

# Obnovljivi izvori energije

## Solarni toplovodni i fotonaponski sustavi

Autor:

**prof. dr. sc. Damir Dović**

Voditelj projekta:

**Danijel Đekić**



[www.esf.hr](http://www.esf.hr)



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.

## Sadržaj

PREDGOVOR.....	4
<b>1. Obnovljivi izvori energije .....</b>	<b>5</b>
1.1. Princip obnovljivosti energije.....	5
1.2. Karakteristike obnovljive energije.....	8
1.3. Iskorištavanje obnovljive energije.....	9
1.4. Sunčeva energija .....	11
1.5. Biomasa .....	13
<b>2. Sunčevo zračenje .....</b>	<b>15</b>
2.1. Karakteristike.....	15
2.2. Zračenje na plohe različite orijentacije i nagiba.....	16
2.3. Optimalni kut i orijentacija kolektora.....	17
<b>3. Kolektori sunčevog zračenja .....</b>	<b>19</b>
3.1. Pločasti kolektori – vrste i karakteristike .....	20
3.2. Toplinska učinkovitost kolektora .....	23
3.3. Utjecaj strujanja radnog fluida na učinkovitost kolektora.....	25
3.4. Raspodjela strujanja u kolektorima.....	26
3.5. Vakuumski kolektori – vrste i karakteristike.....	27
3.6. Neostakljeni apsorberi.....	30
3.7. Polimerni kolektori.....	31
3.8. Solarni zagrijači zraka.....	31
3.9. Koncentrirajući kolektori.....	32
<b>4. Solarni toplovodni sustavi .....</b>	<b>33</b>
4.1. Vrste i karakteristike.....	33
4.1.1. Sustavi za pripremu PTV-a.....	33
4.1.2. Sustavi za grijanje prostora .....	38
4.1.3. Sustavi za grijanje bazena .....	39
4.2. Regulacija.....	40
4.3. Dijelovi i oprema solarnih sustava.....	41
4.4. Montaža kolektora.....	42
4.5. Ispitivanja solarnih kolektora i sustava .....	43
<b>5. Proračun solarnih sustava .....</b>	<b>48</b>
5.1. Metode proračuna.....	48
5.2. Rezultati simulacije.....	51

5.3. Ekonomska analiza .....	52
5.4. Određivanje površine kolektora i zapremine spremnika .....	53
<b>6. Mjere za povećanje učinkovitosti solarnih toplovodnih sustava .....</b>	<b>55</b>
<b>7. Fotonaponske ćelije i sustavi .....</b>	<b>57</b>
7.1. Princip rada i karakteristike fotonaponske ćelije .....	57
7.2. Vrste fotonaponskih ćelija .....	60
7.3. Fotonaponski sustavi.....	62
7.4. Proračuni fotonaponskih sustava .....	65
7.4.1. Postupak.....	65
7.4.2. Primjer proračuna .....	68
PRILOG.....	69
Literatura.....	71
Kazalo slika.....	72
Kazalo tablica .....	74
Popis ključnih pojmova.....	75
Impressum.....	76

## PREDGOVOR

Zadnjih se nekoliko desetljeća ističe važnost zamjene fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije, slijedom sve izraženijih klimatskih promjena te iscrpljivanja fosilnih goriva i s time povezanim rastom cijena energije. Ipak, tek se zadnjih nekoliko godina u dijelovima svijeta s najrazvijenijom sviješću o potrebi smanjivanja emisija stakleničkih plinova, uvela i zakonska obaveza korištenja obnovljivih izvora energije. To se uglavnom odnosi na Europsku uniju, koja je, primjerice, radi ostvarenja dugoročnih planova o potpunoj dekarbonizaciji energetskeg sektora do 2050. g., uvela obavezu gradnje zgrada gotovo nulte energije (nZEB) nakon 2020.g.

Naime, nZEB zgrade, osim malih energetskeg potreba, moraju imati udio obnovljive energije u ukupnoj potrošnji u rasponu 25% do 50%, ovisno o zemlji članici. Štoviše, u postupku donošenja su propisi kojima se uvodi obaveza gradnje zgrada nulte emisije (ZEB) nakon 2027.g., a koje ne smiju proizvoditi nikakve emisije iz fosilnih goriva na lokaciji zgrade te većinu energetskeg potreba moraju pokrivati iz obnovljivih izvora. Tome treba dodati i najavljenju obavezu instaliranja solarnih toplinskih i/ili fotonaponskih sustava na sve nove zgrade i one koje se obnavljaju.

Time dizalice topline, solarni toplinski sustavi, fotonaponski sustavi (PV) i uređaji na biomasu, te visokoučinkoviti sustavi daljinskog grijanja, postaju jedno od tehnološko-ekonomski najprihvatljivijih rješenja za zadovoljavanje navedenih zakonskih uvjeta o korištenju obnovljivih izvora za potrebe grijanja prostora i potrošne tople vode.

Dakako, u praksi se pokazalo da su mnogi sustavi u zgradama niske potrošnje energije pogrešno koncipirani, dimenzionirani i/ili izvedeni.

Iz tih razloga postoji velika potreba za dodatnom izobrazbom svih postojećih i budućih sudionika u primjeni obnovljivih tehnologija u praksi, bilo da se radi o projektantima, konstruktorima ili instalaterima tehničkih sustava i uređaja.

Ovaj priručnik je primarno namijenjen nastavnicima i učenicima strukovnih škola sa specijaliziranim programima za primjenu solarnih tehnologija. Priručnik je komplementaran s teorijskim, laboratorijskim i praktičnim vježbama za rad s modelima solarnih toplovodnih i fotonaponskih sustava, pripremljenim za istu svrhu i u sklopu istog projekta kao i ovaj priručnik. Priručnik je također sastavni dio nastavnih materijala za predmet *Energetska učinkovitost i certifikacija zgrada*, koji je pripremljen u sklopu istog projekta kao i ovaj priručnik, kroz koji se učenici osposobljavaju za primjenu mjera smanjivanja potrošnje energije u zgradama, te se u tu svrhu upoznaju s načinima korištenja obnovljivih izvora energije.

Nakon uvodnih poglavlja, u kojima se opisuju osnovne karakteristike obnovljive energije i sunčevog zračenja, dan je pregled solarnih toplovodnih i fotonaponskih sustava te pripadajućih uređaja. Dan je i kratak pregled uređaja na biomasu, s obzirom na to da još nije napisan zaseban priručnik za te uređaje koji se dobro nadopunjuju sa solarnim i fotonaponskim sustavima. Posebna pažnja je posvećena praktičnim aspektima koncipiranja, dimenzioniranja i korištenja tih sustava i uređaja, kako bi se osigurala njihova najveća energetska učinkovitost i funkcionalnost tijekom njihovog radnog vijeka.

# 1. Obnovljivi izvori energije

## 1.1. Princip obnovljivosti energije

Sunčevo zračenje je najveći obnovljivi izvor energije na Zemlji. Dozračena sunčeva energija se pretvara u druge oblike obnovljive energije (slika 1.) koje se u današnje vrijeme iskorištavaju u većoj ili manjoj mjeri, poput:

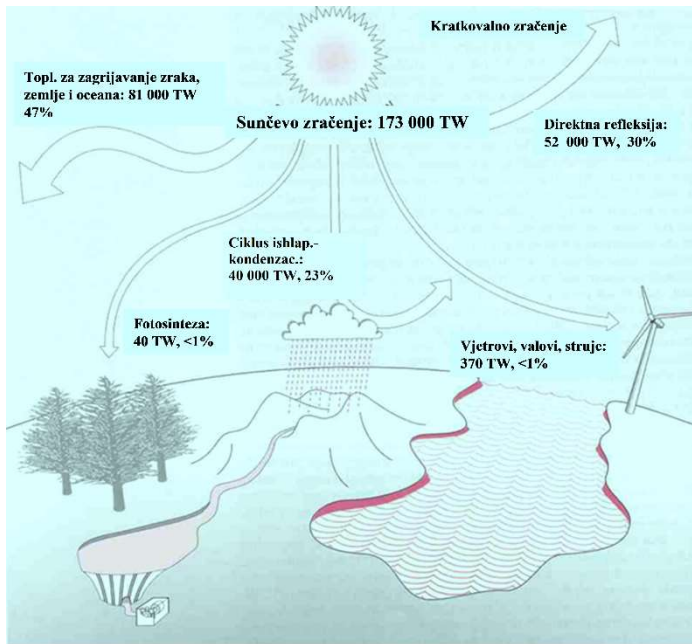
- hidroenergije,
- biomase,
- energije vjetra,
- energije valova,
- energije morskih struja,
- toplinske energije oceana.

Od ostalih oblika iskoristive obnovljive energije, a koji nemaju izvor u sunčevom zračenju, valja istaknuti:

- geotermalnu energiju,
- energiju plime i oseke.

Geotermalna energija ima izvor u kemijskim i nuklearnim reakcijama u slojevima duboko ispod zemljine površine te u toplinskom kapacitetu rastaljene zemljine jezgre.

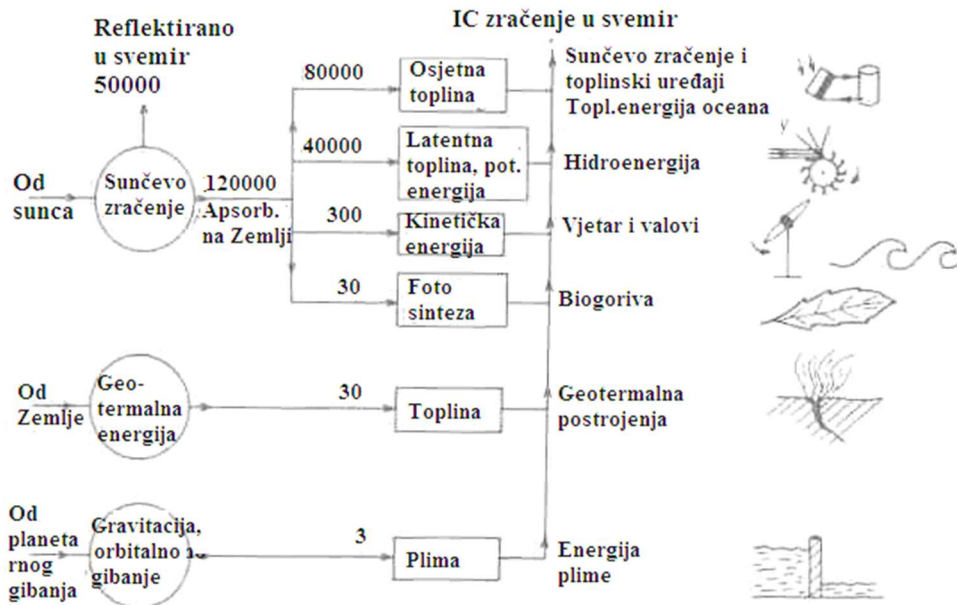
Energija plime i oseke ima izvor u orbitalnom gibanju i gravitacijskim silama između Zemlje, Mjeseca i Sunca.



Slika 1. Energija sunčevog zračenja pretvorena u različite oblike obnovljivih energija na Zemlji [2]

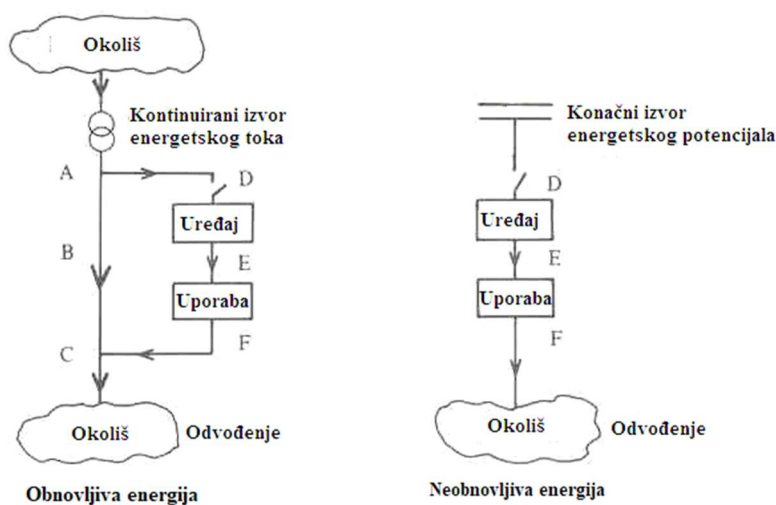
Na slikama 1. i 2. dan je prikaz pretvorbe energije sunčevog zračenja u ostale oblike obnovljive energije. Do granice atmosfere se dozrači 173 000 TW sunčeve energije, od čega se u atmosferi, tlu i vodama apsorbira 120 000 TW. Za usporedbu, svjetske potrebe za primarnom energijom imaju ekvivalent od 18 TW (2022. g.). Iako ukupna apsorbirana sunčeva energija znatno nadmašuje svjetske energetske potrebe, nije ju tehnički jednostavno iskoristiti, zbog činjenice da je ta energija dozračena na veliku površinu, što ima za posljedicu relativno malu vrijednost gustoće energetskega toka  $<1 \text{ kW/m}^2$ . Za usporedbu, izgaranjem fosilnih goriva u, primjerice, toplovodnim kotlovima, postižu se gustoće energetskega toka  $>50 \text{ kW/m}^2$ .

Apsorbirano sunčevog zračenje se pretvara u osjetnu i latentnu toplinu, odnosno troši se na zagrijavanje zemljine površine, oceana i atmosfere te na ishlapljivanje vode. Vrlo mali dio ( $<1\%$ ) iskoristi se za rast biljaka kroz proces fotosinteze, te za pokretanje vjetrova, valova i morskih struja. koji svi primarno nastaju uslijed različitog zagrijavanja pojedinih dijelova Zemlje. Najveći dio sunčevog zračenja pretvara se u osjetnu toplinu te stoga najveći potencijal ima direktno korištenje sunčevog zračenja u npr. solarnim toplovodnim kolektorima ili posredno korištenje u vidu hidroenergije te toplinske energije akumulirane u oceanima i tlu. Posljednje dvije vrste obnovljive energije imaju znatno veću gustoću energetskega toka u odnosu na navedeno direktno iskorištavanje, no različitu razinu raširenosti primjene. Prema tome, mogućnost iskorištenja potencijala pojedine obnovljive energije ovisi ponajviše o njezinim karakteristikama, ali i o dosegnutoj tehnološkoj razini uređaja i sustava koji je koriste.



Slika 2. Prirodni tok obnovljive energije na Zemlji (jedinica 1 TW), [3]

Princip obnovljivosti energije prikazan je na slici 3. Obnovljiva energija ima kontinuirani tok kroz okoliš, pri čemu se samo skreće iz tog toka prilikom korištenja i ponovo vraća u okoliš (npr. nakon zagrijavanja vode toplovodnim solarnim kolektorima se sva tako prikupljena sunčeva energija hlađenjem te iste vode opet vraća u okoliš). Pri takvom korištenju nema dodatnog prirasta energije u okolišu. S druge strane, kod izgaranja fosilnih goriva, u okoliš se u kratkom vremenu oslobađa energija koja se akumulirala milijunima godina. Pri tome je dodatni prirast energije u okolišu jednak upravo energiji oslobođenoj iz goriva.



Slika 3. Tok obnovljive i energije iz fosilnih goriva kroz okoliš [3]

## 1.2. Karakteristike obnovljive energije

Kako je već prethodno navedeno, važna razlika između obnovljive energije i energije iz fosilnih goriva je u znatno nižoj vrijednosti gustoće energetskega toka obnovljive energije pri prvotnoj pretvorbi u oblik energije koji će biti prikladan za korisnika. To ima za posljedicu znatno veće površine potrebne za instalaciju uređaja za iskorištavanje obnovljive energije jednake vršne snage. Ipak, u slučajevima gdje postoji mogućnost akumulacije obnovljive energije, kao kod, primjerice, biomase i hidroenergije, mogu se postići vrijednosti gustoće energetskega toka koje su usporedive s onima kod uređaja na fosilna goriva. Kako bi se donekle kompenzirao navedeni problem nižih gustoća energetskega toka, preporuča se pretvorbu obnovljive energije u oblik prikladan za korisnika obaviti na lokalnoj razini, kroz npr. instaliranje solarnih kolektora i fotonaponskih panela na samoj lokaciji zgrade. Na taj se način izbjegava potreba za osiguravanjem velikih površina na kojima bi se mogli instalirati solarni toplinski i fotonaponski sustavi, a koja često nisu dostupna, posebice u urbanim područjima. Ovdje ipak treba napomenuti da je specifični trošak (EUR/kWh) proizvedene energije kod velikih centraliziranih sustava koji koriste sunčevu energiju, znatno niži nego onaj kod lokalno instaliranih sustava.

Drugo važno svojstvo obnovljive energije je njezina nepredvidivost i varijacija gustoće energetskega toka u vremenu, što dovodi do neusklađenosti s energetskega potrebama korisnika. To nameće potrebu za akumulacijom viškova prikupljene obnovljive energije te za osiguranjem dodatnog izvora energije uz korištenje složene regulacije.

Promjenjiva prostorna raspoloživost obnovljive energije iziskuje često dugogodišnje praćenje meteoroloških parametara odabrane lokacije (npr. sunčevog zračenja) kako bi se dobili pouzdani podatci za dimenzioniranje sustava za iskorištavanje. Danas su na raspolaganju mnoge baze s podacima o sunčevom zračenju za bilo koje mjesto na Zemlji, pri čemu se radi o podacima prikupljenim satelitima i/ili sa zemaljskih meteoroloških postaja (npr. europski PVGIS [4]). Pri tome se kod dimenzioniranja sve više provode dinamičke simulacije rada sustava na satnoj razini, kako bi se dobio što bolji uvid u ponašanje sustava tijekom rada. S obzirom na znatno više cijene sustava koji koriste obnovljive izvore, u odnosu na one konvencionalne na fosilna goriva, za odabir konačnog rješenja često je potrebno provesti tehnološko – ekonomsku optimizaciju, posebice kod većih sustava.

Prosječna efikasnost pretvorbe obnovljive u korisnu energiju je oko 40-50% kod solarnih toplovodnih kolektora, 10-15% kod fotonaponskih ćelija, 70-80% kod toplovodnih kotlova na biomasu.

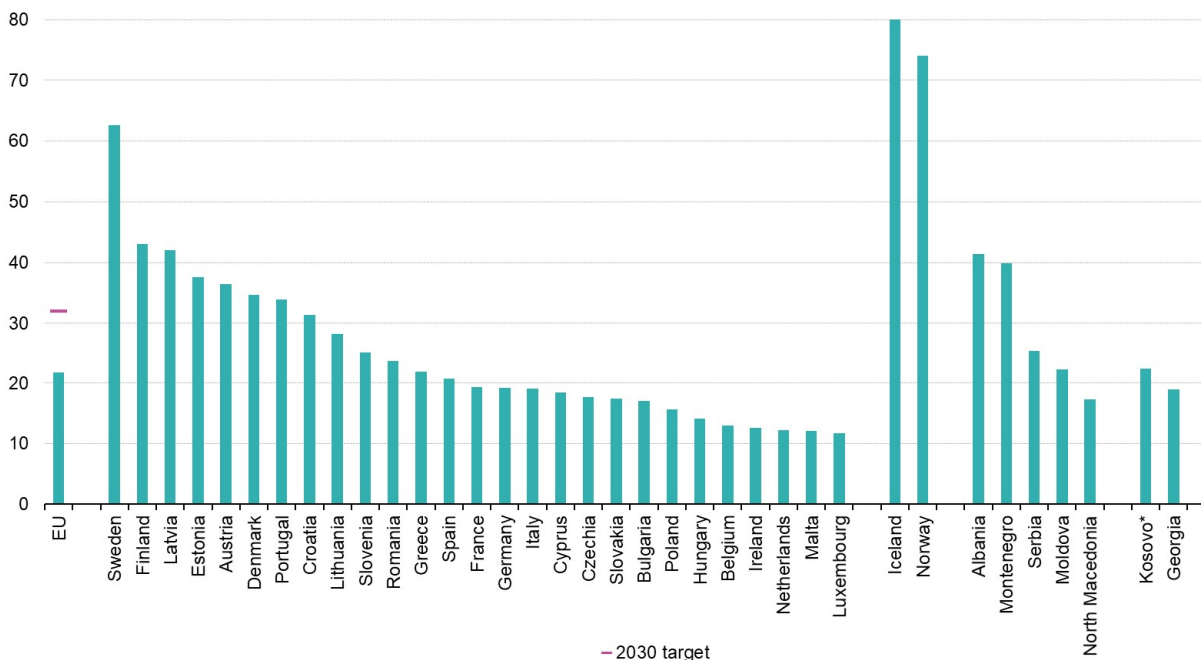
Zbog svega navedenog, iskorištavanje obnovljive energije zahtijeva visoku razinu izobrazbe i iskustva inženjera, konstruktora i instalatera tehničkih uređaja i sustava.



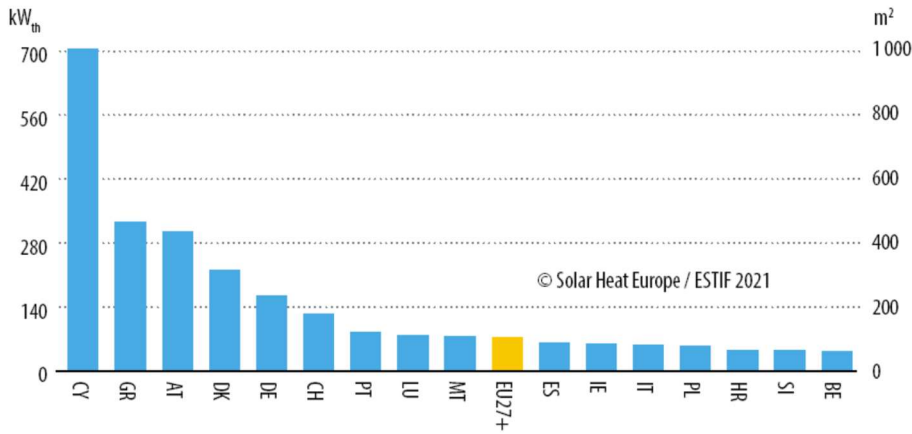
### 1.3. Iskorištavanje obnovljive energije

Na slici 4. su prikazani udjeli obnovljivih izvora energije (OIE) u potrošnji energije u pojedinim zemljama EU. 2021. g. udio obnovljive energije u finalnoj potrošnji energije na razini cijele EU iznosio je 21,8%, dok je, primjerice, 2004. g. taj udio bio 9,6%. Prema tome, u tom su periodu ostvareni zadani ciljevi od 20% udjela OIE do 2020. g., nakon kojih su postavljeni novi ciljevi od 40% udjela OIE do 2030.g. (te 100% do 2050. g.).

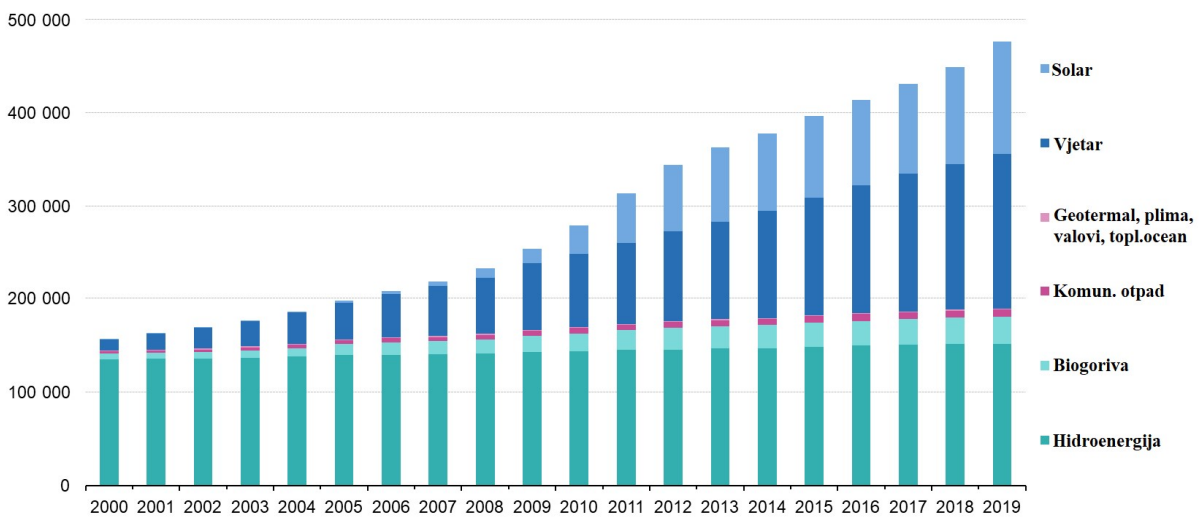
U Hrvatskoj je porast korištenja obnovljive energije u navedenom razdoblju bio znatno skromniji (od 23,4% u 2004.g. do 31% u 2021.g.), prvenstveno stoga jer većina obnovljive energije otpada na hidroenergiju, čije se iskorištavanje putem velikih hidroelektrana nije bitno povećalo, a istovremeno ostali obnovljivi izvori nisu bili dovoljno poticani, kao u nekim drugim zemljama EU. Iz tih razloga ukupno instalirana površina solarnih kolektora u Hrvatskoj iznosi oko 70 m<sup>2</sup> na 1000 stanovnika (slika 5.), što je ispod prosjeka EU koji iznosi oko 100 m<sup>2</sup> na 1000 stanovnika (slika 5.). To je višestruko manja instalirana površina na 1000 stanovnika nego npr. u Austriji (slika 5.), unatoč gotovo dvostruko većoj godišnjoj sunčevoj ozračenosti (insolaciji) u primorskoj Hrvatskoj. Ipak, sukladno navedenim trendovima porasta korištenja OIE u EU i onima sa slike 6., zadnjih nekoliko godina se i u Hrvatskoj primjećuje intenzivniji rast godišnje instaliranih kapaciteta sustava koji koriste OIE, uključivo i sunčevu energiju, pri čemu najveće priraste imaju biomasa, vjetar i PV sustavi (slika 7.).



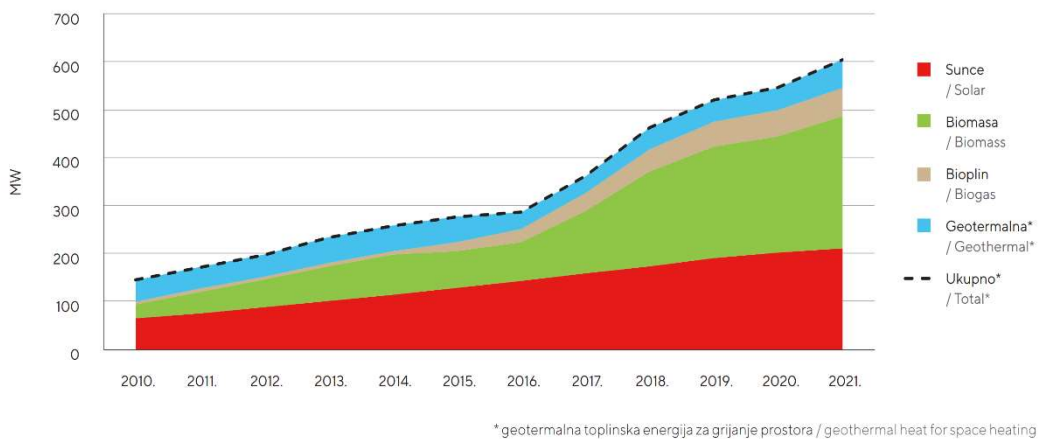
Slika 4. Udjeli obnovljive energije u ukupnoj finalnoj potrošnji energije u EU i drugim zemljama 2021.g. [5]



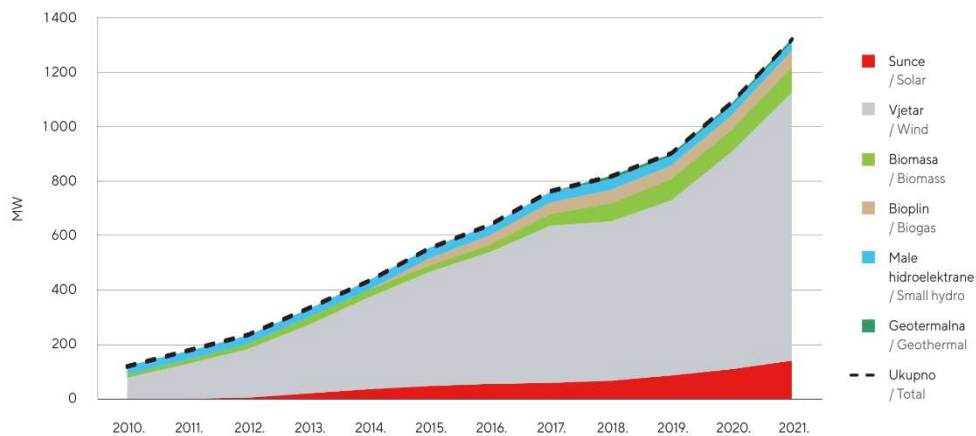
Slika 5. Instalirani toplinski učin solarnih kolektora (na 1000 stanovnika) u EU 2021. g. [6]



Slika 6. Porast instalirane snage [MW] sustava za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i obnovljivog komunalnog otpada u EU 2000.-2019. g. [5]



a)

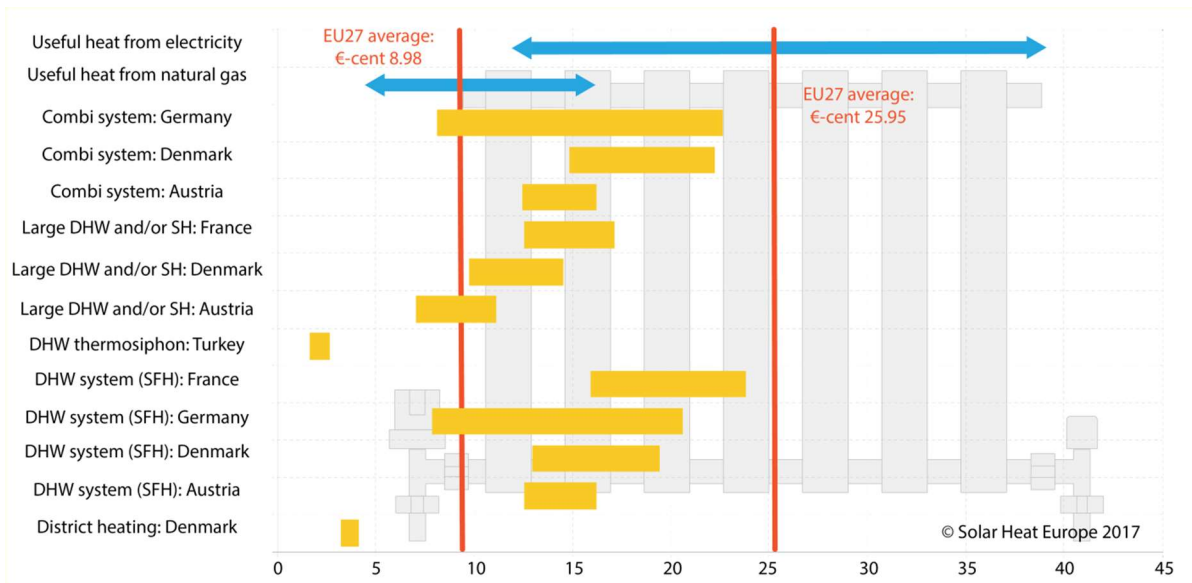


b)

Slika 7. Porast instaliranih kapaciteta sustava koji koriste OIE u Republici Hrvatskoj u periodu od 2010.g. do 2021. g. za proizvodnju a) toplinske i b) električne energije [7]

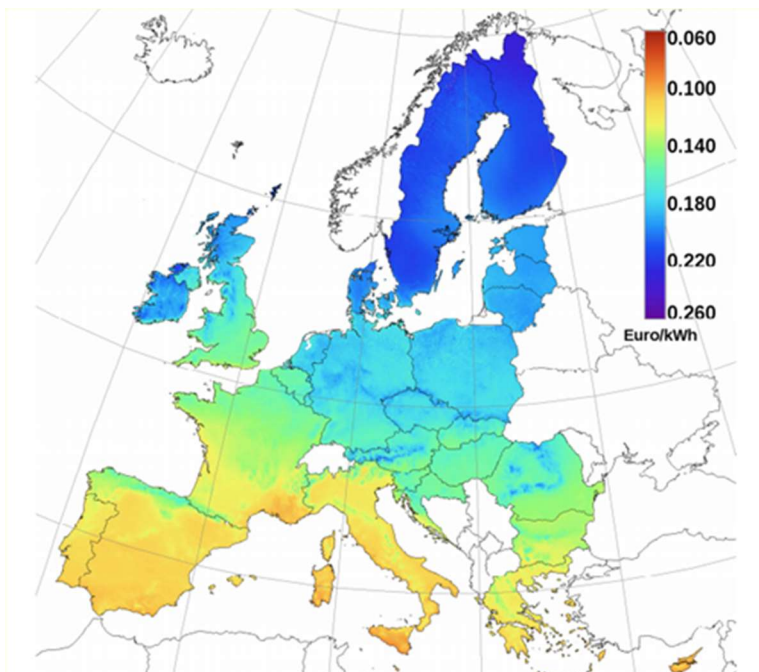
## 1.4. Sunčeva energija

Iskorištavanje sunčeve energije se može podijeliti na direktno i pasivno. Kod direktnog iskorištavanja koriste se solarni toplinski kolektori za zagrijavanje vode i zraka u svrhu pripreme potrošne tople vode (PTV) i grijanja prostora, koncentrirajući toplinski kolektori za posrednu proizvodnju električne energije te fotonaponske ćelije za direktnu pretvorbu sunčeve u električnu energiju. Također, toplinski kolektori se koriste za potrebe hlađenja u sklopu sorpcijskih sustava. Kod pasivnog iskorištavanja sunčeve energije, umjesto solarnih kolektora koriste se građevni elementi za propuštanje, apsorpciju i akumulaciju sunčevog zračenja u zgradi za potrebe grijanja prostora. Kako je već ranije navedeno, zbog relativno male vrijednosti gustoće energetske toka sunčevog zračenja ( $<1 \text{ kW/m}^2$ ), solarni toplinski sustavi, kao i oni fotonaponski, u praksi se uglavnom koriste za lokalnu opskrbu energijom, primjerice, obiteljskih kuća, višestambenih zgrada, hotela, autokampova. Solarne elektrane (npr. fotonaponske ili one s koncentrirajućim kolektorima) kao centralizirani sustavi iziskuju znatno veće investicijske troškove, ali imaju nižu cijenu po jedinici proizvedene energije, promatrano unutar njihovog radnog vijeka. Kako je vidljivo iz slika 8. i 9. trošak energije proizvedene u lokalno instaliranim solarnim toplovodnim sustavima nekoliko je puta veći od troška velikih centraliziranih sustava daljinskog solarnog grijanja. Također, trošak energije iz lokalnih solarnih toplovodnih sustava blizak je razini troškova proizvodnje energije iz fotonaponskih sustava, što je, uz jednostavniju ugradnju i održavanje, razlog što je zadnjih godina znatno veći rast kapaciteta godišnje instaliranih fotonaponskih sustava u odnosu na one toplinske. Nazivne (vršne) snage sustava za direktno iskorištavanje sunčeve energije se kreću od najmanje 1 kW kod sustava s toplovodnim kolektorima ili najmanje 50 W kod fotonaponskih sustava, pa sve do nekoliko MW kod solarnih elektrana s paraboličnim kolektorima ili fotonaponskim ćelijama.



DHW (domestic hot water) – potrošna topla voda  
 SH (solar heating) – solarno grijanje prostora  
 SFH (single family house) – jedno-obiteljska kuća

Slika 8. Prosječni trošak toplinske energije (LCOH) tijekom radnog vijeka solarnih toplinskih sustava (€/ct/kWh) 2017. g.– usporedba s konvencionalnim sustavima [6]



Slika 9. Trošak električne energije iz fotonaponskih sustava [5]

## 1.5. Biomasa

Biomasa je organski materijal nastao tijekom procesa fotosinteze, odnosno spajanja CO<sub>2</sub> i vode pod djelovanjem fotona iz sunčevog zračenja, pri čemu nastaju ugljikohidrati, kisik i voda. Kao takva, zapravo predstavlja akumuliranu energiju sunčevog zračenja. U reverzibilnoj reakciji spajanja s kisikom tijekom izgaranja i prirodnih metaboličkih procesa (npr. raspadanja, fermentacije..) oslobađa se toplinska energija u iznosu od 16 MJ/kg (suhe tvari) te CO<sub>2</sub> i voda. U takvom teoretski zatvorenom ciklusu neto prirast CO<sub>2</sub> jednak je nuli. U prirodi načelno postoji ravnoteža između količine CO<sub>2</sub> iz atmosfere, apsorbirane kroz rast biljaka, i količine CO<sub>2</sub> oslobođene kroz procese njihova raspadanja (kao i kroz respiratorne procese živih bića koji se hrane tim biljkama i dr.). Ukoliko se spaljivanje biomase uskladi s rastom novih biljaka, ona se može smatrati obnovljivim izvorom, bez dodatnih emisija CO<sub>2</sub> u okoliš. U praksi je, dakako, intenzitet korištenja biomase znatno veći od njenog rasta, tako da i korištenje biomase kao goriva trenutno doprinosi povećanju koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi. Tomu još treba dodati emisije drugih štetnih tvari poput NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> spojeva (plinovitog organskog ugljika, engl. OGC), čestica prašine...

Najčešće vrste biomase koje se danas koriste su cijepano drvo, drvni ostaci, peleti, brzorastuće biljke, poljoprivredne kulture (šećerna trska, riža, uljana repica, kukuruz, žetveni ostatci, slama), životinjski ostatci, komunalni i industrijski otpad i dr.

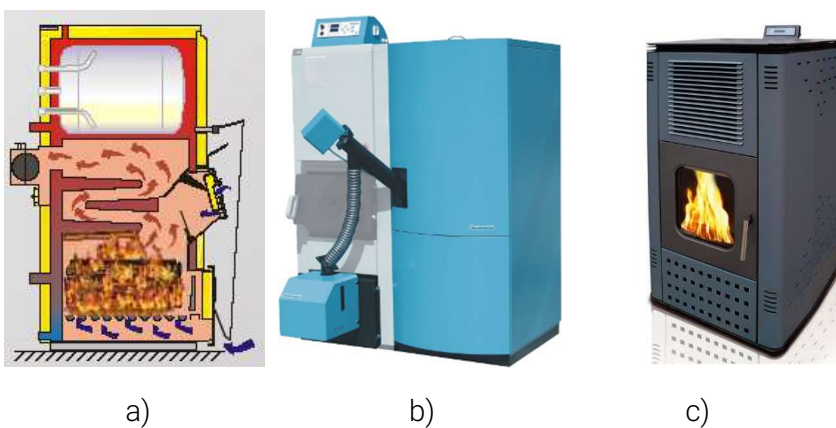
Kroz razne postupke prerade biomase dobivaju se sljedeća biogoriva:

- drveni ugljen (donja ogrjevna vrijednost 30 MJ/kg) dobiven procesom pirolize (zagrijavanje biomase u potpunosti bez prisutnosti zraka ili djelomično izgaranje)
- plinska goriva (mješavine H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>) poput npr. drvnog plina (donja ogrjevna vrijednost 5-10 MJ/kg) dobivena kroz proces pirolize ili rasplinjavanja (reakcija biomase s vrućom vodenom parom i zrakom)
- sintetski plin (mješavina H<sub>2</sub> i CO) koji nastaje procesom rasplinjavanja (korištenjem kisika umjesto zraka) a iz kojeg se dalje može sintetizirati gorivo visoke ogrjevne vrijednosti poput metana (donja ogrjevna vrijednost 55 MJ/kg) ili metanola koji je najprikladnija zamjena za benzin
- etanol - dobiva se kroz anaerobne procese fermentacije biomase sa značajnim udjelom ugljikohidrata (poput šećerne trske ili ostataka nakon obrade-melase, kukuruza, krumpira)
- bioplin (mješavina metana i CO<sub>2</sub>) koji se dobiva procesom anaerobne digestije (uz djelovanje bakterija) iz životinjskog otpada (gnojiva) ili komunalnog i industrijskog otpada
- biljna ulja poput biodizela (donja ogrjevna vrijednost 38 MJ/kg – za usporedbu dizel ima oko 42 MJ/kg, benzin 46 MJ/kg ) ili kokosovog ulja dobivena mehaničkim postupcima iz uljane repice, suncokreta ili kokosa

Danas se biomasa najviše koristi za dobivanje toplinske energije direktnim izgaranjem u pećima, kaminima, kotlovima (slika 10.) za potrebe kuhanja, grijanja prostora i vode, za tehnološke procese,

za pogon plinske turbine produktima izgaranja kod proizvodnje električne energije. Najveći problem pri takvom korištenju predstavlja vlaga koja se nalazi u gorivu (maseni udio obično >20%) i snižava njegovu donju ogrjevnu vrijednost sa 16 MJ/kg suhe tvari na ispod 14 MJ/kg ukupne (vlažne) mase. Osim smanjenja ogrjevne moći, vlažna goriva s više od 18-20% vlage dovode do lošijeg izgaranja u ložištima odnosno niže učinkovitosti, veće koncentracije štetnih plinova (CO, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, prašine) u dimnim plinovima te do taloženja smola na stjenkama ložišta i dimnjaka. Učinkovitosti kod izgaranja biomase se kreću od 70% u standardnim pećima na drvene cjepanice i brikete, do visokih (90-93)% u kotlovima na pelete ili u pirolitičkim kotlovima. Nominalne snage uređaja za izgaranje biomase se kreću od 5 kW kod peći i kamina, do 2 MW kod toplovodnih kotlova ili do 10 MW kod jedinica s višestupanjskim izgaranjem za tretman komunalnog otpada i proizvodnju topline za daljinsko grijanje. Cijena toplinske energije iz ogrjevnog drveta je niža čak i od one iz zemnog plina, a značajno je povoljnija od cijene energije iz lož ulja ili električne energije. Za svakodnevnu uporabu prikladniji peleti (radi izbjegavanja potrebe za čestim ručnim loženjem) imaju višu cijenu od ogrjevnog drveta i zadnjih godina od plina i lož ulja, ali još uvijek nižu od direktnog korištenja el. energije (bez dizalice topline) te, s obzirom na efikasnost i čistoću izgaranja, predstavljaju odličan izbor za kućanstva i veće objekte. Cijena toplinske energije iz briketa se nalazi negdje između one za komadno drvo i pelete. Korištenje briketa često omogućuje u istim uređajima postizanje manjih emisija onečišćujućih tvari od ogrjevnog drveta (pogotovo onog s masenim udjelom vlage >20%).

Biomasa se smatra jednim od najznačajnijih obnovljivih izvora energije za ostvarivanja ciljeva EU o dekarbonizaciji energetskog sektora do 2050. g. No, zbog značajnih emisija onečišćujućih tvari, u tehničku regulativu EU se uvode zahtjevi za velikim smanjivanjem emisija iz novoinstaliranih uređaja na biomasu (npr. ugradnjom filtera, katalizatora, konstrukcijskim rješenjima ložišta i dr.) te obaveza kombiniranja tih uređaja s nekim drugim uređajima koji isto koriste obnovljive izvore (npr. solarnim kolektorima) uz plansku sadnju brzorastućih biljaka i prikladnih poljoprivrednih kultura. Važeće europske norme u Republici Hrvatskoj, kojima su određene karakteristike i ispitivanja uređaja koji koriste biomasu, su HRN EN 303-5 (kotlovi), serija EN 16510 (štednjaci i peći, kamini, grijalice prostora) i dr. gdje su, između ostalog, dane minimalne toplinske učinkovitosti te granične vrijednosti emisija štetnih plinova poput CO, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> i čestica prašine.



Slika 10. Uređaji za izgaranje biomase – kotao na: a) ogrjevno drvo, b) pelete, c) peći (grijalice prostora)



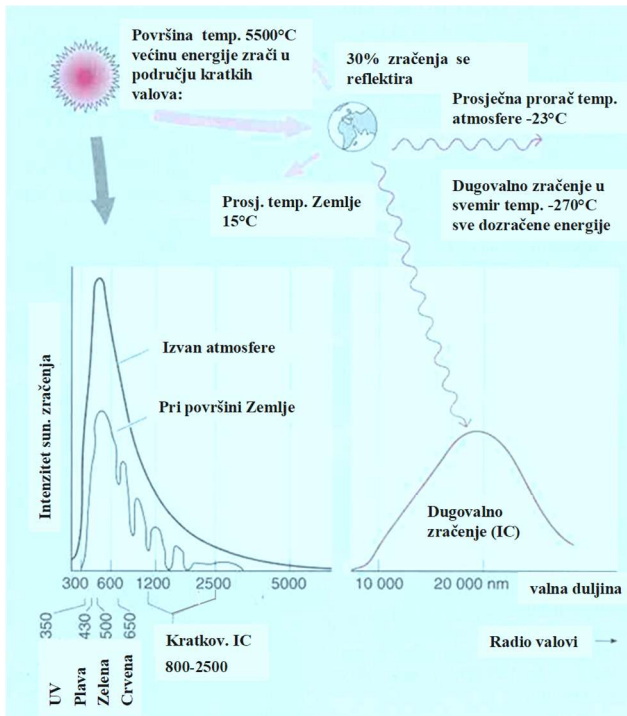
## 2. Sunčevo zračenje

### 2.1. Karakteristike

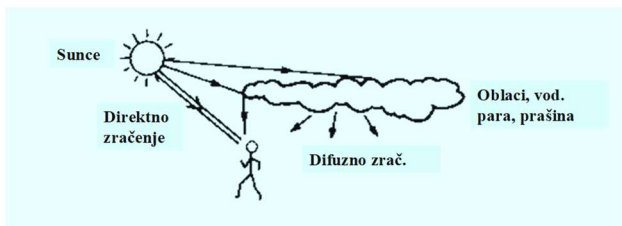
Reakcijama nuklearne fuzije u središtu Sunca oslobađa se golema energija od oko  $380000 \cdot 10^9$  TW. Pri tome prosječna temperatura u središtu Sunca iznosi  $\sim 10^7$  K a na površini  $\sim 5777$  K ( $\sim 5500$  °C). Sunce Zemlji putem elektromagnetskih valova dozrači  $173\,000$  TW od čega se na Zemlji apsorbira  $\sim 120\,000$  TW. Spektralna raspodjela intenziteta zračenja po valnim duljinama (Planckov zakon raspodjele) oblikom je vrlo slična onoj crnog tijela temperature  $5777$  K, (slika 11.). Zbog tako visoke temperature najveći dio sunčeve energije se prenese tzv. kratkovalnim zračenjem u rasponu valnih duljina  $\lambda = 20 \div 2500$  nm ( $0.02 \div 2.5$   $\mu\text{m}$ ) i to u: UV (6.4%), vidljivom (48%) i kratkovalnom infracrvenom području (42.4%). Ostatak ( $\sim 3.2\%$ ) se dozrači u infracrvenom području valnih duljina  $\lambda = 2500 \div 8000$  nm ( $2.5 \div 8$   $\mu\text{m}$ ). Energija sunčevog zračenja, koja se apsorbirala u tlu, morima i atmosferi, vraća se u svemir tzv. dugovalnim zračenjem u području valnih duljina  $\lambda = 5\,000 \div 30\,000$  nm ( $5 \div 30$   $\mu\text{m}$ ) jer se emitira na znatno nižim temperaturama od one na površini Sunca (prosječna proračunska temperatura tla i mora je  $15^\circ\text{C}$  a atmosfere  $-23^\circ\text{C}$ ). Zračenje emitirano s tla i mora se apsorbira u atmosferi (u tzv. stakleničkim plinovima koji su uglavnom nepropusni za dugovalno zračenje:  $\text{CO}_2$ , vodenoj pari, metanu i dr.) te reemitira u svemir. Na taj način zemljina atmosfera djeluje poput staklenika (staklo je isto tako nepropusno za dugovalno zračenje i propusno za kratkovalno sunčevo zračenje). Taj se prirodni 'efekt staklenika' povećava uslijed emisija stakleničkih plinova te dovodi do povećanja temperature svih dijelova Zemlje, odnosno neželjenih klimatskih promjena, posebno izraženih zadnjih nekoliko desetljeća.

Najveća vrijednost sunčevog zračenja koje dolazi na granicu atmosfere ('ekstraterestričko zračenje') je  $1367$   $\text{W}/\text{m}^2$  i naziva se "Sunčevom konstantom". Sunčeva konstanta je gustoća energetske toke sunčevog zračenja (eng. irradiance) na plohu okomitu na smjer sunčevih zraka. Od tog ekstraterestričkog zračenja 30% se odmah reflektira nazad u svemir, većinom od oblaka, a jedan manji dio od zemljine površine (najviše od snijega i leda). Preostali dio zračenja (do  $1000$   $\text{W}/\text{m}^2$ ) se djelomično apsorbira u atmosferi, dok se ostatak apsorbira u tlu i vodama.

Sunčevo zračenje dolazi do površine Zemlje u obliku direktnog i difuznog zračenja. Difuzno zračenje nastaje raspršivanjem dijela direktnog zračenja na oblacima, molekulama zraka (Rayleighovo zračenje), vodenoj pari i prašini (slika 12.).



Slika 11. Intenzitet zračenja prema i sa Zemlje, [2]



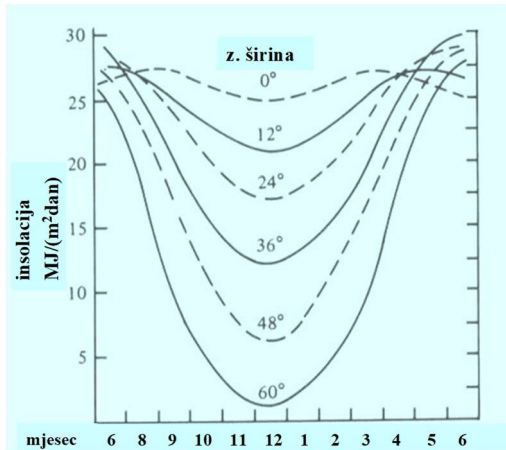
Slika 12. Direktno i difuzno sunčevo zračenje, [3]

## 2.2. Zračenje na plohe različite orijentacije i nagiba

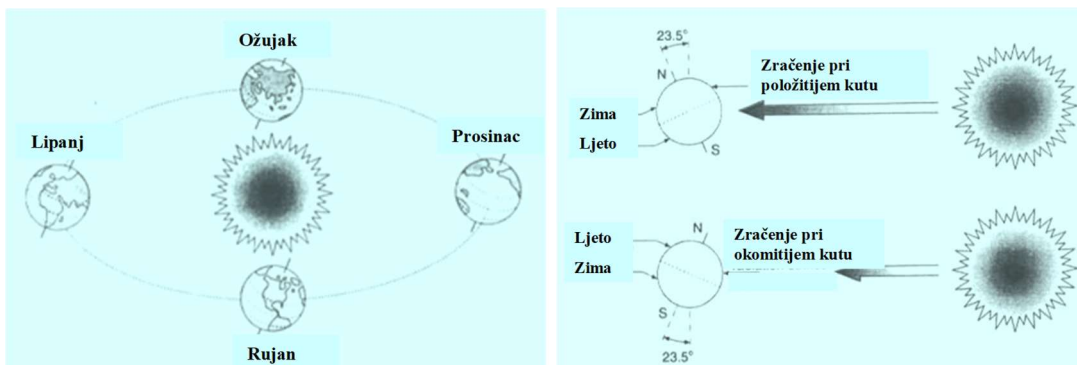
Slika 13. pokazuje varijaciju sunčevog ozračenja na horizontalnu plohu tijekom godine, za različite zemljopisne širine. Ta je varijacija posljedica kretanja Zemlje oko Sunca, pri čemu pojedini dijelovi Zemlje dolaze u različite položaje u odnosu na smjer sunčevih zraka (slika 14.). Tako je u ljetnim mjesecima sjeverna polutka okrenuta 'prema' Suncu, odnosno sunčevo zračenje upada okomitije na zemljinu površinu, što rezultira većim iznosima gustoće energetskog toka sunčevog zračenja u odnosu na zimske mjesece. Tomu treba dodati i dulje dnevno vrijeme ozračenja te kraći put sunčevih zraka kroz atmosferu (to ima utjecaj na količinu raspršenog, reflektiranog i apsorbiranog zračenja), što sve skupa dovodi do viših temperatura na sjevernoj polutki u tom periodu. Suprotno vrijedi za zimske mjesece. Sunčevo ozračenje je u pojedinim zimskim mjesecima i do nekoliko puta manje nego u ljetnim. Godišnje sunčevo ozračenje (insolacija), za područje Zagreba iznosi 1200 kWh/m<sup>2</sup>, a Splita 1600 kWh/m<sup>2</sup>. 75% te energije se dozrači u toplijoj polovici godine, tj. od travnja do listopada.



Opisana varijacija ozračenja predstavlja velik problem kod korištenja solarnih toplinskih sustava, s obzirom da su u zimskim mjesecima potrebe za toplinskom energijom zgrada nekoliko puta veće nego u ljetnim. Stoga je potreban oprez kod dimenzioniranja solarnih toplinskih sustava, kako se, u želji za osiguranjem što veće pokrivenosti energetske potrebe u zimskim mjesecima, ne bi onda javili viškovi prikupljene sunčeve energije u ljetnim mjesecima, a koji mogu blokirati rad solarnog sustava, kako je objašnjeno u Pog. 4.



Slika 13. Godišnja varijacija sunčevog ozračenja (insolacije) horizontalne plohe tijekom vedrog dana, u ovisnosti o zemljopisnoj širini [3]



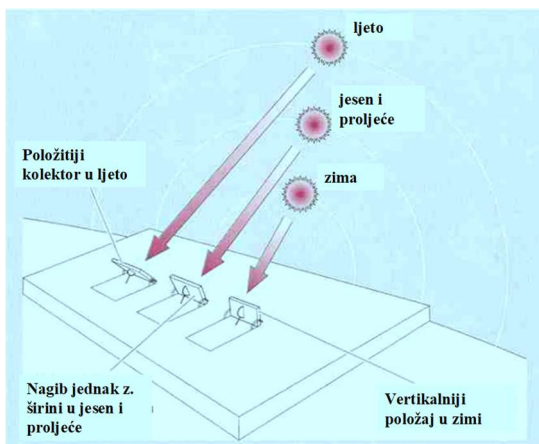
Slika 14. Promjena nagiba Zemljine osi tijekom okretanja oko Sunca [2], [3]

## 2.3. Optimalni kut i orijentacija kolektora

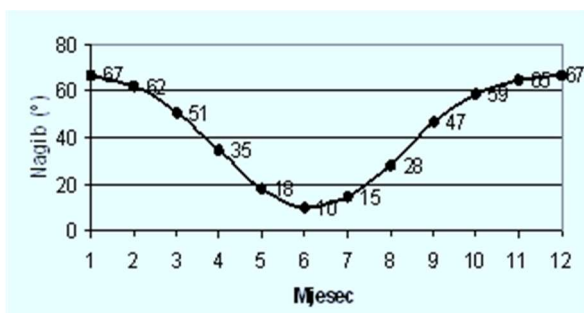
Kako bi se do neke mjere kompenzirale prethodno opisane varijacije sunčevog zračenja, kut nagiba solarnih kolektora prema horizontali se može mijenjati, ovisno o dobu dana i godine za pojedinu zemljopisnu širinu. Pri tome se nastoji postići što okomitiji upad sunčevog zračenja na plohu kolektora u određenom periodu (slika 15.). Najčešće se podešavanje kuta nagiba provodi za pojedine mjesece u godini, tako da se postignu najveće vrijednosti ozračenja za svaki mjesec. Na taj način optimizirani kutovi za područje Zagreba prikazani su na slici 16. Optimalni godišnji nagib

kolektora u Hrvatskoj iznosi  $37^\circ$  te je, kao i obično, blizak prosječnoj zemljopisnoj širini  $\phi=45^\circ$ .

Namještajući nagib kolektora tako da bude optimalan u svakom mjesecu, njegovo ukupno godišnje ozračenje bi, primjerice, u Splitu iznosilo  $1900 \text{ kWh/m}^2$ , dok bi kolektoru montiranom pod  $45^\circ$  bilo dozračeno  $1800 \text{ kWh/m}^2$  tj. 6% manje sunčeve energije. Ta relativno mala razlika je posljedica utjecaja difuzne komponente zračenja koja je manje osjetljiva na promjenu nagiba nego direktna komponenta ukupnog zračenja. Iz tih razloga, te zbog relativno visoke cijene i složenosti sustava koji omogućuju stalnu promjenu nagiba kolektora (i orijentacije u odnosu na strane svijeta), kolektori se često montiraju pod kutom optimiziranim za period najvećeg korištenja solarnog sustava. U slučajevima kada je potrebno prikupiti što više energije u ljetnim mjesecima (npr. tijekom turističke sezone u apartmanima i hotelima) tada je optimalni kut  $(10-20)^\circ$ . S druge strane, u kontinentalnom dijelu Hrvatske je tijekom ljetnih mjeseci obično potrebno manje toplinske energije nego u ostatku godine, tako da, ovisno o ciljanom periodu i namjeni (npr. grijanje prostora), optimalni kut može biti veći i od  $45^\circ$ .



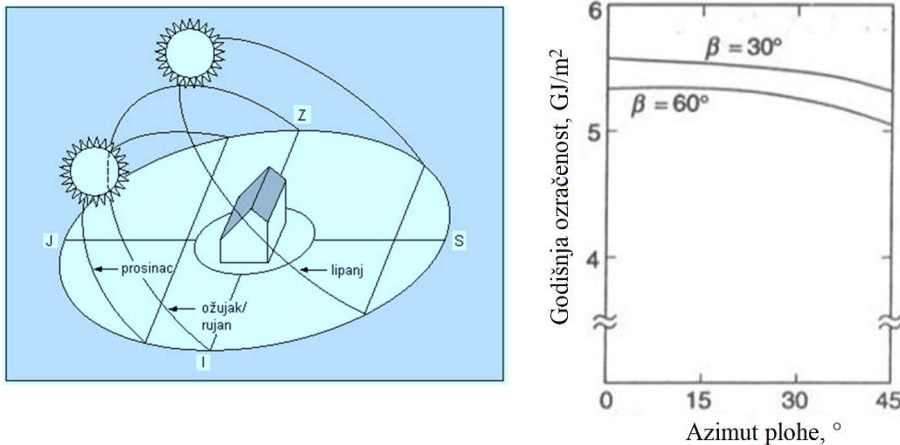
Slika 15. Promjena nagiba kolektora tijekom godišnjih doba radi postizanja najvećih vrijednosti ozračenja [2]



Slika 16. Optimalne vrijednosti kuta nagiba kolektora u pojedinom mjesecu za Zagreb [9]

Kolektore je potrebno, kad god je moguće, postaviti tako da su okrenuti prema jugu. Slika 17.a pokazuje relativnu promjenu položaja Sunca u odnosu na zgradu. U zimskim mjesecima sunčevo zračenje dolazi iz smjera jugoistoka, juga i jugozapada. U ljetnim mjesecima u jutarnjim i poslijepodnevni satima sunčevo zračenje dolazi iz smjera sjeveroistoka i sjeverozapada, a ostatak

dana iz svih ostalih smjerova (osim sjevera). Ukoliko nisu instalirani sustavi za praćenje relativnog kretanja Sunca, najveće vrijednosti ozračenja se u svim periodima godine postižu ako se kolektori orijentiraju prema jugu, jer sunčevo zračenje ima najveće iznose upravo iz toga smjera (u središnjem dijelu dana). Ukoliko se kod montaže odstupi od smjera juga, intenzitet ozračenja počinje bitnije opadati nakon otklona od smjera juga većeg od  $(30-45)^\circ$  (slika 17.b). Slika 17.a isto ukazuje da nije uputno montirati kolektore na vertikalne zidove zgrade (uključivo i južne) s obzirom da će u ljetnim mjesecima jedan period dana biti zasjenjeni, već ih je najbolje montirati na ravne i kose krovove.



a)

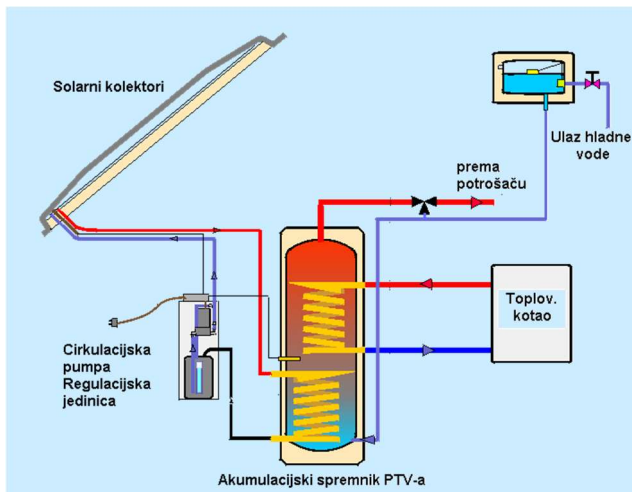
b)

Slika 17. a) Relativno kretanje Sunca promatrano sa Zemlje tijekom pojedinih godišnjih doba, [2], b) utjecaj otklona kolektora od smjera juga na godišnju ozračenost (insolaciju) pri različitim kutovima nagiba prema horizontali  $\beta$  [1]

### 3. Kolektori sunčevog zračenja

Sunčeva energija se danas komercijalno najviše koristi u toplovodnim sunčanim sustavima (slika 18.) i to za pripremu potrošne tople vode (PTV) te u manjem obimu za grijanje prostora i zagrijavanje bazenske vode. U znatno manjem opsegu se za grijanje prostora koriste i solarni toplozračni sustavi. Oni se vrlo rijetko koriste i za zagrijavanje PTV-a, pri čemu služe kao izvor topline za dizalicu topline koja omogućuje postizanje dovoljno visokih temperatura vode. Osnovni dijelovi solarnih sustava za pripremu PTV-a su solarni kolektori, spremnik tople vode, diferencijalna automatika i pomoćni izvor topline (slika 18.). Najvažniji element tih sustava su sunčevi kolektori. U solarnim kolektorima se zagrijava radni medij, koji potom preko izmjenjivača topline predaje prikupljenu sunčevu energiju vodi u spremniku. Diferencijalna automatika uključuje i isključuje pumpu u cirkulacijskoj petlji između kolektora i spremnika, ovisno o tome je li temperatura na izlazu radnog medija iz kolektora veća ili manja od one u spremniku (neposredno iznad izmjenjivača topline). U gornjem dijelu spremnika nalazi se izmjenjivač pomoćnog izvora topline (npr. kotla) preko kojega se voda u spremniku dogrijava na željenu temperaturu (npr.  $45-50^\circ\text{C}$ ) u periodima nedostatne sunčeve ozračenosti ili povećane potrošnje vode u odnosu na toplinski učin kolektora/izmjenjivača. Topla voda se odvodi iz gornjeg dijela spremnika prema izljevnom mjestu (nakon otvaranja slavine), dok se u donji dio

spremnika dovodi ista masa hladne vode, potiskujući toplu vodu.

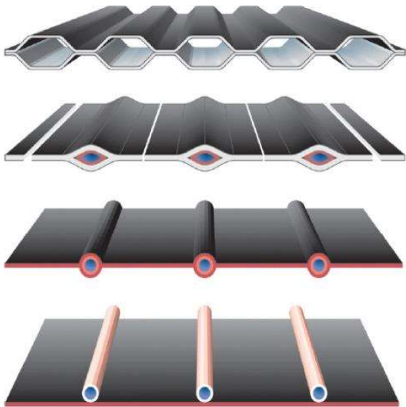


Slika 18. Solarni toplovodni sustav za pripremu PTV-a s pločastim kolektorima

### 3.1. Pločasti kolektori – vrste i karakteristike

Danas se u solarnim toplovodnim sustavima najviše koriste pločasti kolektori, a onda vakuumski. Razne izvedbe pločastih kolektora prikazane su na slici 19. Najčešće se koriste izvedbe s cijevima pričvršćenim za apsorbersku ploču, budući da su se sve druge prikazane izvedbe pokazale složenije/skuplje za izradu, a postižu manju toplinsku učinkovitost u radu.

Kolektori se također razlikuju i prema izvedbi cijevnih registara, odnosno broju prolaza radnog fluida kroz kolektor (slika 20.). Pri tome veći broj prolaza fluida znači i manji ukupni protok kroz kolektor, veći prirast temperature te posljedično i najmanju učinkovitost, kako će kasnije biti objašnjeno. Stoga se izvedbe kolektora s većim brojem prolaza koriste u klimatskim područjima s nižom insolacijom i temperaturama (npr. srednja, zapadna i sjeverna Europa) i/ili kada je u zimskim mjesecima potrebno osigurati dovoljno visoke temperature za rad sustava grijanja prostora i pripreme PTV-a. U svim ostalim situacijama, tj. za naše klimatsko područje (posebice u priobalju) te optimalno dimenzionirane sustave (bez viškova prikupljene sunčeve energije u ljetnim mjesecima), uputno je koristiti izvedbe s manjim brojem prolaza, radi veće toplinske učinkovitosti. Tome još treba dodati i manji pad tlaka, odnosno manju potrošnju električne energije za cirkulacijsku pumpu.

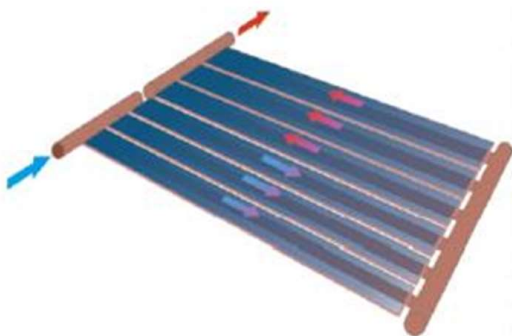


Slika 19. Različite izvedbe pločastih kolektora (odozgo prema dolje): aluminijski valoviti apsorberi, aluminij s utisnutim bakrenim cijevima, cijevi stisnute između dviju ploča, cijevi zalemljene/zavarene na apsorbersku ploču [8]



a)

b)



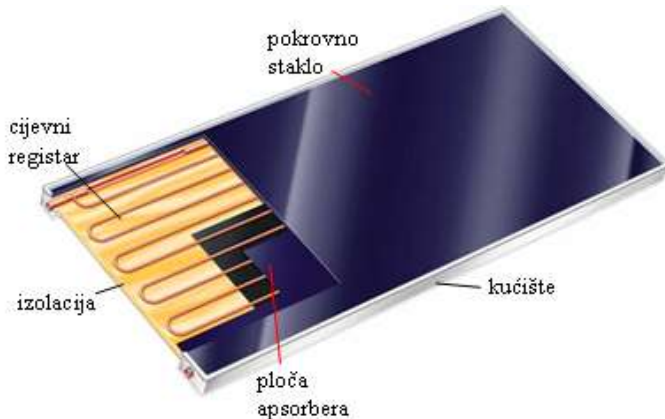
c)

Slika 20. Razni tipovi cijevnih registara pločastih kolektora:

a) Cijevi u obliku serpentine (najmanji protok fluida, najveći broj prolaza, najveći prirast temperature), b) Cijevi u obliku ljestvi-paralelni spoj (najveći protok fluida, jedan prolaz, najmanji prirast temperature), c) Cijevi u obliku ljestvi i serpentine (srednji protok fluida, dva prolaza, srednji prirast temperature) [8]

Pločasti kolektori su prvi put patentirani u Kaliforniji 1909. godine, a masovnija proizvodnja bilježi se tijekom naftne krize 70-tih godina prošlog stoljeća. Od tada su kolektori znatno unaprijeđeni, što se posebice odnosi na njihovu toplinsku učinkovitost, zahvaljujući razvoju novih premaza apsorbera i novih tehnologija pričvršćivanja cijevi za ploču apsorbera (točkasto lemljenje, lasersko ili ultrazvučno zavarivanje).

Na slici 21. su prikazani osnovni dijelovi tipičnog pločastog kolektora.



Slika 21. Pločasti kolektor s pokrovnim staklom [9]

Osnovni dijelovi su apsorberska ploča s pričvršćenim cijevnim registrom, pokrovno staklo, izolacija i kućište. Sunčevo zračenje se apsorbira u premazu apsorberske ploče i pretvara u toplinu. Toplina se provodi kroz materijal apsorberske ploče prema cijevnom registru i tamo predaje radnom fluidu. Dio tako prikupljene topline se gubi s apsorbera prema okolišu mehanizmom slobodne konvekcije i zračenja u međuprostoru između apsorbera i stakla, te sa stakla prema okolišu mehanizmom prisilne konvekcije (vjetar) i zračenje (slika 22.).

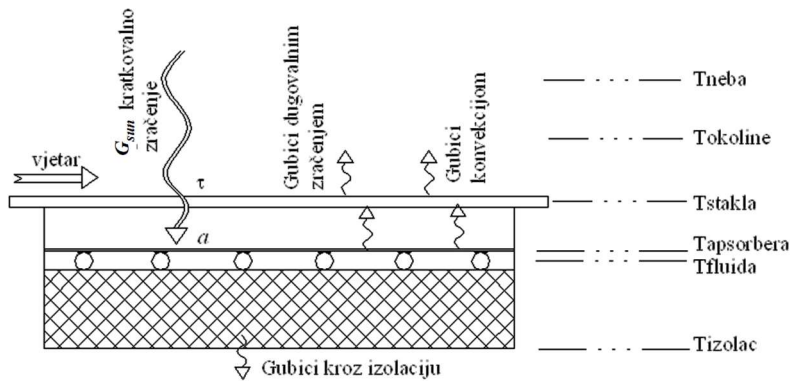
Za premaze apsorberske ploče danas se najčešće koriste selektivni premazi koji imaju visok faktor apsorpcije za kratkovalno sunčevo zračenje ( $a = 0,9-0,96$ ) i nizak faktor apsorpcije tj. emisije ( $a = \varepsilon = 0,06 \div 0,2$ ) za dugovalno IC zračenje. Ekvivalentno, kao i u slučaju atmosfere, faktor propusnosti pokrovnog stakla za kratkovalno sunčevo zračenje je visok ( $\tau = 0,9 \div 0,95$ ) a za dugovalno vrlo nizak ( $\tau < 0,02$ ) ('efekt staklenika').

Jeftiniji kolektori koji se nalaze na tržištu obično imaju  $a=0,9$  i  $\varepsilon=0,2$ , a oni skuplji  $a=0,96$  i  $\varepsilon=0,06$ . S druge strane, primjerice, obična crna boja, kakvom se još uvijek ponekad premazuju jeftiniji kolektori ili spremnici tople vode na krovovima zgrada, ima jednak faktor apsorpcije i emisije pri svim valnim duljinama zračenja ( $a = \varepsilon = 0,9-0,95$ ), što uzrokuje velike toplinske gubitke zračenjem s apsorbera, i velikim dijelom poništava efekt dobre apsorpcije sunčevog zračenja. Prema tome, selektivna svojstva premaza su bitna za ostvarivanje visoke učinkovitosti kolektora, jer omogućavaju dobru apsorpciju sunčevog zračenja i istovremeno smanjenje toplinskih gubitaka dugovalnim zračenjem od zagrijane ploče apsorbera.

Kako bi se dodatno smanjili toplinski gubitci, kolektor je izoliran sa stražnje i bočne strane (mineralna

vuna, poliuretanska pjena debljine 30-50 mm), tako da toplinski gubici kroz izolaciju na kraju iznose oko 5% ukupnih gubitaka topline kolektora.

Cijevni registri tipa "ljestve" (slika 20.) sastoje se od niza cijevi promjera 6÷12 mm, paralelno napajanih iz distribucijskih cijevi većeg promjera (12÷18 mm). Današnji je trend korištenje cijevi manjeg promjera zbog bolje izmjene topline s cijevi na fluid, posljedično i veće učinkovitosti kolektora i nižih troškova proizvodnje.



Slika 22. Osnovni mehanizmi izmjene topline u pločastom kolektoru [9]

## 3.2. Toplinska učinkovitost kolektora

Kako bi se mogle uspoređivati toplinske karakteristike pojedinih kolektora te izračunati prikupljena energija u promatranom periodu, uvedena je veličina koja se naziva toplinska učinkovitost kolektora. Podatke o toplinskoj učinkovitosti proizvođači kolektora daju u sklopu izvješća o ispitivanju kolektora obavljenom od strane akreditiranog laboratorija, obično na traženje projektanta (ali rijetko se nalaze u katalozima). Toplinska učinkovitost kolektora  $\eta_{kol}$  definirana je kao omjer korisnog toplinskog toka predanog radnom fluidu  $P_{kol}$  [W] i upadnog sunčevog zračenja  $G_{sun}$  [W/m<sup>2</sup>] na plohu kolektora (npr. pokrovno staklo, apsorbersku ploču) površine  $A_{kol}$  [m<sup>2</sup>]

$$\eta_{kol} = \frac{P_{kol}}{G_{sun} \cdot A_{kol}} \quad [-] \quad (3.1)$$

Učinkovitost se najčešće određuje eksperimentalno, mjerenjem toplinskog toka predanog fluidu, tj. ulazne i izlazne temperature fluida te njegovog masenog protoka  $\dot{m}$

$$P_{kol} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{f,iz} - \vartheta_{f,ul}) \quad [W] \quad (3.2)$$



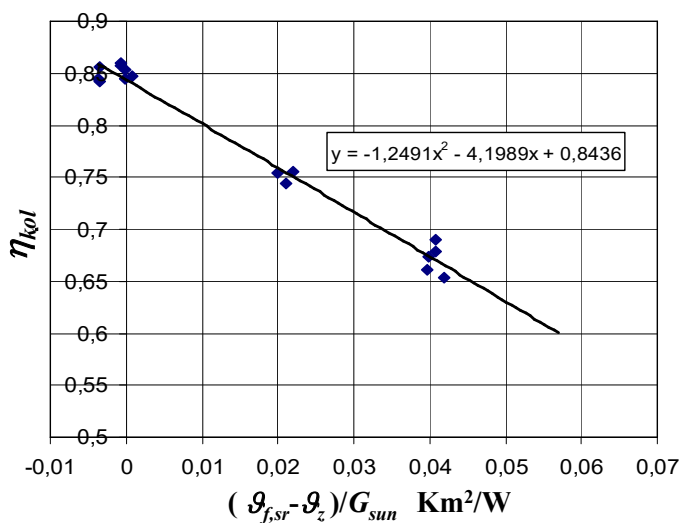
Da bi se odredila učinkovitost, potrebno je izmjeriti i ukupno sunčevo zračenje  $G_{sun}$  za što se koristi piranometar. Piranometar mjeri razliku temperature apsorberske pločice izložene sunčevom zračenju i temperature okoline, koja ovisi o upadnom sunčevom zračenju. Učinkovitost se mijenja u ovisnosti o srednjoj temperaturi fluida  $\vartheta_{f, sr}$ , temperaturi okoline  $\vartheta_z$  te sunčevom zračenju  $G_{sun}$ . Ta se ovisnost najčešće iskazuje kao polinom drugog stupnja (koji je parametarska funkcija  $G_{sun}$ )

$$\eta_{kol} = \eta_o - a_1 \frac{(\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z)}{G_{sun}} - a_2 G_{sun} \left[ \frac{(\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z)}{G_{sun}} \right]^2 \quad [-] \quad (3.3)$$

$$\vartheta_{sr} = \frac{\vartheta_{ul} + \vartheta_{iz}}{2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.4)$$

Koeficijenti polinoma  $\eta_o$ ,  $a_1$  i  $a_2$  određuju se regresijskom analizom eksperimentalnih podataka koji se mogu prikazati u dijagramima, poput onoga na slici 23., u funkciji tzv. reducirane temperaturne razlike  $(\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z)/G_{sun}$  za određenu vrijednost  $G_{sun}$  (npr.  $G_{sun}=800 \text{ W/m}^2$ ) ili u sličnom dijagramu, ali s temperaturnom razlikom  $\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z$  na apscisi.

Kod izračuna učinkovitosti koristi se površina apsorbera ili od nje veća površina upada svjetlosti (engl. aperture), pa kod usporedbe podataka za različite kolektore treba pripaziti na koju su površinu one svedene (kod veće površine učinkovitost računski ispada manja).



Slika 23. Mjerene vrijednosti učinkovitosti pločastog kolektora i regresijski polinom, [9]

Razlika temperatura  $\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z$  predstavlja potencijal za izmjenu topline između radnog medija i okoline, odnosno posredno apsorbera (i drugih dijelova) i okoline. Što je ta razlika veća, veći su i toplinski gubitci kolektora, odnosno manja je njegova učinkovitost, i obrnuto.

Prema tome, radnu temperaturu fluida u kolektoru je poželjno držati što nižom, a da se pri tome još uvijek mogu postići željene temperature vode u spremniku (max.  $50 \div 55^\circ\text{C}$ ).

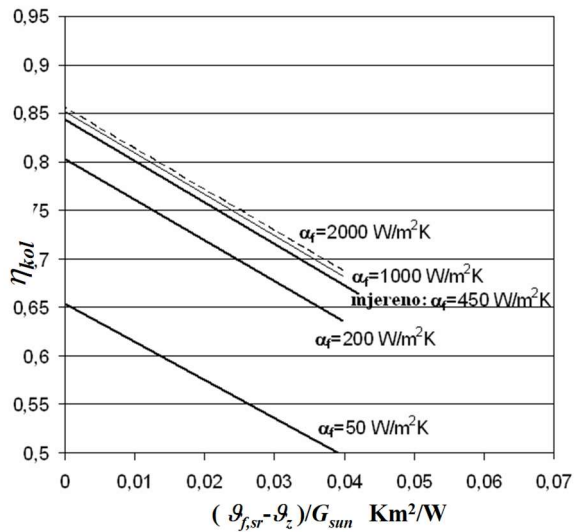
Do povećanja toplinskih gubitaka na okolinu dolazi i kod snižavanja temperature okolišnog zraka, a



pri konstantnim ostalim parametrima rada. Također, smanjenje sunčevog zračenja pri istoj temperaturnoj razlici  $\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z$  isto će dovesti do smanjenja učinkovitosti, s obzirom da su toplinski gubici isti, a dozračena energija niža. Prema tome, u zimskim će mjesecima, kada je sunčevo zračenje manje a temperatura zraka niža, pri istim temperaturama radnog medija učinkovitost kolektora biti znatno manja. Korištenje krivulje učinkovitosti za određivanje toplinskog učin tijekom godine opisano je u Poglavlju 5.

### 3.3. Utjecaj strujanja radnog fluida na učinkovitost kolektora

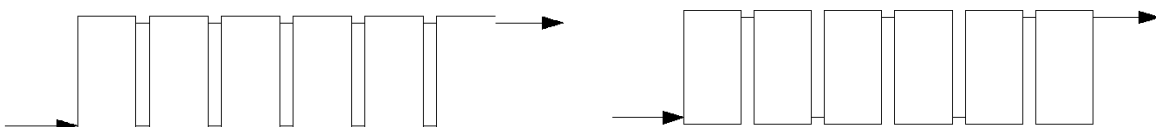
Utjecaj protoka radnog fluida kroz kolektor na njegovu učinkovitost prikazan je u dijagramu na Slici 24. Krivulje efikasnosti izračunate su za različite vrijednosti protoka, odnosno koeficijenta prijelaza topline u cijevi  $\alpha_f$  te uspoređene s izmjerenim vrijednostima pri normiranom ispitnom protoku od  $70 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$  površine apsorbera, što odgovara  $\alpha_f = 450 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kako se vidi iz tog dijagrama, povećanje protoka nema značajniji utjecaj na efikasnost kolektora kada vrijednost prijeđe  $70 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$  ( $\alpha_f = 450 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). U praksi, radni protoci fluida su  $35 \div 50 \text{ kg/h}$  po  $\text{m}^2$  apsorbera., što odgovara  $\alpha_f = 300 \div 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Stoga, povećanje protoka iznad navedenih vrijednosti nema smisla. Dapače, to vodi do nepotrebnog povećanja pogonskih troškova za rad cirkulacijske pumpe, jer pad tlaka raste s kvadratom brzine strujanja fluida, a snaga pumpe s trećom potencijom (tj. 2× veći protok uzrokuje 4× veći pad tlaka i 8× veću snagu pumpe). S druge strane, treba pripaziti da se protok ne smanji na  $25 \div 30 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$  ( $\alpha_f < 200 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), jer toplinski otpor prijelazu topline od stjenke cijevi prema fluidu počinje osjetnije utjecati na ukupni otpor izmjene topline od apsorbera do fluida. Tada dolazi do značajnijeg smanjenja učinkovitosti kolektora. Uzroci za takve male vrijednosti protoka leže u nepravilnom dimenzioniranju cirkulacijskih pumpi, padu tlaka fluida u sustavu ili nepotpunom odzračivanju. Indikacija premalog protoka može biti prirast temperature na kolektoru veći od  $15^\circ\text{C}$  (vidljiv u regulacijskoj jedinici kroz razliku temperatura u spremniku i na izlazu iz kolektora). Slično, kod prevelikog protoka prirast temperature je manji od  $5^\circ\text{C}$ . Idealne vrijednosti prirasta temperature su od  $7$  do  $10^\circ\text{C}$ .



Slika 24. Utjecaj protoka radnog medija tj.  $\alpha_f$  na efikasnost kolektora, temeljeno na CFD simulacijama [10]

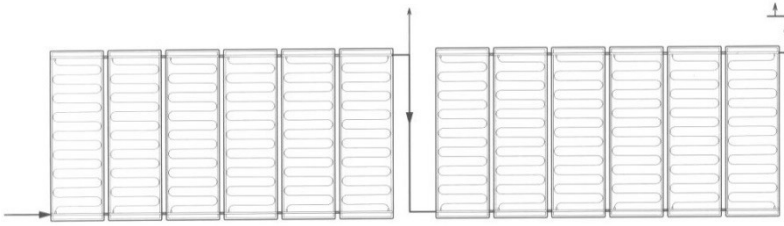
### 3.4. Raspodjela strujanja u kolektorima

Kolektori se spajaju u grupe serijski ili paralelno ( Slika 25.) Također je moguće kombinirati ta dva načina. Svaki od takvih načina spajanja ima svoje prednosti i mane. Paralelni spoj je bolji zbog manjeg pada tlaka, jer fluid prolazi manji ukupni put kroz kolektor, no, to zahtijeva veći broj i veće promjere razdjelnih cijevi, zbog većih protočnih količina radnog fluida u njima. Kao i u slučaju kolektora s paralelnim cijevnim registrom (tip 'ljestve'), i ovdje je prirast temperature manji, a toplinska učinkovitost veća. Što se tiče serijskog spoja, iako je ukupni protok kroz spoj manji, ukupni pad tlaka je znatno veći, jer isti fluid prolazi kroz svaki kolektor u spoju. S druge strane, kao i kod kolektora s cijevnim registrom u obliku serpentine, sve to omogućuje postizanje većeg prirasta temperature od ulaza do izlaza iz spoja, što povlači i nižu učinkovitost nego kod paralelnog spoja s istim brojem kolektora. Kao što je već ranije objašnjeno za kolektor sa serpentinom, serijski spoj je ponekad neizbježan u hladnijim klimama. Prednost serijskog spoja je u tome što nema problema s nejednolikom distribucijom radnog fluida kroz pojedine kolektore u spoju. To se inače događa kod većeg broja paralelno spojenih kolektora, pri čemu kolektori u sredini spoja imaju najmanji protok. Da bi se to izbjeglo, preporuča se da broj kolektora u paralelnom spoju ne bude veći od 5 ili 6, iako proizvođači često preporučuju maksimalno 8-10 kolektora u spoju. Kod serijskog spoja broj kolektora ovisi o željenom padu tlaka, odnosno snazi cirkulacijske pumpe.



a)

b)



c)

Slika 25. a) paralelni i b) serijski spoj kolektora; c) kombinacija paralelnog i serijskog spoja kolektora sa serpentinom [9]

### 3.5. Vakuumski kolektori – vrste i karakteristike

Vakuumski kolektori su danas, poslije pločastih, najviše korišten tip kolektora (slika 26.). Za razliku od pločastih kolektora, u međuprostoru između apsorbera i stakla nema zraka, pa nema toplinskih gubitaka uslijed slobodne konvekcije s apsorbera. Postoje samo toplinski gubici zbog zračenja s apsorbera na staklo (koji su kao i kod pločastih kolektora minimizirani korištenjem selektivnih premaza s malim faktorom emisije  $\varepsilon=0,05$ ). Zbog vakuumiranja međuprostora, apsorber se mora smjestiti unutar staklenih cijevi koje zbog svog cilindričnog oblika mogu izdržati razliku tlakova vanjskog i unutarnjeg prostora, za razliku od ravnog pokrovnog stakla kod pločastih kolektora, koje bi napuklo pri bitno manjim iznosima vakuuma.

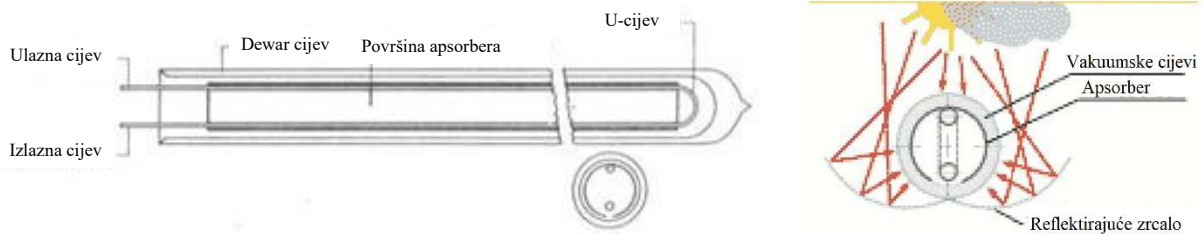
Kod jednog tipa vakuumskih kolektora radni fluid cirkulira kroz registar paralelno spojenih koaksijalnih cijevi, pri čemu je unutrašnja cijev povrat iz sustava, a vanjska cijev polaz (zagrijani fluid), slika 26.a. Ovdje ulogu apsorbera ima vanjska površina koaksijalnih cijevi na koju je nanesen premaz. Reflektirajuća zrcala usmjeravaju sunčevo zračenje na apsorbersku cijev, te mogu biti smještena unutar vakuumске cijevi (slika 26.a) ili izvan nje (26.b). Na slici 26.b prikazan je drugi tip vakuumskog kolektora koji umjesto koaksijalne cijevi ima svinutu apsorbersku ploču i tzv. U-cijev, kod koje kroz jedan ogranak dolazi povratni fluid iz sustava, a kroz drugi polazi zagrijani fluid u sustav.

Kod obiju opisanih konstrukcija apsorberska površina, na koju pada sunčevo zračenje, ovisi o upadnom kutu zračenja, što nije slučaj kod korištenja ravnih apsorberskih ploča (pločasti kolektori, slika 26.c).

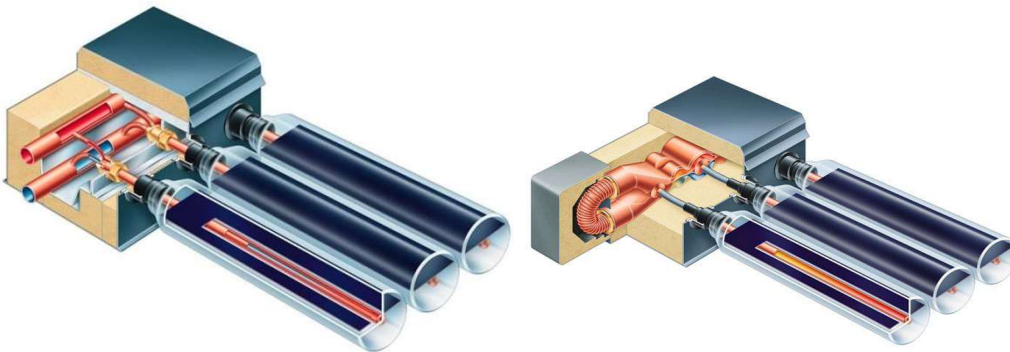
Slika 26.d prikazuje izvedbe s tzv. toplinskim cijevima (engl. heat pipe) kod kojih radni fluid cirkulira kroz istu cijev. U apsorberskom dijelu cijevi radni fluid (freon, alkohol) isparava, dok u gornjem dijelu kolektora dolazi do njegove kondenzacije i povrata kapljevine u donji apsorberski dio. Toplinu kondenzacije preuzima sekundarni fluid koji cirkulira između spremnika i kolektora. Zbog visokih koeficijenata prijelaza topline pri isparavanju i kondenzaciji, ovakvi kolektori imaju nešto veću efikasnost (~5%) od prethodno opisanih s jednofaznim strujanjem. Zbog omogućavanja cirkulacije radnog fluida, kolektori s 'toplinskim cijevima' stoga uvijek trebaju biti montirani pod određenim kutom u odnosu na horizontalu.



a)



b)



c)

d)

Slika 26. a) konstrukcija s apsorberom nanesenim na koncentričnu cijev kroz koju struji fluid (sa i bez reflektirajućih zrcala)

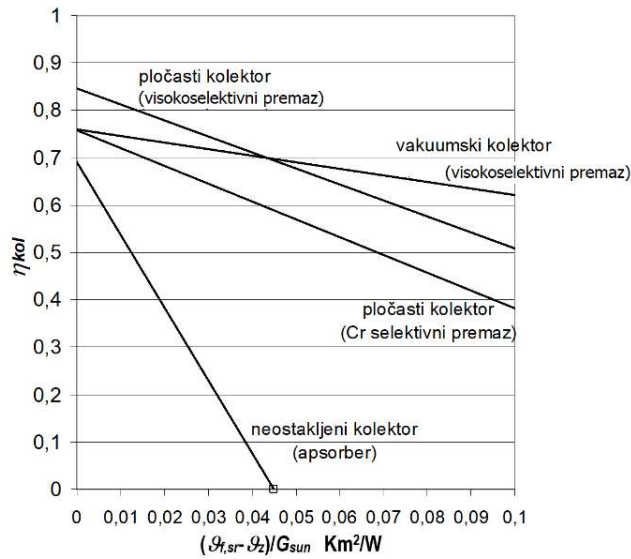
b) konstrukcija s U-cijevi i zakrivljenim apsorberom

c) konstrukcija s koaksijalno postavljenom polaznom i povratnom cijevi i ravnim apsorberom [11]

d) konstrukcija s tzv. toplinskom cijevi (engl. heat pipe) [11]

Zbog odsustva (ili bitnog smanjenja) slobodne konvekcije u međuprostoru između apsorbera i stakla, vakuumski kolektori imaju manje toplinske gubitke u odnosu na pločaste, pri istim uvjetima rada. No, zbog nužnosti korištenja staklenih cijevi manja je korisna površina apsorbera u odnosu na ukupnu površinu kolektora ili površinu upada svjetlosti.

Tako je odnos korisne i ukupne površine oko 0,6 dok je kod pločastih odnos korisne i ukupne površine oko 0,9. Učinkovitost (i cijena) vakuumskih, kao i pločastih kolektora, određuje se prema ukupnoj površini kolektora ili površini upada svjetlosti, koja bolje odražava stvarnu površinu koju kolektor zauzima na krovu, nego površina apsorbera. Kako se učinkovitost vakuumskih kolektora računa prema površini upada svjetlosti, koja je veća od efektivne površine apsorbera, učinkovitost može računski ispasti niža od one kod pločastih kolektora (unatoč manjim toplinskim gubitcima). To je čest slučaj u dijelu radne krivulje koja odgovara ljetnom režimu rada tj. pri  $(\dot{q}_{f, sr} - \dot{q}_z)/G_{sun} = 0 \div 0,05 \text{ Km}^2/\text{W}$ , Slika 27. Drugim riječima, ukoliko se u toplijoj polovici godine želi prikupiti jednaka količina sunčeve energije kao i s pločastim kolektorima, vakuumski kolektori će zauzeti veću površinu na krovu. Obrnuto vrijedi u zimskim mjesecima, pri oblačnom vremenu ili izuzetno visokim temperaturama fluida ( $>70^\circ$ ) tj. pri  $(\dot{q}_{f, sr} - \dot{q}_z)/G_{sun} = 0,05 \div 0,15 \text{ Km}^2/\text{W}$ . Tada do većeg izražaja dolazi smanjenje toplinskih gubitaka u vakuumskim kolektorima u odnosu na pločaste, pa je tako i njihova učinkovitost veća. To ih čini prikladnima za korištenje u hladnijim klimama s nižom sunčevom ozračenosti. Na godišnjoj razini se vakuumskim kolektorima može prikupiti 5-7% više energije nego pločastim jednake površine upada svjetlosti, pri čemu im je cijena često i do 100% viša. Oni se ipak koriste kada je potrebno prikupiti veću količinu sunčeve energije u zimskim mjesecima (npr. za potrebe grijanja prostora), a površina za smještaj kolektora je ograničena. Također, zbog manjih toplinskih gubitaka, vakuumski kolektori omogućuju postizanje većih temperatura na izlazu (max.  $100^\circ\text{C}$ ) nego pločasti (max  $85^\circ\text{C}$ ). To ih čini prikladnima za korištenje u, primjerice, solarnim rashladnim sustavima. Nedostatak vakuumskih kolektora je mogućnost napuknuća stakla zbog dilatacija izazvanih temperaturnim promjenama, pri čemu dolazi do gubitka vakuuma i značajnog pada učinkovitosti. Zbog toga ih je potrebno pažljivo montirati i pratiti promjenu boje na unutrašnjoj strani stakla, jer to upućuje na mogući prodor zraka u vakuumirani prostor (zbog kemijske reakcije plina iz cijevi i zraka).



Slika 27. Toplinska učinkovitost različitih tipova kolektora [9]

### 3.6. Neostakljeni apsorberi

Neostakljeni se apsorberi (slika 28.) sastoje samo od registra plastičnih ili gumenih cijevi otpornih na UV zračenje, bez kućišta i pokrovnog stakla. Stoga su toplinski gubici bitno veći nego kod pločastih i vakuumskih kolektora, pa se ovaj tip kolektora koristi samo za niskotemperaturne primjene ( $24\text{-}32^\circ\text{C}$ ), poput zagrijavanja bazena ili tople vode u ljetnim mjesecima. S druge strane, cijenom su znatno povoljniji od ostalih tipova i jednostavniji za montažu. Dodatni je nedostatak, pored niže učinkovitosti, degradacija materijala uslijed djelovanja UV zračenja.



Slika 28. Neostakljeni apsorberi, [12]



### 3.7. Polimerni kolektori

U današnje se vrijeme na tržištu sve više pojavljuju polimerni kolektori za grijanje i pripremu PTV-a. Isto kao i apsorberi, polimerni kolektori imaju nižu cijenu u odnosu na pločaste i vakuumske kolektore, zbog jeftinijih materijala i jednostavnijeg proizvodnog procesa (npr. ekstruzija materijala ili 3D print). S druge strane polimerni materijali imaju lošija mehanička, toplinska i optička svojstva, što uzrokuje deformaciju, odnosno degradaciju materijala koja se javlja pri nižim vrijednostima temperatura (<130°C) nego kod metalnih izvedbi (koji mogu izdržati i do 220°C kad nema protoka fluida-tzv. temperatura stagnacije), kao i niže vrijednosti toplinske učinkovitosti (30-50%). Polimerni kolektori su se do sada uglavnom koristili kao neostakljeni apsorberi te u sklopu termosifonskih sustava. Kako bi se polimerni kolektori mogli koristiti kao alternativa metalnim trebaju izdržati visoke tlakove (do 10 bar) i temperature (do 180°C). Kako bi se postigle bolje performanse materijala, stalno se ispituju novi materijali i izvedbe (npr. PMMA, akril, polikarbonat (PC), polyphenylene sulphide (PPS)). Za kućišta se mogu koristiti kompozitni materijali (drvo/plastika, fiberglas, polikarbonat), slika 29. Kako bi polimerni kolektori u skorije vrijeme ušli u širu primjenu, i nižom cijenom povećali konkurentnost solarnih toplovodnih sustava, potrebno je intenzivirati istraživanja i razvoj polimernih kolektora, i to u smjeru pronalaska novih materijala, podizanja toplinske učinkovitosti te zaštite od pregrijavanja kada nema cirkulacije fluida.



Slika 29. Primjeri polimernih kolektora za pripremu PTV-a [12]

### 3.8. Solarni zagrijači zraka

Solarni zagrijači zraka (slika 30.) služe za direktno zagrijavanje zraka koji se potom dobavlja u prostor. Solarni toplozračni sustavi imaju nekoliko prednosti u odnosu na solarne toplovodne sustave - nema problema sa zamrzavanjem i pregrijavanjem radnog fluida, mogu biti proizvedeni od lakih materijala jer nema zahtjeva za izdržavanjem visokih tlakova, kao što je slučaj kod kolektora s vodom (6-10 bar), i zbog svega navedenog, cijenom mogu biti puno prihvatljiviji..

S druge strane, solarni zagrijači zraka imaju nižu prosječnu učinkovitost ( $\eta_{kol}=25-35\%$ ) od pločastih i vakuumskih kolektora ( $\eta_{kol}=40-50\%$ ) unatoč nižim temperaturama radnog medija. Nadalje, u toplozračnom sustavu postoje veliki toplinski gubitci zbog propuštanja zagrijanog zraka iz kolektora i zračnih kanala te je potrebna višestruko veća pomoćna energija (ventilator) nego kod toplovodnih

sustava (pumpe). Zračni se kolektori mogu koristiti i za pripremu PTV-a u sustavima gdje postoji dizalica topline koja omogućuje postizanje dovoljno visokih temperatura za zagrijavanje PTV-a (min. 45°C).



Slika 30. Primjeri solarnih zagrijača zraka [12]

### 3.9. Koncentrirajući kolektori

Od ostalih tipova solarnih kolektora treba spomenuti koncentrirajuće kolektore koji prikupljaju sunčevo zračenje na većoj površini i usmjeravaju ga na apsorber znatno manje površine (slika 31.). Zbog znatno viših temperatura (do 500°C-parabolični tipovi i do 1000°C-tanjurasti tipovi) koje se mogu postići na taj način, u odnosu na prethodno opisane tipove kolektora, koncentrirajući kolektori se koriste za proizvodnju električne energije u postrojenjima s parnom turbinom, ili tzv. Stirlingovim strojem za direktnu pretvorbu toplinske u mehaničku energiju. Kao takvi nisu predmet detaljnijeg razmatranja u ovom priručniku.



a)



b)





c)

d)

Slika 31. Koncentrirajući kolektori a) parabolični (za postrojenja s parnom turbinom) i b) linearni Fresnel (za postrojenja s parnom turbinom) c) tanjurasti (sa Stirlingovim strojem) d) parabolični (bolja učinkovitost na povišenim temperaturama od pločastih, PTV, daljinsko grijanje, solarno hlađenje, procesna toplina) [9]

## 4. Solarni toplovodni sustavi

### 4.1. Vrste i karakteristike

#### 4.1.1. Sustavi za pripremu PTV-a

Kako je već ranije navedeno, za direktno iskorištavanje sunčeve energije najčešće se koriste niskotemperaturni ( $40\div 60^{\circ}\text{C}$ ) toplovodni sustavi (slika 18.). Zbog velike razlike sunčevog ozračenja zimi i ljeti, najveći broj instaliranih sustava je namijenjen zagrijavanju potrošne tople vode (PTV), a znatno manji broj se koristi i za grijanje prostora. Taj se omjer danas mijenja, zbog bolje toplinske zaštite zgrada, pri čemu u nekim slučajevima potrebe za grijanjem prostora mogu pasti i ispod onih za pripremu PTV-a.

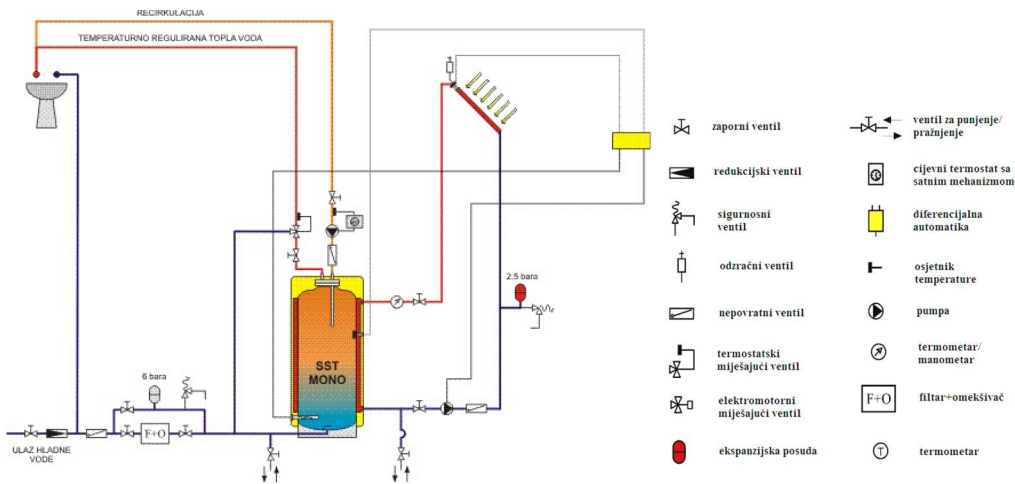
Osnovni dijelovi tih sustava su solarni kolektori i akumulacijski spremnik. Radni fluid je obično mješavina voda/glikol koja je otporna na smrzavanje. Cirkulacija radnog fluida između kolektora i spremnika je najčešće ostvarena prisilno uz pomoć pumpe. Također se koriste i termosifonski sustavi s prirodnom cirkulacijom koja nastaje uslijed razlike gustoća, odnosno razlike temperature radnog fluida u kolektoru i spremniku, slika 32. Kod takvih sustava spremnik se mora nalaziti iznad kolektora kako bi se uspostavila prirodna cirkulacija pod djelovanjem sila uzgona (preporuča se min. 20 cm). To znači da će se spremnik najčešće nalaziti izvan grijanog prostora, pa će stoga imati znatno veće toplinske gubitke (niske temperature, vjetar) u odnosu na sustave s prisilnom cirkulacijom, gdje je spremnik smješten u zgradi. Alternativno, kod sustava s prirodnom cirkulacijom, kolektor se može postaviti na terasu ili na tlo, a spremnik u zgradu. Pri tome treba voditi računa da spojni cjevovodi kolektorskog kruga budu što kraći i što većeg promjera, uz

izbjegavanje dodatnih otpora strujanja (koljena, ventili) kako bi se ukupni pad tlaka držao što nižim, s obzirom na relativno male uzgonske sile koje pokreću fluid. Zbog toga su i protoci kroz kolektor niži nego kod sustava s prisilnom cirkulacijom, što ponekad može dovesti do značajnijeg snižavanja učinkovitosti kolektora. Prednost u odnosu na sustave s prisilnom cirkulacijom je u činjenici da se ne troši električna energija za pogon pumpe (koja iznosi oko 2÷5% prikupljene sunčeve energije), nema regulacijskog sklopa, a i cijena sustava i instalacije je znatno niža. Termosifonski sustavi su zbog opisanih karakteristika prikladniji za korištenje u toplijim klimama s većom godišnjom ozračenosti npr. u mediteranskim zemljama, Australiji, Izraelu, gdje su tradicionalno vrlo rašireni. U našoj zemlji takvi sustavi predstavljaju dobro rješenje tijekom ljeta, no u zimskim mjesecima, osim velikih toplinskih gubitaka vanjskog spremnika, problem predstavlja i opasnost od smrzavanja vode u spremniku kad el. zaštita od smrzavanja zakaže (npr. u slučaju da zbog visokog napona izbací osigurač). Ovdje još treba dodati i znatno veću težinu koju konstrukcija krova mora nositi (kolektori+spremnik) u odnosu na sustave s prisilnom cirkulacijom, što ograničava broj kolektora koji se mogu instalirati.

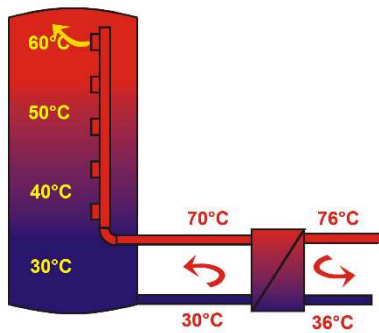


Slika 32. Kompaktni termosifonski sustav, primjeri [12]

Na slici 33. prikazana je shema jednostavnog sustava s prisilnom cirkulacijom ostvarenom s cirkulacijskom pumpom i jednim spremnikom za pripremu PTV-a. U prikazanom primjeru spremnik nema klasični cijevni izmjenjivač topline (kao na slici 18. ), nego radni medij kolektorskog kruga struji kroz dvostruki plašt spremnika, od njegova vrha do dna, i na taj način predaje toplinu vodi u spremniku. Polaz fluida kolektorskog kruga nalazi se na najnižem dijelu spremnika, gdje su temperature vode najniže, kako bi se postigla što veća učinkovitost kolektora. Kako bi pri vrhu spremnika voda imala što višu temperaturu, potrebno je koristiti što izduženije i vertikalno montirane spremnike te minimizirati miješanje svježije vode koja ulazi u spremnik s gornjim slojevima tople vode. Također, radi osiguranja što veće razlike temperatura između slojeva, koriste se i spremnici sa zagrijavanjem vode na različitim visinama ovisno o trenutnoj temperaturi vode (slika 34.).



Slika 33. Sustav s jednim spremnikom za pripremu PTV-a [11]



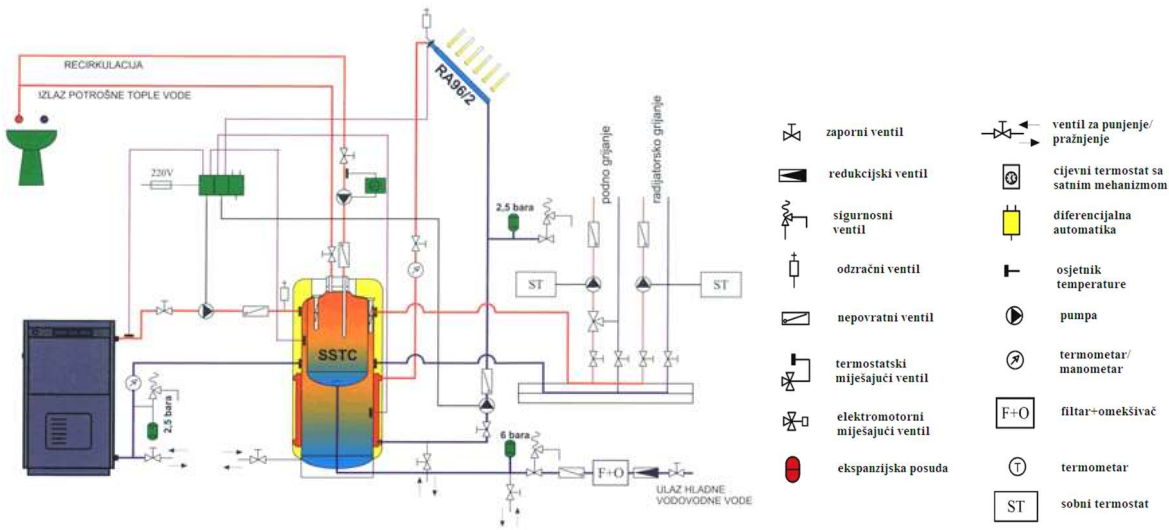
Slika 34. Temperaturna stratifikacija u spremniku, izvedba sa zagrijavanjem spremnika po visini i s vanjskim izmjenjivačem toplote [8]

Diferencijalna automatika isključuje i uključuje cirkulacijsku pumpu solarnog kruga, ovisno o razlici temperatura na izlazu iz kolektora i vode u spremniku. Pumpa se isključuje kada ta razlika postane manja od neke zadane vrijednosti (najčešće  $3\div 5^{\circ}\text{C}$ ), čime se sprječava rashlađivanje vode u spremniku. Automatika će ponovo uključiti pumpu kada se uspostavi tražena minimalna razlika temperatura.

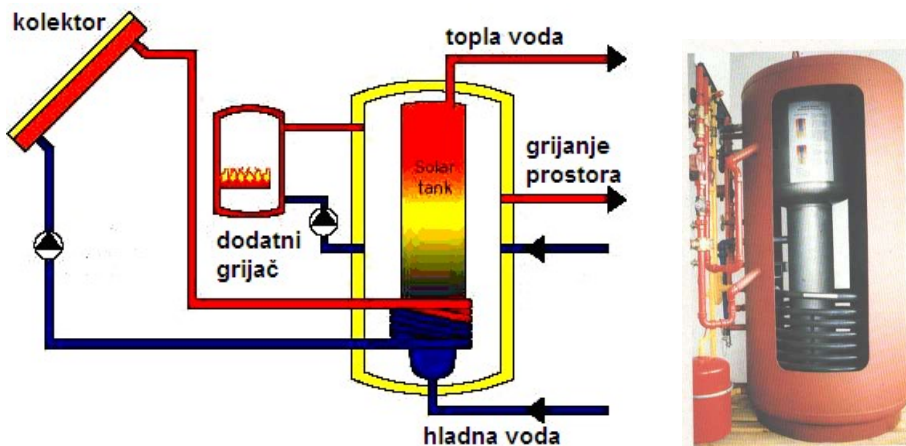
Na slici 35. prikazani su primjeri kombiniranih sustava za pripremu PTV-a i grijanje prostora. Voda iz sustava grijanja se ne smije miješati s PTV-om koji ulazi kao svježa voda u sustav (radi izbjegavanja stvaranja kamenca u kotlu i omogućavanja odračivanja sustava grijanja). Zbog toga se u spremniku s vodom iz sustava grijanja nalazi jedan manji spremnik s PTV-om, koji se zagrijava toplom vodom iz većeg spremnika, preko stjenke manjeg spremnika. U donjem dijelu spremnika se nalazi izmjenjivač solarnog kruga, dok se u gornjem dijelu nalazi izmjenjivač pomoćnog izvora toplote, koji je obično toplovodni kotao ili protočni grijač vode. Umjesto tog izmjenjivača, ili kao njegov dodatak, može biti instaliran i električni grijač.

Temperatura PTV-a mora se povremeno podizati iznad  $60^{\circ}\text{C}$  radi zaštite od bakterije legionele (npr. dva puta tjedno ili nakon duljeg nekorištenja). Bakterija legionela se pojačano razmnožava na

temperaturama (20-45)°C. Poželjno je temperaturu vode u gornjem dijelu spremnika održavati na minimalno 45°C radi higijenskih razloga i pokrivanja toplinskih gubitaka od spremnika do izljevno mjesto (uobičajena temperatura vode potrebna za tuširanje i pranje ruku je cca 35-38°C)



a)

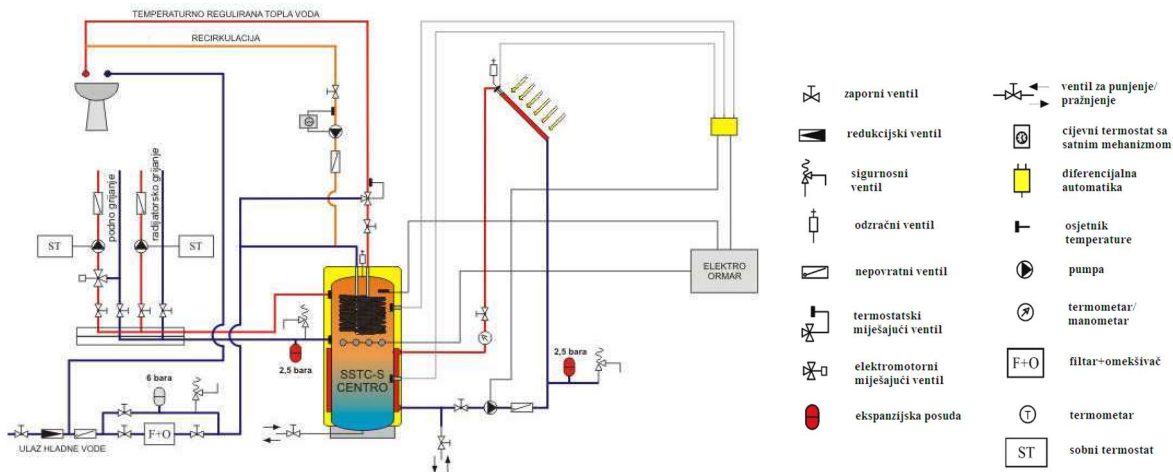


b)

Slika 35. Primjeri kombiniranih solarnih toplovodnih sustava za grijanje prostora i PTV-a s dvostrukim spremnikom [11]

Za zagrijavanje PTV-a se umjesto akumulacijskog spremnika može koristiti i protočni grijač, slika 36. Njime se izbjegava miješanje svježije hladne vode i prethodno zagrijane vode u spremniku. Također, temperatura PTV-a može uvijek biti niža od 60°C, jer nema opasnosti od razvoja bakterije legionele. S druge strane, kako bi se osiguralo zagrijavanje protočne vode, odnosno potrebni toplinski tok, temperatura u gornjem dijelu spremnika mora biti cca 10°C viša od željene temperature PTV-a. To često povlači potrebu za paljenjem pomoćnog grijača. U prethodno opisanom sustavu s dvostrukim spremnikom je zbog mogućnosti akumulacije PTV-a raspoloživo vrijeme zagrijavanja PTV-a dulje, a potrebni toplinski tok posljedično niži, pa i temperatura vode u vanjskom spremniku može biti niža.

Zbog toga se zagrijavanje PTV-a može u određenim uvjetima odvijati i bez potrebe za paljenjem pomoćnog grijača. Kako bi se iskoristile dobre strane i protočnog i akumulacijskog načina zagrijavanja, često se protočni grijači kombiniraju s manjim akumulacijskim spremnikom, kakav je prikazan na slici 37.



Slika 36. Sustav s protočnim grijačem (izmjenjivačem) PTV-a [11]

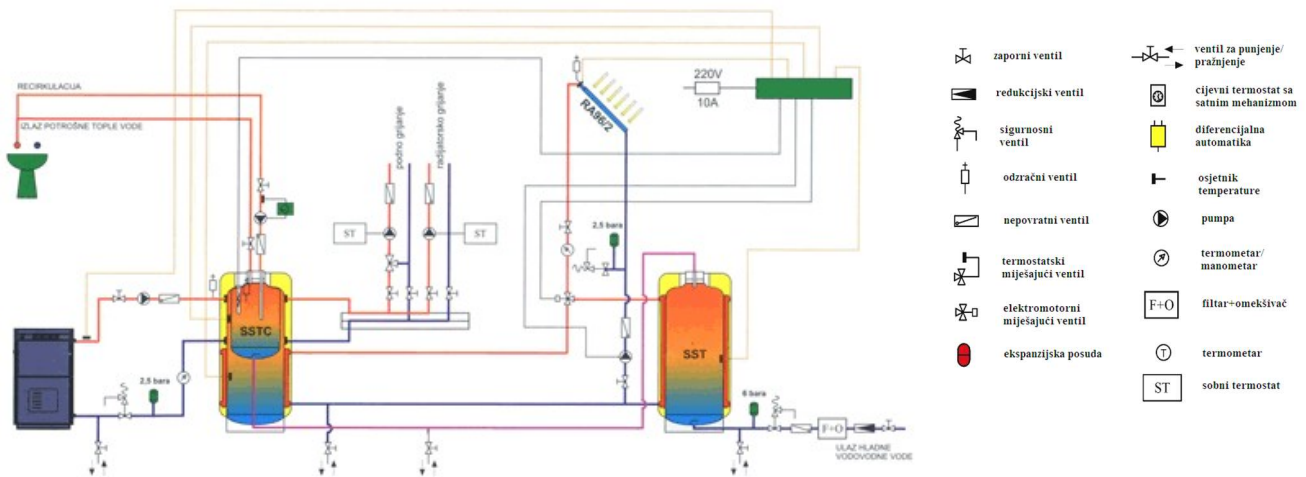


Slika 37. Spremnik s protočnim grijačem, kombiniranim s manjim akumulacijskim spremnikom [12]

Na slici 38. prikazan je sustav s dva akumulacijska spremnika, koji se koristi kod većih površina kolektora ( $>10 \text{ m}^2$ ), odnosno potrebnih zapremina spremnika ( $>500 \text{ Lit}$ ). Ovdje se kolektorima prvo zagrijava jedan spremnik do željene temperature (npr.  $50^\circ\text{C}$ ). Kad se postigla željena temperatura, fluid kolektorskog kruga se usmjerava pomoću troputnog ventila prema izmjenjivaču drugog spremnika. U tom spremniku se predgrijava svježa voda, koja potom ulazi u prvi spremnik i po potrebi se dogrijava pomoćnim grijačem čim temperatura padne ispod postavne. Ovakvim konceptom je omogućeno brže zagrijavanje vode u sustavu na željenu temperaturu, u odnosu na sustav s jednim spremnikom identične ukupne zapremine kao kod dva spremnika. Ovim se smanjuje potreba za paljenjem pomoćnog grijača. Nadalje, zbog povezivanja kolektora s izmjenjivačem drugog spremnika s nižom temperaturom vode, u jednom periodu dnevnog rada



prosječna učinkovitost kolektora je veća no što bi bila da se zagrijavao samo jedan veći spremnik. Takvi su sustavi posebno prikladni za korištenje u turističkim objektima (npr. privatnim kućama s apartmanima), gdje su potrebe za PTV-om tijekom ljeta velike. U zimskim mjesecima, kada je potreba za PTV-om znatno manja, a i sunčevo ozračenje, zagrijava se samo prvi spremnik, dok kroz drugi voda samo protječe, ili se taj spremnik može i u potpunosti isključiti iz rada. Ovakve konfiguracije omogućavaju kompenzaciju viškova sunčeve energije u ljetnim mjesecima kod sustava dimenzioniranih da pokriju i dio potreba za grijanjem prostora, pa imaju instaliranu znatno veću površinu kolektora no što je potrebno za zagrijavanje PTV-a.



Slika 38. Sustav s dva spremnika [11]

Kako je prikazano na slici 34., izmjenjivač topline solarnog kruga može biti smješten i izvan spremnika. Tomu se često pribjegava kod većih sustava, gdje izmjenjivači u spremniku nemaju dovoljnu površinu za izmjenu sve topline (tj. toplinski tok) prikupljene kolektorima. Kada to nije zadovoljeno, dolazi do povećanja polazne temperature fluida kolektorskog kruga (i sniženja učinkovitosti kolektora), sve dok se ne izmjeni sva prikupljena toplina. Nedostatak vanjskih izmjenjivača je potreba za ugradnjom još jedne cirkulacijske pumpe. Alternativa instalaciji vanjskih izmjenjivača je korištenje serijskog spoja kolektora i/ili kolektora sa cijevnom zmijom (serpentinom), jer to omogućava postizanje viših temperatura na izlazu iz kolektora, odnosno potrebno povećanje toplinskog toka na izmjenjivaču u spremniku. S druge strane, to smanjuje učinkovitost kolektora.

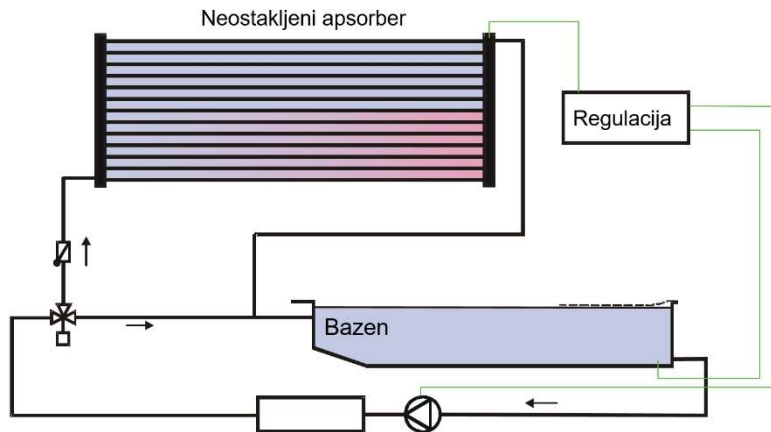
#### 4.1.2. Sustavi za grijanje prostora

Danas se solarni sustavi često koriste i za niske temperaturno grijanje prostora, s obzirom na poboljšanje toplinske zaštite zgrada, odnosno smanjivanje potreba za grijanjem. Na prethodnim shemama solarnih sustava prikazan je način napajanja sustava radijatorskog grijanja iz spremnika s vodom temperature (40-60)°C koja je iz ranije navedenih razloga razdvojena od PTV-a, ili sustava panelnog (podnog ili zidnog) grijanja vodom temp. do 35°C (regulacija temp. polaza grijanja preko troputnog ventila). Radi nižih temperatura, kada je to moguće, preporuča se korištenje sustava

panelnog grijanja. U nekim izvedbama se solarnim krugom direktno zagrijava krug grijanja preko pločastog izmjenjivača topline, mimo spremnika čiji je donji dio u tim situacijama na višim temperaturama od one u sustavu grijanja (npr. jer nije bilo potrošnje PTV-a), pa se na taj način osigurava veća učinkovitost rada kolektora. Zbog činjenice da je zimi sunčevo ozračenje i do 5 puta manje nego ljeti, a toplinske potrebe (grijanje prostora+PTV) nekoliko puta veće, potrebno je pažljivo optimizirati broj kolektora i ostale dijelove sustava (zapreminu spremnika) kako ne bi došlo do pregrijavanja spremnika tijekom ljeta ili prevelikog smanjenja učinkovitosti zbog viših temperatura u sustavu, a da je sustav još uvijek ekonomski isplativ (npr. povrat investicije unutar polovice njegovog iskoristivog radnog vijeka, tj. 10-12.g. Iz tih se razloga takvi sustavi obično dimenzioniraju na način da se prikupljenom sunčevom energijom pokrije oko 10-15% ukupnih energetske potrebe zimi (grijanje prostora+PTV). U novim gotovo nula energetskim zgradama – nZEB (s potrebnom godišnjom energijom za grijanje  $Q_{H,nd} < 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ti udjeli rastu i do 50%. Kombiniranjem solarnih sustava s uređajima na biomasu ili dizalicama topline, moguće je ostvariti 100% pokrivanje toplinskih potreba zgrade s obnovljivim izvorima, što je krajnji cilj uvođenja ZEB standarda (zgrade nultih emisija). Viškovi prikupljene sunčeve energije u ljetnim mjesecima se mogu kompenzirati korištenjem većeg spremnika (inertniji sustav), dodatnog spremnika (najbolje rješenje - slika 38.) ili zasjenjivanjem kolektora (ekonomski najlošije rješenje).

### 4.1.3. Sustavi za grijanje bazena

Zbog nižih temperatura bazenske vode (24-32)°C u odnosu na pripremu PTV-a, jedan je od najučinkovitijih i najekonomičnijih načina korištenja sunčeve energije upravo onaj za zagrijavanje bazena (slika 39.). Kako je već ranije bilo navedeno, za tu svrhu se najčešće koriste neostakljeni apsorberi. Njima se pokrivaju toplinski gubitci bazena uslijed ishlapljivanja, prskanja, konvekcije na zrak (vjetra) te zračenja prema nebu i okolišnim objektima. Kolektorima se obično pokrivaju i potrebe za zagrijavanje svježije vode, radi održavanja higijenskog minimuma. Za zagrijavanje svježije vode na željenu temperaturu, u bazenu se pri prvom punjenju, obično koristi dodatni grijač. Da bi se smanjili toplinski gubitci, bazeni se često prekrivaju prozirnim plastičnim pločama onda kada se ne koriste. Bez te zaštite, toplinski gubitci, zračenjem prema vedrom nebu, mogu tijekom noći dovesti do pada temperature vode čak i kada je temperatura okolišnog zraka viša od temperature vode u bazenu. Procijenjeni toplinski gubitci otvorenih bazena iznose oko 4 kWh/m<sup>2</sup> na dan, dok zatvoreni bazeni imaju gubitke oko 2,5 kWh/m<sup>2</sup> na dan.



Slika 39. Shema sustava sa neostakljenim apsorberom za zagrijavanje bazena [8]

## 4.2. Regulacija

Rad regulacije i pravilne postavke bitno utječu na učinkovitost svakog termotehničkog, pa tako i solarnog sustava. U osnovi, regulacijski sklop se sastoji od upravljačke jedinice, osjetnika temperature smještenog na izlazu iz kolektora i na različitim pozicijama u spremnicima te u drugim dijelovima sustava (u toplovodnom kotlu, na mjestu polazu kruga grijanja, prostorijama). Osjetnik temperature u spremniku se smješta neposredno iznad izmjenjivača kolektorskog kruga, kako bi se osiguralo da u trenutku kada se uključi pumpa na cijeloj površini izmjenjivača postoji temperaturna razlika u odnosu na fluid kolektorskog kruga potrebna za izmjenu sve topline prikupljene kolektorima. Osjetnik temperature fluida na izlazu iz kolektora se montira tako da bude zaštićen od direktnog sunčevog zračenja, najbolje direktno u fluid preko cijevnog umetka (tzv. puškice). Alternativno, osjetnik se može samo pričvrstiti za cijev i sve skupa izolirati (pri tome paziti na odabir izolacije, zbog vremenskih utjecaja i ptica, koje često uništavaju izolaciju kljunovima).

Upravljačka jedinica uključuje i isključuje pojedine pumpe, usmjerava fluid preko troputnog ventila na pojedini spremnik, uključuje rad pomoćnog el. grijača ili pumpe toplovodnog kotla. Najbolji toplinski učinci i učinkovitost se postižu kada regulacija integrira rad svih dijelova termotehničkog sustava zgrade (solarnog sustava, sustava grijanja, pripreme PTV-a, pomoćnih grijača). Potrebno je još spomenuti i cirkulacijsku petlju, kroz koju protječe PTV između spremnika i izljevno mjesto, kako bi topla voda bila dostupna neposredno nakon otvaranja slavine. Radom cirkulacijske petlje upravlja upravljačka jedinica, ovisno o željenom periodu rada i o temperaturi u petlji (pali se kada temperatura padne ispod postavne vrijednosti). Preporuka je da se preko noći isključi cirkulacijska pumpa kako bi se smanjilo rashlađivanje spremnika, s obzirom da je cirkulacijska petlja jedan od većih izvora toplinskih gubitaka u sustavu (koji ljeti nadmašuju i samu potrebu za PTV-om, dok se zimi ti gubitci mogu iskoristiti za posredno grijanje prostora)



### 4.3. Dijelovi i oprema solarnih sustava

Ekspanzijske posude i ventili sigurnosti su važni dijelovi solarnog sustava, jer osiguravaju njegovu funkcionalnost u svim uvjetima rada. Montiraju se u kolektorskom krugu, dovodu svježe vode i sustavu grijanja (vidi prethodne sheme sustava). Ekspanzijska posuda mora biti dimenzionirana tako da može prihvatiti sve promjene volumena radnog medija, a koje su posebno velike u kolektorskom krugu uslijed velikih razlika temperatura tijekom rada tj. da osigura stalni tlak u sustavu. Tlak u kolektorskom krugu se obično kreće oko 2÷2,5 bar, dok je u ostalim dijelovima sustava oko 3 bar. Ukoliko dođe do pada tlaka u kolektorskom krugu ispod 1,5 bar, može doći do smanjenja protoka radnog fluida zbog pojave kavitacije na usisnoj strani pumpe i/ili zbog pojačanog izlučivanja zraka otopljenog u radnom mediju (posebice kod visokih temperatura). Osim smanjivanja učinkovitosti kolektora (manji protok, više temperature), zbog visokih temperatura zaštita pumpe od pregrijanja može isključiti pumpu (kod temp.>75-80°C). To dovodi do isparavanja fluida u kolektoru. Cirkulacija se može ponovo uspostaviti tek kada temperatura u kolektoru padne ispod granične (obično tek u večernjim satima). Isti učinak na rad sustava ima i predimenzionirani broj kolektora u odnosu na toplinske potrebe zgrade i volumen spremnika (min. je potrebno osigurati 50-70 Lit spremnika po m<sup>2</sup> kolektorske površine). Do pada tlaka može doći i zbog primjerice propuštanja spojeva izloženih sunčevom zračenju, uslijed propuštanja sigurnosnog ventila bilo zbog njegove ili neispravnosti ekspanzijske posude. Također, pad tlaka u sustavu može nastupiti kod pregrijavanja sustava uslijed nestanka el. energije za pogon cirkulacijske pumpe ako ekspanzijska posuda nije dobro dimenzionirana. Tada dolazi do porasta tlaka i otvaranja sigurnosnog ventila te pada tlaka nakon hlađenja radnog medija. Iz tih razloga potrebno je redovito (npr. jednom tjedno) provjeravati tlak u sustavu i po potrebi dopunjavati kolektorski krug radnim fluidom.

U kolektorski krug se obavezno ugrađuje nepovratni ventil, da bi se spriječila cirkulacija od toplijeg dijela spremnika prema kolektorima, odnosno njegovo rashlađivanje kada pumpa nije u pogonu (npr. za oblačna vremena i noću). Iz istih se razloga nepovratni ventil postavlja između spremnika i toplovodnog kotla. Nepovratne ventile je potrebno u redovitom godišnjem servisu očistiti od nečistoća, jer u suprotnom mogu djelomično izgubiti funkciju. Dodatnu termosifonsku recirkulaciju, koja može nastupiti unutar samog polaznog cjevovoda solarnog kruga (između ulaza u izmjenjivač spremnika i izlaza iz kolektora) kada ne radi cirkulacijska pumpa, moguće je spriječiti montiranjem U-cijevi (tzv. sifona) u taj dio solarnog kruga.

Na cjevovodu svježe vode montira se redukcijski ventil koji osigurava stalni tlak u sustavu, s obzirom da ulazni tlak iz vodovodne mreže može varirati. Na isti cjevovod je poželjno montirati filter i omekšivač te nepovratni ventil, kako bi se spriječilo pražnjenje spremnika i pad tlaka kada nestane vode u vodovodu (npr. zbog radova na mreži). Na izlaznom cjevovodu PTV-a potrebno je montirati zaštitni termostatski miješajući ventil (vidi sliku 33.) koji ima ulogu spriječiti protok vruće vode (npr. temperature veće od 50°C) prema izljevnom mjestu, na način da se PTV iz spremnika pomiješa s hladnom vodom.

Što se tiče cjevovoda, oni bi općenito trebali biti što je moguće kraći, kako bi se toplinski gubitci

sveli na najmanju mjeru. Svi dijelovi cjevovoda kolektorskog kruga moraju se izolirati izolacijom debljine  $(\frac{1}{2} \div \frac{3}{4}) \times$  promjer cjevovoda. Za to se često koristi specijalna UV otporna (npr. Armaflex) izolacija, kojoj je nedostatak to što je kljunom mogu oštetiti ptice, iako na tržištu postoje i posebne vrste izolatora koji ptice privlače u znatno manjoj mjeri. U većim sustavima se koristi mineralna vuna obložena Al limom ( što, između ostalog, pruža bolju zaštitu i od ptica). U manjim kućnim sustavima, do 10 m<sup>2</sup> kolektorske površine, cjevovodi su obično promjera 10 do 20 mm.

Što se tiče cirkulacijskih pumpi, poželjno je ugraditi one s frekvencijskim upravljanjem broja okretaja, jer imaju znatno manju potrošnju energije od nereguliranih, te se protok može prilagođavati sunčevom ozračenju (i temperaturi zraka) preko regulacijske jedinice, kako bi temperaturni prirast na kolektorima bio konstantan (npr. 5-7°C). Za kontrolu protoka, uz pumpnu grupu (pumpa, termometar, manometar, ekspanzijska posuda, nepovratni ventil, sigurnosni ventil, ventil za punjenje) montiraju se i protokomjeri (tzv. rotametri).

## 4.4. Montaža kolektora

Kolektori se obično montiraju na krov (slika 40.a). Bolje je rješenje ako se kolektori montiraju kao dio krova (slika 40.b) zbog štednje na materijalu pokrova (npr. crijepu) a dobiva se i odlična toplinska izolacija na tom mjestu. Također, kolektori se mogu montirati na ravne krovove, terase ili tlo, korištenjem posebnih nosača (slika 41.). Ukoliko orijentacija kosog krova znatno odstupa od smjera juga, kolektore je moguće montirati na nosače zakrenute prema jugu (slika 40.c)

Pri tome je potrebno provjeriti nosivost krovne konstrukcije, s obzirom da se krovovi obično projektiraju tako da mogu izdržati vlastitu težinu, vjetar i snijeg. Iz tih razloga često lakonosive konstrukcije industrijskih hala nisu pogodne za instalaciju kolektora koji ima težinu od (15-17) kg/m<sup>2</sup> površine kolektora, čemu još treba pridodati težinu krovnih nosača.



a)

b)

c)

Slika 40. a) kolektor montiran na krov, b) kolektor montiran kao dio krova c) kolektori montirani na nosače (kosi krovovi koji znatno odstupaju od smjera juga) [12]

U većim sustavima kolektori se spajaju u grupe, slika 41. Ovdje treba voditi računa o tome da se pravilnim dimenzijama cjevovoda osigura jednolik protok kroz sve grupe. Protok kroz grane razvodnog cjevovoda balansira se ventilima s ugrađenim mjeračem protoka.

Na najvišem dijelu instalacije, odnosno izlazu iz kolektora ili grupe, montira se odzračni ventil koji se koristi za ispuštanje zraka iz cjevovoda tijekom punjenja sustava.



Slika 41. Solarni sustav s grupama kolektora montiranim na krovne nosače [12]

## 4.5. Ispitivanja solarnih kolektora i sustava

U EU ispitivanja se provode u ispitnim laboratorijima akreditiranim od strane neke akreditacijske agencije prema sljedećim normama:

HRN EN ISO 9806:2017 Sunčeva energija - Sunčani toplinski kolektori - Metode

HRN EN 12975:2022 Solarni kolektori - Opći zahtjevi

HRN EN 12976-1:2021 Solarni toplinski sustavi i komponente - Tvornički izrađeni sustavi - 1. dio: Opći zahtjevi

HRN EN 12976-2:2019 Solarni toplinski sustavi i komponente - Tvornički izrađeni sustavi - 2. dio: Metode ispitivanja

Pojedini ispitni centri provode ispitivanja prema seriji normi:

HRN EN 12977-1:2018 Solarni toplinski sustavi i komponente -- Sustavi izrađeni po narudžbi -- 1. dio: Opći zahtjevi za solarne grijače vode i kombinirane sustave

HRN EN 12977-2:2018 Solarni toplinski sustavi i komponente -- Sustavi izrađeni po narudžbi -- 2. dio: Metode ispitivanja za solarne grijače vode i kombinirane sustave

HRN EN 12977-3:2018 Solarni toplinski sustavi i komponente -- Sustavi izrađeni po narudžbi -- 3. dio: Metode ispitivanja radnih značajka spremnika za solarne grijače vode

HRN EN 12977-4:2018 Solarni toplinski sustavi i komponente -- Sustavi izrađeni po narudžbi -- 4. dio: Metode ispitivanja radnih značajka solarnih kombiniranih spremnika

HRN EN 12977-5:2018 Solarni toplinski sustavi i komponente -- Sustavi izrađeni po narudžbi -- 5. dio: Metode ispitivanja radnih značajka opreme za upravljanje

Europski odbor za normizaciju (CEN) je uveo dobrovoljnu oznaku "Solar Keymark" kojom se potvrđuje da je kolektor ispitan prema gore navedenim EN normama i ispunjava sve postavljene zahtjeve te da je provedena provjera osiguranja kvaliteta u proizvodnji. Većina kolektora koji se dostavljaju na tržište EU (a i Hrvatske) nosi oznaku "Solar Keymark" [13].

Primjer javno dostupnog izvješća ispitivanja karakteristika kolektora akreditiranog laboratorija prema EN ISO 9806:2017 koji je prilog Solar Keymark certifikatu, prikazan je na slici 42. Ovdje je toplinska učinkovitost svedena na bruto površinu (podaci o koeficijentima polinoma učinkovitosti  $\eta_{o,b}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) kako se zahtjeva Delegiranom uredbom komisije (EU) br. 811/2013 [14] (slika 43.). Kada se učinkovitost iskazuje prema EN 12975:2022 onda se svodi na površinu upada svjetlosti ('aperture area'). U izvješću su dani i podatci o godišnjem toplinskom učinku kolektora i njegovoj učinkovitosti za različite klime u EU (gradove) i temperaturne režime. Ti podatci mogu poslužiti za usporedbu s drugim kolektorima, dok se za projektiranje koriste podatci o koeficijentima polinoma učinkovitosti, koji omogućuju proračun učina i učinkovitosti za proizvoljne klimatske podatke.



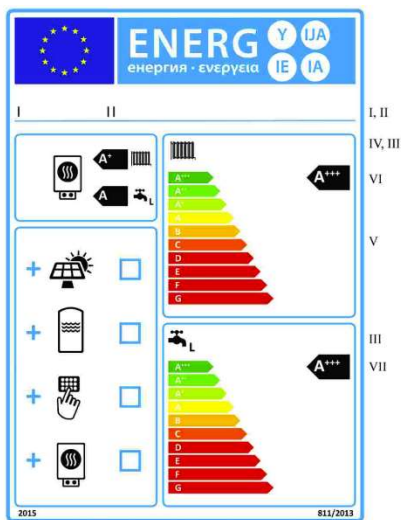
Page 1/2

		Licence Number <b>OEM 9999.2.9</b>	
Annex to Solar Keymark Certificate		Date issued <b>2023-09-26</b>	
Issued by <b>DQS Hellas</b>			
Licence holder <b>THERMIC LTD</b>		Country <b>Greece</b>	
Brand (optional) Street, Number Postcode, City		Web E-mail Tel	
15600 Mandra Attikis		www.thermiccol.com exports@thermiccol.com +302105555523	
Collector Type <b>Flat plate collector</b>			
Collector name <b>CRONUS 2.7</b> <b>CRONUS 2.7H</b>		Power output per collector $G_b = 850 \text{ W/m}^2, G_d = 150 \text{ W/m}^2 \text{ \& } u = 1.3 \text{ m/s}$ $\theta_{in} = \theta_{out}$	
Gross area (A <sub>g</sub> ) m <sup>2</sup>	Gross length mm	Gross width mm	Gross height mm
2.72 2.160	1.260 2.160	86 2.107	2.018 1.821
1.597 1.348	1.093 1.093	1.597 1.348	1.093 1.093
Power output per m <sup>2</sup> gross area		775 742 669 587 495 400	
Performance parameters test method Steady state - outdoor			
Performance parameters (related to A <sub>g</sub> )			
Units Test results	a1 W/(m <sup>2</sup> ·K)	a2 W/(m <sup>2</sup> ·K)	a3 J/(m <sup>2</sup> ·K)
0.784 3.15	0.012 0.000	0.000 0.000	8.720 0.000
Incidence angle modifier test method Steady state - outdoor			
Incidence angle modifier			
Angle Transversal Longitudinal	10° 1.00 1.00	20° 1.00 1.00	30° 0.99 0.99
40° 0.98 0.98	50° 0.96 0.96	60° 0.92 0.92	70° 0.87 0.87
80° 0.82 0.82	90° 0.78 0.78		
Heat transfer medium for testing Water			
Flow rate for testing (per gross area, A <sub>g</sub> ) dm <sup>3</sup> /dt 0.022 kg/(sm <sup>2</sup> )			
Maximum temperature difference during thermal performance test (T <sub>in</sub> - T <sub>out</sub> ) <sub>max</sub> 58.5 K			
Standard stagnation temperature (G = 1000 W/m <sup>2</sup> , θ <sub>a</sub> = 30 °C) T <sub>stagn</sub> 100.5 °C			
Maximum operating pressure P <sub>max,op</sub> 1000 kPa			
Testing laboratory HCSB Demokritos / Solar & other Energy Systems www.solar.demokritos.gr			
Test report(s) 419023 4197003			
Date 10/11/2018 2/6/2017			
Comments of testing laboratory Ver. 6.2 (13.01.2022)			
Central Offices: Kalavriton 2, 145 64 kifisia, Athens, Tel: +30 210 6233493-4, Fax: +30 210 6233495, http://www.dqs.gr, e-mail: l.alexio@dqs.gr			

Page 2/2

Annex to Solar Keymark Certificate Supplementary Information		Licence Number Issued		OEM 9999.2.9 2023-09-26	
Gross Thermal Yield in kWh/collector at mean fluid temperature θ <sub>m</sub>					
Standard Locations		Athens		Davos	
				Stockholm	
				Würzburg	
Collector name	θ <sub>a</sub>	25°C	50°C	75°C	25°C
CRONUS 2.7		3.422	2.564	1.786	2.673
CRONUS 2.7H		3.422	2.564	1.786	2.673
		1.943	1.310	1.954	1.349
		874	2.121	1.461	932
		874	2.121	1.461	932
Gross Thermal Yield per m <sup>2</sup> gross area					
Annual efficiency, η <sub>a</sub>					
Fixed or tracking collector					
Annual irradiation on collector plane					
Mean annual ambient air temperature					
Collector orientation or tracking mode					
The collector is operated at constant temperature θ <sub>m</sub> (mean of in- and outlet temperatures). The calculation of the annual collector performance is performed with the official Solar Keymark spreadsheet tool Senocalc Ver. 6.2 (13.01.2022). A detailed description of the calculations is available at <a href="http://www.estif.org/solarkeymarknew/">http://www.estif.org/solarkeymarknew/</a>					
Additional Information					
Collector heat transfer medium				Water-Glycol	
The collector is deemed to be suitable for roof integration				No	
The collector was tested successfully under the following conditions:					
Climate class (A, A, B or C)		G <sub>h</sub> (W/m <sup>2</sup> ) >		θ <sub>a</sub> (°C) >	
A		1000		20	
H <sub>h</sub> (M/m <sup>2</sup> ) >		3000		Pa	
Maximum tested positive load		3000		Pa	
Maximum tested negative load		3000		Pa	
Hail resistance using steel ball (maximum drop height)		2		m	
Additional collector attribute(s)					
Using external power source(s) for normal operation		No		Active or passive measure(s) for self-protection	
Co-generating thermal and electrical power		No		Façade collector(s)	
No		No		No	
Energy Labelling Information					
Reference Area, A <sub>ref</sub> (m <sup>2</sup> )		Hydraulic Designation Code		Aperture Area, A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	
CRONUS 2.7		2.72		11-V-12345-A-7.2.2050-C-20.6.1320-	
CRONUS 2.7H		2.72		18-V-12345-A-7.2.1158-C-20.6.2240-	
				2,57	
Data required for CDR (EU) No 811/2013 - Reference Area A <sub>ref</sub>					
Collector efficiency (η <sub>col</sub> )		63%		Zero-loss efficiency (η <sub>z</sub> )	
				0.77	
First-order coefficient (a <sub>1</sub> )		3.15		W/(m <sup>2</sup> ·K)	
Second-order coefficient (a <sub>2</sub> )		0.012		W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )	
Remark: Collector efficiency (η <sub>col</sub> ) is defined in CDR (EU) No 811/2013 as collector efficiency of the solar collector at a temperature difference between the solar collector and the surrounding air of 40 K and a global solar irradiance of 1000 W/m <sup>2</sup> , expressed in % and rounded to the nearest integer. Deviating from the regulation η <sub>col</sub> is based on reference area (A <sub>ref</sub> ) which is aperture area for values according to EN 12975-2 or gross area for values according to EN 12975-2 or gross area for ISO 9806:2017.					
Remark: The data given in this section are related to collector reference area (A <sub>ref</sub> ) which is aperture area for values according to EN 12975-2 or gross area for values according to EN 12975-2 or gross area for ISO 9806:2017.					
Central Offices: Kalavriton 2, 145 64 kifisia, Athens, Tel: +30 210 6233493-4, Fax: +30 210 6233495, http://www.dqs.gr, e-mail: l.alexio@dqs.gr					

Slika 42. Primjer dodatka certifikatu Solar Keymark s podacima ispitivanja prema EN ISO 9806:2017 [13]



- I. naziv ili zaštitni znak trgovca i/ili dobavljača;
- II. dobavljačeva ili trgovčeva identifikacijska oznaka modela;
- III. funkcija zagrijavanja prostora i funkcija zagrijavanja vode, uključujući deklarirani profil opterećenja izražen odgovarajućom slovnom oznakom u skladu s tablicom 15. Priloga VII.;



- IV. razred sezonske energetske učinkovitosti pri zagrijavanju prostora i zagrijavanju vode kombiniranog grijača utvrđen u skladu s točkama 1. i 2. Priloga II.;
- V. naznaka o tome mogu li se solarni kolektor, spremnik tople vode, uređaj za upravljanje temperaturom i/ili dodatni grijač uključiti u komplet koji sadržava kombinirani grijač, uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj;
- VI. razred sezonske energetske učinkovitosti pri zagrijavanju prostora kompleta koji sadržava kombinirani grijač, uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj, utvrđen u skladu s točkom 6. Priloga IV.; vrh strelice s oznakom razreda sezonske energetske učinkovitosti pri zagrijavanju prostora kompleta koji sadržava kombinirani grijač, uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj nalazi se na istoj visini kao i vrh strelice odgovarajućeg razreda energetske učinkovitosti.
- VII. razred energetske učinkovitosti pri zagrijavanju vode kompleta koji sadržava kombinirani grijač, uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj, utvrđen u skladu s točkom 6. Priloga IV.; vrh strelice s oznakom razreda energetske učinkovitosti pri zagrijavanju vode kompleta koji sadržava kombinirani grijač, uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj nalazi se na istoj visini kao i vrh strelice odgovarajućeg razreda energetske učinkovitosti.

Slika 43. Primjer označavanja kompleta koji sadržavaju kombinirani grijač (grijanje prostora+ PTV), uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj s razredima energetske učinkovitosti prema Delegiranoj uredbi komisije (EU) br. 811/2013 [14]

#### Ispitivanje kolektora (prema HRN EN ISO 9806:2017) uključuje (slika 44.):

1. Mjerenje učinkovitosti s vjetrom i bez njega
2. Određivanje faktora promjene upadnog kuta sunčevog zračenja
3. Izračun toplinskog kapaciteta
4. Pad tlaka
5. Ispitivanje kvalitete:
  - Tlačna proba (1,5×max. radni tlak)
  - Otpornost na visoku temperaturu (određivanje stagnacijske temperature)
  - Ispitivanje izloženosti dugotrajnom sunčevom zračenju
  - Vanjski i unutrašnji toplinski šok
  - Propusnost na kišu
  - Otpornost na smrzavanje
  - Mehaničko opterećenje stakla i spojeva s kućištem (uslijed vjetera i snijega)
  - Otpornost na udarce (kamenje, tuča)



a)



b)



c)

Slika 44. a) Ispitna linija za mjerenje toplinskih karakteristika kolektora i b) sustava c) ispitivanje polimernog kolektora na simulatoru sunčevog zračenja [12]

**Standardna ispitivanja sustava prema HRN EN 12976-2:2019 uključuju (slika 44.):**

1. Otpornost na smrzavanje
2. Zaštitu od pregrijavanja
3. Tlačnu probu
4. Prikladnost za pitku vodu
5. Otpornost na vanjske utjecaje
6. Zaštitnu opremu (sigurnosni ventili, ekspanzijske posude..)
7. Označavanje
8. Toplinske karakteristike sustava:
  - 8.1 Određivanje pomoćne energije (el. grijači, kotao..)
  - 8.2 Određivanje "parazitske" energije (pumpa, regulacija)
  - 8.3 Određivanje energije odvedene potrošaču
  - 8.4 Određivanje udjela solarne u ukupnoj energiji
  - 8.5 Simulacije rada za razne pogonske i vremenske uvjete na temelju mjerenja
  - 8.6 Provjera pokrivanja potreba bez rada kolektora
9. Zaštita od povratnog strujanja
10. Električna sigurnost

### **Ispitivanje komponenti**

spremnika za potrebe PTV-a i grijanja:

- određivanje toplinskih gubitaka
- određivanje ukupne godišnje prikupljene energije u kombinaciji s različitim kolektorima ili regulacijom ili pumpama



**Ispitivanje materijala**

1. Određivanje propusnosti stakla
2. Određivanje karakteristika premaza apsorbira
3. Određivanje faktora promjene upadnog kuta stakla

**Posebna ispitivanja**

1. Paralelna ispitivanja dvaju usporedivih sustava
2. Ispitivanja kombiniranih sustava za pripremu PTV-a i grijanje prostora

## 5. Proračun solarnih sustava

### 5.1. Metode proračuna

Solarni toplinski sustav mora biti tako dimenzioniran da pokrije ukupnu potrebu ili jedan dio potrebe za toplinskom energijom za pripremu PTV-a i/ili grijanje prostora u određenom periodu godine, a da se osigura što veća učinkovitost i izbjegne pregrijavanje radnog fluida, odnosno zastoj rada u bilo kojem trenutku. Odluka o tome koliki će udio toplinskih potreba zgrade biti pokriven solarnim sustavom donosi se temeljem proračuna isplativosti (npr. perioda povrata investicije, neto iznosa sadašnje vrijednosti i dr.) te zakonskih uvjeta na nZEB zgrade (npr. maksimalna potrošnja primarne energije zgrade, minimalno ostvareni udio obnovljive energije u ukupnoj potrošnji energije). Da bi se ispravno dimenzionirali ključni dijelovi solarnog sustava (površina kolektora, volumen spremnika) provode se dinamičke simulacije rada na satnoj razini, koje pružaju uvid u ponašanje sustava tijekom promatranog perioda godine, tj. temperature kolektora i spremnika, toplinsku učinkovitost, prikupljenu sunčevu energiju, potrebnu energiju pomoćnog grijača. Konačna površina i nagib kolektora te volumen spremnika dobiju se ekonomskom analizom, pazeći pri tome da u sustavu nema pregrijanja.

U literaturi se mogu pronaći razne metode proračuna koje većinom ne pružaju detaljan uvid u ponašanje sustava, već daju podatke o prikupljenoj sunčevoj energiji samo za određenu površinu i tip kolektora te volumen spremnika (npr.  $f$ -chart metode ili  $\phi$ ,  $f$ -chart metode i dr. [1],[17]).

U ovom je priručniku opisana prethodno navedena dinamička metoda za simulaciju rada solarnog toplovodnog sustava. Na istom principu se temelji i metoda u normi za određivanje energetske svojstava zgrada i za energetske certifikiranje zgrada HRN EN 15316-4-3:2017 Energetska svojstva zgrada -- Metoda proračuna energetske svojstava i učinkovitosti sustava -- Dio 4-3: Sustavi proizvodnje topline, sunčani toplinski sustavi i fotonaponski sustavi. Ta je norma uvedena upravo iz

ranije spomenutih razloga, s obzirom na to da se prethodna verzija te norme iz 2008. g. [17] bazirala na općenitijim mjesečnih proračunima (*f-chart* metodi). No, zbog nedostatka odgovarajućeg računalnog programa, proračuni energetske svojstava zgrade sa solarnim sustavima za potrebe projektiranja i energetske certifikacije, još se uvijek provode prema normi iz 2008. g. [17].

U nastavku su dani osnovni izrazi na kojima se temelji simulacija rada toplovodnog solarnog sustava. Izrazi se odnose na kombinirani sustav s jednim spremnikom za zagrijavanje PTV-a i grijanje prostora. Korisna sunčeva energija prikupljena kolektorima u vremenu  $t$  može se odrediti iz eksperimentalnih podataka o učinkovitosti kolektora dobivenih od proizvođača prema

$$Q_{kol} = \eta_{kol} \cdot G_{sun} \cdot A_{kol} \cdot t \quad [\text{Wh}] \quad (5.1)$$

pri tome je  $t=1$  h.

$G_{sun}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] je prosječno sunčevo zračenje na plohu kolektora u određenom satu karakterističnog dana pojedinog mjeseca u godini. Podatci o mjerenim satnim vrijednostima sunčevog zračenja ( $G_{sun}t$ ) na horizontalnu plohu ( $0^\circ$ ) i plohu nagnutu pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali, prikazani su u Prilogu (tablice 6. i 7.).

Mjesečni i satni podaci DHMZ-a o ozračenju za različite nagibe ploha za područje Zagreba i Splita, a koji se koriste za određivanje energetske svojstva i energetske certifikaciju zgrada, mogu se pronaći na web stranicama nadležnog ministarstva (vidi Prilog). Satni meteo- podatci za proračun na druge nagibe ploha i za bilo koju lokaciju u Hrvatskoj (i veći dio svijeta) mogu se dobiti iz baze podataka Joint Research Centra PVGIS [4]. Pri tome je potrebno koristiti podatke o tipičnoj meteorološkoj godini (TMY) koji su dani za ravnu plohu. Za proizvoljne kutove nagiba kolektora potrebno je provesti zaseban proračun (više u [1]).

Toplinska energija, koja se odvodi iz spremnika tijekom potrošnje PTV-a pri protoku  $\dot{m}$  (kg/s), računa se prema

$$Q_{PTV} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{s1} - \vartheta_{svj}) \cdot t \quad [\text{Wh}] \quad (5.2)$$

gdje je  $\vartheta_{s1}$  temperatura vode u spremniku na početku svakog sata ( $t = 1$  h).  $\vartheta_{svj}$  je temperatura svježe vode koja se dovodi u spremnik ( $\vartheta_{svj} = 10 \div 15$  °C). Raspodjela potrošnje vode tijekom dana značajno utječe na dinamičko ponašanje sustava, odnosno njegovo dimenzioniranje. Protok PTV-a u pojedinom satu tijekom dana je teško točno odrediti. U pojednostavljenim proračunima se može uzeti da je potrošnja PTV-a jednoliko raspoređena kroz određeni dio dana kada se obično koristi (npr. 7:00-9:00 h, 15:00-22:00 h). Općenito, može se uzeti da potrošnja PTV-a referentne temperature  $45^\circ\text{C}$  u kućanstvima iznosi oko  $40 \div 60$  litara/dan po osobi, dok je u hotelima i autokampovima ona znatno viša i iznosi oko  $80 \div 120$  litara/dan po osobi. Ovdje treba napomenuti da se potrošnja vode u EN normama definira za referentnu temperaturu  $60^\circ\text{C}$ , pa je stoga njena potrošnja niža od prethodno navedenih vrijednosti (kako bi  $Q_{PTV}$  bio isti).

Toplinska energija akumulirana u spremniku je

$$Q_{sprem} = Q_{kol} \cdot \eta_g - Q_{PTV} \text{ [kWh]} \quad (5.3)$$

gdje  $\eta_g$  uzima u obzir toplinske gubitke cjevovoda i izmjenjivača ( $\eta_g \approx 0,95$ ).

Porast prosječne temperature spremnika zapremine  $V_{sprem}$  tijekom svakog sata je

$$\Delta \vartheta = \frac{Q_{sprem}}{V_{sprem} \cdot \rho \cdot c_p} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.4)$$

Temperatura vode u spremniku na kraju svakog sata je

$$\vartheta_{s,2} = \vartheta_{s,1} + \Delta \vartheta \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.5)$$

Gornji izrazi omogućuju izračun promjene temperature vode u spremniku tijekom karakterističnog dana u mjesecu. Ukupna površina kolektora i zapremina spremnika se onda određuju na način da se postignu željene temperature u spremniku u pojedinom mjesecu (npr. u ljetnim mjesecima maks. 55°C). Na kraju pojedinog dana postignuta temperatura spremnika se umanjuje za (2÷3)°C radi toplinskih gubitaka tijekom noći te se s tom vrijednošću ulazi u simulaciju rada za sljedeći dan, tj. u sljedeći korak iteracije. Nakon nekoliko koraka simulacije (koji predstavljaju par dana rada sustava) postiže se stacionarna raspodjela temperatura od jutarnjih do večernjih sati. Temeljem te temperature raspodjele provodi se proračun potrebne energije pomoćnog grijača (kotla, el. grijača) da bi se voda zagrijala na željenu temperaturu. Najveća temperatura PTV-a u spremniku bi u jednom dijelu dana morala iznositi najmanje 45°C radi sprječavanja razmnožavanja legionele, ali ne znatno viša (do 55°C) jer se time nepotrebno smanjuje učinkovitost kolektora. Iznos toplinske energije dodatnog izvora (el. grijač, kotao) računa se prema

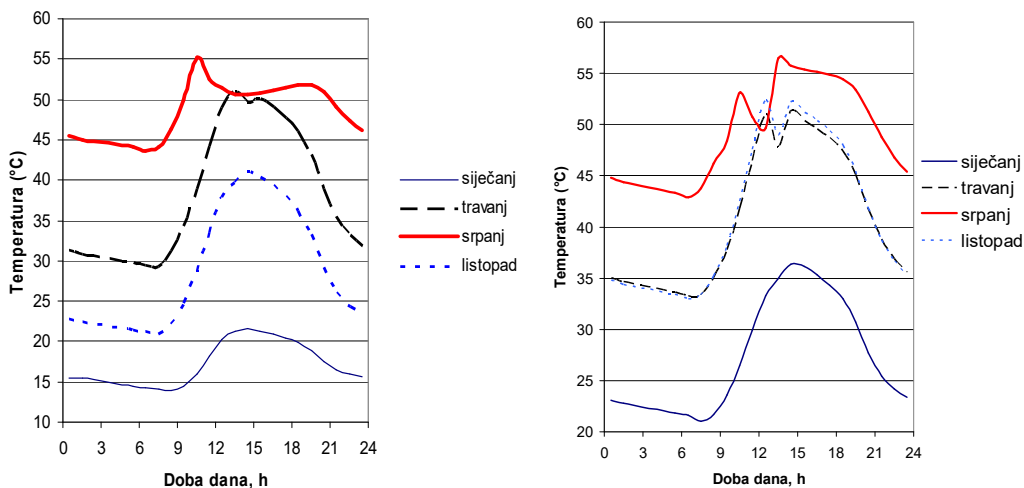
$$Q_{PTV} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (45^\circ\text{C} - \vartheta_{s,2}) \cdot t \text{ [kWh]} \quad (5.6)$$

U ovakvom modelu proračuna pretpostavljena je ujednačena temperatura u spremniku, tj. kao da se PTV dogrijava izvan spremnika (npr. pločastim izmjenjivačem) na temperaturu 45°C, tako da je temperatura u spremniku ovisna samo o toplini dovedenoj vodi u spremniku od strane kolektora i onoj odvedenoj zbog potrošnje PTV-a. U najvećem broju sustava to se dogrijevanje događa na izmjenjivaču u samom spremniku, no voda ima tu višu temperaturu (45°C) samo pri vrhu spremnika, tako da takva situacija ne utječe puno na prosječne temperature  $\vartheta_{s,1,2}$  s kojima se računa

učinkovitost kolektora u simulaciji. Detaljniji proračuni prema normi HRN EN 15316-4-3 [17] mogu uključiti i utjecaj temperaturne raspodjele u spremniku (u kombinaciji s normom HRN EN 15316-5:2023). U slučaju da se koristi kombinirani sustav za bilo radijatorsko, podno ili zidno grijanje, potrebno je u prethodni izraz za akumuliranu toplinu uvrstiti toplinu koja se iz spremnika odvodi u sustav grijanja (a koja predstavlja obično samo dio toplinske potrebe koja se određuje prema normi HRN EN 13790:2008 ili novijoj verziji HRN EN ISO 52016-1:2017).

## 5.2. Rezultati simulacije

Primjenjujući prethodno opisanu metodu, provedena je simulacija rada solarnog sustava za obiteljsku kuću korisne površine  $A_k = 100 \text{ m}^2$  s 4 ukućana, smještenu u dva različita klimatska područja - Zagrebu i Splitu [16]. U dijagramu na slikama 45.a,b prikazana je izračunata temperatura vode u spremniku tijekom karakterističnog dana u pojedinom mjesecu. Površina kolektora je tako određena da se u potpunosti pokrije potreba za zagrijavanjem PTV-a u srpnju i kolovozu. Rezultati očekivano pokazuju da je srednja godišnja učinkovitost kolektora veća u Splitu  $\eta_{kol} = 0,60$  nego u Zagrebu  $\eta_{kol} = 0,49$ . Zanimljivo je primijetiti kako je tijekom ljetnih mjeseci efikasnost kolektora  $\eta_{kol} = 0,62$  u Splitu tek nešto veća nego u zimskim mjesecima  $\eta_{kol} = 0,58$ . Tako male razlike su posljedica nižih temperatura u spremniku zimi (što podiže učinkovitost) i s druge strane nižih vrijednosti temperature zraka i ozračenosti (što pak snižava učinkovitost). U Zagrebu je učinkovitost kolektora zimi  $\eta_{kol} = 0,4$  znatno niža nego ljeti  $\eta_{kol} = 0,56$ . To je posljedica većih razlika temperatura zraka i iznosa ozračenosti zimi i ljeti no što je to slučaj u Splitu.



a)

b)

Slika 45. Simulirane vrijednosti promjene temperatura u spremniku PTV-a  $\mathcal{S}_s$  tijekom karakterističnog dana za solarni sustav u a) Zagreb i b) Split [16]

### 5.3. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza se često provodi temeljem perioda povrata investicije ili neto sadašnje vrijednosti. Uz to i visina investicije često u konačnici određuje dimenzije komponenti solarnog sustava, i to prvenstveno ukupnu površinu kolektora kojoj se prilagođava zapremina spremnika. Obično manji spremnici imaju kraći period povrata investicije, ali i smanjuju učinkovitost sustava (zbog viših temperatura). U postupku optimizacije nastoji se odabrati ono rješenje koje daje najmanji period povrata investicije.

U investiciju ulaze troškovi kolektora, spremnika, regulacije, pumpe, ekspanzijske posude, ventila, cijevi, ugradnje i dr. Dakako, ukoliko su spremnik i sva pripadajuća armatura dio konvencionalnog sustava koji bi se ionako morao ugraditi, onda investicija u solarni sustav obuhvaća samo one dijelove koji se moraju dodatno ugraditi (kolektori, regulacija, dodatne cijevi, pumpe, razlika u cijeni solarnog spremnika i manjeg spremnika u konvencionalnom sustavu i dr.). Najbolji način određivanja investicije u solarni dio sustava je razlika između ukupne cijene konvencionalnog sustava kombiniranog sa solarnim i samog konvencionalnog sustava. Kod gradnje nove zgrade ta razlika često može biti manja, jer se odnosi samo na one dijelove koji se dodatno moraju ugraditi (kolektori, regulacija, dodatne cijevi, pumpe, razliku u cijeni solarnog spremnika i manjeg spremnika u konvencionalnom sustavu i dr.), a kod nadogradnje postojećeg sustava ta razlika može biti veća, jer obuhvaća puni trošak ugradnje novog spremnika sa svom armaturom (zbog nemogućnosti spajanja kolektora na postojeći spremnik).

Uštede na troškovima za gorivo, koje se ostvaruju korištenjem solarnog sustava tijekom godine, određuju se iz rezultata proračuna, odnosno prethodno opisanih simulacija. Iznosom su jednake cijeni za određeno gorivo koje bi se moralo potrošiti da se dobije količina energije jednaka iskorištenoj sunčevoj energiji za pripremu PTV-a i grijanje prostora. Ta se ušteda može izračunati prema

$$S = \frac{\sum Q_{kol} \eta_g}{\eta_{kotalo}} / H_d \cdot C_G \quad [\text{EUR/a}] \quad (5.7)$$

gdje je  $H_d$  donja ogrjevna moć goriva ( $\text{J/kg}$ ,  $\text{J/m}_n^3$ ), a  $C_G$  je cijena goriva ( $\text{EUR/kg}$ ,  $\text{EUR/m}_n^3$ ).  $\sum Q_{kol} \eta_g$  ( $\text{J/a}$ ) je ukupno prikupljena godišnja sunčeva energija iskorištena za zagrijavanje vode, a  $\eta_{kotalo}$  je učinkovitost kotla.

Treba napomenuti da ovdje nisu uračunate uštede vezane uz smanjene toplinske gubitke konvencionalnog dijela sustava. One posebice dolaze do izražaja ljeti, kada je smanjena potrošnja energije (samo za pripremu PTV-a) a dodatni izvor topline (kotalo) mora biti veći dio vremena u stanju pripravnosti (stand-by režim rada) kako bi održavao temperaturu vode u spremniku. Korištenje solarnih sustava omogućuje rad samo s povremenim uključivanjem dodatnog izvora

topline (tj. on ne mora biti u stanju pripravnosti cijelo vrijeme) čime se postižu znatne uštede i podiže prosječna godišnja efikasnost konvencionalnog dijela sustava (do 30%). Za procjenu tih ušteda potrebno je koristiti proračune iz skupine normi HRN EN 15316. U tom slučaju, kao i kod procjene investicije, i ovdje se može koristiti pristup da se ušteda  $S$  izračuna kao razlika između ukupnih troškova konvencionalnog sustava i kombiniranog konvencionalnog sa solarnim sustavom.

Jednostavni period povrata investicije računa se prema

$$P = \frac{C_{invest}}{S} \quad [a] \quad (5.8)$$

U prethodnom izrazu radi jednostavnijeg izračuna nije uzet u obzir utjecaj kamata i inflacije. Ukoliko se investicija financira bankarskim kreditom, utjecaj kamate bi produžio period povrata. S druge strane, utjecaj inflacije skraćuje period povrata.

## 5.4. Određivanje površine kolektora i zapremine spremnika

U tablici 1. dane su optimalne vrijednosti površina kolektora i zapremine spremnika solarnih sustava za pripremu PTV-a različitih veličina, ovisno o broju osoba, i to za klimatska područja Zagreba i Splita. Optimalna površina kolektora, ovisno o broju osoba, prikazana je dijagramski na slici 46. Također, za sve te sustave je izračunat period povrata investicije, slika 47. U proračunu je uzeta relativno visoka potrošnja PTV-a referentne temp. 45°C u iznosu od 80 Lit/dan po osobi. To predstavlja prosječnu vrijednost potrošnje u solarnim sustavima u rezidencijalnom i turističkom sektoru (apartmani, autokampovi..). U proračunima energetske svojstava zgrada i za energetske certifikacije koriste se znatno niže vrijednosti potrošnje vode koje odgovaraju 12 kWh/m<sup>2</sup> za obiteljsku kuću i 16 kWh/m<sup>2</sup> za stambenu zgradu. To rezultira i nižim vrijednostima prikupljene toplinske energije (<500 kWh/m<sup>2</sup> površine kolektora) u odnosu na vrijednosti koje se dobivaju prema simulacijama (550-600 kWh/m<sup>2</sup> za Zagreb i 850-1000 kWh/m<sup>2</sup> za Split), jer niža potrošnja vode povlači za sobom više temperature u spremniku. Stoga se može reći da su ti proračuni na strani sigurnosti. Kao što je već prije navedeno, smanjenje zapremine spremnika također dovodi do smanjenja prikupljene sunčeve energije zbog viših temperatura, no ono smanjuje investicijske troškove pa i takvo rješenje može smanjiti period povrata investicije. U ovom primjeru sustavi su optimizirani prema dva kriterija:

1. da se u potpunosti pokriju energetske potrebe za pripremom PTV-a u srpnju i kolovozu,
2. da se postigne minimalan period povrata investicije.

Investicijski troškovi su procijenjeni temeljem prosječnih tržišnih cijena opreme različitih proizvođača i cijena kolektora prosječnih toplinskih karakteristika. Kod sustava za pripremu PTV-a sa 6 i više osoba, koji ionako moraju imati spremnik sa svom pripadajućom armaturom (npr. ventili,

ekspanzijske posude, pumpe i dr.), u investiciju solarnog dijela sustava su uračunati samo troškovi za kolektore, cjevovode, regulaciju, "solarni set" (pumpa, ekspanzijska posuda, ventili i dr.) i ugradnju, te razlika u cijeni između sunčanog spremnika i onog za konvencionalni sustav. Rezultat toga je naglo smanjenje perioda za povrat investicije, u odnosu na sustave kod kojih je broj osoba manji od 6.

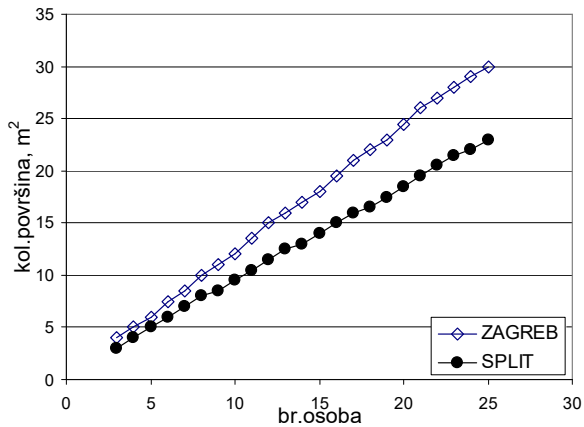
Kako se vidi iz rezultata (slika 46.), odnos potrebne površine kolektora i broja osoba je linearan. U Zagrebu je za 1 osobu potrebno cca 1,25 m<sup>2</sup> kolektora, a u Splitu je taj odnos 1:1 (tablica 1).

U klimatskom području Splita ostvaruju se značajno niži (30-50%) periodi povrata investicije nego u području Zagreba, što je sukladno većoj godišnjoj ozračenosti kolektora (40%) i višim temperaturama zraka u Splitu. Također, period povrata investicije pada s veličinom sustava, i to intenzivnije kod manjih sustava. Kako je već ranije spomenuto, kada bi u izračun uključili uštede zbog smanjenja toplinskih gubitaka konvencionalnog sustava, dobile bi se još niže vrijednosti povrata investicije (no to vrijedi samo za konvencionalne sustave s toplovodnim kotlovima, a ne i za one s protočnim bojlerima koji nemaju tzv. stand-by gubitke).

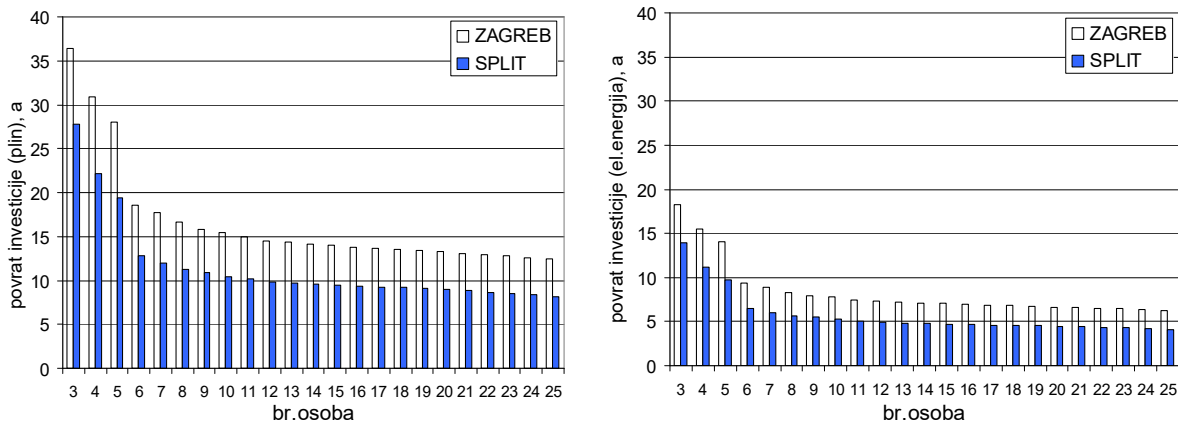
Broj osoba	Površina kolektora, m <sup>2</sup>		Spremnik Lit.	Iskorištena sun. energija, kWh/a		Energija za PTV kWh/a	Povrat invest.-plin.,a		Povrat invest.-el.energija,a	
	ZAG	SPLIT		ZAG	SPLIT		ZAG	SPLIT	ZAG	SPLIT
3	4	3	200	2320	2850	3574	36,4	27,8	18,2	13,9
4	5	4	200	2900	3800	4765	30,9	22,2	15,5	11,1
5	6	5	250	3480	4750	5957	28,1	19,4	14,1	9,8
6	7,5	6	300	4350	5700	7148	18,6	12,8	9,3	6,4
7	8,5	7	350	4930	6650	8339	17,7	11,9	8,9	6,0
8	10	8	400	5800	7600	9531	16,6	11,3	8,3	5,7
9	11	8,5	450	6380	8075	10722	15,9	10,9	8,0	5,5
10	12	9,5	500	6960	9025	11913	15,5	10,5	7,8	5,3
11	13,5	10,5	550	7830	9975	13105	14,9	10,1	7,5	5,1
12	15	11,5	600	8700	10925	14296	14,5	9,9	7,3	4,9
13	16	12,5	650	9280	11875	15487	14,3	9,6	7,2	4,8
14	17	13	700	9860	12350	16679	14,2	9,6	7,1	4,8
15	18	14	750	10440	13300	17870	14,0	9,5	7,0	4,7
16	19,5	15	800	11310	14250	19061	13,8	9,3	6,9	4,7
17	21	16	850	12180	15200	20253	13,6	9,2	6,8	4,6
18	22	16,5	900	12760	15675	21444	13,5	9,2	6,8	4,6
19	23	17,5	950	13340	16625	22635	13,5	9,1	6,7	4,5
20	24,5	18,5	1000	14210	17575	23827	13,3	8,9	6,7	4,5
21	26	19,5	1050	15080	18525	25018	13,1	8,8	6,6	4,4
22	27	20,5	1100	15660	19475	26209	13,0	8,7	6,5	4,4
23	28	21,5	1150	16240	20425	27401	12,8	8,5	6,4	4,3
24	29	22	1200	16820	20900	28592	12,6	8,4	6,3	4,2
25	30	23	1250	17400	21850	29783	12,4	8,2	6,2	4,1

Tablica 1. Tehničke i ekonomske karakteristike optimiziranih solarnih sustava različitih veličina, u odnosu na broj osoba za područje Zagreba i Splita (povrat investicije izražen u godinama [a]) [9]





Slika 46. Optimalna površina kolektora u ovisnosti o broju osoba [9]



a)

b)

Slika 47. Izračunati period povrata investicije (godina) u ovisnosti o broju osoba, a) usporedba s plinom, b) usporedba s električnom energijom kao energentom u konvencionalnom dijelu sustava [9]

## 6. Mjere za povećanje učinkovitosti solarnih toplovodnih sustava

1. Za objekte s više od 4 osobe prilikom projektiranja sustava grijanja i pripreme PTV-a i/ili kupovine opreme treba predvidjeti mogućnost spajanja spremnika PTV-a na solarne kolektore, jer se uz prikupljenu sunčevu energiju time smanjuju i toplinski gubitci sustava (posebice izvan sezone grijanja)
2. Za veće sustave od 4 m<sup>2</sup> kolektorske površine, obavezno napraviti proračun veličine komponenti sunčanog sustava (kolektorske površine, zapremine spremnika)

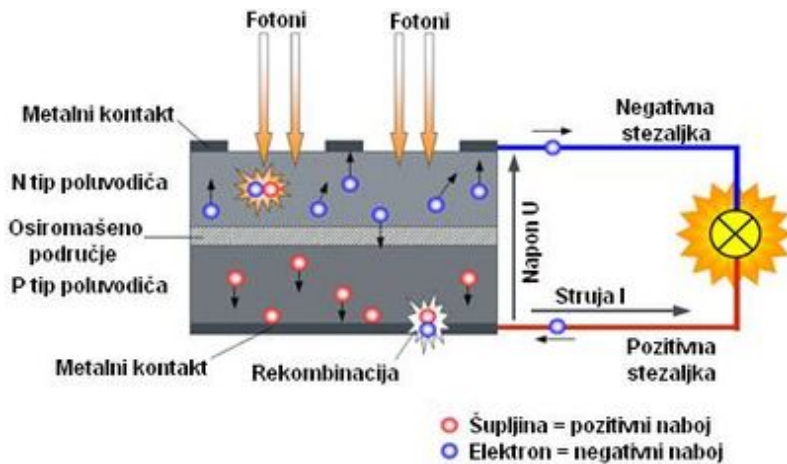
3. Za veće sustave od 4 m<sup>2</sup> odrediti potrebnu visinu dizanja pumpe u kolektorskom krugu (temeljem proračuna pada tlaka) kako bi se izbjegao pad učinkovitosti zbog protoka manjih od 20-30 Lit/h po m<sup>2</sup> kolektora, odnosno preveliki pad tlaka i potrošnja za pogon pumpe kod vrijednosti većih od 50-70 litara/h·m<sup>2</sup>, a koje praktički ne dovode do povećanja efikasnosti kolektora
4. Kod većih solarnih sustava sa potrebnom zapreminom spremnika > 800-1000 litara, predvidjeti ugradnju dvaju manjih spremnika umjesto jednog većeg, jer se time postiže brže zagrijavanje vode na potrebnu temperaturu i povećava učinkovitost sustava radi nižih prosječnih temperatura na polazu kolektorskog kruga, te omogućuje modularni način rada, ovisno o potrošnji i iznosu sunčevog zračenja (npr. režim rada ljeto-zima).
5. Sustave i regulaciju projektirati na način da se u spremnicima održavaju temperature <55°C zbog što učinkovitijeg rada kolektora .
6. Izolirati spremnik i sve cjevovode u sustavu
7. Vakuumske kolektore koristiti samo kada je potrebno prikupiti veću količinu sunčeve energije zimi, jer ljeti rade s nižom učinkovitošću od pločastih i znatno su skuplji
8. Serijski spoj kolektora koristiti samo kada se proračunom dokaže da izmjenjivači topline u spremniku ne bi u zimskim mjesecima mogli postići temperature >30-35°C potrebne za rad podnog sustava grijanja.
9. Sustave projektirati tako da se u potpunosti pokriju potrebe za PTV-om u ljetnim mjesecima kako bi se izbjegla potreba za paljenjem kotla i zagrijavanjem velikog volumena vode u njemu i priključnim cjevovodima. Isto ne vrijedi ako se koristi protočni bojler.
10. U slučajevima iz prethodne točke preporučuje se direktna ugradnja el. grijača u spremnik, što je tada ekonomičnije rješenje od korištenja toplovodnog kotla
11. Prilikom projektiranja i izvođenja sustava za grijanje prostora koristiti niskotemperaturna podna i zidna grijanja, radi povećanja efikasnosti kolektora i sustava u cjelini
12. U prethodnom slučaju se preporuča ugradnja pločastog izmjenjivača koji omogućava direktno zagrijavanje vode u sustavu grijanja u situacijama kada je temperatura u donjem dijelu spremnika viša od temperature sustava grijanja.
13. Solarne sustave za grijanje prostora potrebno je dimenzionirati prema mogućnosti korištenja viškova topline tijekom ljeta, a koji se, primjerice, mogu iskoristiti za zagrijavanje bazenske vode ili apsorpcijsko hlađenje.
14. Provjeravati tlak u kolektorskom krugu barem jednom tjedno i po potrebi nadopuniti radni fluid da se izbjegnu zastoji u radu i pregrijavanje kolektora.
15. Redovito jednom godišnje obaviti čišćenje izmjenjivačkih površina, dopunu radnog fluida i kontrolu svih ostalih dijelova sustava (ekspanzijskih posuda, sigurnosnih ventila i dr.) te priključaka (posebno na kolektorima).

## 7. Fotonaponske ćelije i sustavi

### 7.1. Princip rada i karakteristike fotonaponske ćelije

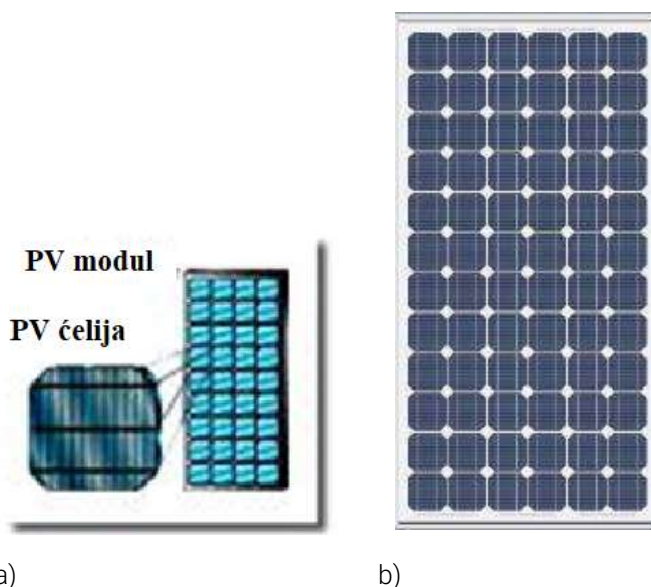
Fotonaponske (PV) ćelije omogućuju direktnu pretvorbu energije sunčevog zračenja u električnu energiju korištenjem fotoelektričnog efekta. Većina danas komercijalno korištenih fotonaponskih ćelija napravljena je od poluvodiča silicija (Si), pa će na tom primjeru biti objašnjen princip rada. Silicijska fotonaponska ćelija nastaje spajanjem dva tanka sloja P i N - tipa poluvodiča (slika 48.). Pozitivno nabijen P - tip sadrži male količine primjese (obično fosfor) ubačenih u kristalnu rešetku silicija koje imaju nižu valenciju (broj slobodnih elektrona u zadnjoj ljusci) od samog silicija. Negativno nabijeni N - tip nastaje dodavanjem druge primjese (obično bor) koja ima veću valenciju od silicija. Zbog takvog dopiranja u kristalnoj strukturi silicija dolazi do manjka slobodnih elektrona u međuatomskim vezama kod P - tipa, tj. do pojave tzv. "šupljina", odnosno viška slobodnih elektrona kod N - tipa. Spajanjem P i N - tipa poluvodiča dolazi do prelaska elektrona iz N - tipa u P - tip u ograničenom području, neposredno oko PN - spoja, koje se zbog toga naziva "osiromašeno" od nositelja naboja. Pri tome se oko PN - spoja uspostavlja električno polje koje djeluje u smjeru iz P u N - tip, a koje je ključno za osiguravanje protoka elektrona kroz spoj. Kada se fotonaponska ćelija osvjetli, fotoni izbijaju elektrone iz međuatomskih veza (zadnje ljuske) te, pod utjecajem uspostavljenog električnog polja u osiromašenom području, dolazi do njihovog pojačanog kretanja prema N - tipu, dok se "šupljine" kreću prema P - tipu. Kada se metalni kontakti na P i N dijelu spoje s vanjskim trošilom, elektroni će se kretati preko vanjskog električnog kruga prema P - tipu, popunjavajući tamo "šupljine" (rekombinacija) te opet kroz ćeliju preko PN spoja prema kontaktima N- tipa.

Jakost tako nastale električne struje (tj. protok elektrona u jedinici vremena) proporcionalna je iznosu sunčevog zračenja. Gustoća električne struje je oko  $200 \text{ A/m}^2$ , što daje jakost struje do  $2,5 \text{ A}$  po ćeliji. Najveći napon iznosi oko  $0,6 \text{ V}$  (kada ćelija nije spojena na vanjsko trošilo) i vrlo malo ovisi o sunčevom zračenju.



Slika 48. Fotonaponska ćelija - princip rada PN spoja [12]

Fotonaponske ćelije se spajaju u seriju (slika 49.a) kako bi se dobile veće vrijednosti napona (npr. 30-40 V). Potom se serijski nizovi spajaju u paralelu, kako bi se postigli veći iznosi jakosti struje (npr. 10-15 A), odnosno željena snaga. Na taj način nastaju moduli u obliku panela (slika 49.b), na kojima su fotonaponske ćelije učvršćene i zaštićene od atmosferskih utjecaja. Na same fotonaponske ćelije nanesen je antirefleksijski premaz, radi bolje apsorpcije sunčevog zračenja. Ćelije se najčešće pričvršćuju ('enkapsuliraju') na polimernu podlogu i spajaju međusobno metalnim kontaktima. Fotonaponski moduli (PV moduli) sastoje se još i od metalnog okvira (npr. Al), pokrova (npr. kaljeno staklo), zaštitne folije na pozadini (npr. PE), priključne kutije i kablova.



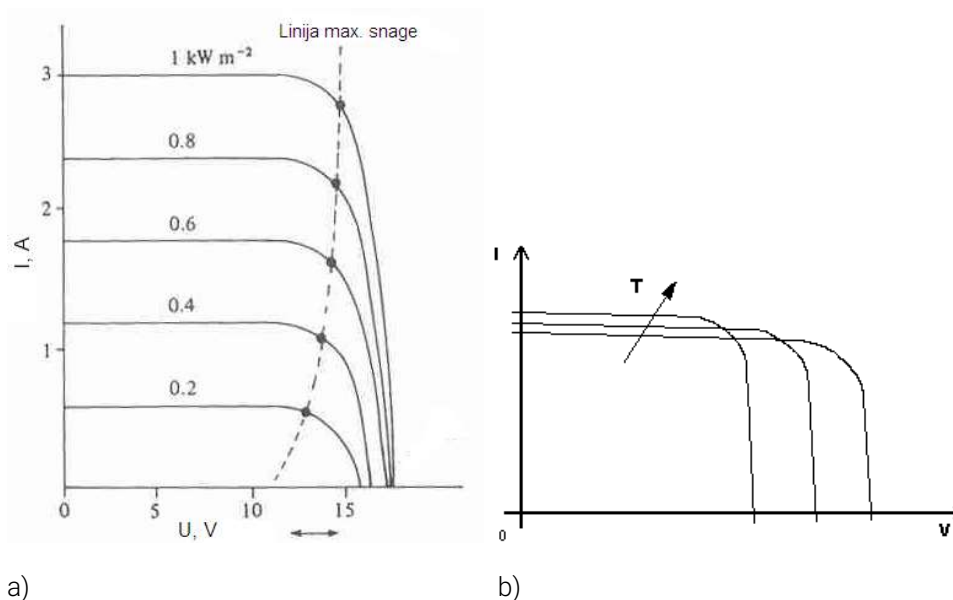
Slika 49. a) Spajanje fotonaponskih ćelija u modul (monokristal), b) fotonaponski modul u obliku panela, [12]

Na Slici 50.a prikazana je radna karakteristika fotonaponskog modula za različite vrijednosti sunčevog zračenja. Jakost struje fotonaponske ćelije najviše ovisi o iznosu sunčevog zračenja, dok napon puno manje. Najveća snaga ćelije ostvaruje se u točki (MPP) koja otprilike odgovara 75% vrijednosti napona  $V_{oc}$  otvorenog strujnog kruga kada je  $I=0$ . Da bi se radna točka ćelije stalno držala blizu krivulje maksimalne snage, neovisno o sunčevom zračenju, potrebno je ugraditi specijalni

elektronski regulator opterećenja, tzv. MPP regulator, koji varira otpor strujnog kruga, kako bi ostvario najveći umnožak  $P=U \times I$  (smanjuje izlazni napon u odnosu na ulazni).

Ovdje je bitno napomenuti da povećanje temperature ćelije dovodi do snižavanja  $V_{oc}$  i povećanja  $I_{sc}$  (struje kratkog spoja kad je  $U=0$  V), što u konačnici dovodi do snižavanja najveće snage ćelije, slika 50.b. Zbog toga je potrebno u eksploataciji osigurati što bolje hlađenje fotonaponskih modula.

Najveća (nazivna) snaga fotonaponskog modula od npr. polikristalnog silicija površine  $1 \text{ m}^2$  iznosi  $150 \text{ W}$  pri referentnom sunčevom zračenju od  $1000 \text{ W/m}^2$  i temperaturi ćelije od  $25^\circ\text{C}$ , uz učinkovitost pretvorbe sunčeve u električnu energiju od 15%. Za usporedbu, solarni toplovodni kolektor identične površine bi pri sunčevom zračenju od  $1000 \text{ W/m}^2$  imao snagu (toplinski učin) od oko  $600 \text{ W}$  pri ljetnim uvjetima rada (tj. pri toplinskoj učinkovitosti od 60%). Ovdje treba naglasiti da se toplovodnim kolektorima dobiva toplinska, a fotonaponskim modulima električna energija, koja se smatra "vrjednijim" oblikom energije, jer se može izravno pretvoriti u toplinsku energiju i u mehanički rad. Kako bi se usporedila dobivena električna i toplinska energija, može se razmotriti koliko bi se električnom energijom iz PV modula proizvelo toplinske energije u kombinaciji s dizalicom topline (tj. pogonom njenog kompresora). U takvoj kombinaciji bi se iz navedenih  $150 \text{ W}$  na kondenzatoru dizalice topline, pri ljetnim uvjetima rada, dobilo u prosjeku isto oko  $600 \text{ W}$  toplinskog učina. Dakako, za vjerodostojniju usporedbu solarnog toplovodnog i kombiniranog sustava s PV modulima i dizalicom topline, potrebno je provesti proračune dobivene toplinske energije za cijelu godinu te uzeti u obzir i cijenu investicije, troškove energije, održavanja, zamjene dijelova, inflacije i dr.



Slika 50. a) Ovisnost napona  $U$  i jakosti struje  $I$  o sunčevom zračenju, b) promjena radne karakteristike s temperaturom PV modula [3]

## 7.2. Vrste fotonaponskih ćelija

Fotonaponske ćelije se mogu podijeliti na:

1. Monokristalne
2. Polikristalne
3. U tankom filmu
4. Ostale tipove

1. Monokristalne ćelije su proizvedene od Si visoke čistoće, imaju jednoliku strukturu kristalne rešetke. Proizvodni proces je skup i obuhvaća izvlačenje komada monokristala Si (sjemena) iz rastaljenog polikristalnog Si, oko kojega se formira novi kristal cilindričnog oblika (ingot) koji se potom laserski reže na tanke pločice osmerokutnog oblika. U novije vrijeme koriste se drugi jeftiniji postupci - npr. izvlačenje traka Si iz rastaljenog mono ili polikristalnog Si.

Monokristalne ćelije imaju visoke nazivne (vršne) učinkovitosti pretvorbe sunčeve u električnu energiju, koje se kod komercijalnih modela kreću oko 20-22% (kod najboljih modela do 26%). Zbog visoke cijene koriste se onda kada su potrebne veće snage na manjem prostoru i često se montiraju na platforme za praćenje sunca (time se postižu do 30% veće vrijednosti sunčevog ozračenja u odnosu na fiksne kutove montaže, slika 51.).

2. Danas se za nove sustave najviše koriste jeftinije polikristalne ćelije (niža investicija u proizvodni pogon i niži troškovi proizvodnje) čija je struktura kristala manje pravilna, što dovodi do povećane rekombinacije elektrona i 'šupljina' na granicama kristala te posljedično manje učinkovitosti u odnosu na monokristalne. Postupak proizvodnje se temelji na taljenju sirovog Si, njegovim lijevanjem u blokove, koji se potom režu na pločice kvadratnog oblika, što je povoljniji oblik, zbog manjeg gubitka korisne površine modula, nego kod monokristalnih ćelija. Također, takav postupak proizvodnje omogućuje izrezivanje pločica većih dimenzija, koje su prikladnije za ugradnju u module. Nazivne učinkovitosti pretvorbe sunčeve u električnu energiju iznose oko 14-17% (kod najboljih modela do 22%).

3. Komercijalno se koriste i fotonaponske ćelije proizvedene nanošenjem tankog filma poluvodičkog materijala na neku podlogu (staklo, plastiku, čelik, aluminij) bilo kojeg oblika. Materijali koji se najčešće nanose su silicij (plin silan  $\text{SiH}_4$ ), kadmij i bakar. Takve ćelije su bitno jeftinije od prethodno opisanih, no neke imaju i znatno nižu učinkovitost koja se kreće oko 6% za najčešće korišteni amorfnu Si (4% nakon izlaganja sunčevom zračenju). Od ostalih tipova treba spomenuti  $\text{Cl(G)S}$  ćelije (Copper Indium Gallium Selenide), koje nemaju degradaciju učinkovitosti nakon izlaganja sunčevom zračenju, ali su toksične (npr. ukoliko dođe do oštećenja ćelije) te imaju učinkovitost od 13% (najbolji modeli do 21%). Također se koriste i  $\text{CdTe}$  ćelije (Cadmium Telluride), koje su također toksične, a imaju učinkovitost od 16% (najbolji modeli do 22%).

4. Od ostalih tipova solarnih ćelija treba spomenuti:

- tzv. višespojne ćelije (Multi junction) koje se sastoje od dvaju ili više PN - spojeva, nanosenih u



slojevima jedan iznad drugoga, koji apsorbiraju sunčevo zračenje različitih valnih duljina. Na taj se način postiže znatno veće učinkovitosti u odnosu na pojedinačne vrste PN - spojeva, npr. od 42% za trospojnu ćeliju: galij arsenid (GaAs)-germanij-indij. Ovakvi tipovi ćelija se najčešće koriste za napajanje satelita, bespilotnih letjelica i sl.

- koncentrirajuće, fluorescentne koncentrirajuće (zračenje u uskom području valnih duljina), silikonske sfere (fleksibilan materijal), fotoelektrične ćelije ( $\text{TiO}_2$ )
- fotonaponske ćelije sljedeće generacije: organske, ćelije s osjetljivom bojom (DSC), perovskitne, kvantne točke (Quantum dot cells, QDSC) i dr.

Ovdje je potrebno napomenuti da su sve navedene učinkovitosti pretvorbe sunčeve u električnu energiju nazivne (vršne), odnosno određene pri standardiziranim uvjetima na energetski tok sunčevog zračenja od  $1000 \text{ W/m}^2$  i temperaturu PV modula od  $25^\circ\text{C}$ . U eksploataciji su te vrijednosti niže (20-30%) zbog degradacije učinkovitosti kroz vrijeme (cca 1% svake godine) te viših temperatura ćelije (obično do  $50^\circ\text{C}$ ). Razlozi za relativno niske nazivne učinkovitosti većine komercijalno korištenih fotonaponskih ćelija su gubitci koji nastaju zbog prevelike ili premale količine energije koju imaju fotoni u pojedinom području valnih duljina, u odnosu na iznos potreban za izdvajanje elektrona iz međuatomskih veza. Neiskorišteni dio apsorbirane sunčeve energije se pretvara u toplinu. Ostali gubitci nastaju zbog otpora u samom materijalu i spojevima, zasjenjenja od metalnih kontakata na površini, tzv. rekombinacijskih struja u osiromašenom području, zbog apsorpcije i refleksije od pokrovnog zaštitnog stakla te zbog refleksije od samog poluvodičkog materijala. Kako je pokazano na prethodnom dijagramu, učinkovitost fotonaponskih ćelija, a time i snaga, padaju s povećanjem njihove temperature. Iz tih je razloga potrebno osigurati što bolje hlađenje montiranih modula (npr. odmicanjem modula od površine krova - tzv. provjetravani moduli, slika 51.). Jedan od načina kako osigurati kvalitetno hlađenje, i pri tome dodatno iskoristiti apsorbiranu sunčevu energiju, fotonaponski su moduli kombinirani s cijevnim izmjenjivačem za zagrijavanje tople vode smješteni na poleđini modula (slika 52.). Takav hibridni modul pri tome ima najveću učinkovitost pretvorbe sunčeve u toplinsku energiju  $\eta_o$  oko 50% (pločasti kolektori imaju  $\eta_o$  oko 80%). Ovakvi su se hibridni moduli pokazali jednako skupim kao i rješenja sa zasebnim PV - modulima i solarnim kolektorima, pri čemu je učinkovitost toplovodnog dijela hibridnog modula niža od one kod zasebnog kolektora, ali je potrebna manja površina za ugradnju.





Slika 51. Montaža PV - modula – primjeri [18]



Slika 52. Fotonaponski modul kombiniran s cijevnim izmjenjivačem na poledini za zagrijavanje tople vode [12]

### 7.3. Fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustavi se mogu podijeliti na:

- Izvanmrežne (off grid)
- Mrežne (grid)

Osnovni dijelovi izvanmrežnog fotonaponskog sustava su fotonaponski paneli, punjiva baterija (akumulator) (regulator i pretvarač istosmjerne u izmjeničnu struju (DC/AC pretvarač), slika 53. Punjenje/praznjenje baterije se regulira posebnim regulatorom koji ima zadaću spriječiti prepunjenost ili preveliku ispražnjenost baterije, što može bitno smanjiti vijek trajanja baterije ili je pak uništiti. Shunt (s premosnikom) i serijski regulatori punjenja sprječavaju preopterećenje baterije tako da prekinu punjenje kada se dosegne određena gornja granica napona. Kada se baterija isprazni i dosegne određeni niži prag napona, regulator se ponovno spaja na solarne ćelije. S druge

strane PMW regulator kontinuirano puni bateriju. U sklopu regulatora često se nalazi i prethodno opisani MPP regulator.

DC/AC pretvarač (inverter, izmjenjivač) koristi se za pretvorbu istosmjerne struje napona PV modula u izmjeničnu struju napona 230 V prikladnu za pogon kućanskih aparata. Pretvorba kemijske energije akumulatora (baterija) natrag u električnu te ostali gubitci u navedenim regulatorima i pretvaračima, dodatno smanjuju efikasnost pretvorbe sunčeve u korisnu električnu energiju.

Osnovni dijelovi mrežnih fotonaponskih sustava su fotonaponski paneli, pretvarač istosmjerne u izmjeničnu struju te brojila predane/preuzete električne energije u/iz mreže (slika 54.).

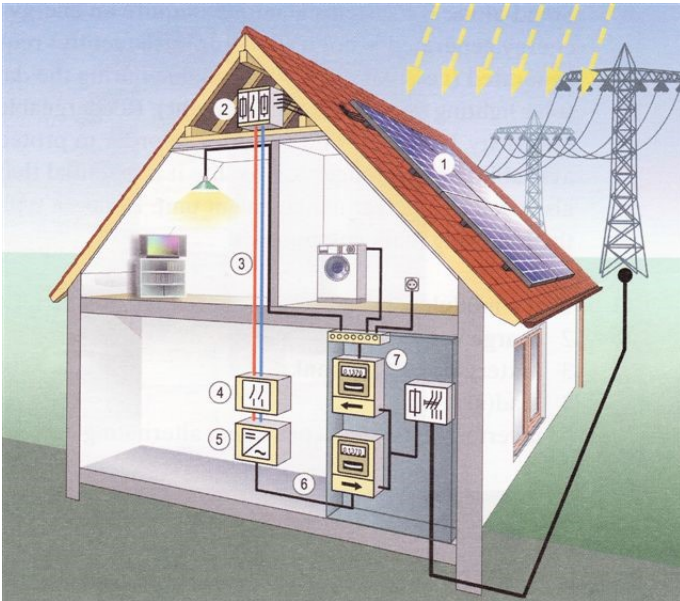
Kod oba tipa sustava kao dijelove još treba spomenuti priključnu kutiju PV modula, glavnu sklopku za odvajanje PV modula od kućne mreže, priključni ormar. Također, u fotonaponske sustave često se ugrađuje i zaštita od prenapona zbog udara groma kojem su paneli jako izloženi zbog položaja i velike površine.

Danas se na tržištu nude fotonaponski sustavi (solarne elektrane) po sistemu 'ključ u ruke', koji imaju sve prethodno navedene dijelove, uključivo nosače za montažu, kablove, konektore i ostalu sitnu opremu. Nazivne snage takvih sustava se kreću od 2 kW, 3 kW, 5 kW, 10 kW na više. Cijene opreme i ugradnje su ovisne o veličini sustava (veći su specifično jeftiniji). Tomu još treba pridodati troškove projekta, dozvola i priključak na mrežu.

Proizvođači najčešće deklariraju nazivnu (vršnu) snagu, onu pri sunčevom zračenju od  $1000 \text{ W/m}^2$  i temp. modula  $25^\circ\text{C}$ . Uz taj podatak u specifikacijama se ponekad daje i nazivna snaga pri sunčevom zračenju od  $800 \text{ W/m}^2$  i temperaturi okolišnog zraka od  $20^\circ\text{C}$ , pri brzini vjetra  $1 \text{ m/s}$ . Uz sve to se još nalaze podatci o temperaturnom području, maksimalnom naponu sustava, maksimalnoj struji (prekidna struja osigurača i reverzna struja) te temperaturnom koeficijentu snage (struje kratkog spoja  $I_{sc}$  i napona otvorenog kruga  $V_{oc}$ ).



Slika 53. Izvan mrežni fotonaponski sustav - osnovni dijelovi [12]



1. fotonaponski moduli
2. spojna kutija sa zaštitnom opremom
3. kablovi istosmjernog razvoda
4. glavna sklopka za odvajanje
5. DC/AC pretvarač
6. kablovi izmjeničnog razvoda
7. brojila predane i preuzete električne energije

Slika 54. Mrežni fotonaponski sustav - osnovni dijelovi, [18]

## 7.4. Proračuni fotonaponskih sustava

### 7.4.1. Postupak

Za brze proračune godišnje proizvedene električne energije može se koristiti vrijednost od oko 160 kWh/m<sup>2</sup>a po 1 m<sup>2</sup> instaliranih PV panela (polikristalni moduli nazivne učinkovitosti od 15%, osrednje dobro ventilirani) u kontinentalnoj Hrvatskoj i oko 200 kWh/m<sup>2</sup>a u primorskoj Hrvatskoj.

Izraženo po kWp instalirane snage, pri tome godišnje proizvedena električna energija iznosi oko 1050 kWh/kWp u kontinentalnoj Hrvatskoj i oko 1300 kWh/kWp u primorskoj Hrvatskoj.

Tako se, primjerice, instaliranim fotonaponskim sustavom nazivne snage od 5 kWp u jednoj obiteljskoj kući može godišnje proizvesti 5250 kWh električne energije u kontinentalnoj Hrvatskoj i 6500 kWh u primorskoj Hrvatskoj (ukoliko je potrošnja el. energije ista ili veća od proizvedene). Pri tome su periodi povrata investicije oko 7 i 5 godina, slijedom.

Detaljniji i točniji proračun godišnje proizvedene električne energije za dani PV sustav se može provesti prema normi HRN EN 15316-4-6:2008 [19]. Proračun u normi uzima u obzir vrstu PV modula, njihov nagib i orijentaciju, sunčevo ozračenje (klimatsko područje) te način ugradnje. Ukoliko nisu poznati podatci proizvođača niti podatci o ozračenju, moguće je koristiti informativne vrijednosti iz tablica u nastavku.

Godišnje proizvedena električna energija fotonaponskim sustavom se računa prema

$$E_{el,pv,out} = \frac{E_{sol} \cdot P_{pk} \cdot f_{perf}}{G_{ref}} \quad [\text{kWh/a}] \quad (7.1)$$

$E_{sol}$  – godišnje sunčevo ozračenje PV modula (kWh/m<sup>2</sup>a);

$P_{pk}$  – vršna snaga (kW), predstavlja el. snagu PV modula pri referentnom sunčevom zračenju  $G_{ref}=1$  kW/m<sup>2</sup> na plohu tog sustava (pri 25°C), podatak proizvođača;

$f_{perf}$  – faktor učinkovitosti PV sustava (-), ovisno o načinu ugradnje PV modula na zgradi, tablica 5.

Godišnje sunčevo ozračenje PV modula se dobije iz

$$E_{sol} = E_{sol,hor} \cdot f_{tilt} \quad [\text{kWh/m}^2\text{a}] \quad (7.2)$$

$E_{sol,hor}$  – godišnje sunčevo ozračenje na horizontalnu plohu (kWh/m<sup>2</sup>a), kumulativni godišnji meteo podaci za 8760 h za odabranu lokaciju, tablica 2;

$f_{tilt}$  – faktor nagiba za preračunavanje ozračenja na nagnutu plohu (-), tablica 3.

Ukoliko nije poznat podatak proizvođača nazivna (vršna) snaga se može odrediti prema

$$P_{pk} = K_{pk} \cdot A \quad [\text{kW}] \quad (7.3)$$

$K_{pk}$  – koeficijent vršne snage ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), ovisno o vrsti modula, tablica 4.

$A$  – ukupna efektivna površina (bez okvira) PV modula ( $\text{m}^2$ )

Isporučena energija zgradi PV sustavom

$$E_{del} = E_{el,pv,out} \quad [\text{kWh/a}] \quad (7.4)$$

Klima	$E_{sol,hor}$ [kWh/m <sup>2</sup> a]
Kontinentalna Hrvatska	1253
Primorska Hrvatska	1542

Tablica 2. Godišnje vrijednosti sunčevog ozračenja horizontalne plohe za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku (prema podacima iz tehničke regulative koja se odnosi na energetske certificiranje zgrada)

Kontinentalna Hrvatska		Orijentacija				
		Zapad	Jugozapad	Jug	Jugoistok	Istok
		Faktor nagiba $f_{tilt}$ [-]				
kut	0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	30°	0,93	1,07	1,13	1,07	0,93
	45°	0,87	1,05	1,11	1,05	0,87
	60°	0,79	0,98	1,04	0,98	0,79
	90°	0,60	0,73	0,76	0,73	0,60
Primorska Hrvatska		Orijentacija				
		Zapad	Jugozapad	Jug	Jugoistok	Istok



		Faktor nagiba $f_{tilt}$ [-]				
kut	0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	30°	0,93	1,09	1,15	1,09	0,93
	45°	0,87	1,06	1,13	1,06	0,87
	60°	0,79	0,99	1,06	0,99	0,79
	90°	0,59	0,74	0,77	0,74	0,59

Tablica 3. Informativne vrijednosti faktora nagiba  $f_{tilt}$  u ovisnosti o nagibu i orijentaciji PV modula

Vrsta PV modula	$K_{pk}$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Mono-kristalni silicij	0,12-0,18
Poli-kristalični silicij	0,10-0,16
Tankoslojni amorfni silicij	0,04-0,08
Ostali tankoslojni	0,035
Tankoslojni bakar-indij-galij-diselenid	0,105
Tankoslojni kadmij-telurid	0,095

Tablica 4. Informativne vrijednosti koeficijenta vršne snage  $K_{pk}$  za razne vrste PV modula

Način ugradnje PV modula	$f_{perf}$ [-]
Neventilirani moduli	0,70
Osrednje dobro ventilirani moduli	0,75
Intenzivno ili prisilno ventilirani moduli	0,80

Tablica 5. (HRN EN 15316-4-6 B.4) Informativne vrijednosti faktora učinkovitosti PV sustava  $f_{perf}$  u ovisnosti o načinu ugradnje PV modula na zgradi

## 7.4.2. Primjer proračuna

Obiteljska kuća u kontinentalnom dijelu Hrvatske.

PV paneli su smješteni na krov zgrade.

Vel.	Jed.	Iznos				Napomena
$A$	$m^2$	13	20	33	46,5	
$E_{sol,hor}$	$kWh/m^2a$	1253	1253	1253	1253	Tabl. 2. kontinentalna Hrvatska
$f_{tilt}$	-	1,13	1,13	1,13	1,13	Tabl. 3. orijentacija-jug, nagib 30°
$K_{pk}$	$kW//m^2$	0,15	0,15	0,15	0,15	Tabl. 4. poli-kristalični PV
$f_{perf}$	-	0,75	0,75	0,75	0,75	Tabl. 5. osrednje dobro vent.
$E_{sol}$	$kWh/m^2a$	1416	1416	1416	1416	
$P_{pk}$	$kW$	2,0	3,0	5,0	7,0	
$I_{ref}$	$kW/m^2$	1	1	1	1	
$E_{el,pv,out}$	$kWh/a$	2071	3186	5256	7407	

## PRILOG

Zagreb $\beta=0^\circ$	mjesec											
sat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4-5				0,5	11	19	14	2,5				
5-6			2	22	67	87	77	38	8			
6-7		4	27	92	167	186	185	128	61	0,1		
7-8	9	35	96	197	288	310	310	257	162	13	0,6	
8-9	43	101	188	317	417	437	445	383	289	68	14	4
9-10	98	183	290	419	528	542	564	518	403	150	52	30
10-11	147	252	366	499	599	633	654	608	496	240	101	72
11-12	184	290	389	534	643	665	695	661	539	320	147	112
12-13	194	303	396	529	644	664	698	651	532	358	177	139
13-14	168	266	347	493	589	628	651	600	486	359	185	143
14-15	117	201	275	420	501	544	561	512	402	322	153	121
15-16	54	117	196	301	398	423	443	397	289	248	104	79
16-17	11	42	100	191	280	310	326	268	163	152	50	33
17-18		4	28	83	155	191	192	136	54	62	11	5
18-19			1,5	18	55	83	79	36	6	8	0,1	
19-20				0,1	7	17	14	2				

MJ/dan	3,69	6,47	9,73	14,82	19,26	20,66	21,27	18,71	14,00	8,28	3,58	2,66
kWh/mjesec	31,78	50,34	83,75	123,47	165,82	172,17	183,15	161,12	116,70	71,30	29,84	22,88

Split $\beta=0^\circ$	mjesec											
dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4-5					6	15	11	1				
5-6			1	20	72	106	90	46	8			
6-7		5	37	112	200	243	231	171	85	20	1	
7-8	18	65	165	255	354	405	395	330	227	129	38	10
8-9	98	176	289	400	503	553	553	482	378	267	136	81
9-10	192	297	410	524	626	678	605	617	509	390	238	172
10-11	263	378	515	609	716	776	778	706	598	479	307	242
11-12	306	428	556	647	758	816	827	752	638	521	345	277
12-13	312	420	540	645	750	810	821	753	633	517	339	285
13-14	276	375	506	603	697	755	761	699	580	463	295	248
14-15	200	292	432	521	615	676	670	609	503	371	224	175
15-16	106	183	306	406	505	560	554	486	369	242	117	88
16-17	23	71	172	268	361	415	402	334	216	104	28	14
17-18		5	53	128	211	262	249	175	73	13	0	
18-19			2	26	81	111	100	50	5			
19-20					7	17	13	2				

MJ/dan	6,46	9,70	14,34	18,59	23,26	25,91	25,42	22,37	17,36	12,66	7,44	5,73
kWh/mjesec	55,61	75,46	123,50	154,92	200,32	215,94	218,86	192,60	144,66	109,00	62,04	49,35

Tablica 6. Satne vrijednosti sunčeve ozračenosti horizontalne plohe u Zagrebu i Splitu za karakterističan dan u pojedinom mjesecu ( $G_{sun,t}$ ) [20]

Zagreb $\beta=45^\circ$	mjesec												
	sat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4-5					0,52	9,52	15,96	11,90	2,37				
5-6				2,56	23,04	57,97	73,06	65,43	35,97	9,03			
6-7			5,42	34,52	96,35	144,50	156,20	157,21	121,16	68,84	0,12		
7-8	14,11	47,38	122,72	206,32	249,20	260,34	263,43	243,26	182,83	16,13	0,95		
8-9	67,41	136,74	240,33	331,99	360,82	367,00	378,15	362,52	326,16	84,39	22,17	7,26	
9-10	153,62	247,75	370,72	438,82	456,87	455,17	479,27	490,30	454,81	186,14	82,33	54,44	
10-11	230,43	341,17	467,88	522,60	518,31	531,60	555,75	575,49	559,77	297,83	159,92	130,67	
11-12	288,43	392,62	497,28	559,26	556,38	558,47	590,59	625,65	608,30	397,11	232,75	203,26	
12-13	304,11	410,22	506,23	554,02	557,24	557,63	593,14	616,19	600,40	444,27	280,25	252,26	
13-14	263,35	360,12	443,59	516,32	509,65	527,40	553,20	567,91	548,49	445,51	292,92	259,52	
14-15	183,41	272,12	351,55	439,86	433,51	456,85	476,72	484,62	453,69	399,59	242,25	219,59	
15-16	84,65	158,40	250,56	315,24	344,38	355,24	376,45	375,77	326,16	307,76	164,67	143,37	
16-17	17,24	56,86	127,84	200,03	242,28	260,34	277,02	253,67	183,96	188,63	79,17	59,89	
17-18		5,42	35,79	86,93	134,12	160,40	163,15	128,73	60,94	76,94	17,42	9,07	
18-19			1,92	18,85	47,59	69,70	67,13	34,07	6,77	9,93	0,16		
19-20				0,10	6,06	14,28	11,90	1,89					

MJ/dan	5,78	8,76	12,43	15,52	16,66	17,35	18,07	17,71	15,80	10,28	5,67	4,82
kWh/mjesec	49,01	74,24	105,33	131,46	141,17	147,00	153,12	150,05	133,90	87,06	48,04	40,85

SPLIT $\beta=45^\circ$	mjesec												
	sat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4-5						5,46	12,74	9,57	0,98				
5-6				1,20	20,65	65,51	90,04	78,31	44,97	9,43			
6-7			7,35	44,24	115,61	181,97	206,41	200,99	167,18	100,14	29,61	1,74	
7-8	32,12	95,51	197,31	263,23	322,09	344,02	343,68	322,63	267,44	190,96	66,24	19,12	
8-9	174,89	258,61	345,59	412,90	457,67	469,73	481,15	471,24	445,34	395,24	237,08	154,89	
9-10	342,65	436,41	490,28	540,90	569,58	575,91	526,40	603,23	599,68	577,32	414,89	328,91	
10-11	469,35	555,43	615,84	628,65	651,47	659,15	676,92	690,24	704,54	709,07	535,18	462,77	
11-12	546,09	628,90	664,87	667,87	689,68	693,13	719,56	735,21	751,67	771,24	601,42	529,70	
12-13	556,80	617,14	645,73	665,81	682,40	688,03	714,33	736,19	745,78	765,32	590,96	545,00	
13-14	492,55	551,02	605,08	622,45	634,18	641,31	662,13	683,40	683,33	685,39	514,26	474,25	
14-15	356,92	429,06	516,59	537,81	559,57	574,21	582,95	595,41	592,61	549,20	390,49	334,65	
15-16	189,17	268,90	365,92	419,10	459,48	475,68	482,02	475,15	434,74	358,24	203,96	168,28	
16-17	41,05	104,33	205,68	276,65	328,46	352,51	349,77	326,54	254,48	153,95	48,81	26,77	
17-18		7,35	63,38	132,13	191,98	222,55	216,65	171,09	86,01	19,24			
18-19			2,39	26,84	73,70	94,29	87,01	48,88	5,89				
19-20					6,37	14,44	11,31	1,96					

MJ/dan	11,53	14,26	17,15	19,19	21,17	22,01	22,11	21,87	20,45	18,74	12,98	10,96
kWh/mjesec	97,65	120,78	145,30	162,58	179,33	186,48	187,35	185,27	173,27	158,75	109,95	92,85

Tablica 7. Satne vrijednosti sunčeve ozračenosti plohe orijentirane prema jugu i nagnute pod kutom  $45^\circ$  prema horizontali u Zagrebu i Splitu, za karakterističan dan u pojedinom mjesecu ( $G_{\text{sun}}t$ ) [20]

Napomena: detaljniji meteorološki podaci su dostupni na web stranicama ministarstva nadležnog za propise iz područja energetskog svojstva zgrada [21] ili iz baze PVGIS Joint Research Center-a [4]

## Literatura

- [1] Duffie J.A., Beckman W.A., Solar engineering of thermal processes, John Wiley&Sons, pp.919, New York, 1991
- [2] Boyle G., Renewable energy-power for sustainable future, Oxford University Press, pp.477, Oxford, 1998
- [3] Twidell J., Weir T., Renewable energy resources, E&FN Spon, pp.439, London, 1997
- [4] PVGIS, baza meteo podataka, JRC, [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)
- [5] Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat>, 2023
- [6] Solar Heat Europe, <https://solarheateurope.eu>, 2017-2023
- [7] EIHP, Energija u Hrvatskoj, Godišnji energetska pregled, 2021
- [8] Dović D., nastavni materijali (power point prezentacije) Solarna tehnika-Solarni toplovodni sustavi, EUREM, AHK, 2018
- [9] Dović D., Skripta za kolegij Obnovljivi izvori energije, FSB, 2020
- [10] Dović D., Numerička i eksperimentalna studija sunčevog kolektora s valovitim apsorberom, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2005
- [11] Katalozi: Horvatić, Buderus, VIEMANN, Wolf, GreenOneTec, Centrometal, Vaillant: 1997-2023
- [12] Dović D., nastavni materijali (power point prezentacije) za kolegije Obnovljivi izvori energije i Solarni toplinski sustavi, FSB, 2023
- [13] Solar Keymark, <https://solarkeymark.eu>, <https://solarkeymark.eu/database>, 2023
- [14] Delegirana uredba komisije (EU) br. 811/2013, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0811>, 2013
- [15] Mathioulakis E., Belessiotis V., A new heat-pipe type solar domestic hot water system, Solar Energy, Vol. 72, No. 1, pp. 13–20, 2002
- [16] Kolaković I., Dović D., Simulation of the solar domestic hot water system operation, Technical gazette, Vol. 16, No. 1, pp. 3-9, 2009
- [17] HRN EN 15316-4-3:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava – Dio 4-3: Sustavi za proizvodnju topline, toplinski sustavi sunčevog zračenja
- [18] Hrvatska stručna udruga za sunčevu energiju (HSUSE), <https://www.hsuse.hr>, 2023
- [19] HRN EN 15316-4-6:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih

zahtjeva i učinkovitosti sustava – Dio 4-6: Sustavi za proizvodnju topline, fotonaponski sustavi

- [20] Kulišić P., Novi izvori energije, Šk. knjiga, pp.154, Zagreb, 1991
- [21] Meteorološki podaci za proračun energetske svojstva zgrada, DHMZ, MPGI, <https://mpgi.gov.hr/pristup-informacijama-16/zakoni-i-ostali-propisi/podrucje-energetske-ucinkovitosti/meteoroloski-podaci-primjenjuju-se-od-1-sijecnja-2016/4830>, 2016

## Kazalo slika

Slika 1. Energija sunčevog zračenja pretvorena u različite oblike obnovljivih energija na Zemlji [2] ....	6
Slika 2. Prirodni tok obnovljive energije na Zemlji (jedinica 1 TW), [3].....	7
Slika 3. Tok obnovljive i energije iz fosilnih goriva kroz okoliš [3].....	7
Slika 4. Udjeli obnovljive energije u ukupnoj finalnoj potrošnji energije u EU i drugim zemljama 2021.g. [5].....	9
Slika 5. Instalirani toplinski učin solarnih kolektora (na 1000 stanovnika) u EU 2021. g. [6].....	10
Slika 6. Porast instalirane snage [MW] sustava za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i obnovljivog komunalnog otpada u EU 2000.-2019. g. [5] .....	10
Slika 7. Porast instaliranih kapaciteta sustava koji koriste OIE u Republici Hrvatskoj u periodu od 2010.g. do 2021. g. za proizvodnju a) toplinske i b) električne energije [7].....	11
Slika 8. Prosječni trošak toplinske energije (LCOH) tijekom radnog vijeka solarnih toplinskih sustava (€/kWh) 2017. g.– usporedba s konvencionalnim sustavima [6].....	12
Slika 9. Trošak električne energije iz fotonaponskih sustava [5].....	12
Slika 10. Uređaji za izgaranje biomase – kotao na: a) ogrjevno drvo, b) pelete, c) peći (grijalice prostora) .....	14
Slika 11. Intenzitet zračenja prema i sa Zemlje, [2].....	16
Slika 12. Direktno i difuzno sunčevo zračenje, [3] .....	16
Slika 13. Godišnja varijacija sunčevog ozračenja (insolacije) horizontalne plohe tijekom vedrog dana, u ovisnosti o zemljopisnoj širini [3].....	17
Slika 14. Promjena nagiba Zemljine osi tijekom okretanja oko Sunca [2], [3].....	17
Slika 15. Promjena nagiba kolektora tijekom godišnjih doba radi postizanja najvećih vrijednosti ozračenja [2].....	18
Slika 16. Optimalne vrijednosti kuta nagiba kolektora u pojedinom mjesecu za Zagreb [9].....	18
Slika 17. a) Relativno kretanje Sunca promatrano sa Zemlje tijekom pojedinih godišnjih doba, [2], b) utjecaj otklona kolektora od smjera juga na godišnju ozračenost (insolaciju) pri različitim kutovima nagiba prema horizontali $\beta$ [1].....	19
Slika 18. Solarni toplovodni sustav za pripremu PTV-a s pločastim kolektorima.....	20

Slika 19. Različite izvedbe pločastih kolektora (odozgo prema dolje): aluminijski valoviti apsorberi, aluminij s utisnutim bakrenim cijevima, cijevi stisnute između dviju ploča, cijevi zalemljene/zavarene na apsorbersku ploču [8] .....	21
Slika 20. Razni tipovi cijevnih registara pločastih kolektora:.....	21
Slika 21. Pločasti kolektor s pokrovnim staklom [9] .....	22
Slika 22. Osnovni mehanizmi izmjene topline u pločastom kolektoru [9] .....	23
Slika 23. Mjerene vrijednosti učinkovitosti pločastog kolektora i regresijski polinom, [9] .....	24
Slika 24. Utjecaj protoka radnog medija tj. $\alpha_f$ na efikasnost kolektora, temeljeno na CFD simulacijama [10].....	26
Slika 25. a) paralelni i b) serijski spoj kolektora; c) kombinacija paralelnog i serijskog spoja kolektora sa serpentinom [9] .....	27
Slika 26. a) konstrukcija s apsorberom nanesenim na koncentričnu cijev kroz koju struji fluid (sa i bez reflektirajućih zrcala) .....	28
Slika 27. Toplinska učinkovitost različitih tipova kolektora [9].....	30
Slika 28. Neostakljeni apsorberi, [12].....	30
Slika 29. Primjeri polimernih kolektora za pripremu PTV-a [12] .....	31
Slika 30. Primjeri solarnih zagrijača zraka [12].....	32
Slika 31. Koncentrirajući kolektori a) parabolični (za postrojenja s parnom turbinom) i b) linearni Fresnel (za postrojenja s parnom turbinom) c) tanjurasti (sa Stirlingovim strojem) d) parabolični (bolja učinkovitost na povišenim temperaturama od pločastih, PTV, daljinsko grijanje, solarno hlađenje, procesna toplina) [9].....	33
Slika 32. Kompaktni termosifonski sustav, primjeri [12].....	34
Slika 33. Sustav s jednim spremnikom za pripremu PTV-a [11] .....	35
Slika 34. Temperaturna stratifikacija u spremniku, izvedba sa zagrijavanjem spremnika po visini i s vanjskim izmjenjivačem topline [8].....	35
Slika 35. Primjeri kombiniranih solarnih toplovodnih sustava za grijanje prostora i PTV-a s dvostrukim spremnikom [11].....	36
Slika 36. Sustav s protočnim grijačem (izmjenjivačem) PTV-a [11].....	37
Slika 37. Spremnik s protočnim grijačem, kombiniranim s manjim akumulacijskim spremnikom [12]37	
Slika 38. Sustav s dva spremnika [11].....	38
Slika 39. Shema sustava sa neostakljenim apsorberom za zagrijavanje bazena [8].....	40
Slika 40. a) kolektor montiran na krov, b) kolektor montiran kao dio krova c) kolektori montirani na nosače (kosi krovovi koji znatno odstupaju od smjera juga) [12].....	42
Slika 41. Solarni sustav s grupama kolektora montiranim na krovne nosače [12].....	43
Slika 42. Primjer dodatka certifikatu Solar Keymark s podacima ispitivanja prema EN ISO 9806:2017 [13].....	45
Slika 43. Primjer označavanja kompleta koji sadržavaju kombinirani grijač (grijanje prostora+ PTV), uređaj za upravljanje temperaturom i solarni uređaj s razredima energetske učinkovitosti prema Delegiranoj uredbi komisije (EU) br. 811/2013 [14] .....	46
Slika 44. a) Ispitna linija za mjerenje toplinskih karakteristika kolektora i b) sustava c) ispitivanje	



polimernog kolektora na simulatoru sunčevog zračenja [12].....	47
Slika 45. Simulirane vrijednosti promjene temperatura u spremniku PTV-a $\vartheta_s$ tijekom karakterističnog dana za solarni sustav u a) Zagreb i b) Split [16] .....	51
Slika 46. Optimalna površina kolektora u ovisnosti o broju osoba [9].....	55
Slika 47. Izračunati period povrata investicije (godina) u ovisnosti o broju osoba, a) usporedba s plinom, b) usporedba s električnom energijom kao energentom u konvencionalnom dijelu sustava [9]	55
Slika 48. Fotonaponska ćelija - princip rada PN spoja [12] .....	58
Slika 49. a) Spajanje fotonaponskih ćelija u modul (monokristal), b) fotonaponski modul u obliku panela, [12] .....	58
Slika 50. a) Ovisnost napona $U$ i jakosti struje $I$ o sunčevom zračenju, b) promjena radne karakteristike s temperaturom PV modula [3].....	59
Slika 51. Montaža PV - modula – primjeri [18] .....	62
Slika 52. Fotonaponski modul kombiniran s cijevnim izmjenjivačem na poledini za zagrijavanje tople vode [12].....	62
Slika 53. Izvan mrežni fotonaponski sustav - osnovni dijelovi [12].....	63
Slika 54. Mrežni fotonaponski sustav - osnovni dijelovi, [18].....	64

## Kazalo tablica

Tablica 1. Tehničke i ekonomske karakteristike optimiziranih solarnih sustava različitih veličina, u odnosu na broj osoba za područje Zagreba i Splita (povrat investicije izražen u godinama [a]) [9].....	54
Tablica 2. Godišnje vrijednosti sunčevog ozračenja horizontalne plohe za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku (prema podacima iz tehničke regulative koja se odnosi na energetska certificiranje zgrada)	66
Tablica 3. Informativne vrijednosti faktora nagiba $f_{tilt}$ u ovisnosti o nagibu i orijentaciji PV modula .	67
Tablica 4. Informativne vrijednosti koeficijenta vršne snage $K_{pk}$ za razne vrste PV modula .....	67
Tablica 5. (HRN EN 15316-4-6 B.4) Informativne vrijednosti faktora učinkovitosti PV sustava $f_{perf}$ u ovisnosti o načinu ugradnje PV modula na zgradi.....	67
Tablica 6. Satne vrijednosti sunčeve ozračenosti <u>horizontalne plohe</u> u Zagrebu i Splitu za karakterističan dan u pojedinom mjesecu ( $G_{sun}t$ ) [20] .....	69
Tablica 7. Satne vrijednosti sunčeve ozračenosti plohe orijentirane prema jugu i nagnute pod <u>kutom 45°</u> prema horizontali u Zagrebu i Splitu, za karakterističan dan u pojedinom mjesecu ( $G_{sun}t$ ) [20] ..	70

## Popis ključnih pojmova

$a$	- faktor apsorpcije (-);
$\varepsilon$	- faktor emisije (-);
$\tau$	- faktor propusnosti (-);
$\eta_{kol}$	- toplinska učinkovitost kolektora (-);
$P_{kol}$	- toplinski učin kolektora (korisni toplinski tok predan radnom fluidu) (W);
$\vartheta$	- temperatura (°C);
$G_{sun}$	- sunčevo zračenje (gustoća energetskega toka sunčevog zračenja) (W/m <sup>2</sup> )
$A$	- površina (m <sup>2</sup> )
$Q_{kol}$	- korisna sunčeva energija prikupljena kolektorima (Wh) ili (J);
$Q_{PTV}$	- toplinska energija koja se odvodi iz spremnika tijekom potrošnje PTV-a (Wh) ili (J);
$S$	- godišnja ušteda (EUR/a);
$P$	- period povrata investicije (a);
$V_{oc}$	- napon otvorenog strujnog kruga PV ćelije (V)
$I_{sc}$	- struja kratkog spoja (A)
$\eta_o$	- učinkovitost pretvorbe sunčeve u električnu energiju PV modula (-);
$E_{el,pv,out}$	- godišnje proizvedena električna energija PV sustavom (kWh/a);
$E_{sol}$	- godišnje sunčevo ozračenje (insolacija) (kWh/m <sup>2</sup> a);
$P_{pk}$	- vršna električna snaga PV modula (kW).

## **Impressum**

**Autori: prof.dr.sc. Damir Dović**

**Lektor: Gordana Hajni, prof.**

**Recenzent: prof.dr.sc. Daniel Rolph Schneider**