

Priručnik

Damir Dović

Sunčani toplovodni sustavi



Ovaj projekt financira
Europska unija



Ova publikacija izrađena je uz pomoć Europske unije.
Za sadržaj ove publikacije odgovorna je Srednja škola
Oroslavje i ne odražava stavove Europske unije.



Agencija za
strukovno obrazovanje
i obrazovanje odraslih



IPA Komponenta IV – Razvoj ljudskih potencijala

Program Europske unije za Hrvatsku

Instrument pretpristupne pomoći – Obnovljivi izvori energije

Project financed by the European Union

IMPLEMENTATION OF NEW CURRICULA:

Increasing knowledge and information on Renewables

Projekt je financiran sredstvima Europske unije

IMPLEMENTACIJA NOVIH KURIKULUMA:

Povećanje znanja i informacija o obnovljivim izvorima energije

Provedbeno tijelo:

Agencija za strukovno obrazovanje i obrazovanje odraslih, Odjel DEFCO

Nositelj projekta:

Srednja škola Oroslavje

Partneri na projektu:

Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu

Grad Oroslavje

Stručni suradnici:

Darko Cobović, dipl. ing.

Goran Nuskern, dipl. ing.

Davor Sokač, dipl. ing.

Autor:

Doc. dr. sc. Damir Dović dipl. ing.

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Izdavač:

Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu

Srednja škola Oroslavje

Tehnički urednik:

Mario Lesar, graf. ing.

Dizajn i promocija:

Culmena d.o.o.

Web adresa:

www.ipa-oie.com

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Fizikalne osnove	3
2.1 Izmjena topline	3
2.1.1 Temperatura	3
2.1.2 Toplina	3
2.1.3 Provođenje topline	4
2.1.4 Konvekcija	4
2.1.5 Zračenje	5
2.2 Izmjena topline između dvaju medija	7
2.3 Izmjena topline transportom mase	8
3. Obnovljivi izvori energije	8
3.1 Obnovljivi izvori i fosilna goriva	8
3.2 Karakteristike obnovljive energije	10
4. Sunčevo zračenje	11
4.1 Karakteristike	11
4.2 Efekt staklenika	12
4.3 Godišnja promjena Sunčeva ozračenja	12
4.4 Optimalni kut kolektora	13
5. Kolektori sunčevog zračenja	15
5.1 Efikasnost kolektora	15
5.2 Pločasti kolektori	16
5.3 Vakuumski kolektori	18
5.4 Neostakljeni apsorberi	20
5.5 Koncentrirajući kolektori i sunčane elektrane	21
5.6 Raspodjela strujanja u kolektorima	22
6. Izmjena topline u pločastom kolektoru	23
6.1 Mehanizmi izmjene topline	23
6.2 Utjecaj konstrukcije na toplinske karakteristike	24
6.2.1 Utjecaj optičkih svojstava apsorbera i stakla	24
6.3 Utjecaj strujanja radnog fluida	25

7. Sunčani toplovodni sustavi	26
7.1 Sustavi za pripremu PTV-a	26
7.2 Sustavi za grijanje prostora	30
7.3 Sustavi za grijanje bazena	30
7.4 Regulacija	31
7.5 Oprema i armatura	31
7.6 Montaža kolektora	32
8. Ispitivanja sunčevih kolektora i sustava	32
9. Simulacija i ekonomično dimenzioniranje sunčanih sustava	34
9.1 Metode proračuna	34
9.2 Rezultati simulacije	36
9.3 Period povrata investicije	36
9.4 Optimizacija površine kolektora i zapremine spremnika	37
Literatura	39

1. Uvod

U današnje vrijeme svjedoci smo jačanja svijesti o potrebi korištenja obnovljivih izvora energije, kao i povećanja energetske učinkovitosti u proizvodnji i njezinu korištenju, a sve kao odgovor na ubrzan rast cijena fosilnih energenata, predviđanja o njihovom iscrpljivanju u skoroj budućnosti te onečišćenje okoliša. Sunčevo zračenje je najveći izvor obnovljive energije na Zemlji, gdje se pretvara u ostale oblike poput hidroenergije, energije vjetra, biomasu, energiju valova i dr. Danas se u svijetu sunčeva energija direktno najčešće koristi u toplovodnim sunčanim sustavima za potrebe zagrijavanja potrošne tople vode i grijanje prostora. Proračuni i praksa pokazuju da sunčani sustavi u Republici Hrvatskoj mogu ponekad biti isplativi čak i bez namjenskih novčanih potpora.

2. Fizikalne osnove

2.1 Izmjena topline

Kod sunčanih toplinskih sustava najveći dio energije izmjenjuje se u obliku topline. U nastavku je dan pregled odgovarajućih mehanizama izmjene topline te izrazi kojima se oni opisuju.

2.1.1 Temperatura

Temperatura (T , K i ϑ , °C) veličina je stanja neke materije (tijela ili fluida) kojom se opisuje njezin stupanj zagrijanosti odnosno ohlađenosti. Temperatura ovisi o prosječnoj kinetičkoj energiji, tj. brzini gibanja čestica od kojih se sastoji materija, pri čemu je temperatura to viša što je veća kinetička energija. Za mjerenje temperature koristi se apsolutna Kelvinova i relativna Celzijeva skala. Veza između tih dviju skala jest

$$T(K) = \vartheta(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (2.1)$$

pri čemu je 0 K najniža temperatura, tj. apsolutna nula koja odgovara teorijskom stanju pri kojem nema gibanja čestica. 0 °C odgovara točki smrzavanja vode pri standardnom atmosferskom tlaku (101325 Pa). Interval podjele identičan je kod obje skala.

2.1.2 Toplina

Toplina (Q , J) je energija koja se izmjenjuje između dvaju tijela (ili sustava) kada su ona na različitim temperaturama. Toplinski tok je toplina izmijenjena u jedinici vremena

$$P = \frac{Q}{t}, \text{ J/s} = \text{W}. \quad (2.2)$$

Često se kod sunčanih sustava za iskazivanje izmijenjene topline koristi mjerna jedinica, Wh umjesto, J. 1 Wh predstavlja toplinu koja se izmjeni tijekom 1 sata pri toplinskom toku od $P = 1 \text{ W}$. Pri tome je $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$.

Kod uređaja namijenjenih izmjeni topline (npr. izmjenjivači topline, kolektori i dr.) za toplinski tok P koristi se i termin snaga.

Gustoća toplinskog toka izmijenjeni je toplinski tok po jedinici površine okomite na smjer širenja topline

$$q = \frac{P}{A}, \text{ W/m}^2 \quad (2.3)$$

A – ploština površine izmjene topline, m^2 .

2.1.3 Provođenje topline

Provođenje topline (kondukcija) mehanizam je izmjene topline putem izmjene kinetičke energije između čestica tvari (molekula, atoma) i gibanja slobodnih elektronabez njihovog primjetnog makroskopskog pomicanja, a sve uslijed postojanja temperaturnih razlika (gradijenta) unutar tvari. Provođenje topline jedini je mogući mehanizam izmjene topline unutar krutih neprozirnih tvari (kod prozirnih moguće je još i zračenje) i između krutih tvari koje su u toplinskom kontaktu. Isto tako, provođenje topline prisutno je i kod kapljevina i plinova ukoliko nema primjetnog miješanja makroskopskih čestica kada se nalaze u malom i ograničenom prostoru (npr. između dviju staklenih stjenki prozora). Kod laminarnog strujanja, kod kojeg nema miješanja strujnica, toplina se provodi poprečno na smjer strujnica.

Prema Fourierovom zakonu, provođenjem se izmijenjeni toplinski tok kroz ravnu stjenku može izraziti kao

$$P = -\frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta T \cdot A, \text{ W} \quad (2.4)$$

λ – toplinska provodnost materijala stjenke, W/mK

δ – debljina stjenke, m

ΔT – temperaturna razlika površina stjenke, K

A – ploština površine okomite na smjer širenja topline, m².

U tablici 2.1 dane su vrijednosti toplinske provodnosti za nekoliko gradbenih materijala i radnih fluida koji se koriste kod sunčanih toplinskih sustava. Iz prikazanih vrijednosti može se uočiti kako su metali najbolji, a plinovi najlošiji vodiči topline.

Tablica 2.1: Toplinska svojstva tvari (pri 20 °C)

Materijal	Gustoća ρ , kg/m ³	Toplinska provodnost λ , W/mK	Specifični toplinski kapacitet c_p , kJ/kgK
bakar (trgovački)	8300	372	0,419
aluminij	2700	229	0,896
čelik – obični	7840-7850	47-59	0,460-0,465
čelik – nehrđajući	7900-7880	14-20	0,477-0,502
kamena vuna	50-300	0,036-0,043	0,67
staklo	2700	0,76	0,840
voda	998	0,598	4182
voda/glikol 40 % (solarna tekućina)	1046	0,382	3733
zrak	1,164	0,0251	1,013

2.1.4 Konvekcija

Konvekcija je mehanizam izmjene topline između krute stjenke i kapljevine (tekućine ili plina) koja se primjetno giba. Konvekcija se temelji na gibanju makroskopskih čestica kapljevine (većih od molekula) različitih temperatura, pri čemu u međusobnim kontaktima dolazi do izmjene energije. Što je više takvih kontakata, to je intenzivnija izmjena topline, a to prije svega ovisi o uvjetima strujanja (brzini, geometriji stjenke i dr.) te fizikalnim svojstvima kapljevine. Kako uslijed gibanja fluida do stjenke dolaze uvijek nove čestice različite temperature, koje se kod turbulentnog strujanja još dodatno miješaju s onima iz ostatka struje, konvekcija dovodi do znatno intenzivnije izmjene topline nego što je to, primjerice, kod provođenja topline između stjenke i

mirujuće kapljevine. Konvekcija može biti slobodna ili prisilna. Kod slobodne je konvekcije gibanje kapljevine uz stjenku uzrokovano uzgonskim silama koje su posljedica razlike u gustoći čestica različitih temperatura uz i dalje od te stjenke.

S druge strane, kod prisilne je konvekcije strujanje kapljevine izazvano vanjskim djelovanjem, npr. pumpom, ventilatorom ili vjetrom.

Konvekcijom izmijenjen toplinski tok može se prema Newtonovom zakonu izraziti kao

$$P = \alpha \cdot (\vartheta_{\text{stj}} - \vartheta_{\text{f}}) \cdot A, \text{ W} \quad (2.5)$$

α – koeficijent prijelaza topline, $\text{W/m}^2\text{K}$

ϑ_{stj} – temperatura stjenke, $^{\circ}\text{C}$

ϑ_{f} – temperatura fluida dalje od stjenke (izvan graničnog sloja uz stjenku), $^{\circ}\text{C}$

A – ploština površine okomite na smjer širenja topline, m^2 .

Koeficijent prijelaza topline α za rješavanje praktičnih problema određuje se iz eksperimentalno.

2.1.5 Zračenje

U širem smislu zračenje je emitiranje određenih energetske čestice (alfa, beta čestice, fotoni dr.) ili elektromagnetskih valova neke materije u prostor. Postoje različite vrste s različitim uzrocima unutar atoma, poput alfa, beta, gama, rendgenskog, neutronske i elektromagnetske zračenja. Elektromagnetsko zračenje obuhvaća UV zračenje, svjetlost (vidljivi dio spektra), infracrveno (IC) zračenje, radio valove i dr. Za izmjenu topline zanimljivo je ono elektromagnetsko zračenje koje je određeno temperaturom i prirodom pojedine tvari, a obuhvaća područje valnih duljina od cca. 0,1-100 μm , tj. dio UV područja, cijeli vidljivi dio spektra i infracrveno područje. U nastavku će se za to zračenje jednostavno koristiti termin "zračenje". Zračenje je mehanizam izmjene topline putem elektromagnetskih valova koja odašilju tijela različitih temperatura. Za razliku od provođenja i konvekcije, ovakav način izmjene topline može se odvijati sa i bez posrednika, jer se elektromagnetski valovi mogu širiti kroz vakuum (npr. u svemiru između Sunca i Zemlje) kao i kroz razne plinove (npr. kroz atmosferu) ili prozirne medije (npr. kroz staklo sunčevog kolektora). Sva tijela emitiraju elektromagnetske valove pri cjelokupnom spektru valnih duljina, a čemu je uzrok titranje elektrona oko jezgre atoma.

Zračenje E koje dolazi na površinu nekog tijela može biti djelomično ili u potpunosti apsorbirano, reflektirano i propušteno. To ovisi o svojstvima površine, valnoj duljini zračenja, upadnom kutu zračenja te o vrsti materijala.

Na osnovi zakona o održanju energije vrijedi:

$$E = r \cdot E + a \cdot E + \tau \cdot E, \text{ W/m}^2, \quad (2.6)$$

odnosno

$$r + a + \tau = 1 \quad (2.7)$$

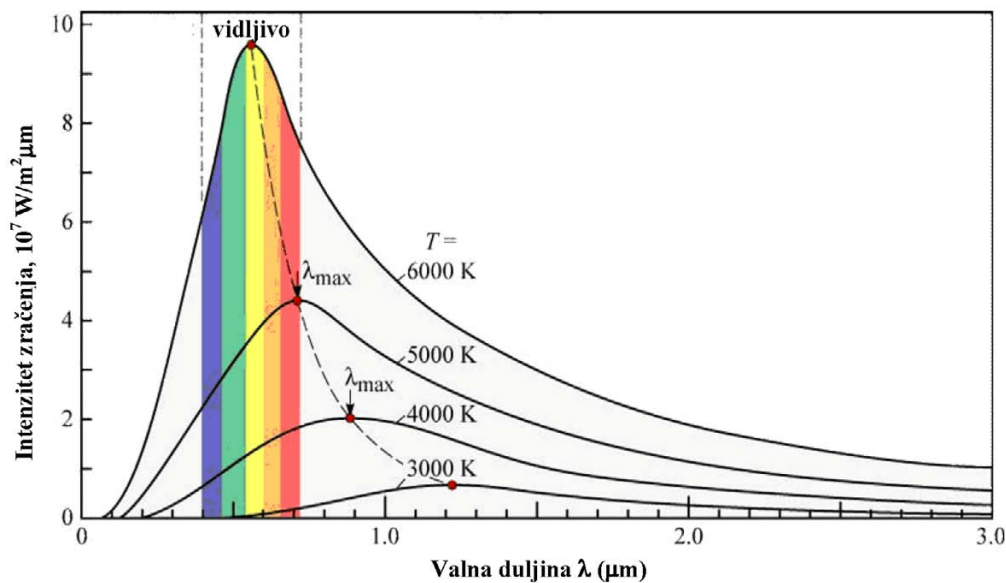
r – koeficijent refleksije

a – koeficijent apsorpcije

τ – koeficijent propusnosti.

U teoretskim analizama zračenja koristi se koncept crnog tijela, idealiziranog etalonskog tijela koje u potpunosti apsorbira svo upadno zračenje svih valnih duljina iz svih smjerova, tj. $a = 1$.

Raspodjela emitirane energije zračenjem crnog tijela određene temperature po spektru valnih duljina određena je Planckovim zakonom zračenja, slika 2.1.



Slika 2.1 Intenzitet vlastitog zračenja crnog tijela u ovisnosti o valnoj duljini za razne temperature

Energija koju crno tijelo emitira zračenjem na pojedinoj temperaturi dobije se integriranjem krivulje intenziteta zračenja za tu temperaturu sa slike 2.1 po svim valnim duljinama. Rezultat je Stefan-Boltzmannov zakon

$$E_c = \sigma \cdot T^4, \text{ W/m}^2 \quad (2.8)$$

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T – termodinamička temperatura, K.

Realna tijela zračenjem emitiraju manje energije od crnih, tako da Stefan-Boltzmannov zakon za realna tijela poprima oblik

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \text{ W/m}^2 \quad (2.9)$$

ε – koeficijent emisije (emisijski koeficijent)

Kirchoffov stavak daje važnu vezu između koeficijenata apsorpcije i emisije površine tijela za zračenje pri određenoj valnoj duljini i kod vremenski nepromjenjive temperature tijela

$$a = \varepsilon \quad (2.10)$$

Ovdje treba naglasiti da kod nekih tijela (npr. selektivnih premaza apsorbera sunčeva kolektora) koeficijenti apsorpcije pa tako i emisije mogu znatno varirati po valnim duljinama.

Ukupno zračenje koje dolazi s površine nekog tijela zbroj je vlastitog, reflektiranog i propuštenog zračenja.

Neto izmijenjeni toplinski tok zračenjem između dvaju tijela različitih temperatura razlika je odzračenih energija s njihovih površina. Ukoliko je tijelo 1 toplije od tijela 2, izmijenjeni toplinski tok s tijela 1 na tijelo 2 može se izraziti kao

$$P = F_{12} \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4), \text{ W} \quad (2.11)$$

F_{12} – geometrijski faktor oblika, ovisi o međusobnom geometrijskom položaju tijela i koeficijentima emisije

A_1 – ploština površine tijela temperature T_1 , m^2

T_1 – termodinamička temperatura tijela 1, K

T_2 – termodinamička temperatura tijela 2, K.

Vrijednosti F_{12} mogu se pronaći u specijaliziranim priručnicima u obliku tabličnih izraza za pojedine slučajeve.

Izdvojeni karakteristični slučajevi koji se susreću u analizi izmjene topline u kolektorima:

a) dvije paralelne ravne stjenke

$$F_{12} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (2.12)$$

b) tijelo 1 obuhvaćeno tijelom 2 pri čemu je $A_1 \ll A_2$ (npr. kolektor i nebeski svod)

$$F_{12} = \varepsilon_1 \quad (2.13)$$

Kada govorimo o Sunčevu zračenju, mogu se koristiti sljedeći termini i definicije:

Sunčevo zračenje – odnosi se na elektromagnetske valove, odnosno ukupno zračenje (osim ako nije navedeno drukčije) koje emitira Sunce.

Ozračenje (iradijancija), W/m^2 – energija sunčevog zračenja dozračena u jedinici vremena (energetski tok) na $1 m^2$ površine plohe okomite na smjer tog zračenja (odnosno gustoća energetskog toka Sunčeva zračenja na neku plohu).

Ozračenost (insolacija), J/m^2 ili Wh/m^2 – energija Sunčeva zračenja dozračena u nekom vremenu na $1 m^2$ površine plohe okomite na smjer zračenja.

2.2 Izmjena topline između dvaju medija

Toplinski tok izmijenjen između dvaju medija različite temperature odvojenih stjenkom može se izraziti kao

$$P = k \cdot A \cdot (\vartheta_{f,t} - \vartheta_{f,h}), \quad W \quad (2.14)$$

$\vartheta_{f,t}, \vartheta_{f,h}$ – temperature fluida, °C

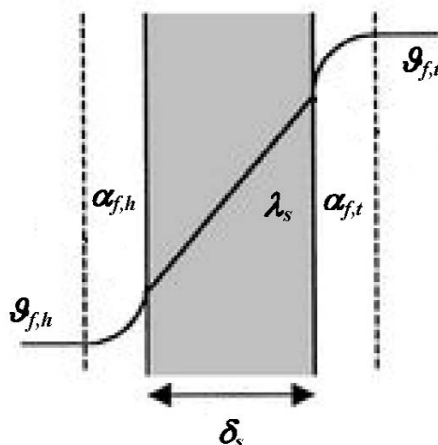
A – površina izmjene topline, m^2

k – koeficijent prolaska topline, W/m^2K

ili

$$P = \frac{A \cdot (\vartheta_{f,t} - \vartheta_{f,h})}{R_{uk}}, \quad W \quad (2.15)$$

R_{uk} – ukupni toplinski otpor prolasku topline, m^2K/W .



Slika 2.2 Raspodjela temperatura pri izmjeni topline kroz ravnu stjenku

Pritom je za ravnu stjenku koeficijent prolaska topline definiran kao

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{f,t}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_{f,h}}, \text{ W/m}^2\text{K} \quad (2.16)$$

$\alpha_{f,t}, \alpha_{f,h}$ – koeficijenti prijelaza topline s fluida na stjenku, $\text{W/m}^2\text{K}$

λ_s – toplinska provodnost materijala stjenke, W/mK

δ_s – debljina stjenke, m,

a ukupni toplinski otpor prolasku topline kao

$$R_{uk} = R_{f,t} + R_{stj} + R_{f,h}, \text{ m}^2\text{K/W} \quad (2.17)$$

$R_{f,t}, R_{f,h}$ – toplinski otpori prijelazu topline s fluida na stjenku, $\text{m}^2\text{K/W}$

R_{stj} – toplinski otpor provođenju topline kroz stjenku, $\text{m}^2\text{K/W}$.

Za cijevnu (cilindričnu) stjenku vrijedi:

$$\frac{1}{k_u} = \frac{1}{\alpha_{f,t}} + \frac{d_u}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{d_u}{d_v \cdot \alpha_{f,h}}, \text{ W/m}^2\text{K} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{k_v} = \frac{d_E}{d_u \cdot \alpha_{f,t}} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_{f,h}}, \text{ W/m}^2\text{K} \quad (2.19)$$

k_u – koeficijent prolaska topline sveden na unutrašnju površinu stjenke cijevi, $\text{W/m}^2\text{K}$

k_v – koeficijent prolaska topline sveden na vanjsku površinu stjenke cijevi, $\text{W/m}^2\text{K}$

d_u – unutrašnji promjer cijevi, m, a d_v – vanjski promjer cijevi, m

2.3 Izmjena topline transportom mase

Toplinski tok doveden fluidu koji struji kroz neki od toplinskih uređaja u sunčanom sustavu (npr. sunčevi kolektor, izmjenjivač u spremniku) može se izraziti kao

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{f,iz} - \vartheta_{f,ul}), \text{ W} \quad (2.20)$$

$\dot{m}$ – maseni protok fluida, kg/s

c_p – specifični toplinski kapacitet fluida, J/kgK

$\vartheta_{f,ul}$ – temperatura fluida na ulazu u promatrani toplinski uređaj, $^{\circ}\text{C}$

$\vartheta_{f,iz}$ – temperatura fluida na izlazu iz promatranog toplinskog uređaja, $^{\circ}\text{C}$.

3. Obnovljivi izvori energije

3.1 Obnovljivi izvori i fosilna goriva

Najveći obnovljivi izvor energije na Zemlji je Sunce. Energija Sunčeva zračenja se pretvara u druge iskoristive oblike obnovljive energije (slika 3.1) poput:

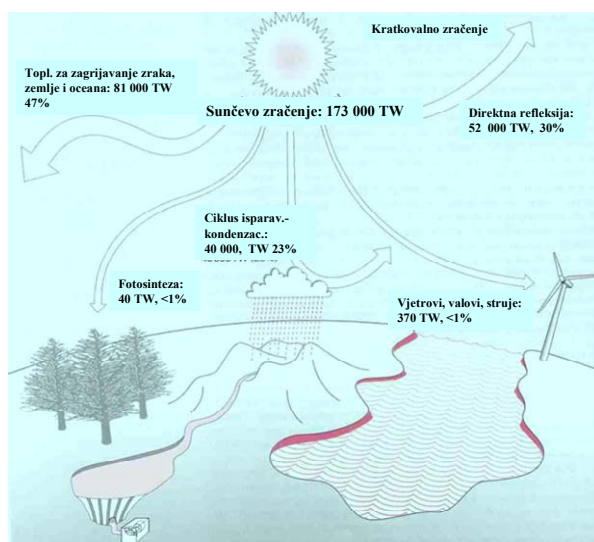
- hidroenergije
- biomase
- energije vjetra
- energije valova
- energije morskih struja
- toplinske energije oceana.

Uz navedeno, u obnovljivu energiju spada i

- geotermalna energija
- energija plime i oseke.

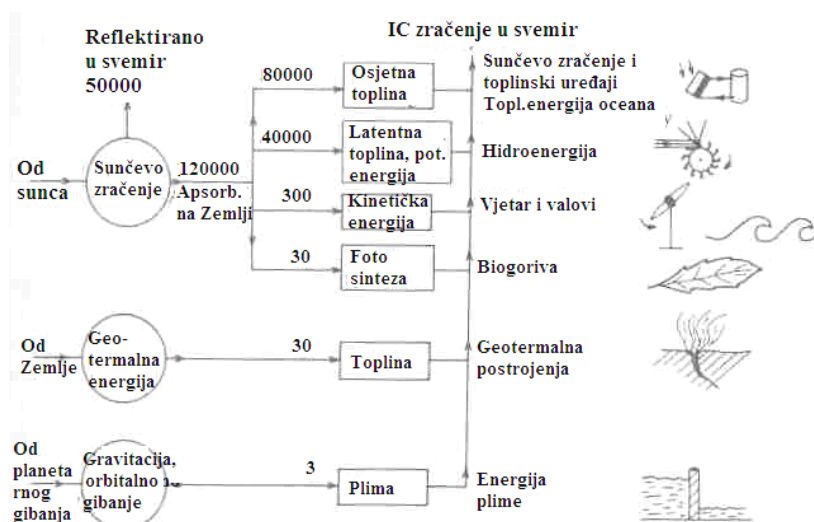
Geotermalna energija ima izvor u kemijskim i nuklearnim reakcijama u slojevima duboko ispod zemljine površine te u toplinskom kapacitetu rastaljene zemljine jezgre.

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



Slika 3.1 Pretvorba Sunčeve energije u druge oblike obnovljivih energija na Zemlji, [2]

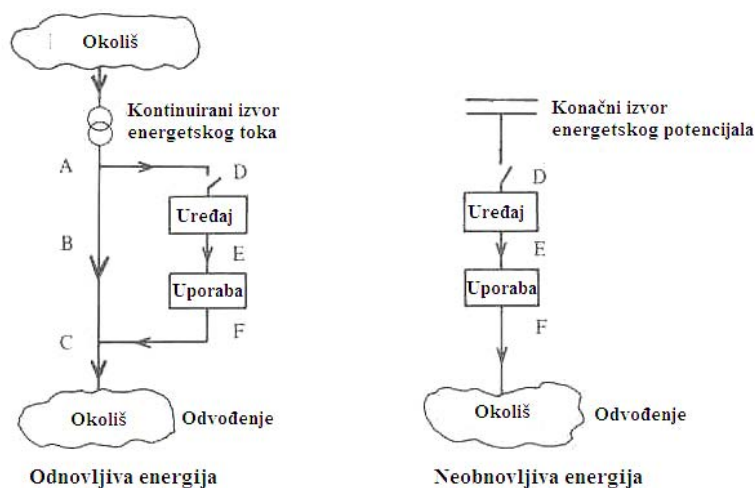
Na slikama 3.1 i 3.2 dan je prikaz energetske tokove obnovljive energije. Do granice atmosfere doznači se 173 000 TW sunčeve energije od čega se u atmosferi, tlu i vodama apsorbira 120 000 TW. Za usporedbu, svjetske potrebe za primarnom energijom imaju ekvivalent od 16 TW (2006. g.). Veliki problem pri iskorištenju te energije predstavlja to što je ta sunčeva energija dozračena na veliku površinu što ima za posljedicu relativno malu vrijednost gustoće energetskog toka $<1 \text{ kW/m}^2$.



Slika 3.2 Prirodni tokovi raznih oblika obnovljive energije na Zemlji (jedinica 1 TW), [3]

Najveći dio apsorbirane sunčeve energije na Zemlji troši se na zagrijavanje atmosfere Zemljine površine, vodenih masa te na ishlapljivanje vode. Ukupno manje od 1 % te energije iskoristi se

kroz proces fotosinteze za rast biomase te za pokretanje vjetrova, valova i morskih struja. Vjetrovi, valovi i morske struje nastaju uslijed različitog zagrijavanja pojedinih dijelova Zemlje. Kako se vidi iz slike 3.2, najveći dio Zemlji dozačene sunčeve energije mogao bi se direktno iskoristiti, i tonpr. s pomoću sunčevih kolektora i fotonaponskih ćelija, korištenjem toplinske energije akumulirane u oceanima i tlu te hidroenergije. Stvarna mogućnost iskorištenja ovisi o karakteristikama odgovarajućeg oblika obnovljive energije te tehnološko-ekonomskim aspektima u odnosu na primijenjene uređaje i sustave.



Slika 3.3 Razlika između tijeka obnovljive i energije iz fosilnih goriva kroz okoliš, [3]

Na slici 3.3 prikazana je temeljna razlika između obnovljive energije i one dobivene izgaranjem fosilnih goriva. Obnovljiva je energija tijekom korištenja samo "skrenuta" iz svog prirodnog obnovljivog toka te opet vraćena u njega. S druge strane, fosilna goriva su statični izvori u kojima se energija akumulirala kroz više milijuna godina. Tako akumulirana energija oslobađa u okoliš vanjskim djelovanjem, i to u bitno kraćem vremenu nego što se akumulirala.

3.2 Karakteristike obnovljive energije

Najveća prepreka široj uporabi Sunčeve energije kod direktne pretvorbe u korisnu energiju jest relativno niska vrijednost gustoće energetskega toka, koji je manji od 1 kW/m^2 . Fosilna goriva u pravilu omogućuju postizanje znatno većih vrijednosti, primjerice, u ložištu toplovodnog plinskog kotla moguće je izmijeniti 100 kW/m^2 toplinske energije. Ipak, u slučajevima gdje postoji mogućnost akumulacije obnovljive energije kao, primjerice, kod biomase i hidroenergije, mogu se postići vrijednosti gustoće energetskega toka koje su usporedive s onima kod fosilnih goriva. Za razliku od prvotne pretvorbe iz primarne u korisnu energiju, korisna se energija u konačnici lokalno koristi uz znatno niže vrijednosti gustoće energetskega toka, a koje su istoga reda veličine bez obzira radi li se o obnovljivoj ili energiji iz fosilnih goriva. Stoga je prikladno pretvorbu obnovljive primarne energije u onu korisnu obaviti lokalno, kod samog korisnika (npr. u sunčanom sustavu u sklopu zgrade). S druge strane, pretvorba većih iznosa primarne energije iz fosilnih goriva u korisnu energiju često se obavlja centralno (npr. termoelektrana snage 200 MW), a korisna se električna i toplinska energija onda distribuira dalje korisnicima.

Drugo važno svojstvo obnovljive energije njezina je promjenjivost u vremenu, što dovodi do neusklađenosti s potrošnjom. To nameće potrebu za uskladištenjem viškova energije te postojanjem dodatnog fosilnog izvora energije i složene regulacije.

Promjenjiva prostorna raspoloživost obnovljive energije iziskuje često dugogodišnje praćenje meteoroloških parametara odabrane lokacije (npr. Sunčeva zračenja, brzine vjeta i dr.) kako bi se dobili vjerodostojni podaci za dimenzioniranje sustava za iskorištavanje. Pri tome proračunski

postupci često uključuju dinamičke simulacije rada sustava, a konačno se rješenje odabire na temelju tehnološko – ekonomske analize izvedivosti.

Kvalitetno iskorištavanje obnovljive energije zahtijeva multidisciplinarni pristup, koji uključuje područja poput biologije, kemije, meteorologije, poljoprivrede, geologije, strojarstva, elektrotehnike i arhitekture.

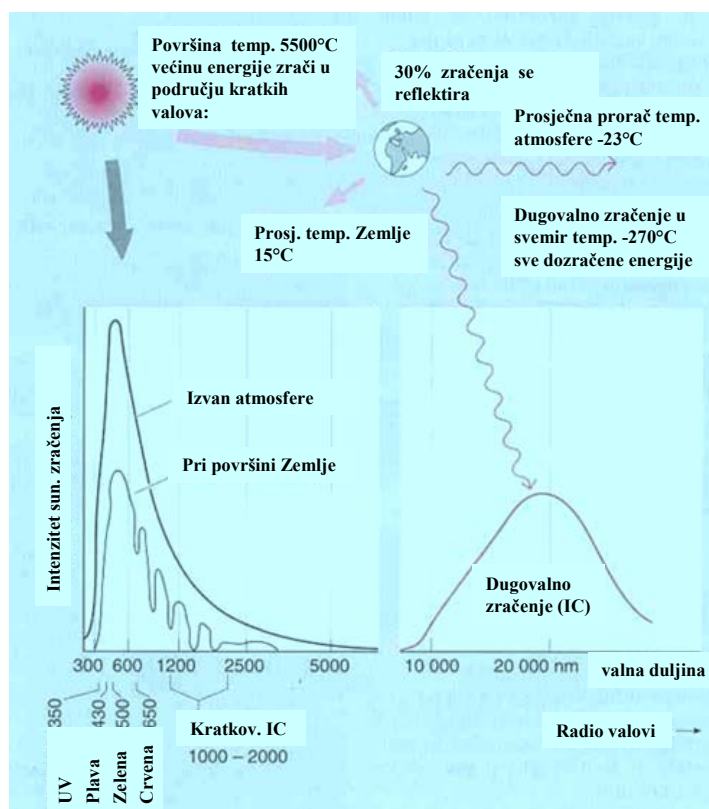
Efikasnosti pretvorbe obnovljive u korisnu energiju iznose oko 50 % kod sunčevih toplovodnih kolektora, 10 % kod fotonaponskih ćelija, 70 % kod toplovodnih kotlova na biomasu, 60 % kod hidroelektrana, 30 % kod vjetroelektrana, a 75 % kod elektrana koje koriste energiju plime ili valova.

Zbog složenosti iskorištavanja, redovito velikih investicijskih troškove i visoke specifične cijene energije dobavljene krajnjem korisniku, za postizanje većeg udjela obnovljive u ukupnoj energetske bilanci RH nego što je to danas, potrebno je postići visoku razinu ekološke osviještenosti državne administracije, lokalne zajednice i energetskih stručnjaka.

4. Sunčevo zračenje

4.1 Karakteristike

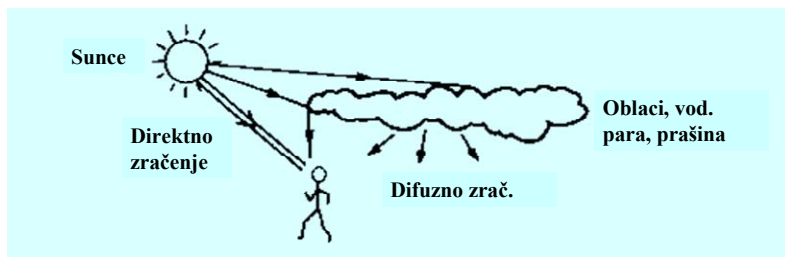
Reakcijama nuklearne fuzije u središtu Sunca oslobađa se golema energija od oko $380000 \cdot 10^9$ TW. Pri tome prosječna temperatura u njegovu središtu iznosi oko 10^7 K a na površini 5777 K. Od Sunca se Zemlji putem elektromagnetskih valova dozrači 173 000 TW, a od toga se na njoj apsorbira oko 120 000 TW. Spektralna raspodjela intenziteta zračenja po valnim duljinama oblikom je vrlo slična onoj crnog tijela temperature 5777 K (slika 4.1). Stoga se najveći dio sunčeve energije prenese u vidljivom i kratkovalnom infracrvenom području valnih duljina $\lambda = 0,3\text{--}2,5$ μm , tj. putem tzv. kratkovalnog zračenja.



Slika 4.1 Izmjena topline zračenjem između Sunca, Zemlje i Svemira, [2]

Površina ispod krivulje spektralne razdiobe intenziteta zračenja sa slike 4.1 iznosi 1367 W/m^2 i naziva se "Sunčevom konstantom" te predstavlja iznos ekstraterestričkog Sunčeva ozračenja na granici zemljine atmosfere, iskazanog po jedinici površine plohe okomite na smjer zračenja. Od tog ekstraterestričkog zračenja 30 % se odmah reflektira nazad u svemir, većinom od oblaka, a jedan manji dio od zemljine površine (većinom snijega i leda). Preostali dio zračenja (vrijednost ozračenja do 1000 W/m^2) djelomično se apsorbira u atmosferi, a ostatak u Zemljinoj površini.

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 4.2 Direktno i difuzno sunčevo zračenje, [3]

4.2 Efekt staklenika

Sunčevo zračenje apsorbirano u atmosferi uzrokuje njezino zagrijavanje. Pri tome atmosfera zrači prema površini i prema svojim gornjim slojevima odnosno svemiru. S druge strane, Zemljina površina (tlo, oceani) apsorbiranu energiju predaje atmosferi kroz procese isparavanja i naknadne kondenzacije u višim slojevima atmosfere te konvektivno i zračenjem. Na kraju je ukupno dozračena energija Zemlji jednaka ukupno odzračenoj energiji nazad u svemir temperature $-273 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Kako je efektivna temperatura za izmjenu topline zračenjem u svemir gornjih slojeva atmosfere $-23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a površine $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tj. relativno je niska, najveći se dio energije sa Zemlje u Svemir odzrači u području infracrvenog zračenja, odnosno u rasponu valnih duljina $\lambda = 5\text{-}25 \text{ }\mu\text{m}$.

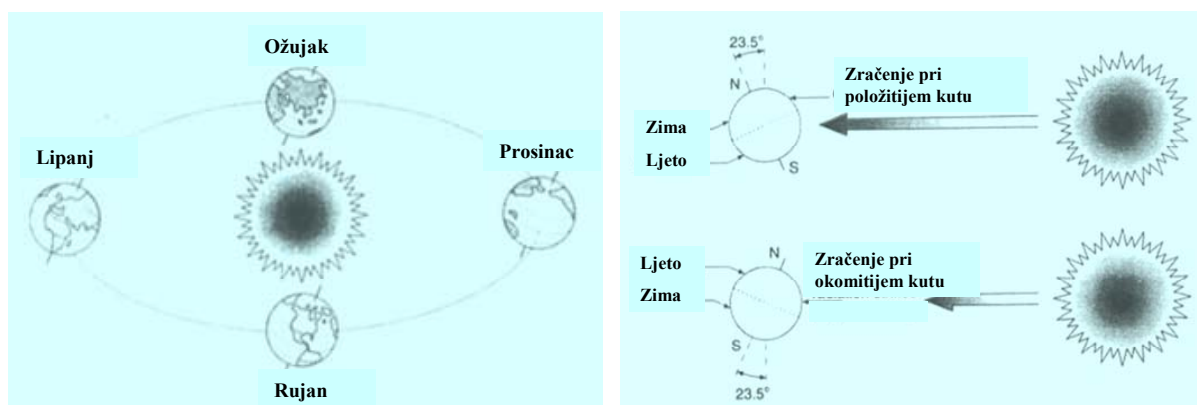
Najveći dio tog dugovalnog zračenja prvotno se apsorbira u tzv. stakleničkim plinovima koji su sastavni dio atmosfere, i to ponajviše u CO_2 , vodenoj pari i metanu. Ta se energija potom djelomično emitira u svemir, a dio nazad prema Zemljinoj površini. Taj je prirodni proces poznat i kao "efekt staklenika". Prema tome, staklenički plinovi djeluju kao prirodni izolator povećavajući toplinski otpor izmjeni topline između Zemlje i svemira. Bez toga bi temperatura Zemljine površine iznosila oko $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, uz znatno veće temperaturne promjene dan/noć. Svako povećanje koncentracije stakleničkih plinova dodatno povećava toplinski otpor izmjeni topline sa svemirom te nužno dovodi do povećanja prosječne temperature površine i atmosfere, jer dozračena energija Zemlji i dalje ostaje ista. Pretpostavlja se da je mjerenjima zabilježeno povećanje prosječne temperature na Zemlji od sredine 20 stoljeća do danas za $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ upravo posljedica povećanja koncentracije stakleničkih plinova uslijed korištenja fosilnih goriva.

4.3 Godišnja promjena Sunčeva ozračenja

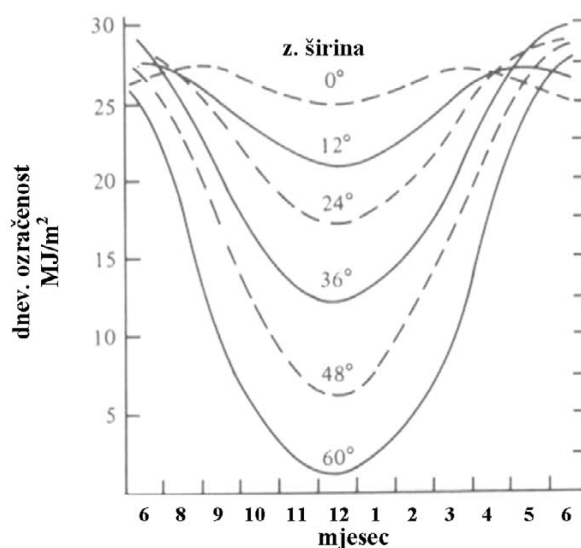
Godišnja promjena Sunčeva ozračenja posljedica je orbitalnog kretanja Zemlje oko Sunca, slika 4.3. To dovodi do promjene upadnog kuta sunčevih zraka na Zemljinu površinu, što uvelike utječe na iznos ozračenja. Isto tako, mijenja se i duljina puta koji sunčeve zrake moraju prolaziti kroz atmosferu što utječe na iznos raspršenog, reflektiranog i apsorbiranog zračenja. Mjera promjene Sunčeva ozračenja kroz godinu je deklinacija δ , tj. kut nagiba Zemljine osi prema ravnini orbite koji se mijenja se od $\delta = -23,5^{\circ}$ zimi do $\delta = 23,5^{\circ}$ ljeti.

Iznos ukupne dozračene sunčeve energije na horizontalnu plohu u jednoj godini, tj. godišnja ozračenost, za područje Zagreba iznosi 1200 kWh/m^2 , a Splita 1600 kWh/m^2 . Kako je vidljivo iz

dijagrama na slici 4.4 za zemljopisnu širinu 45° , tj. za našu zemlju, postoji velika razlika u ozračenosti između zimskih i ljetnih mjeseci, tako da je u siječnju ona oko 5 puta manja nego u lipnju. Isto tako, 75 % godišnje dozračene sunčeve energije otpada na topliju polovicu godine, tj. period od travnja do listopada. Ta činjenica otežava dimenzioniranje sunčanih sustava koji moraju osigurati dostatne količine toplinske energije korisniku u zimskim mjesecima kad su potrebe najveće, ali da se izbjegnu zastoji u radu u ljetnim mjesecima zbog mogućih viškova prikupljene sunčeve energije koja se ne može iskoristiti.



Slika 4.3 Orbitalno kretanje Zemlje oko Sunca i promjena nagiba zemljine osi, [2,3]



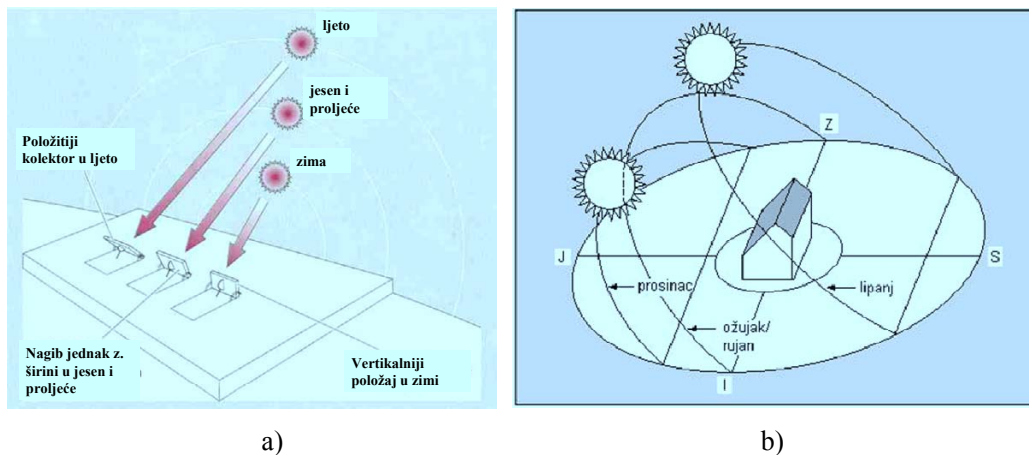
Slika 4.4 Promjena dnevne sunčeve ozračenosti horizontalne plohe tijekom godine za vedra dana i razne zemljopisne širine, [3]

Detaljni podaci o satnim ozračenostima horizontalne plohe i plohe nagnute pod kutom od 45° za Zagreb i Split dani su u [19]. Podaci za plohe nagnute pod drugim kutovima mogu se pronaći u odgovarajućoj literaturi ili pak izračunati iz podataka za horizontalnu plohu koristeći neki od modela iz stručne literature (npr. izotropni model [1]).

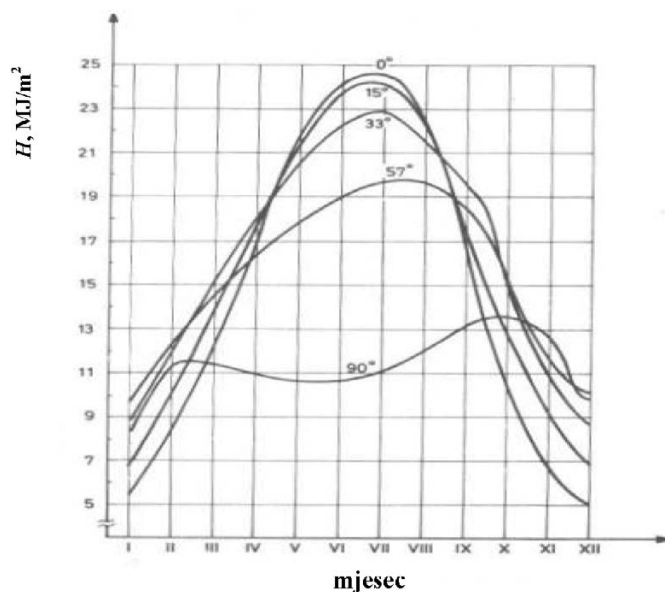
4.4 Optimalni kut kolektora

Sunčev kolektor uputno je montirati pod optimalnim kutom prema horizontali koji u periodu korištenja (godini, ljetnim mjesecima) osigurava najveću ozračenost kolektorske plohe. Optimalni kut ovisi o zemljopisnoj širini, periodu u godini za koji se određuje (slike 4.5, 4.6) te o namjeni sunčanog sustava. Optimalni godišnji nagib kolektora obično je iznosom blizak zemljopisnoj širini $\phi = 45^\circ$ pa tako za Republiku Hrvatsku iznosi 37° . Ukoliko je namjena sustava takva da je potreb-

no prikupiti što više energije u ljetnim mjesecima (npr. u apartmanima i hotelima tijekom turističke sezone) tada je optimalni kut (10-20)°. Izvan turističkog sektora, obično je tijekom ljetnih mjeseci potrebno prikupiti manje toplinske energije nego u ostatku godine tako da, ovisno o ciljanom periodu, optimalni kut može biti veći i od 45°.

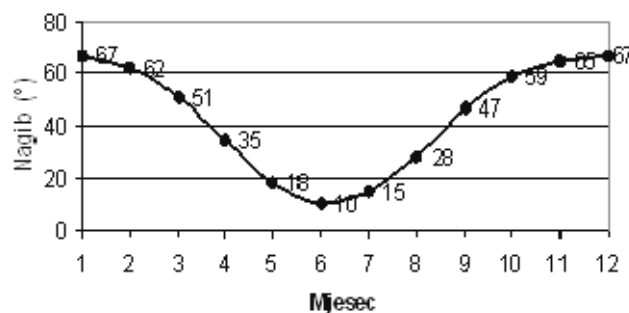


Slika 4.5 a) Optimalni kut nagiba kolektora u ovisnosti o godišnjim dobima, b) Relativna putanja Sunca u odnosu na promatrača na Zemlji tijekom pojedinih godišnjih doba, [2]



Slika 4.6 Izmjerene vrijednosti godišnje ozračenosti kolektora H za različite kutove nagiba ($\beta = 0 \div 90^\circ$), [4]

Optimalni kutovi nagiba kolektora za različite mjesece u Republici Hrvatskoj dani su na slici 4.7.



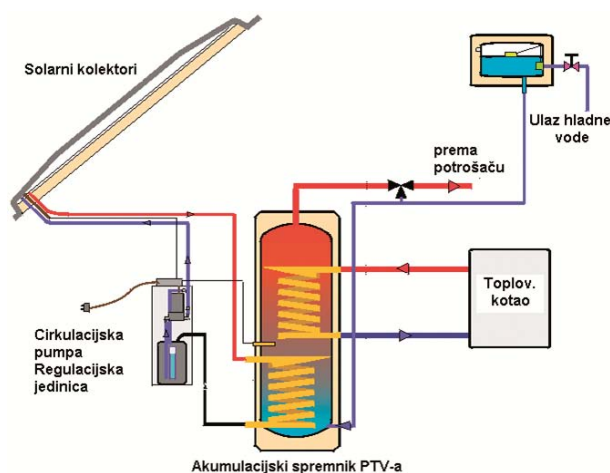
Slika 4.7 Mjesečne optimalne vrijednosti kuta nagiba kolektora β kroz godinu, [17]

Kada bi se kut nagiba kolektora svaki mjesec namještao tako da bude optimalan, ukupna godišnja ozračenost takvog kolektora u Splitu bi iznosila 1900 kWh/m^2 , dok bi onaj montiran pod 45° imao ozračenost od 1800 kWh/m^2 , tj. 6 % manje sunčeve energije. S obzirom na promjenu optimalnih kutova kroz godinu (slika 4.7), tako mala razlika odražava činjenicu da je difuzna komponenta zračenja manje osjetljiva na promjenu kuta nagiba od one direktne.

5. Kolektori Sunčeva zračenja

5.1 Efikasnost kolektora

Sunčeva energija danas se komercijalno najviše koristi u toplovodnim sunčanim sustavima (slika 5.1) i to za pripremu potrošne tople vode (PTV) te u manjem obimu za grijanje prostora i zagrijavanje bazenske vode. Najvažniji element sunčanih toplovodnih sustava predstavljaju sunčevi kolektori. Oni prikupljaju sunčevu energiju i predaju je radnom mediju koji struji u zatvorenom krugu između kolektora i spremnika tople vode te kojoj preko izmjenjivača predaje prikupljenu toplinsku energiju.



Slika 5.1 Sunčani sustav za pripremu PTV-a s pločastim kolektorima

Efikasnost prikupljanja sunčeve energije za kolektore je stoga od presudnog utjecaja na efikasnost rada cijelog sustava. Podatke o efikasnosti njihovi proizvođači daju u sklopu izvješća o ispitivanju kolektora koje je obavio akreditirani laboratorij.

Efikasnost kolektora definirana je kao udio sunčeve toplinske energije predane vodi i energije upadnog sunčevog zračenja G_{sun} na plohu kolektora površine A_{kol}

$$\eta_{\text{kol}} = \frac{P_{\text{kol}}}{G_{\text{sun}} \cdot A_{\text{kol}}} \quad (5.1)$$

Efikasnost se određuje eksperimentalno mjerenjem toplinskog toka predanog fluidu, tj. ulazne i izlazne temperature fluida te njegovog masenog protoka $\dot{m}$, a može se izračunati iz sljedećeg izraza

$$P_{\text{kol}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{\text{f,iz}} - \vartheta_{\text{f,ul}}) \cdot [\text{W}] \quad (5.2)$$

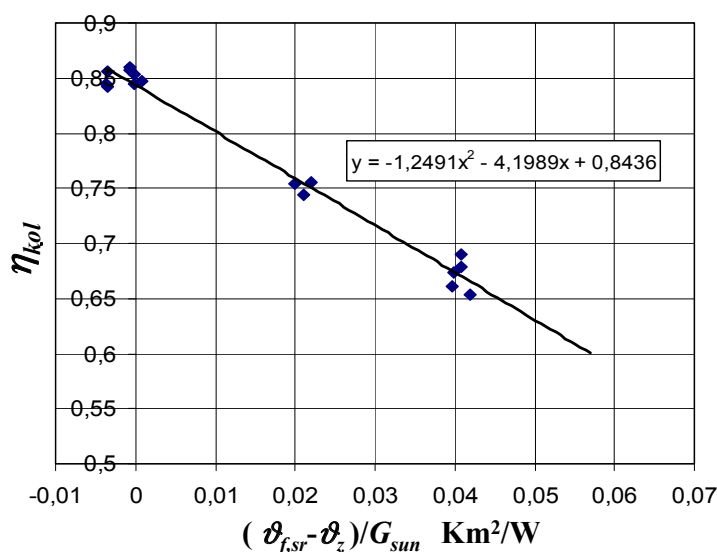
Isto tako, da bi se odredila efikasnost, potrebno je mjeriti i ukupno sunčevo ozračenje G_{sun} za što se koristi instrument piranometar. Rad piranometra temelji se na mjerenju temperature apsorbirajuće pločice (termopilovima) izložene Sunčevu zračenju i temperature okoline. Temeljem toga dobije se potrebno ozračenje za održavanje te temperaturne razlike.

Efikasnost se najčešće iskazuje u ovisnosti o razlici srednje temperature radnog fluida $\vartheta_{f, sr}$ u kolektoru i temperature okolišnog zraka ϑ_z te upadnom sunčevom ozračenju G_{sun} na ravninu kolektora, odnosno izrazom

$$\eta_{kol} = \eta_0 - a_1 \frac{(\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z)}{G_{sun}} - a_2 G_{sun} \left[\frac{(\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z)}{G_{sun}} \right]^2 \quad (5.3)$$

$$\vartheta_{sr} = \frac{\vartheta_{ul} + \vartheta_{iz}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.4)$$

Koeficijenti polinoma η_0 , a_1 i a_2 određuju se regresijskom analizom eksperimentalnih podataka koji se obično prikazuju u dijagramima poput onog na slici 5.2.



Slika 5.2 Mjerene vrijednosti efikasnosti pločastog kolektora i regresijski polinom (podaci FSB, Zagreb)

Razlika $\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z$ predstavlja potencijal za izmjenu topline između radnog medija i okoline, tj. za toplinske gubitke. Što su toplinski gubici kolektora manji, to će i njegova efikasnost biti veća, i obrnuto.

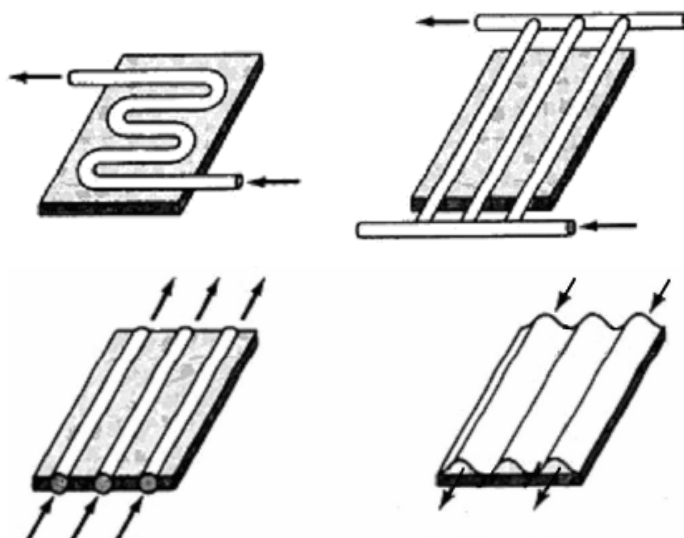
Iz prethodnog se dijagrama vidi da pri konstantnom Sunčevu zračenju efikasnost kolektora pada s porastom temperature radnog fluida. Tada toplinski gubici na okolinu rastu jer dolazi do povećanja temperature svih dijelova kolektora, posebice apsorbera. Prema tome, radnu temperaturu medija u kolektoru je poželjno držati što nižom, a da se pri tome još uvijek mogu postići željene temperature vode u spremniku (55-60 °C).

Do povećanja gubitaka na okolinu dolazi i kod snižavanja temperature okolišnog zraka, a pri konstantnim ostalim parametrima rada. Smanjenje Sunčeva zračenja pri istoj temperaturnoj razlici $\vartheta_{f, sr} - \vartheta_z$ će isto tako dovesti do smanjenja efikasnosti s obzirom da su toplinski gubici isti, apsorbirana energija niža, a time je i niža dovedena korisna toplota radnom fluidu. Tako će u zimskim mjesecima, kada je sunčevo ozračenje manje, a temperature zraka niže, pri istim temperaturama radnog medija efikasnost kolektora biti niža.

5.2 Pločasti kolektori

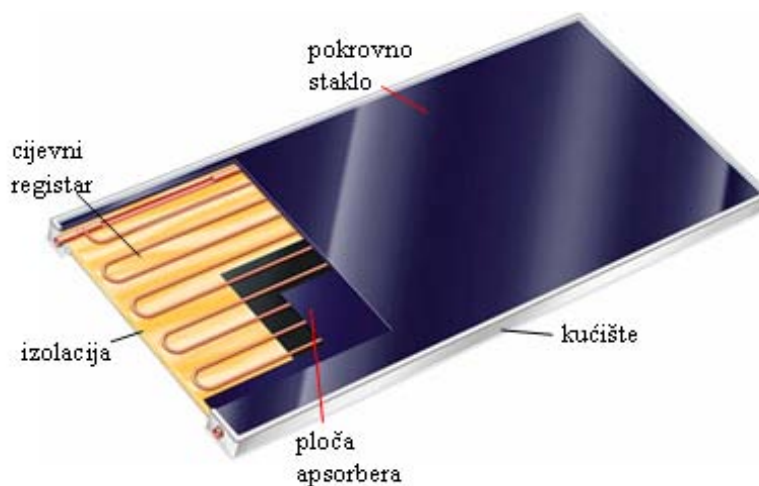
U sunčanim toplovodnim sustavima danas se najviše koriste pločasti kolektori, a u novije vrijeme sve više i vakuumski (poglavlje 5.3). Razne izvedbe pločastih kolektora prikazane su na slici 5.3.

Prvi je komercijalni pločasti kolektor patentiran u Kaliforniji 1909. godine, a masovnija proizvodnja bilježi se tijekom naftne krize 70-tih godina prošlog stoljeća. Od tada su pločasti kolektori znatno unaprijeđeni, što se posebice odnosi na njihovu toplinsku efikasnost kao i pouzdanost u radu i trajnost. To je sve dovelo do znatnoga povećanja broja instaliranih kolektora tijekom 1990-tih i, posljedično, znatnog snižavanja cijena. Taj se trend i danas nastavlja.



Slika 5.3 Razne izvedbe pločastih kolektora

Na slici 5.4 prikazan je tip pločastog kolektora s pokrovnim staklom kakav se najčešće može pronaći na tržištu.



Slika 5.4 Pločasti kolektor s pokrovnim staklom

Osnovni dijelovi kolektora su: apsorberska ploča, cijevni registar, pokrovno staklo, izolacija i kućište. Apсорberska je ploča premazana posebnim premazom koji apsorbera sunčevo zračenje. Tako prikupljena toplina dalje se provodi kroz materijal apsorberske ploče (debljine cca 0,3-0,5 mm) prema cijevnom registru i na kraju predaje radnom fluidu koji protječe kroz cijevni registar. Cijevi su pričvršćene za apsorber lemljenjem, laserskim ili ultrazvučnim zavarivanjem i ponekad lijepljenjem. Najviše se koriste tzv. selektivni premazi apsorbera koje karakterizira visoki koeficijent apsorpcije za kratkovalno sunčevo zračenje ($\alpha = 0,9-0,96$) i niski koeficijent apsorpcije, tj. emisije za dugovalno IC zračenje ($\alpha = \varepsilon = 0,06-0,2$) koje predstavlja toplinske gubitke kolektora. Takva svojstva osiguravaju istovremeno značajnu apsorpciju sunčevog zračenja i bitno smanjenje toplotnih

skih gubitaka zagrijane ploče apsorbera dugovalnim zračenjem u odnosu na premaze koji nisu selektivni (poput npr. obične crne boje). Slične karakteristike i ulogu ima pokrovno staklo čiji je koeficijent propusnosti za kratkovalno sunčevo zračenje visok ($\tau = 0,9-0,95$), a za dugovalno vrlo nizak ($\tau < 0,02$). Osim smanjenja toplinskih gubitaka, staklo ima i važnu ulogu u zaštiti kolektora od atmosferskih utjecaja. Radi dodatnog smanjenja toplinskih gubitaka, kolektor je izoliran sa stražnje i bočne strane. Za izolaciju se obično koriste mineralna vuna ili PU pjena debljine 30-70 mm, pri čemu gubici kroz izolaciju iznose oko 5-10 % ukupnih gubitaka kolektora.

Cijevni registar tipa "ljestve" (engl. *harp*) sastoji se od niza cijevi promjera 6-10 mm usporedno napajanih iz distribucijskih cijevi većeg promjera (12-14 mm) (slika 5.3). Drugi se tip registra sastoji od jedne cijevi savijene u obliku serpentine (slika 5.3). Kolektor s paralelnim registrom radi s većim protocima (veći broj cijevi) u odnosu na onaj sa serpentinom, što ima za posljedicu niži prirast temperature radnog medija od ulaza do izlaza iz kolektora. U tom slučaju su zbog niže prosječne temperature radnog medija toplinski gubici kolektora manji, tj. veća je efikasnost (vidi poglavlje 5.1).

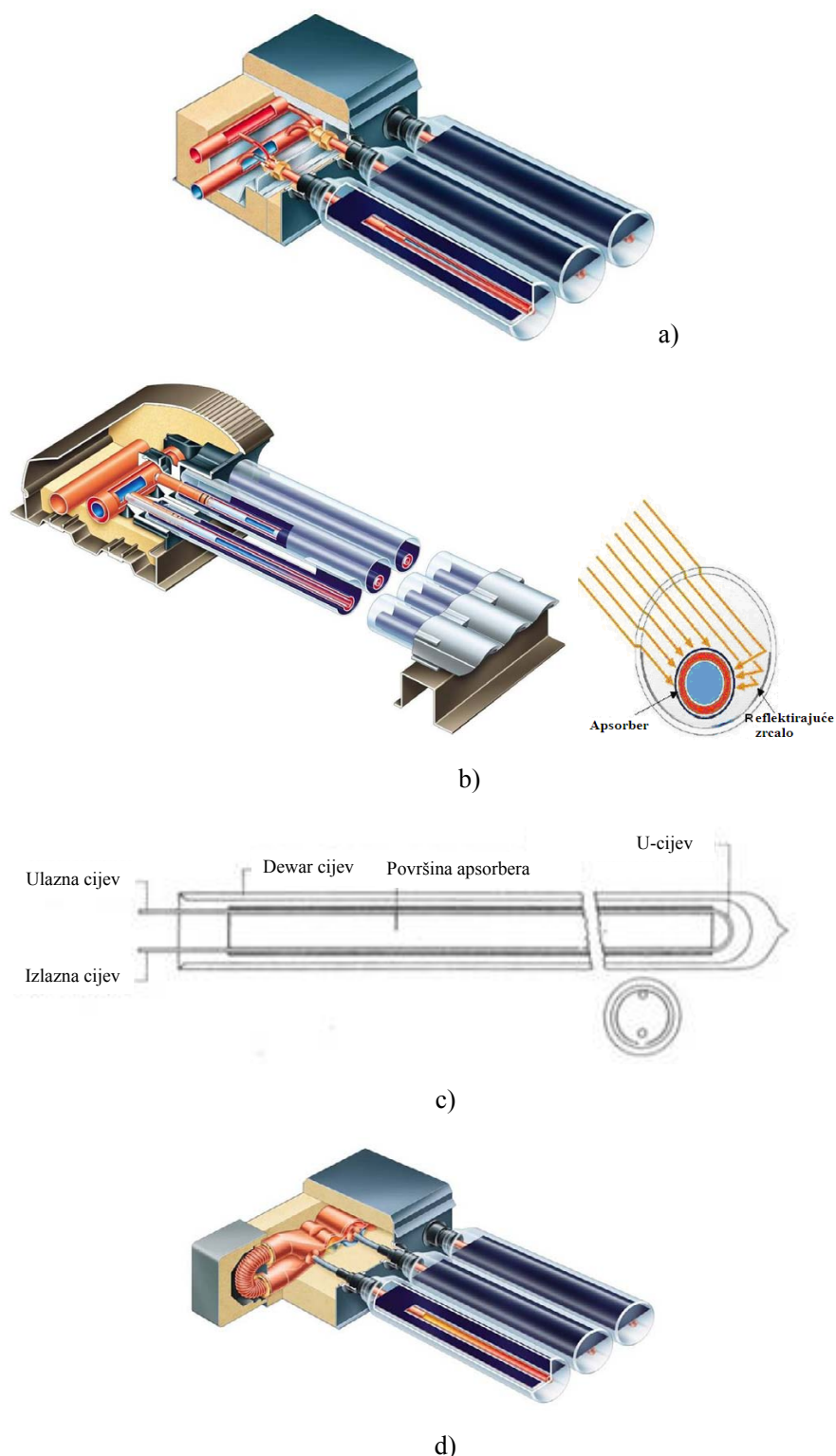
S druge strane, niže temperature na izlazu iz kolektora mogu predstavljati prepreku za predaju sve prikupljene topline vodi u spremniku. Stoga je takav tip apsorbera primjereniji za uporabu u toplijim klimatskim područjima, gdje je tijekom cijele godine moguće postići dovoljno visoke temperature na izlazu iz kolektora da se omogući predaja sve prikupljene topline na izmjenjivaču standardnih dimenzija vodi u spremniku. Registri u obliku serpentine omogućuju veće izlazne temperature fluida iz kolektora prilikom svakog prolaza i kod nižih vrijednosti ozračenja i temperature okoline, pri ukupno manjim vrijednostima protoka kroz, u ovom slučaju, samo jednu cijev serpentine. To ih čini prikladnijim za umjerene do hladne klime (npr. srednja, zapadna i sjeverna Europa). U toplijim područjima (npr. Mediteran) ima više smisla koristiti paralelne registre (pogotovo u ljetnom periodu) zbog veće efikasnosti u radu.

5.3 Vakuumske kolektori

Danas su vakuumske kolektori, poslije pločastih, najviše korišteni tip kolektora. Razvijeni su kako bi se smanjili konvektivni gubici s apsorbera na okolinu, što je učinjeno na način da je iz prostora između apsorbera i stakla izvučen zrak. Kod standardne konstrukcije pločastih kolektora tako nastali vakuum bi doveo do pucanja pokrovnog stakla, pa se kod vakuumskih kolektora apsorber smješta u vakuumirane staklene cijevi (koje zbog kružnog oblika stijenke imaju pri istom vakuumu znatno manja naprezanja u materijalu).

Osnovni tipovi prikazani su na slici 5.5. Kod jednog tipa kolektora fluid struji u dva smjera kroz niz paralelno spojenih koaksijalnih cijevi, pri čemu je unutrašnja povratna iz sustava (hladni fluid) a vanjska polazna (zagrijani fluid), slike 5.5a,b. Apsorber je kao kod pločastih kolektora pričvršćen za cijev (slika 5.5a) ili pak ulogu apsorbera ima vanjska površina koaksijalnih cijevi na koju je nanesen premaz (slika 5.5b). U posljednjem slučaju kod nekih se modela koriste reflektirajuća zrcala koja usmjeravaju sunčevo zračenje na apsorbersku cijev (slika 5.5b). Na slici 5.5c prikazan je drugi tip vakuumskog kolektora koji umjesto koaksijalne cijevi ima savinutu, tzv. U-cijev, kod koje kroz jedan ogranak struji povratni medij iz sustava a kroz drugi zagrijani polazni medij u sustav. Apsorber je u tom slučaju izveden kao ravna ploča.

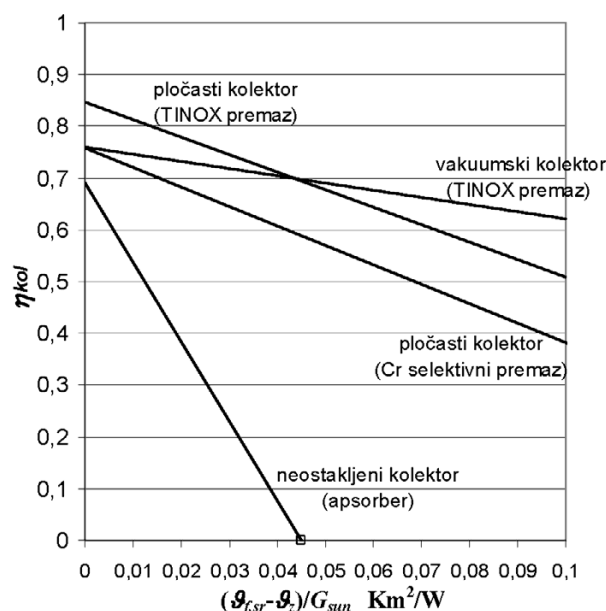
Na tržištu se također mogu pronaći i tzv. toplinske cijevi (engl. *heat pipe*) kod kojih fluid struji kroz samo jednu cijev u dva smjera (slika 5.5d). U donjem apsorberskom dijelu cijevi radni fluid (freon, alkohol) isparava, a u gornjem dijelu cijevi dolazi do njegove kondenzacije, pri čemu se toplina predaje sekundarnom fluidu koji ju dalje preko izmjenjivača predaje vodi u spremniku. Sličan se princip koristi i kod hlađenja većih elektronskih sklopova. Zbog visokih koeficijenata prijelaza topline pri isparavanju i kondenzaciji, ovakvi kolektori imaju ponešto veću efikasnost od prethodno opisanih s jednofaznim strujanjem.



Slika 5.5 a) Konstrukcija s koaksijalno postavljenom polaznom i povratnom cijevi i ravnim apsorberom, [11] b) Konstrukcija s apsorberom nanesenim na koncentričnu cijev kroz koju struji fluid (s i bez reflektirajućih zrcala), [11] c) Konstrukcija s U cijevi i ravnim apsorberom, [1] d) Konstrukcija s tzv. toplinskom cijevi, [11]

Vakuumske kolektore 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 projiciranu površinu kolektora (odnos je oko 0,6) u usporedbi s pločastima (odnos je oko 0,9). Efikasnost (i cijena) vakuumskih, kao i pločastih kolektora, određuje se prema ukupnoj

projiciranoj površini apsorbera ili kolektora. Zbog toga na taj način izračunata efikasnost vakuumskih kolektora može biti i niža od one kod pločastih kolektora identičnih karakteristika apsorbera i stakla. To je čest slučaj u dijelu radne krivulje koja odgovara pretežito ljetnom režimu rada, tj. pri $(\vartheta_{sr} - \vartheta_z)/G_{sun} = 0-0,05 \text{ Km}^2/\text{W}$, slika 5.6. 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 $(\vartheta_{sr} - \vartheta_z)/G_{sun} = 0,05-0,15 \text{ Km}^2/\text{W}$. Tada do većeg izražaja dolazi smanjenje toplinskih gubitaka u vakuumskim kolektorima nego kod pločastih pa je i njihova efikasnost veća. To ih čini prikladnima za korištenje u hladnijim klimama s nižom sunčevom ozračenosti. Zbog manjih toplinskih gubitaka vakuumski kolektori omogućuju postizanje većih temperatura na izlazu (max. 100°C) nego pločasti (max. 85°C). To ih čini prikladnima za korištenje, primjerice, u sunčanim rashladnim sustavima. Kao nedostatak vakuumskih kolektora treba spomenuti mogućnost napuknuća stakla uslijed dilatacija izazvanih temperaturnim promjenama, pri čemu dolazi do gubitka vakuuma i značajnog pada efikasnosti.



Slika 5.6 Krivulje efikasnosti različitih konstrukcija kolektora

5.4 Neostakljeni apsorberi

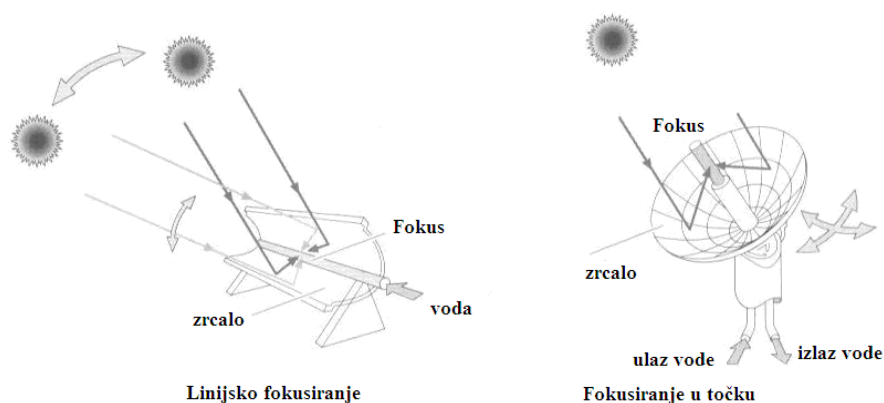
Neostakljeni apsorberi (slika 5.7) sastoje se od plastičnih ili gumenih cijevi otpornih na UV zračenje i montiranih u paralelnom spoju. Zbog nepostojanja pokrovnog stakla toplinski gubici su veliki, tako da su ovakvi kolektori prikladni samo za rad pri nižim temperaturama, i to u ljetnim mjesecima. Najčešće se koriste za zagrijavanje bazena i pripremu PTV-a. Njihova niska cijena opravdava malu efikasnost i kratak rok trajanja (nekoliko godina), a zbog propadanja materijala uslijed djelovanja UV zračenja.



Slika 5.7 Neostakljeni apsorberi

5.5 Koncentrirajući kolektori i sunčane elektrane

Da bi se sunčevim kolektorima mogla efikasno proizvoditi električna energija, potrebno je zagrijati radni medij na temperaturu višu od nekoliko stotina °C. U tu se svrhu koriste koncentrirajući kolektori koji prikupljaju sunčevo zračenje na većoj površini i usmjeravaju ga na apsorber znatno manje površine. Tako se postižu znatno veće vrijednosti gustoće energetskog toka u odnosu na one kod pločastih i vakuumskih kolektora. Koncentrirajući kolektori dijele se na tzv. parabolična korita i tanjuraste koncentratore, slika 5.8.



Slika 5.8 Koncentrirajući kolektori – a) parabolično korito, b) tanjurasti koncentrator, [2]

Parabolično korito sastoji se od apsorberske cijevi i paraboličnog zrcala (aluminij ili srebro nanoseno na staklo ili plastiku) koje se okreće oko uzdužne osi orijentirane u smjeru istok-zapad radi praćenja promjene upadnog kuta Sunca. Zračenje se koncentrira na apsorbersku cijev kroz koju protječe radni fluid (npr. ulje) i zagrijava na temperature do cca 500 °C. Zagrijani fluid se odvodi dalje u postrojenje za proizvodnju vodene pare. Tako proizvedena para koristi se za pogon parne turbine i na njezino vratilo vezanog generatora električne struje. Slika 5.9 prikazuje primjer jedne sunčeve elektrane s paraboličnim koritima. Najveća efikasnost pretvorbe sunčeve u električnu energiju iznosi oko 22 %, a prosječna je oko 14 %. Omjer koncentracije R odnos je površine zrcala i površine apsorbera te za parabolična korita iznosi oko $R = 50$.



Slika 5.9 Sunčana elektrana Luz, južna Kalifornija

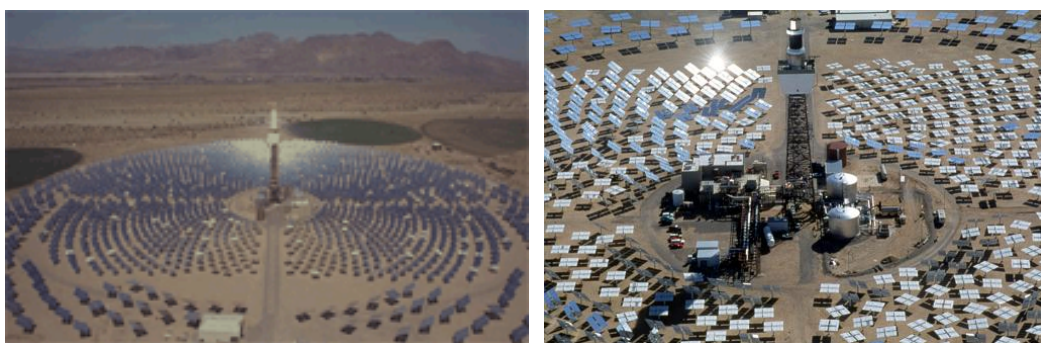
Veći omjeri koncentracije (teoretski $R = 45\,000$, a u praksi do $R = 10\,000$) postižu se tanjurastim koncentratorima. Oni prate kretanje Sunca u dvije dimenzije, po visini i po azimutu (istok-zapad) i omogućuju postizanje temperatura na apsorberu i do 2700 °C. U praksi su, zbog ograničene izdržljivosti materijala, temperature ipak niže te se kreću oko 700-1000 °C. Takve, još uvijek visoke temperature, omogućuju direktnu proizvodnju mehaničkog rada za pokretanje generatora električne struje. Tada se koristi Stirlingov stroj koji se smješta u fokus koncentratora, slika 5.10.

Pri tome se postiže i visoka efikasnost pretvorbe sunčeve u električnu energiju od 30 %, što je bližu prosječnim efikasnostima pretvorbe kemijske energije iz goriva u električnu u konvencionalnim termoelekttranama (33-35 %).



Slika 5.10 Tanjurasti koncentratori sa Stirlingovim strojem smještenim u žarištu

Na slici 5.11 prikazana je sunčana elektrana koja koristi tzv. Sunčev toranj. Ovdje se heliostatskim zrcalima koji prate kretanje Sunca usmjerava sunčevo zračenje na apsorber smješten na vrhu tornja. Tamo se zagrijava termičko ulje ili tekuća sol (npr. KCl) na $\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ i potom odvodi dalje u postrojenje smješteno pored tornja. Tamo se koristi za proizvodnju vodene pare za turbinu te u konačnici za proizvodnju električne energije. Dio prikupljene energije akumulira se u spremnicima te koristi za proizvodnju pare i električne energije tijekom noći. Danas u svijetu postoji nekoliko ovakvih elektrana (SAD, Španjolska, Francuska), pri čemu, primjerice, u Španjolskoj postoje planovi za instalaciju 7 elektrana (dvije su već instalirane, svaka sa po cca. 20 MW el. snage). Cijena proizvedene električne energije po kWh zbog veličine je niža nego kod individualnih postrojenja s, primjerice, fotonaponskim ćelijama. No investicijski troškovi su znatno veći, što je do sada često bila prepreka širem korištenju.



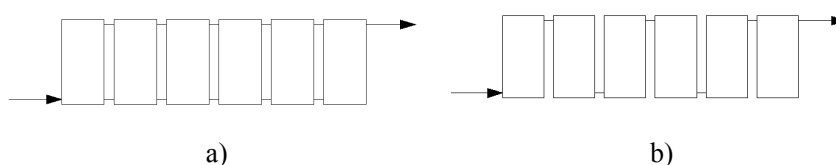
Slika 5.11 Sunčev toranj (10 MWe) u južnoj Kaliforniji, 1818 heliostatskih zrcala

Općenito, glavni je nedostatak fokusirajućih kolektora njihova visoka cijena. Razlog tome je potreba za preciznim smještanjem apsorbera u fokus, postizanjem geometrijski točnog paraboličnog oblika samih zrcala te ugradnje mehanizma za praćenje Sunca. Osim toga, reflektirajuća zrcala su podložna koroziji i oksidaciji uslijed izloženosti visokim temperaturama, a potrebno je i osigurati visoku čistoću reflektirajućih površina što dodatno povećava troškove održavanja.

5.6 Raspodjela strujanja u kolektorima

Kolektori se spajaju u grupe serijski ili paralelno, slika 5.12. Svaki od načina spajanja ima svoje prednosti i nedostatke. Tako je paralelni spoj bolji zbog manjeg pada tlaka jer fluid prolazi manji ukupni put kroz spoj. No on zahtijeva veći broj i promjere razdjelnih cijevi uslijed većih protočnih

količina radnog fluida u njima. 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, sve to omogućuje postizanje većeg prirasta temperature od ulaza do izlaza iz spoja. Međutim zbog toga je prosječna temperatura u serijskom spoju viša, a time je i prosječna efikasnost niža nego kod paralelnog spoja s istim brojem kolektora. Slično kao što je to slučaj s kolektorima s cijevnom serpentinom, serijski spoj je ponekad neizbježan jer u hladnijim klimama s nižom godišnjom ozračenosti omogućuje korištenje izmjenjivačkih površina standardnih dimenzija u spremnicima tople vode, a da se još uvijek može predati sva prikupljena toplina vodi u spremniku. 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, preporučuje se da broj kolektora u paralelnom spoju ne bude veći od 5-6. Kod serijskog spoja broj kolektora je ograničen dozvoljenim padom tlaka.

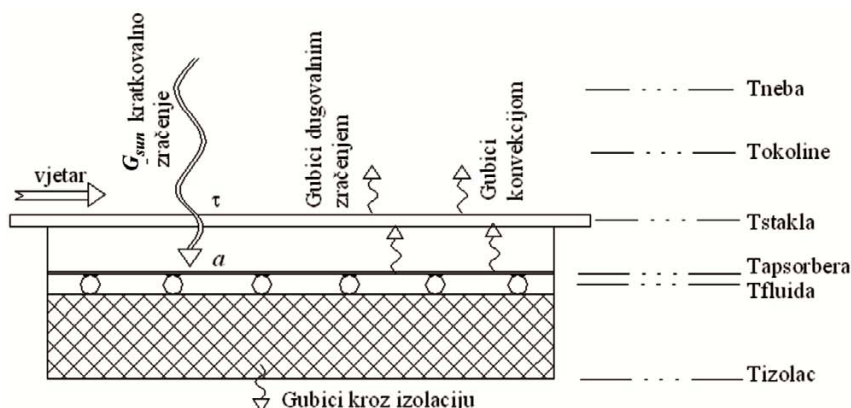


Slika 5.12 a) Paralelni i b) Serijski spoj kolektora

6. Izmjena topline u pločastom kolektoru

6.1 Mehanizmi izmjene topline

Slika 6.1 shematski prikazuje osnovne mehanizme izmjene topline u pločastom kolektoru. Sunčevo se zračenje nakon prolaska kroz pokrovno staklo i gubitaka uslijed refleksije i apsorpcije u staklu (ukupno 10 % kod stakla sa $\tau = 0,9$) jednim dijelom apsorbira u premazu apsorberske ploče. Preostali dio upadnog zračenja dospjelog do apsorbera reflektira se nazad u okolinu kroz staklo, ali pri tome i djelomično apsorbira u njemu. U konačnici ukupno apsorbirana energija zračenja u apsorberu iznosi $G \cdot (\tau \cdot a)$. Dio te energije provodi se kroz materijal apsorberske ploče (bakar, aluminij) preko materijala spoja do cijevi i u na kraju predaje radnom fluidu (voda, propilenglikol/voda) koji struji kroz te cijevi. Ovdje treba napomenuti da veliki utjecaj na efikasnost kolektora ima upravo toplinski otpor spoja između cijevi i apsorbera.

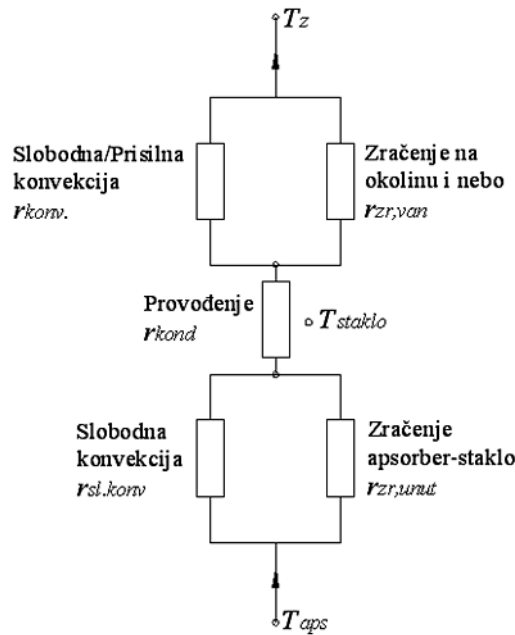


Slika 6.1 Osnovni mehanizmi izmjene topline u pločastom kolektoru

Na žalost, sva apsorbirana sunčeva energija ne uspije se predati radnom mediju. Značajan dio izmjeni se s okolišem i kao takav predstavlja toplinske gubitke kolektora. Izmjena topline s okoli-

šem odvija se konvektivno i zračenjem u više faza. U prostoru između apsorbera i stakla dominantna je slobodna konvekcija s ploče apsorbera na zrak. Zrak se uslijed toga kreće od apsorbera prema staklu predajući mu toplinu i potom vraća nazad prema apsorberu.

Staklo se isto tako zagrijava i od dugovalnog zračenja koje emitira zagrijana apsorberska ploča. Pokrovno staklo praktički ne propušta to dugovalno zračenje, ali ga apsorbira. Od konvekcijom i zračenjem zagrijanog stakla toplina se dalje gubi putem slobodne ili prisilne konvekcije (u slučaju kada puše vjetar) na okolišni zrak te zračenjem na okolne objekte i nebeski svod. Jedan manji dio topline izgubi se provođenjem kroz izolaciju kolektora (< 5-10 % ukupnih gubitaka). Opisani gubici mogu se u analogiji s električnim krugovima prikazati putem paralelnog i serijskog spoja toplinskih otpora i temperaturne razlike apsorber-zrak, slika 6.2.



Slika 6.2 Prikaz toplinskih otpora izmjene topline između apsorbera i okoline – analogija s električnim krugovima

Korisni toplinski tok predan radnom fluidu može se izraziti kao razlika apsorbirane energije zračenja i toplinskih gubitaka na okoliš svedenih na temperaturu zraka ϑ_z

$$P_{kol} = G_{sun} \cdot (\tau a) \cdot A_{kol} - A_{kol} (\vartheta_{aps} - \vartheta_z) / R_t \quad [\text{W}]. \quad (6.1)$$

Taj je toplinski tok upravo jednak toplinskom toku izmijenjenom između apsorberske ploče temperature ϑ_{aps} i fluida u cijevima temperature ϑ_f

$$P_{kol} = A_{kol} (T_{aps} - T_f) / R_{a-f} \quad [\text{W}]. \quad (6.2)$$

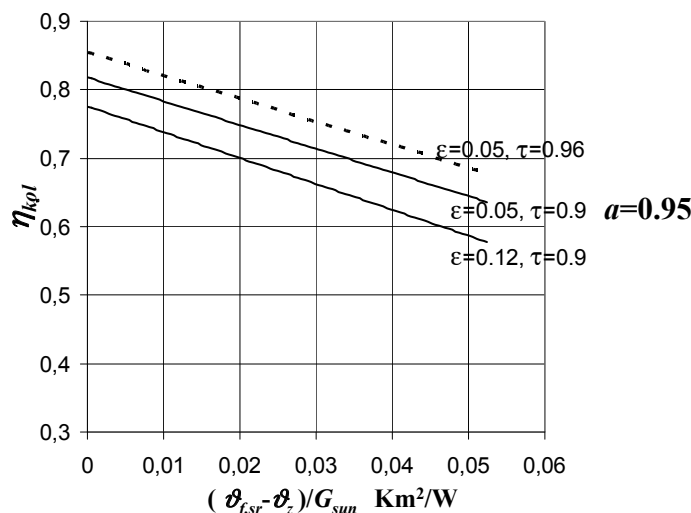
gdje R_{a-f} ($\text{m}^2\text{K/W}$) predstavlja toplinski otpor između apsorbera i fluida u cijevima. Ukupni toplinski otpor gubicima topline R_t ($\text{m}^2\text{K/W}$) računa se prema slici 6.4 kao serijski spoj dviju grupa paralelnih otpora zračenja i konvekcije te otpora provođenja kroz staklo (detaljnije u [16]).

6.2 Utjecaj konstrukcije na toplinske karakteristike

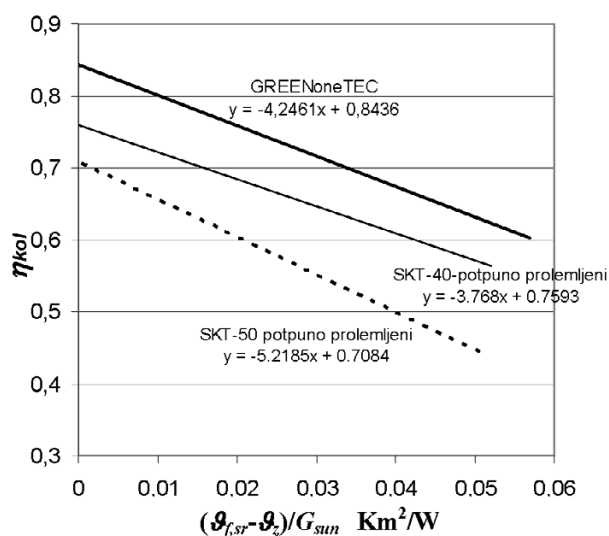
6.2.1 Utjecaj optičkih svojstava apsorbera i stakla

Jednadžbe 6.1 i 6.2 osnova su za proračun izmjene topline u kolektoru. U kombinaciji s proračunom toplinskih otpora omogućuju analizu utjecaja konstrukcijskih parametara na efikasnost kolektora te slijedom toga i optimizaciju konstrukcije. Na slici 6.3 prikazani su rezultati jedne takve

analize utjecaja koeficijenta emisije apsorbera i propusnosti stakla. Ovdje se može primijetiti kako smanjenje koeficijenta emisije s $\varepsilon = 0,12$ (prosječni premazi) na $\varepsilon = 0,05$ (visoko selektivni i nešto skuplji premazi) ima isti utjecaj na povećanje efikasnosti, kao i povećanje koeficijenta propusnosti stakla s uobičajenih $\tau = 0,9$ na $\tau = 0,96$, koji imaju najkvalitetnija i vrlo skupa kolektorska stakla.



Slika 6.3 Utjecaj koeficijenta emisije apsorbera i propusnosti stakla na efikasnost pločastog kolektora, $a = 0,95$

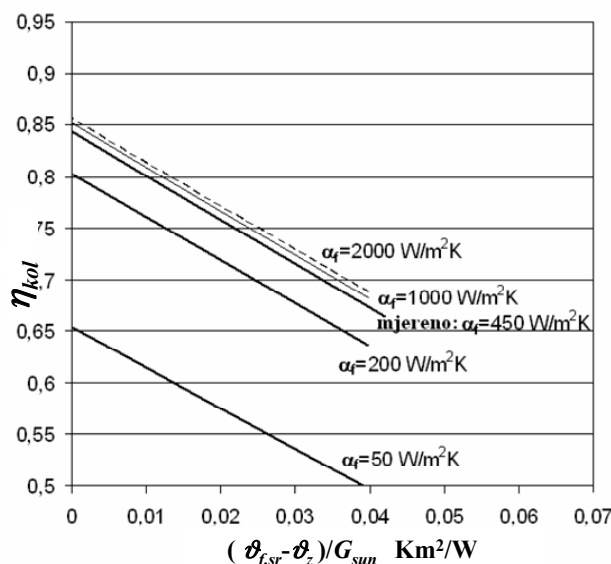


Slika 6.7 Rezultati mjerenja kolektora s TINOX premazom i laserski zavarenim cijevima za ploču apsorbera, [16]

6.3 Utjecaj strujanja radnog fluida

Utjecaj protoka radnog fluida kroz kolektor na njegovu efikasnost prikazan je u dijagramu na slici 6.4. Krivulje efikasnosti izračunate su za različite vrijednosti protoka, odnosno koeficijenta prijelaza topline u cijevi α_f te uspoređene s izmjeranim 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, α_f nema značajniji utjecaj na efikasnost kolektora nakon što njegova vrijednost prijeđe $\alpha_f = 450 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kod tipične konstrukcije kolektora s promjerom cijevi od 7-10 mm radni su protoci fluida 35-50 kg/h po m^2 apsorbera. Tada je strujanje uglavnom laminarno, a $\alpha_f = 300\text{-}400 \text{ W/m}^2\text{K}$. Daljnje povećanje protoka iznad navedenih nema smisla, a i štetno je u smislu povećanja pogonskih troškova za cirkulacijsku pumpu jer pad tlaka raste gotovo 8 puta brže nego α_f . S druge strane, kada se protok smanji toliko da je $\alpha_f < 200 \text{ W/m}^2\text{K}$, toplinski otpor prolasku topline od

cijevi prema fluidu ima veći utjecaj na ukupni otpor od apsorbera do fluida. Tada dolazi do značajnijeg smanjenja efikasnosti kolektora. Zato je potrebno obratiti pozornost da vrijednosti protoka kroz kolektore ne padnu ispod cca. 25-30 kg/h·m². U tu se svrhu provodi proračun hidrauličkih gubitaka strujanja u kolektorskom krugu i temeljem toga odabire odgovarajuća cirkulacijska pumpa. Indikacija premalog protoka može biti i prirast temperature na kolektoru veći od 15 °C. Slično, kod prevelikog protoka prirast temperature je manji od 5 °C.



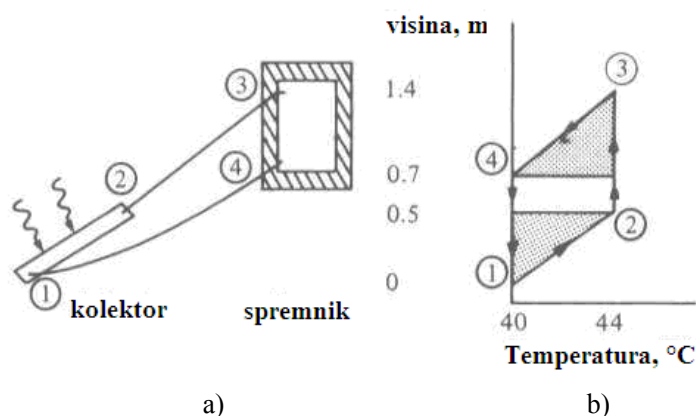
Slika 6.4 Utjecaj α_f na efikasnost kolektora, temeljeno na mjerenjima i CFD simulacijama u FLUENT 6.1, [16]

7. Sunčani toplovodni sustavi

7.1 Sustavi za pripremu PTV-a

Kako je već ranije navedeno, danas se za direktno iskorištavanje Sunčeve energije najčešće koriste niskotemperaturni (40-60 °C) toplovodni sunčani sustavi (vidi sliku 5.1). Najveći broj instaliranih sustava namijenjen je zagrijavanju potrošne tople vode (PTV) zbog toga što je Sunčeva ozračenost najveća upravo u periodu godine izvan sezone grijanja. Osnovni su dijelovi tih sustava sunčevi kolektori i akumulacijski spremnik. Radni fluid je obično voda ili mješavina voda/glikol otporna na smrzavanje. Cirkulacija radnog fluida između kolektora i spremnika najčešće je ostvarena prisilno uz pomoć pumpe. Isto se tako koriste i termosifonski sustavi s prirodnom cirkulacijom koja nastaje uslijed razlike gustoća, odnosno razlike temperature radnog fluida u kolektoru i u spremniku, slika 7.1. Kod takvih sustava spremnik se mora nalaziti iznad kolektora da bi se uspostavila prirodna cirkulacija pod djelovanjem sila uzgona. One se dodatno pojačavaju što je spremnik više iznad gornjeg ruba kolektora (preporuča se min 20 cm). Imajući u vidu da se kolektori najčešće montiraju na krovove, to instalaciju često čini nepraktičnom. Zato se često koriste kompaktni sustavi (slika 7.2) gdje je spremnik pričvršćen za gornju stranicu kolektora. Zbog vanjskog smještaja taj će spremnik imati znatno veće toplinske gubitke (niske temperature, vjetar) nego kad je smješten unutar objekta. Alternativno, kod sustava s prirodnom cirkulacijom kolektor se može smjestiti na terasu ili na tlo, a spremnik u objekt. Pritom treba voditi računa da su spojni cjevovodi kolektorskog kruga što kraći i većih 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 također niski – najviše 30-40 litara/(h·m²),

što ponekad može dovesti do značajnijeg snižavanja efikasnosti kolektora. S druge strane, temperaturni gradijenti u spremniku su veći u odnosu na sustave s prisilnom cirkulacijom. To znači da će iz donjeg dijela spremnika izlaziti hladniji fluid prema kolektoru što ima povoljan utjecaj na njegovu efikasnost. Prednost u odnosu na sustave s prisilnom cirkulacijom leži 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 niža. Termosifonski sustavi su zbog opisanih karakteristika prikladniji za korištenje u toplijim klimama s većom godišnjom ozračenosti, npr. mediteranske zemlje, Australija, Izrael, 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.



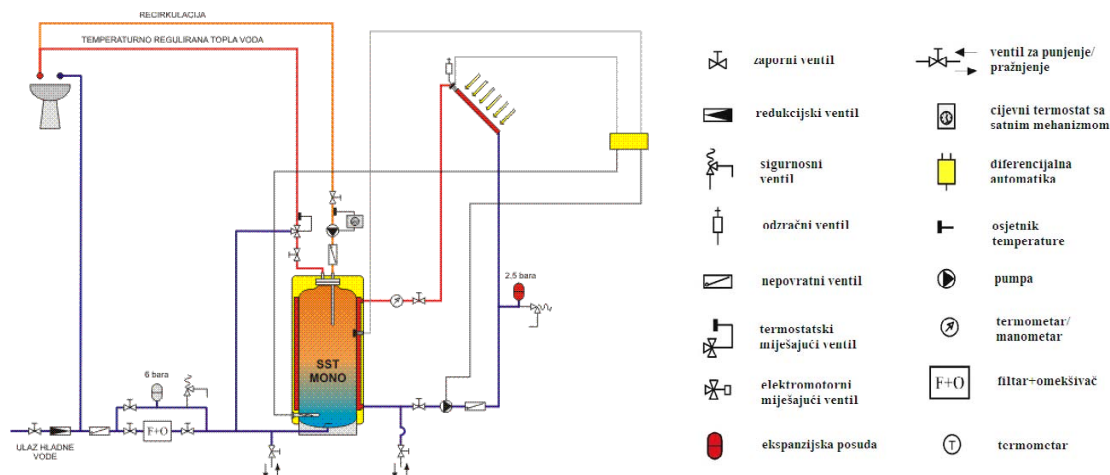
Slika 7.1 a) Termosifonski sunčani sustav s prirodnom cirkulacijom, b) Raspored temperatura (uzgonske sile su proporcionalne površini koju zatvaraju linije 1234), [3]



Slika 7.2 Primjeri kompaktnog termosifonskog sustava

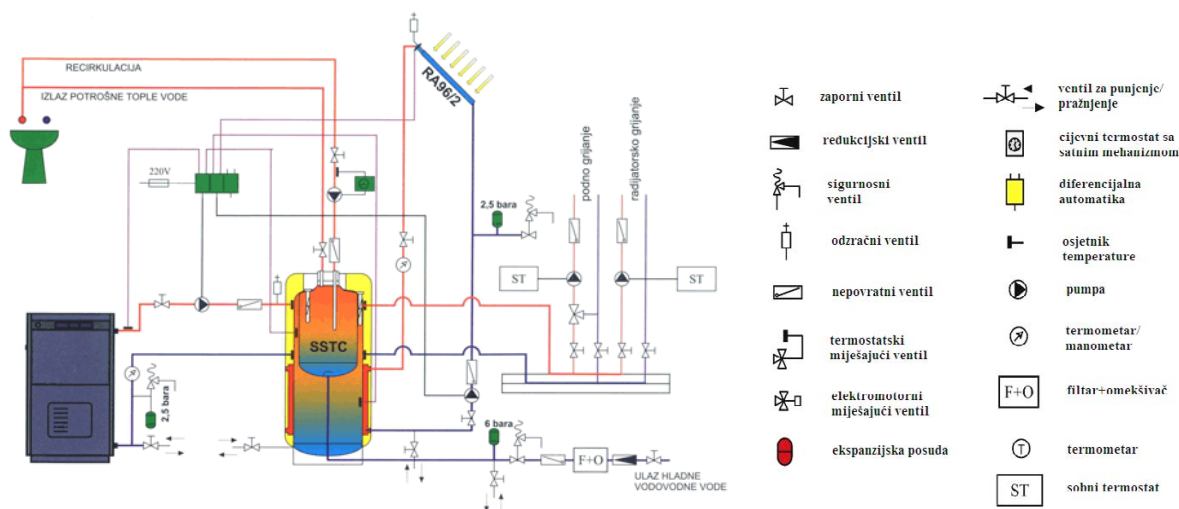
Na slici 7.3 prikazana je shema jednostavnog sustava s prisilnom cirkulacijom ostvarenom cirkulacijskom pumpom i jednim spremnikom za pripremu PTV-a. U prikazanom primjeru spremnik nema klasični izmjenjivač topline u obliku cijevi, kao na slici 5.1, već radni medij kolektorskog kruga struji kroz dvostruki plašt spremnika od njegovog vrha do dna. Na taj način toplinu predaje vodi u spremniku. Polaz fluida kolektorskog kruga nalazi se na najnižem, tj. najhladnijem dijelu spremnika, kako bi se ostvario što efikasniji rad kolektora. Pri tome je važno osigurati što veću razliku temperatura po visini spremnika. To je moguće postići, npr. izduženim oblikom spremnika, postavljanjem raspršivača mlaza ulazne hladne vode radi smanjenja njenog miješanja s gornjim toplijim slojevima vode u spremniku, zagrijavanjem spremnika na različitim visinama ovisno o trenutnoj temperaturi vode i dr.

U načelu, sustavi s prisilnom cirkulacijom koriste diferencijalnu automatiku za isključivanje pumpe kada razlika temperatura fluida na izlazu iz kolektora i vode u spremniku postane manja od neke zadane vrijednosti (najčešće 3-5 °C). Time se sprječava rashlađivanje spremnika. Automatika će ponovo uključiti pumpu kada se uspostavi tražena minimalna temperaturna razlika.



Slika 7.3 Sustav s jednim spremnikom za pripremu PTV-a, [11]

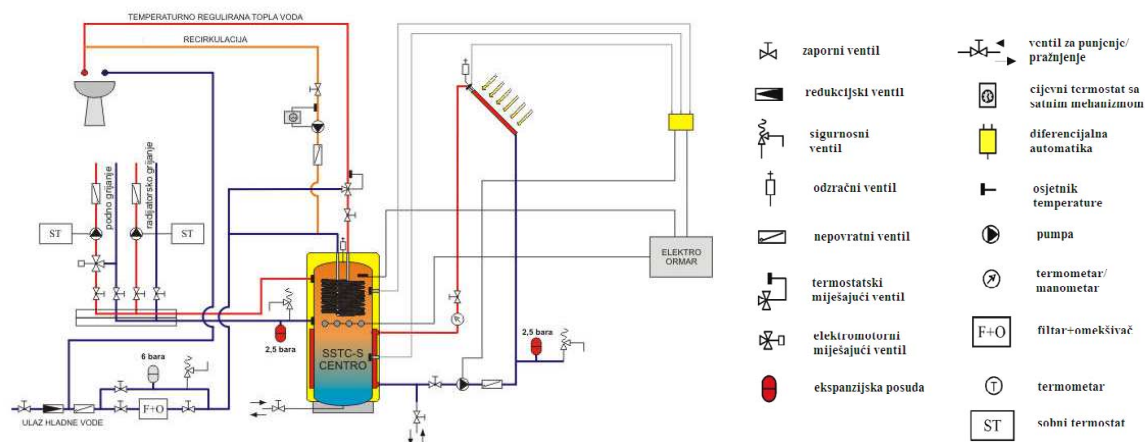
Na slici 7.4 prikazan je primjer kombiniranog sustava za pripremu PTV-a i grijanje prostora. Ovdje se koriste spremnici za vodu iz sustava grijanja koji u sebi imaju jedan manji s PTV-om. PTV iz manjeg spremnika izmjenjuje toplinu s vodom iz vanjskog spremnika koja se indirektno zagrijava kolektorima preko izmjenjivača u donjem dijelu spremnika. U gornjem dijelu spremnika nalazi se izmjenjivač pomoćnog izvora topline, koji je obično toplovodni kotao ili protočni zagrijač vode. Kod ovakvog sustava se izbjegava narušavanje temperaturne raspodjele vode u većem spremniku, koje inače nastaje zbog miješanja s hladnom svježom vodom jer se hladna voda ovdje dovodi direktno u manji spremnik.



Slika 7.4 Primjer kombiniranog sunčanog sustava za pripremu PTV-a i grijanje prostora s dvostrukim spremnikom, [11]

Za zagrijavanje PTV-a umjesto akumulacijskog spremnika može se koristiti i protočni zagrijač, slika 7.5. Njime se izbjegava miješanje svježe hladne vode i prethodno zagrijane vode u spremniku. Isto tako, temperatura PTV-a može biti niža od 55-60 °C jer nema opasnosti od razvoja bakterije legionele. S druge strane, kako bi se uspjela izmijeniti sva potrebna toplina za zagrijavanje protočne vode, temperatura u gornjem dijelu spremnika mora biti desetak °C viša od željene temperature PTV-a. To često dovodi do potrebe za paljenjem pomoćnog grijača. U sustavu sa dvostrukim spremnikom (slika 7.4) zbog mogućnosti akumulacije PTV-a vrijeme je zagrijavanja PTV-a dulje. To znači da se izmjena topline između dvaju spremnika može odvijati pri nižim temperaturama vode u vanjskom spremniku, sve dok su one postanu jednake temperaturi PTV-a u manjem spremniku. Kako bi se iskoristile dobre strane i protočnog i akumulacijskog načina

zagrijavanja, često se protočni zagrijači kombiniraju s manjim akumulacijskim spremnikom, kakav je prikazan na slici 7.6.

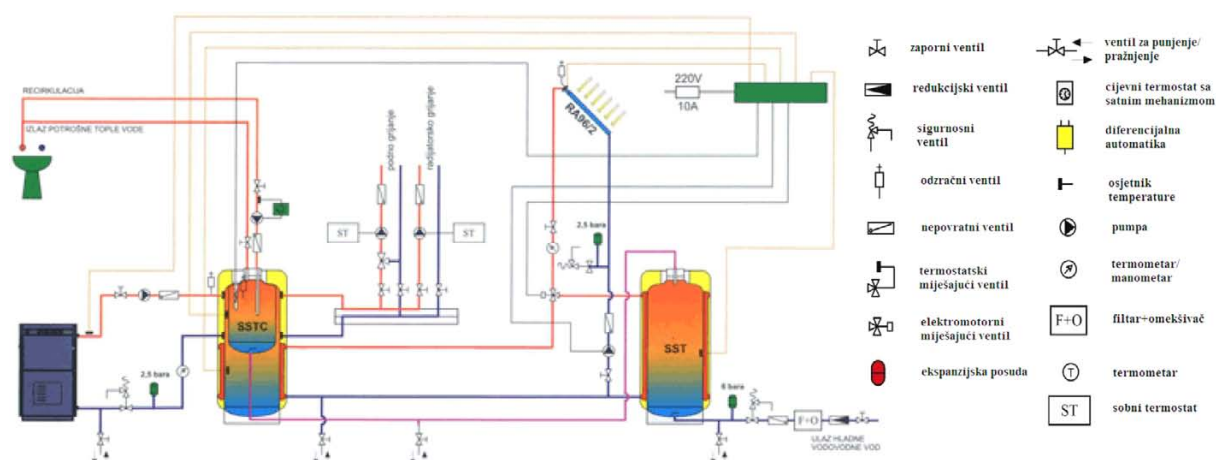


Slika 7.5 Kombinirani sunčani sustav za pripremu PTV-a i grijanje prostora s protočnim grijačem (izmjjenjivačem) PTV-a, [11]



Slika 7.6 Spremnik s protočnim grijačem kombiniran s manjim akumulacijskim spremnikom

Kada je potrebno ugraditi spremnik zapremine veće od 500 lit, kao što je to kada je kolektorska površina $> 10 \text{ m}^2$, preporučuje se ugradnja dvaju manjih umjesto jednog spremnika, slika 7.7.



Slika 7.7 Kombinirani sunčani sustav za pripremu PTV-a i grijanje prostora dva spremnika, [11]

U takvom sustavu kolektori prvo zagrijavaju jedan spremnik do željene temperature (npr. 55°C). Nakon toga se fluid kolektorskog kruga usmjerava uz pomoć troputnog ventila prema

izmjenjivaču drugog spremnika, u kome se predgrijava svježa voda koja ulazi u sustav. Na taj način se prvi spremnik brže zagrijava na željenu temperaturu, a zbog zagrijavanja drugog spremnika niže temperature vode prosječna efikasnost kolektora tijekom perioda rada je veća nego što bi bila da se zagrijavao samo jedan veći spremnik. Takvi su sustavi posebice 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, kao što je uostalom i sunčeva ozračenost, zagrijava se samo prvi spremnik, dok kroz drugi voda samo protječe ili se pak taj spremnik može u potpunosti isključiti iz rada.

Općenito, kod svih sustava izmjenjivači topline moraju biti tako dimenzionirani da izmjene svu toplinu prikupljenu kolektorima pri određenoj minimalnoj temperaturnoj razlici kolektorskog fluida i vode u spremniku koja može nastupiti tijekom rada. U suprotnom dolazi do povećanja polazne temperature fluida kolektorskog kruga i sniženja efikasnosti kolektorasve dok se ne izmjeni sva prikupljena toplina. Kako je već objašnjeno u prethodnim poglavljima, ukoliko potrebnu izmjenjivačku površinu nije moguće smjestiti u spremnik ili je naprosto jeftinije koristiti manje izmjenjivače, potrebni toplinski učinak moguće je postići povećanjem temperature radnog fluida, i to bilo spajanjem kolektora u serijski spoj i/ili korištenjem kolektora s cijevnom serpentinom, što svakako smanjuje efikasnost kolektora.

7.2 Sustavi za grijanje prostora

Iako najčešće za pripremu PTV-a, sunčani sustavi koriste se i za niskotemperaturno grijanje prostora. Na prethodnim shemama kombiniranih sunčanih sustava prikazan je način napajanja sustava radijatorskog grijanja iz spremnika vodom temp. (40-60) °C koja je fizički uvijek odvojena od PTV-a, ili pak sustava podnog, ili zidnog grijanja vodom temperature oko 30 °C. Kod sustava podnog grijanja temperatura polaza grijanja regulira se preko troputnog ventila kako bi se temperatura poda držala ispod 30 °C (radi sprječavanja podizanja prašine i nastajanja proširenih vena). Zbog činjenice da je zimi sunčeva ozračenost do 5 puta manja nego ljeti, a potrebe za toplinom oko 6-7 puta veće, bile bi potrebne 30-40 puta veće površine kolektora za pokrivanje ukupnih toplinskih potreba objekta za vrijeme zime. To bi, uz velike investicijske troškove i veliki period povrata investicije, dovelo i do pregrijavanja sustava ljeti. Da se sve to izbjegne, potrebno je pažljivo optimirati broj kolektora i zapreminu spremnika. Obično se sustavi dimenzioniraju na način da se prikupljenom sunčevom energijom pokrije oko 10-15 % ukupnih energetske potrebe zimi (grijanje + PTV), ovisno radi li se o kontinentalnom ili primorskom dijelu Hrvatske. U energetski štedljivijim objektima ti udjeli rastu sa smanjenjem specifične potrošnje topline za grijanje $Q_{H,nd}$, tako da je u pasivnim niskoenergetskim kućama ($Q_{H,nd} < 15 \text{ kWh/m}^2$) moguće i 100 %-tno pokrivanje potreba za toplinskom energijom i u zimskim mjesecima. Pri tome je potrebno osigurati minimalno 50 lit zapremine spremnika po svakom m^2 instalirane kolektorske površine kako bi se izbjeglo pregrijavanje spremnika ljeti.

7.3 Sustavi za grijanje bazena

Zagrijavanje bazenske vode pomoću sunčevih kolektora jedan je od najefikasnijih i najekonomičnijih načina korištenja sunčeve energije za grijanje tople vode. Razlog tome su relativno niske potrebne temperature vode (24-32) °C i mogućnost korištenja jeftinih neostakljenih apsorbera. Prikupljena sunčeva energija na kolektorima se ovdje koristi za pokrivanje toplinskih gubitaka bazena uslijed ishlapljivanja, prskanja, konvekcije na zrak (vjetra), zračenja prema nebu i okolišnim objektima te za zagrijavanje svježe vode koja se ubacuje u bazen radi održavanja higijenskog minimuma. Procijenjeni toplinski gubici otvorenih bazena iznose oko 4 kWh/m^2 na dan, dok zatvoreni bazeni imaju gubitke oko $2,5 \text{ kWh/m}^2$ na dan. Da bi se smanjili ti gubici, bazeni se često prekrivaju prozirnim plastičnim pločama, koje istodobno omogućuju prolaz Sunčeva zračenja prema vodi i apsorpciju u njoj.

7.4 Regulacija

Regulacija je od velike važnosti za efikasnost sunčanog sustava. U osnovi regulacija se sastoji od upravljačke jedinice, osjetnika temperature smještenog na izlazu iz kolektora i na različitim pozicijama u spremnicima. Osjetnik temperature u spremniku smješta se neposredno iznad izmjenjivača kolektorskog kruga kako bi se osiguralo da u trenutku kada se uključi pumpa i na tom najtoplijem dijelu izmjenjivača postoji temperaturna razlika u odnosu na fluid kolektorskog kruga. Osjetnik temperature fluida na izlazu kolektora montira se tako da bude zaštićen od direktnog Sunčeva zračenja, najbolje direktno u fluid. Alternativno, osjetnik se može samo pričvrstiti za cijev i sve skupa izolirati.

Upravljačka jedinica uključuje i isključuje pojedine pumpe, usmjerava fluid preko troputnog ventila na pojedini spremnik, uključuje rad pomoćnog električnog grijača ili pumpe toplovodnog kotla. Isto tako, moderne regulacije imaju funkciju upravljanja i ostatkom sustava grijanja u zgradi (npr. grupama podnog grijanja i radijatora po prostorijama i dr.) povezujući sve u jedinstveni sustav upravljanja.

7.5 Oprema i armatura

Ekspanzijske posude i ventili sigurnosti važni su dijelovi sunčanog sustava koji osiguravaju njegovu funkcionalnost u svim uvjetima rada. Montiraju se u kolektorskom krugu, dovodu svježe vode i sustavu grijanja. S obzirom na velike promjene temperatura koje mogu nastupiti tijekom rada (posebice u kolektorskom krugu) ekspanzijska posuda mora biti dimenzionirana tako da može prihvatiti sve promjene volumena vode, tj. da osigura stalni tlak u sustavu. Tlak u kolektorskom krugu obično se kreće oko 2-2,5 bar, a 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. U takvoj situaciji isto tako može doći do isparavanja fluida u kolektoru, pri čemu se u potpunosti zaustavlja cirkulacija. Do pada tlaka može doći i zbog, primjerice, propuštanja spojeva izloženih sunčevom zračenju, uslijed propuštanja sigurnosnog ventila bilo zbog njegove ili neispravnosti ekspanzijske posude ili pak zbog pregrijavanja sustava uslijed nestanka električne energije za pogon cirkulacijske pumpe. Iz tih razloga potrebno je redovito (npr. jednom tjedno) provjeravati tlak u sustavu i po potrebi dopunjavati kolektorski krug radnim fluidom.

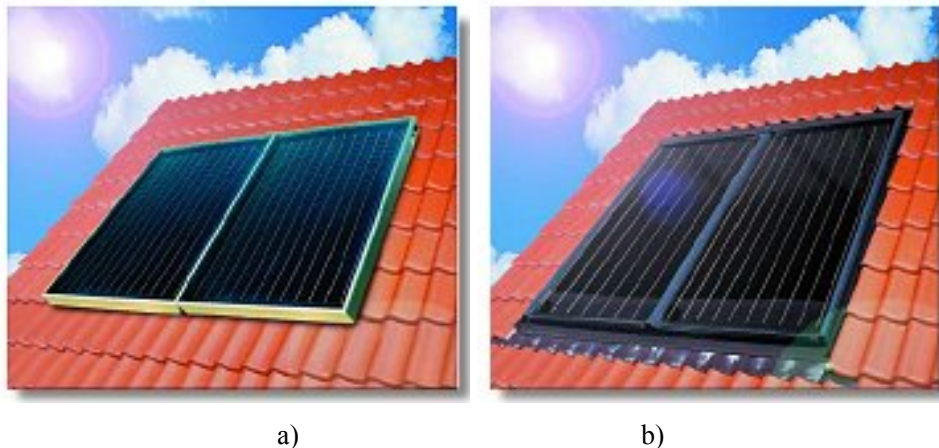
U kolektorski krug obvezno se ugrađuje nepovratni ventil kako bi se spriječilo rashlađivanje spremnika tijekom noći ili oblačnog vremena zbog prirodne cirkulacije od toplijeg spremnika prema hladnijim kolektorima. Iz istih razloga se nepovratni ventil postavlja između spremnika i toplovodnog kotla. Te je ventile potrebno očistiti od nečistoća u redovitom godišnjem servisu jer u suprotnom mogu djelomično izgubiti funkciju.

Na cjevovodu svježe vode montira se redukcijski ventil koji osigurava stalni tlak u sustavu. Na isti je cjevovod poželjno montirati filter i omekšivač te nepovratni ventil kako bi se spriječilo pražnjenje spremnika i pad tlaka (i eventualnu imploziju spremnika) kada nestane vode u vodovodu. Na izlaznom cjevovodu PTV-a potrebno je montirati zaštitni termostatski miješajući ventil (vidi sliku 7.3) koji ima ulogu spriječiti protok vruće vode (npr. temperature $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) prema izljevnom mjestu tako da PTV iz spremnika promiješa s hladnom vodom.

Što se tiče cjevovoda, oni bi općenito trebali biti što je moguće kraći ne bi li se toplinski gubici sveli na najmanju mjeru. Svi dijelovi cjevovoda kolektorskog kruga moraju se izolirati izolacijom debljine $(\frac{1}{2} - \frac{3}{4}) \times$ promjer cjevovoda. Za to se često se koristi specijalna UV otporna (Armaflex) izolacija, kojoj je nedostatak što je mogu oštetiti ptice. U većim sustavima koristi se mineralna vuna obložena Al limom (koji između ostalog pruža zaštitu i od ptica). U manjim kućnim sustavima do 10 m^2 kolektorske površine cjevovodi su obično promjera 10 do 20 mm.

7.6 Montaža kolektora

Kolektori se obično montiraju na krov (slika 7.8a). Bolje je rješenje ako se kolektori montiraju kao dio krova (slika 7.8b) jer se tako štedi na materijalu pokrova, npr. crijevu, a na tom mjestu dobiva se i izvrsna toplinska izolacija. Isto tako, kolektori se mogu montirati na ravne krovove, terase ili tlo koristeći posebne nosače (slika 7.9). Pri tome je potrebno provjeriti nosivost krovne konstrukcije.



Slika 7.8 a) Kolektor montiran na krov b) Kolektor montiran kao dio krova

U većim sustavima kolektori se spajaju u grupe, slika 7.9. Ovdje treba voditi računa o tome da se pravilnim dimenzijama cjevovoda osigura jednoliki protok kroz sve grupe. Sustav se balansira ventilima u pojedinim granama s ugrađenim mjerачem 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 7.9 Sunčani sustav s grupama kolektora montiranim na krovne nosače

8. Ispitivanja sunčevih kolektora i sustava

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

- EN 12975-2: Solar thermal systems and components – Solar collectors – Part 2: Test methods
- EN 12976-2: Solar thermal systems and components – Factory made systems – Part 2: Test methods, koja preuzima dio ispitivanja iz

- ISO 9459-2:1995 Solar heating-Domestic water heating systems: Outdoor test methods for system performance characterisation and yearly performance of solar only systems.

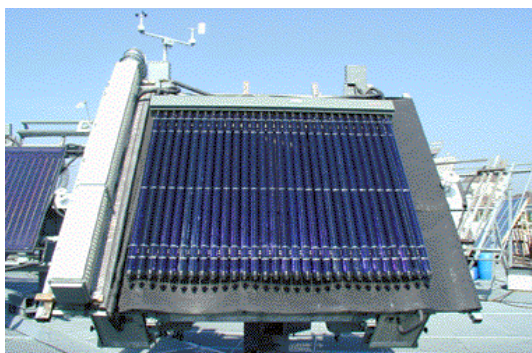
Isto tako, pojedini ispitni centri provode ispitivanja prema nacrtima normi:

ENV 12977-2 (Custom built systems) i ENV 12977-3 (Stores)

Europski odbor za normizaciju (CEN) uveo je dobrovoljnu oznaku "Solar Keymark" kojom se potvrđuje da je kolektor kolektor ispitivan prema gore navedenim EN normama i ispunjava sve zahtjeve iz njih te da je provedena provjera osiguranja kvalitete u proizvodnji. Većina kolektora koji se dostavljaju na tržište EU-a, kao i Hrvatske, nosi oznaku "Solar Keymark".

Ispitivanje kolektora (prema EN 12975-2:2006) uključuje:

1. Mjerenje efikasnosti sa i bez vjetra
2. Određivanje faktora promjene upadnog kuta
3. Izračun toplinskog kapaciteta
4. Pad tlaka
5. Ispit kvalitete
 - 5.1 Tlačna proba ($1.5 \times \text{max radni tlak}$)
 - 5.2 Otpornost na visoku temperaturu (određivanje stagnacijske temperature)
 - 5.3 Ispitivanje izloženosti dugotrajnom Sunčevu zračenju
 - 5.4 Vanjski i unutrašnji toplinski šok
 - 5.5 Propusnost na kišu
 - 5.6 Otpornost na smrzavanje
 - 5.7 Mehaničko opterećenje stakla i spojeva s kućištem (uslijed vjetra i snijega)
 - 5.8 Otpornost na udarce (kamenje, tuča).



a)



b)

Slika 8.1 a) Ispitna linija za mjerenje toplinskih karakteristika kolektora i b) sustava

Standardna ispitivanja sustava do 10 m² i 900 Lit prema EN 12976-2:2006 uključuju:

1. Otpornost na smrzavanje
2. Zaštita od pregrijavanja
3. Tlačna proba
4. Prikladnost za pitku vodu
5. Otpornost na vanjske utjecaje
6. Zaštitna oprema (sigurnosni ventili, ekspanzijske posude. .)
7. Označavanje
8. Toplinske karakteristike sustava – provedba ispitivanja karakteristika komponenti prema **ISO 9459-5**
 - 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 apsorbera
- 3. Određivanje faktora promjene upadnog kuta stakla

Posebna ispitivanja

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

9. Simulacija i ekonomično dimenzioniranje sunčanih sustava

9.1 Metode proračuna

Sunčani sustav mora biti tako dimenzioniran da pokrije dio ili ukupnu potrebu za toplinskom energijom u određenom periodu godine, a da se izbjegne pregrijavanje sustava i zastoj rada u bilo kojem trenutku. U tu je svrhu najbolje provesti simulaciju rada sunčanog sustava na satnoj razini. Simulacija uključuje proračun dovedene i odvedene energije iz sustava u pojedinom satu tijekom dana te slijedom toga određivanje temperatura vode u spremniku i kolektorskom krugu. Na taj se način dobiju podaci o dinamičkim karakteristikama sustava tijekom cijelog dana, što omogućuje međusobno usklađivanje površine kolektora, zapremine i broja spremnika te toplinskog učinka izmjenjivača topline i snage pomoćnog izvora topline. Konačne dimenzije i karakteristike komponenti dobiju se optimizacijom u odnosu na cijenu investicije i prikupljenu energiju (tj. ekvivalentne uštede na troškovima za gorivo), i to tako da period povrata investicije bude najmanji.

Osim provođenja detaljnih simulacija rada, proračun sustava moguće je napraviti prema raznim drugim poopćenim metodama temeljenim na određivanju potrebnih parametara iz dijagrama, poput f -chart metode ili ϕ, f -chart metode i dr. (više u [1]).

U nastavku su dani osnovni izrazi koji se koriste u prethodno spomenutoj simulaciji rada toplivodnog sunčanog 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 efikasnosti kolektora dobivenih od proizvođača prema

$$Q_{kol} = \eta_{kol} \cdot G_{sun} \cdot A_{kol} \cdot t \quad [\text{Wh}], \quad (9.1)$$

pri tome je $t = 1$ h.

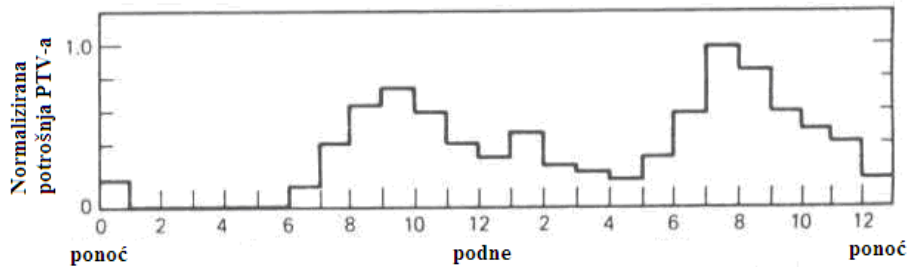
G_{sun} je sunčevo ozračenje na plohu kolektora u određenom satu karakterističnog dana pojedinog mjeseca u godini. Podaci o mjerenim satnim vrijednostima sunčevog zračenja na horizontalnu

plohu i plohu nagnutu pod 45° prema horizontali su dani u [19]. Za druge kutove nagiba plohe potrebno je provesti zaseban proračun (više u [1]). U [19] su isto tako dani i podaci o temperaturi okolišnog zraka potrebni za proračun efikasnosti.

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

$$Q_{PTV} = \dot{m} c_p (\vartheta_{s1} - \vartheta_{svj}) t, \text{ Wh} \quad (9.2)$$

gdje je ϑ_{s1} temperatura vode u spremniku na početku svakog vremenskog intervala ($t = 1\text{h}$). Svježa voda koja se dovodi u spremnik jest temperature $\vartheta_{svj} = 10\text{--}15\text{ }^\circ\text{C}$. Raspodjela potrošnje vode tijekom dana značajno utječe na dinamičko ponašanje sustava, odnosno njegovo dimenzioniranje. Na žalost, protok PTV-a u pojedinom satu tijekom dana teško je točno odrediti. U tu se svrhu mogu koristiti dijagrami poput onih sa slike 9.1. Općenito, može se uzeti da potrošnja PTV-a referentne temperature 45 °C u kućanstvima iznosi oko 40-60 litara/dan po osobi, dok je u hotelima i autokampovima ona znatno viša i iznosi oko 80-120 litara/dan po osobi.



Slika 9.1 Primjer satne potrošnje PTV-a u kućanstvu kroz dan, [1]

Toplinska energija akumulirana u spremniku jest

$$Q_{\text{sprem}} = Q_{\text{kol}} \eta_g - Q_{PTV}, \text{ Wh.} \quad (9.3)$$

gdje η_g uzima u obzir toplinske gubitke cjevovoda i izmjenjivača ($\eta_g = 0,9$).

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

$$\Delta \vartheta = \frac{Q_{\text{sprem}}}{V_{\text{sprem}} \cdot \rho \cdot c_p}, \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (9.4)$$

Temperatura vode u spremniku na kraju svakog sata tada je

$$\vartheta_{s2} = \vartheta_{s1} + \Delta \vartheta, \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (9.5)$$

Izrazi (9.1)-(9.5) omogućuju izračun promjene temperature vode u spremniku tijekom karakterističnog dana u mjesecu. Ukupna površina kolektora i zapremina spremnika tada se 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 umanjuje se za (2-3) °C zbog toplinskih gubitaka tijekom noći te se s tom vrijednošću ulazi u simulaciju rada za sljedeći dan, tj. u sljedeći korak iteracije. Nakon proračuna nekoliko koraka simulacije (tj. za nekoliko dana) postiže se stacionarna raspodjela temperatura od jutarnjih do večernjih sati. Temeļjem te temperaturne raspodjele provodi se proračun potrebne energije pomoćnog grijača (kotla, el. grijača) da bi se voda zagrijala na željenu temperaturu (npr. 50 °C). Najveća temperatura PTV-a u spremniku bi u jednom dijelu dana morala biti između 45-55 °C radi sprječavanja razmnožavanja legionele, ali ne znatno viša, jer se time nepotrebno smanjuje efikasnost kolektora. Iznos toplinske energije dodatnog izvora (el. grijač, kotao) računa se prema

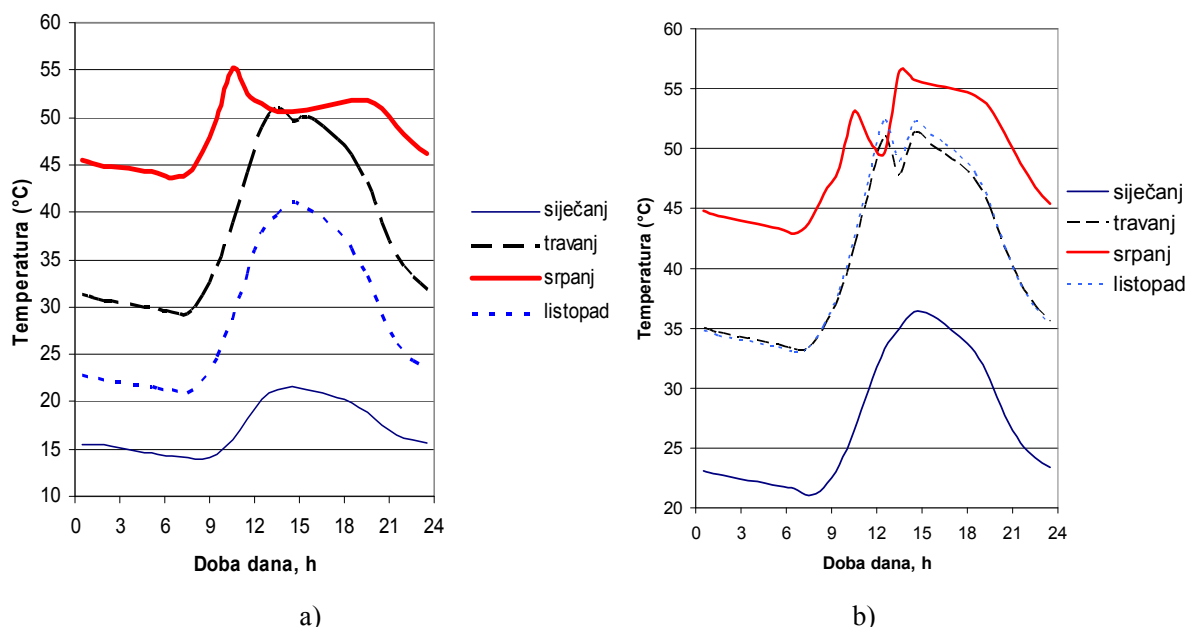
$$Q_{\text{PTV}} = \dot{m} c_p (50^\circ \text{C} - T_{s2}) t, \quad \text{Wh.} \quad (9.6)$$

U ovakvom modelu proračuna pretpostavljeno je da se PTV dogrijava izvan spremnika (npr. pločastim izmjenjivačem) na temperaturu 50°C , tako da je temperatura u spremniku ovisna samo o toplini dovedenoj kolektorima i onoj odvedenoj kroz potrošnju PTV-a. U najvećem broju sustava to se dogrijevanje događa na izmjenjivaču u samom spremniku (vidi poglavlje 7.1).

9.2 Rezultati simulacije

Primjenjujući prethodno opisanu metodu, provedena je simulacija rada sunčanog sustava za obiteljsku kuću korisne površine $A_k = 100 \text{ m}^2$ s 4 ukućana, smještenu u dvama različitim klimatskim područjima – Zagrebu i Splitu, [10].

U dijagramu na slikama 9.2a,b prikazana je izračunata temperatura vode u spremniku tijekom karakterističnog dana u pojedinom mjesecu. Površina je kolektora tako određena da se u potpunosti pokrije potreba za zagrijavanjem PTV-a u ljetnim mjesecima. Rezultati očekivano pokazuju da je srednja godišnja efikasnost kolektora veća u Splitu $\eta_{\text{kol}} = 0,60$ nego u Zagrebu $\eta_{\text{kol}} = 0,49$. Zanimljivo je vidjeti kako je tijekom ljetnih mjeseci efikasnost kolektora $\eta_{\text{kol}} = 0,62$ u Splitu tek nešto veća nego u zimskim mjesecima $\eta_{\text{kol}} = 0,58$. Tako male razlike posljedica su nižih temperatura u spremniku zimi (što podiže efikasnost) i druge strane nižih vrijednosti temperature zraka i ozračenosti (što pak snižava efikasnost). U Zagrebu je efikasnost kolektora zimi $\eta_{\text{kol}} = 0,4$ znatno niža nego ljeti $\eta_{\text{kol}} = 0,56$. To je posljedica većih razlika temperatura zraka i iznosa ozračenosti zimi i ljeti od onih u Splitu. Isto tako, efikasnosti se u ljetnim mjesecima u Zagrebu i Splitu znatno manje razlikuju nego one za ova dva grada u zimskim mjesecima, i to upravo zbog većih razlika u temperaturama zraka i ozračenosti tijekom zimskih mjeseci.



Slika 9.2 Simulirane vrijednosti promjene temperatura u spremniku PTV-a tijekom karakterističnog dana za optimirani sunčani sustav u a) Zagrebu i b) Splitu, [17]

9.3 Period povrata investicije

Visina investicije i njezin period povrata često u konačnici određuju dimenzije komponenti sunčanog sustava, i to prije svega ukupnu površinu kolektora. U postupku optimizacije nastoji se odabrati ono rješenje koje daje najmanji period povrata investicije. Pri tome je zgodno prikazati

cijenu investicije kao zbroj promjenjivih troškova ovisnih o ukupnoj površini kolektora C_{kol} i nepromjenjivih troškova sustava C_{fix} .

$$C_{invest} = C_{kol} A_{kol} + C_{fix} \quad [\text{kn}]. \quad (9.8)$$

Tada ukupna površina kolektora postaje varijabla po kojoj se vrši optimizacija.

Fiksni troškovi definirani su za određeni raspon ukupne površine kolektora i odnose se na spremnik, regulaciju, pumpe, ekspanzijske posude, ventile, cijevi, ugradnju i dr. Dakako, ukoliko su spremnik i sva pripadajuća armatura dio konvencionalnog sustava koji bi se ionako morao ugraditi, onda investicija u sunčani sustav obuhvaća samo one dijelove koji se dodatno moraju ugraditi (kolektori, regulacija, dodatne cijevi, pumpe, razlika u cijeni sunčanog spremnika i manjeg spremnika u konvencionalnom sustavu i dr.). Najtočniji način određivanja investicije u sunčani dio sustava jest razlika ukupne cijene konvencionalnog sustava kombiniranog sa sunčanim i samog konvencionalnog sustava.

Uštede na troškovima za gorivo koje se ostvaruju kroz korištenje sunčanog sustava tijekom godine određuju se iz rezultata simulacija. Iznosom su jednake cijeni za određeno gorivo koje bi se moralo potrošiti da se dobije količina energije jednaka iskorištenoj Sunčevoj energiji za zagrijavanje vode (za PTV i grijanje prostora). Ta se ušteda može izračunati prema

$$S = \frac{\sum Q_{kol} \eta_g}{\eta_{kotao}} H_d \cdot C_G, \quad \text{kn}. \quad (9.9)$$

gdje je H_d donja ogrjevnost goriva (kg/J , m_n^3/J), a C_G je cijena goriva (kn/kg , kn/m_n^3). $\sum Q_{kol} \eta_g$ je ukupna prikupljena godišnja sunčeva energija iskorištena za zagrijavanje vode. 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 (kotao) mora biti veći dio vremena u stanju pripravnosti (stand by režim rada) kako bi održavao temperaturu vode u spremniku. Korištenje sunčanih sustava omogućuje rad samo s povremenim uključivanjem dodatnog izvora topline, tj. ne mora biti u stanju pripravnosti cijelo vrijeme, čime se postižu znatne uštede i podiže prosječna godišnja efikasnost konvencionalnog dijela sustava. Za procjenu tih ušteda potrebno je koristiti proračune iz skupine normi HRN EN 15316. Njihovim pridodavanjem prikupljenoj Sunčevoj energiji znatno se može smanjiti izračunata vrijednost perioda povrata investicije (ovisno o veličini sustava cca. 10-30 %).

Jednostavni period povrata investicije računa se prema

$$P = \frac{C_{invest}}{S}, \quad \text{godina}. \quad (9.10)$$

U prethodnom izrazu radi jednostavnosti nije uzet u obzir utjecaj kamata niti inflacije. Ukoliko se investicija financira bankarskim kreditom, utjecaj kamate produljio bi period povrata. S druge strane, utjecaj inflacije bio bi takav da skraćuje period povrata.

9.4 Optimizacija površine kolektora i zapremine spremnika

U tablici 8.1 dane su optimizirane vrijednosti površina kolektora i zapremine spremnika sunčanih sustava za pripremu PTV-a različitih veličina ovisno o broju osoba, i to za klimatska područja Zagreba i Splita. Optimalna površina kolektora u ovisnosti o broju osoba prikazana je dijagramski na slici 9.3. Isto tako, za sve sustave je izračunat period povrata investicije, slika 9.4. Za proračun 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 sunčanim sustavima u rezidencijalnom i turističkom sektoru (apartmani, autokampovi i sl.).

Načelno, kod sunčanih sustava povećanje potrošnje PTV-a rezultira povećanjem iznosa godišnje prikupljene sunčeve energije, jer dovodi do snižavanja prosječne temperature vode u spremniku. Isti efekt ima i povećanje zapremine spremnika, no ono povlači i veće investicijske troškove, tako da u konačnici može dovesti do povećanja perioda povrata investicije. Sustavi su optimizirani prema dvama kriterijima, a to su:

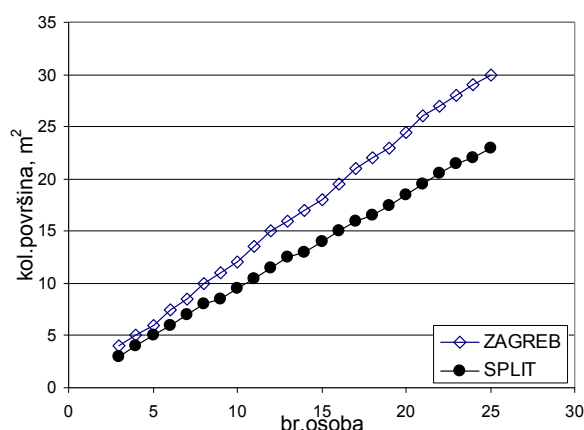
1. da se u potpunosti pokriju energetske potrebe za pripremom PTV-a u srpnju i kolovozu
2. minimalni period povrata investicije.

Investicijski su troškovi 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 sunčanog dijela sustava uračunati su 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 povrata investicije u odnosu na sustave za broj osoba <6. Uštede u gorivu i periodi povrata investicije računati su u odnosu na plin ($C_G = 0,31$ kn/kWh) i električnu energiju ($C_G = 0,69$ kn/kWh). Naime, to su energenti koji se najčešće koriste za pripremu PTV-a. Rezultati očekivano pokazuju kako se u klimatskom području Splita ostvaruju značajno niži periodi povrata investicije nego u području Zagreba. Isto se tako vidi kako period povrata investicije pada s veličinom sustava.

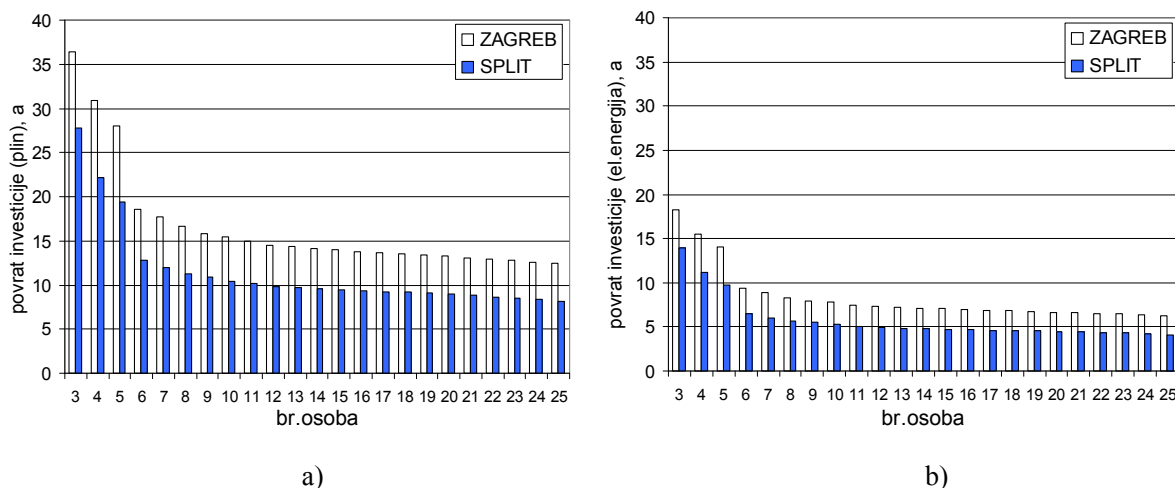
Kako je već ranije spomenuto, kada bi u izračun uključili uštede zbog smanjenja toplinskih gubitaka konvencionalnog sustava, dobile bi se još niže vrijednosti povrata investicije. Na taj način bi mogli postati isplativi uz državne poticaje i manji sunčani sustavi (br. osoba <6), čak i u objektima gdje se koristi plin kao konvencionalni energent.

Tablica 9.1: Tehničke i ekonomske karakteristike optimiziranih sunčanih sustava različitih veličina u odnosu na broj osoba za područje Zagreba i Splita

Broj osoba	Površina kolektora, m ²		Spremnik Lit.	Iskorištena sun. energija, kWh/a		Energija za PTV kWh/a	Povrat invest.- plin., a		Povrat invest.- el.energija., a		Cijena investicije, kn	
	ZAG	SPLIT		ZAG	SPLIT		ZAG	SPLIT	ZAG	SPLIT	ZAG	SPLIT
3	4	3	200	2320	2850	3574	36,4	27,8	18,2	13,9	29001	27201
4	5	4	200	2900	3800	4765	30,9	22,2	15,5	11,1	30801	29001
5	6	5	250	3480	4750	5957	28,1	19,4	14,1	9,8	33547	31747
6	7,5	6	300	4350	5700	7148	18,6	12,8	9,3	6,4	27800	25100
7	8,5	7	350	4930	6650	8339	17,7	11,9	8,9	6,0	29981	27281
8	10	8	400	5800	7600	9531	16,6	11,3	8,3	5,7	33064	29464
9	11	8,5	450	6380	8075	10722	15,9	10,9	8,0	5,5	34783	30283
10	12	9,5	500	6960	9025	11913	15,5	10,5	7,8	5,3	36989	32489
11	13,5	10,5	550	7830	9975	13105	14,9	10,1	7,5	5,1	40133	34733
12	15	11,5	600	8700	10925	14296	14,5	9,9	7,3	4,9	43319	37019
13	16	12,5	650	9280	11875	15487	14,3	9,6	7,2	4,8	45645	39345
14	17	13	700	9860	12350	16679	14,2	9,6	7,1	4,8	48007	40807
15	18	14	750	10440	13300	17870	14,0	9,5	7,0	4,7	50394	43194
16	19,5	15	800	11310	14250	19061	13,8	9,3	6,9	4,7	53694	45594
17	21	16	850	12180	15200	20253	13,6	9,2	6,8	4,6	56988	47988
18	22	16,5	900	12760	15675	21444	13,5	9,2	6,8	4,6	59354	49454
19	23	17,5	950	13340	16625	22635	13,5	9,1	6,7	4,5	61665	51765
20	24,5	18,5	1000	14210	17575	23827	13,3	8,9	6,7	4,5	64792	53992
21	26	19,5	1050	15080	18525	25018	13,1	8,8	6,6	4,4	67798	56098
22	27	20,5	1100	15660	19475	26209	13,0	8,7	6,5	4,4	69746	58046
23	28	21,5	1150	16240	20425	27401	12,8	8,5	6,4	4,3	71491	59791
24	29	22	1200	16820	20900	28592	12,6	8,4	6,3	4,2	72985	60385
25	30	23	1250	17400	21850	29783	12,4	8,2	6,2	4,1	74177	61577



Slika 9.3 Optimalna površina kolektora u ovisnosti o broju osoba



Slika 9.4 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

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] Kulišić, P.: *Novi izvori energije*, Šk. knjiga, pp.154, Zagreb, (1991)
- [5] International Energy Agency, <http://www.iea.org>, (2010)
- [6] European Environment Agency: <http://www.eea.europa.eu>, (2010)
- [7] Energetski institut Hrvoje Požar: <http://www.eihp.hr/>, (2010)
- [8] The European Wind Energy Association: <http://www.ewea.org/>, (2010)
- [9] Dović, D., Švaić, S.: Ispitno izvješće sunčevih kolektora proizvođača Tehnomont d.o.o., FSB, Zagreb, (2003)
- [10] Dović, D., Švaić, S.: Solar energy for heating and domestic water purposes, *Ist Int conference on renewable energy resources*, Dubrovnik, (2004)

- [11] Katalozi proizvođača: Horvatić, Buderus, VIESMANN, Wolf, GreenOneTec, Centrometal, Vaillant: (1997-2009)
- [12] Recknagel, H. et al.: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, Oldenburg Verlag, München, (2007)
- [13] Vieira, M. E., Duarte, P.O.O, Buarque, H. L. B.: Determination of the void fraction and drift velocity in a two-phase flow with a boiling solar collector, *Solar Energy*, Vol. 69, No. 4, pp. 315–319, (2000)
- [14] Hussein H.M.S., Transient investigation of a two phase closed thermosyphon flat plate solar water heater, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, pp. 2479–2492, (2002)
- [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] Dović, D.: Numerička i eksperimentalna studija sunčevog kolektora s valovitim apsorberom, *Doktorska disertacija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, (2005)
- [17] Kolaković, I., Dović, D.: Simulation of the solar domestic hot water system operation, *Technical gazette*, Vol. 16, No. 1, pp. 3-9, (2009)
- [18] HRN EN 15316-4-3 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava – Dio 4-3: Sustavi za proizvodnju topline, toplinski sustavi sunčevog zračenja, (2008)
- [19] Dović, D.: Sunčani toplinski sustavi, Priručnik za nastavnike, IPA program "IMPLEMENTATION OF NEW CURRICULA: Increasing knowledge and information on Renewables", (2011)





Instrument pretpristupne pomoći Obnovljivi izvori energije

Instrument pretpristupne pomoći (*eng. Instrument for Pre-Accession Assistance – IPA*) pretpristupni je program za razdoblje od 2007. do 2013. godine koji zamjenjuje dosadašnje programe CARDS, Phare, ISPA i SAPARD. Osnovni ciljevi ovog programa su pomoć u izgradnji institucija i vladavine prava, ljudskih prava, uključujući i temeljna prava, prava manjina, jednakost spolova i nediskriminaciju, administrativne i ekonomske reforme, ekonomski i društveni razvoj, pomirenje i rekonstrukciju te regionalnu i prekograničnu suradnju.

IPA Komponenta IV Razvoj ljudskih potencijala doprinosi jačanju gospodarske i socijalne kohezije, te prioritetima Europske strategije zapošljavanja u području zapošljavanja, obrazovanja, stručnog osposobljavanja i socijalnog uključivanja.

Europsku uniju čini 27 zemalja članica koje su odlučile postupno povezivati svoja znanja, resurse i sudbine. Zajednički su, tijekom razdoblja proširenja u trajanju od 50 godina, izgradile zonu stabilnosti, demokracije i održivog razvoja, zadržavajući pritom kulturalnu raznolikost, toleranciju i osobne slobode. Europska unija posvećena je dijeljenju svojih postignuća i svojih vrijednosti sa zemljama i narodima izvan svojih granica.

Europska komisija izvršno je tijelo EU.



Više o projektu na www.ipa-oie.com