



Co-funded by the
European Union



KALCEA



SOLARNI TERMALNI SISTEMI

1. Uvod

Energija zračenja Sunca koja godišnje dospijeva do Zemljine površine je oko 170 puta veća od energije koju sadrže ukupne rezerve uglja u svijetu. Kapacitet sunčeve energije na Zemlji je, po nekim procjenama, oko 14.000 - puta veći od cjelokupne energije koju troši čovječanstvo danas. Snaga sunčevog zračenja koja dospijeva na Zemlju iznosi oko 175.000 TW. Koji je to potencijal pokazuje i činjenica da cjelokupna svjetska energetska potrošnja ima snagu od približno 13 TW! Energija zračenje Sunca koja dolazi do zemljine površine, dakle potencijalno iskoristivo zračenja Sunca, iznosi oko $1,9 \times 10^8$ TWh (190 miliona teravat časova) godišnje. Ta je energija oko 170 puta veća od energije ukupnih rezervi uglja u svijetu i kada se uporedi sa energetskim potrebama čovječanstva, koje iznose $1,3 \times 10^5$ TWh (130 hiljada teravat časova) godišnje, dobija se podatak da je sunčeva energija koja stiže na površinu Zemlje u toku samo 6 časova dovoljna da zadovolji sve svjetske potrebe na godišnjem nivou. Da bi se dobio bolji uvid u ove veličine, prosječno domaćinstvo u nekim od najrazvijenijih zemalja sveta troši godišnje oko 10.000 kWh električne energije, a bilo bi potrebno oko 100.000 godina da se potroši 1 TWh. Oko 37% svjetske energetske potražnje zadovoljava se proizvodnjom električne energije koja je u toku 2008. godine iznosila oko 17.000 TWh. Sa gledišta energetike, sunčeva energija predstavlja resurs koji je na raspolaganju za korištenje i supstituciju značajnih količina konvencionalnih energetskih oblika. Njeno ograničeno korištenje je uzrokovan tehnološkim i ekonomskim problemima. To je ogroman energetski izvor kojim se mogu zadovoljiti energetske potrebe za veoma dugo vreme. Sunčeva energija koja dospijeva na površinu Zemlje u toku samo 6 časova dovoljna je da zadovolji sve svjetske potrebe na godišnjem nivou. Sunčeva energija može imati značajno mjesto u energetici jedne zemlje jer predstavlja obnovljiv i neiscrpan energetski resurs.

Obnovljivim izvorima energije se ne posvećuje ista pažnja u svijetu. Može se slobodno reći da toj problematici više pažnje posvećuje relativno mali broj zemalja - i to onih razvijenijih. Interesantno je da se energetske tehnologije bazirane na korištenju sunčeve energije najviše razvijaju u tehnološki i ekonomski moćnijim zemljama. Za to postoji više razloga od kojih su najvažniji strateški, ekonomski i ekološki faktori. Sunčeva energija je, ekološki gledano, čista energija čije energetske tehnologije u primjeni ne zagađuju životnu sredinu. Ona predstavlja resurs sa kojim raspolaže svaka država bez uvozne zavisnosti. Posebno je značajno što se postrojenja za korištenje sunčeve energije mogu graditi u neposrednoj blizini potrošača - bez značajnijih ulaganja u

infrastrukturu. Sunčeva energija se tehničkim sredstvima jednostavno transformiše direktno u toplotu i direktno ili indirektno u električnu energiju, čime je omogućena brza primjena u svim energetskim procesima. Korištenje sunčeve energije u svim segmentima energetske potrošnje danas je u značajnom porastu u mnogim zemljama sveta. Sunčeva energija pruža raznovrsne mogućnosti za primjenu.

Savremeni solarni sistemi omogućavaju iskorištenje sunčeve energije tokom cijele godine. Ovakvi sistemi mogu snabdjeti do 35% svih potreba u sjevernoj i centralnoj Evropi, više od 50% južno od Alpa, a na jugu Evrope čak 70%. Istovremeno, znatno se smanjuje emisija štetnih gasova u atmosferu, što je argument više za korištenje sunčeve energije.

Sa gledišta praktičnog korištenja sunčeve energije, važna je količina energije koja dospijeva na neku površinu u toku dana. Ta količina zavisi od geografske širine, godišnjeg doba, orientacije prijemne površine i meteoroloških uslova. Prva tri faktora su geometrijskog karaktera i postoje računski metodi njihovog tačnog određivanja. Međutim, meteorološki uslovi su promjenljiv faktor i pouzdani se podaci mogu dobiti jedino dugogodišnjim mjeranjima. Za korištenje sunčeve energije važni su i podaci o srednjoj dnevnoj sumi energije po mjesecima, kao i podaci o prosječnim temperaturama za iste periode. Veliku ulogu u korištenju sunčeve energije imaju i oblik, veličina zgrada, orientacija, materijali koji se koriste i dr. Bitno je i okruženje, tj. da li ima zasjenjenja od strane drugih zgrada i dr.

Korištenje obnovljivih izvora energije i u okviru njih - sunčeve energije doprinosi efikasnijem korištenju sopstvenih potencijala u proizvodnji energije, smanjenju emisija "gasova staklene bašte", smanjenju uvoza fosilnih goriva, razvoju lokalne industrije i otvaranju novih radnih mjesta.

2. SUNČEVA ENERGIJA

Sunce je jedna od tipičnih zvijezda, čiji prečnik iznosi $1,39 \times 10^6$ km. Temperatura na njegovoj površini ima efektivnu vrijednost od 5.762 K, dok prema središtu raste dostižući, prema raznim procjenama, vrijednost od 8×10^6 K do 40×10^6 K. Na Suncu se neprekidno odvijaju spontani termonuklearni procesi pod dejstvom visokih temperatura i velikog pritiska nastalog djelovanjem gravitacione kontrakcije. Energija sunčevog zračenja definisana je donekle termonuklearnim reakcijama, pri čemu je najvažniji proces transmutacije vodonika u helijum (četiri protona vodonika u jedno jezgro helijuma). U središtu Sunca se pri visokim temperaturama odigravaju nuklearni procesi koji obuhvataju vodonik, ugljenik, azot i druge lakše elemente. Jezgro helijuma ima manju masu od mase četiri protona vodonika, što znači, da se deo mase (1/141 deo) u reakciji manifestuje kao energija. Ova energija se oslobađa u unutrašnjosti Sunca pri temperaturama od više miliona stepeni, pa se iz njegove unutrašnjosti predaje površini i emituje u vaskonski prostor. Pri tome se naizmjenično ostvaruju procesi zračenja i konvekcije, uslijed čega nastaje apsorpcija i izračivanje. Zračenje jezgra Sunca nastaje u djelu spektra, odgovarajućem rendgenskom i γ -zračenju, pri čemu talasna dužina zračenja raste sa padom temperature i povećanjem radijalnog rastojanja. Najveći dio Sunčeve energije se emituje u prostor u obliku elektromagnetskih talasa. Veći dio tih talasa se nalazi u vidljivoj i infracrvenoj, a manji u ultraljubičastoj oblasti spektra. Spoljni slojevi Sunca, tzv. solarna atmosfera, sastoji se iz fotosfere, hromosfere i korone, koje imaju vrlo različite osobine. Najveći dio svjetlosti koja dospijeva na Zemlju sa Sunca dolazi iz fotosfere. Zona ultraljubičastog zračenja obuhvata oblast spektra talasnih dužina (λ) do $0,38 \mu\text{m}$, vidljivi dio svjetlosti od $0,38$ do $0,78 \mu\text{m}$ i infracrvenu oblast talasnih dužina - preko $0,78 \mu\text{m}$. Srednja udaljenost Sunca od Zemlje iznosi $1,495 \times 10^8$ km, što sunčevu zračenje - gulinu toplotnog toka koja na Suncu (sunčeva sjajnost) iznosi 6.350 W/cm^2 , redukuje na vrijednost od 1.353 W/m^2 neposredno pre ulaska u Zemljinu atmosferu. Ova vrijednost od 1.353 W/m^2 (neka novija mjerena utvrdila su da je $1.367 \pm 7 \text{ W/m}^2$) koja predstavlja snagu sunčevog zračenja na jediničnu površinu, upravnu na pravac upada zraka pri ulasku u Zemljinu atmosferu (pri srednjem odstojanju Zemlje od Sunca) naziva se: solarna konstanta. Energija, koju Sunce izrači u vaskonski prostor odgovara snazi od $3,5 \times 10^{20} \text{ MW}$, a samo 2×10^9 - ti dio od toga, tj. $1,75 \times 10^{11} \text{ MW}$ dospijeva na Zemlju. Oko 30% primljene energije Zemlja reflektuje nazad u kosmos, oko 47% zadrži kao toplotu, oko 23% se "troši" na proces kruženja vode u prirodi dok se ostatak „potroši“

na fotosintezu. Sunčev zračenje koje dospijeva do površine Zemlje se razlikuje od spektra izvanzemaljskog solarnog zračenja. Ove promjene su uzrokovane promjenom rastojanja između Sunca i Zemlje, atmosferskom rasijanošću molekula vazduha, vodene pare i prašine u atmosferi, kao i atmosferskom koncentracijom kiseonika, ozona, vode i ugljen-dioksida. Analizom podataka sunčevog zračenja utvrđeno je da promjena integralnog zračenja tokom vremena ne odstupa više od $\pm 1,5\%$. Raspršenost, odnosno koncentracija molekula vazduha, vodene pare i čestica prašine i dima u atmosferi utiču na umanjenje propusnosti sunčevog zračenja na površinu Zemlje. Apsorpcija energije zračenja u atmosferi definiše se u funkciji sadržaja vodene pare i optičke vazdušne mase. Optička vazdušna masa se određuje dužinom puta radijacije kroz atmosferu, pri čemu se vertikalna putanja uzima za jedinicu mase. Mjerenjima i proračunima utvrđeno je, da je zbog reflektovanja zraka od atmosfere i apsorpcije u atmosferi, pri normalnom upadu zraka i malom sadržaju vodene pare, prašine i dima - umanjen intenzitet zračenja. Zbog toga na površinu Zemlje dospijeva (u našem podneblju) sunčev zračenje od 970 [W/m²] - leti i 1.030 [W/m²] - zimi. U proračunima se najčešće koristi srednja vrijednost snage od 1.000 [W/m²]. Na promjenu vrijednosti zračenja koje dospijeva do gornjih slojeva atmosfere utiče i promjena rastojanja između Zemlje i Sunca tokom godine. Ova promjena se nalazi u granicama odstupanja od $\pm 3\%$. Iz navedenog je evidentna i naučno utvrđena činjenica, po kojoj je snaga sunčevog zračenja na Zemljii (u našem podneblju) u toku zime čak veća za 5,8% od snage zračenja leti. Ovaj porast snage zračenja zasniva se na činjenici da je Sunce, za sjevernu poluloptu, bliže Zemlji zimi za oko 3% nego leti. Ukupni efekti zračenja energije su ipak leti veći za odgovarajuća podneblja - zbog duže putanje Sunca preko neba (dužeg vremena trajanja obdanice). Sunce kao izvor energije ima veoma stabilno dejstvo i intenzitet zračenja do ulaska u Zemljinu atmosferu. Umanjenje ovog zračenja u atmosferi Zemlje pod najpovoljnijim uslovima se kreće u granicama od 23,9 do 28,3%. Međutim, osim godišnjih, mjesecnih i dnevnih promjena intenziteta Sunčevog zračenja na određenoj površini Zemlje, promjene nastaju i u zavisnosti od meteoroloških uslova atmosfere, kao i od ugla upada zraka na Zemlju, odnosno na površinu do koje dospijeva. U geografskim uslovima u Vojvodini energija koja dospijeva na horizontalnu ravan od 1 m² dostiže vrijednost od minimalno 1.350 do maksimalno - 1.500 kWh/god. To je jednak količini toplotne energije, koju je moguće dobiti sagorijevanjem približno 160-180 m³ zemnog gasa.

2.1. Globalno, direktno, difuzijsko i reflektovano zračenje

Na zemljinoj površini se zato registruju tri osnovne vrste sunčevog zračenja - direktno sunčevu zračenje, raspršujuće (difuzno) zračenje i zračenje reflektovano od zemljine površine ili drugih objekata.

Atmosfersko dejstvo na Sunčevu radijaciju ogleda se u promjenama koje uzrokuju refrakciju i disperziju zračenja, čime se u stvari mijenja smjer putanje i vrši razdvajanje susjednih talasnih dužina. Slabljene sunčeve radijacije uzrokuje difuzno i apsorpciono dejstvo atmosfere. Intenzitet direktnog sunčevog zračenja na granici zemljine atmosfere je približno 1.360 W/m^2 . Od ovoga, kroz atmosferu na zemljinu površinu prodre - pri najpovoljnijim uslovima približno 1.000 W/m^2 .

Direktno zračenje predstavlja komponentu globalnog zračenja koje direktno dospijeva na površinu Zemlje pri jasnom i vedrom danu.

Direktno sunčevu zračenje se računa prema sljedećem izrazu:

$$I_B = I_{BN} \cdot \cos\theta \quad (2.1.1)$$

gdje je:

- I_{BN} – direktno normalno sunčevu zračenje [W/m^2],
- θ – upadni ugao sunčevog zračenja [$^\circ$].

Dio ukupnog zračenja se prilikom prolaska Sunčevih zraka kroz atmosferu rasipa zbog nailaska na čestice vode, prašine i drugih oblika aerozagađenja. Koncentracija pare i prašine je promjenljiva veličina u atmosferskom plasti koja uzrokuje promjenljivu spektralnu raspodjelu globalnog zračenja, a u okviru toga i promjenljivu vrijednost njegovih komponenti - direktnog i difuznog dijela zračenja detektovanog na površini Zemlje. Pravac direktnog Sunčevog zračenja se može odrediti na svakoj tački Zemljine površine geometrijskim korelacijama, dok je pravac difuznog zračenja veoma složen i zavisi od atmosfere, a ne od položaja Sunca. Vrijednosti ovih komponenti zračenja najtačnije se utvrđuju mjeranjem pomoću odgovarajućih instrumenata - piranometara. Komponenta direktnog zračenja je dominantna u potencijalu globalnog zračenja za vedre dane, dok se udio difuznog zračenja kreće najčešće u granicama od 8 do 22% od ukupnog. Oblačnih

dana je svo zračenje difuznog karaktera. U zavisnosti od doba godine i klimatskog područja difuzno zračenje premašuje i 30% od globalnog, te postaje itekako značajna komponenta Sunčevog energetskog dejstva. U gradovima, zbog aerozagađenja i konfiguracije tla, ova komponenta je izraženija. Poseban oblik zračenja koje se detektuje na određenu površinu u ravni Zemlje nastaje reflektovanjem Sunčevog zračenja sa površina iz okoline (albedo podloge). Albedo predstavlja odnos kratkotalasnog reflektovanog i globalnog zračenja i ima promjenljivu veličinu (u funkciji podloge). Promjenom osobina podloge mijenja se i vrijednost albeda, što se manifestuje promjenama u bilansu zračenja, posebno kada su u pitanju promjene u većim razmjerima (obrada velikih površina tla - rast bilja, snijeg i dr.). Stoga je veoma važan antropogeni uticaj na prirodni raspored vegetacionih površina. Intenzitet reflektovanog zračenja je u direktnoj zavisnosti od konfiguracije objekata i tla u okolini indikatorske površine. Kod zelenih površina koeficijent refleksije se kreće u granicama od 0,2 do 0,3, što znači da reflektuju od 20 do 30 % Sunčevog zračenja. Na raspoloživu količinu sunčeve energije utiču promjene u sastavu atmosfere, odnosno njene zamućenosti. Posljednjih godina zamućenost atmosfere se u gradovima povećava, posebno u ljetnjim mjesecima, kada je najintenzivniji vegetacioni period. Ona je naravno, izraženija u blizini urbanih i industrijskih centara, dok joj efekat slabi sa udaljavanjem od ovih centara (slabi zamućenost atmosfere, a jača efekat albeda).

Ukupno zračenje na ravnu površinu je jednako zbiru: direktnog, difuzijskog i reflektiranog zračenja:

$$I_C = I_B + I_d + I_r \quad (2.1.2)$$

2.2. Proračun sunčevog zračenja na nagnutu površinu

Dozračena energija Sunca I_C na nagnutu površinu je jednaka zbiru tri komponente Sunčevog zračenja: direktne, difuzijske i refleksijske.

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (2.2.1)$$

gdje je:

- I_{BC} – direktno Sunčev zračenje na nagnutu površinu $\left[\frac{kWh}{m^2 dan}\right]$,
- I_{DC} – difuzijsko Sunčev zračenje na nagnutu površinu $\left[\frac{kWh}{m^2 dan}\right]$,
- I_{RC} – refleksijsko Sunčev zračenje na nagnutu površinu $\left[\frac{kWh}{m^2 dan}\right]$.

Difuzijska solarna iradijacija na nagnutu površinu I_{DC} :

Prosječna mjesecna deklinacija δ i časovni ugao izlaska Sunca H_{SR}

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 81) \right] \quad (2.2.2)$$

gdje je:

- n – broj dana, .

Časovni ugao izlaska Sunca H_{SR} :

$$H_{SR} = \cos^{-1} \cdot (-\operatorname{tg} L \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (2.2.3)$$

gdje je:

- L – geografska širina,
- δ – prosječna mjesecna deklinacija.

Ekstraterestrička iradijacija na horizontalna površinu \bar{I}_0 :

$$\bar{I}_0 = \left(\frac{24}{\pi} \right) \cdot SC \cdot \left[1 + 0,034 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot (\cos L \cdot \cos \delta \cdot \sin H_{SR} + H_{SR} \cdot \sin L \cdot \sin \delta) \quad (2.2.4)$$

gdje je:

- SC – solarna konstanta, $SC = 1355 \frac{W}{m^2}$.

Indeks vidljivosti:

$$K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_0} \quad (2.2.5)$$

gdje je:

- \bar{I}_H – prosječna horizontalna iradijacija $\left[\frac{kWh}{m^2 dan} \right]$.

Difuzijska iradijacija \bar{I}_{DH} na horizontalnu površinu:

$$\frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H} = 1,390 - 4,027 \cdot K_T + 5,531 \cdot K_T^2 - 3,108 \cdot K_T^3 \quad (2.2.6)$$

Difuzijska iradijacija \bar{I}_{DC} na nagnutu površinu:

$$\bar{I}_{DC} = \bar{I}_{DH} \cdot \left(\frac{1 + \cos\Sigma}{2} \right) \quad (2.2.7)$$

Refleksijska solarna iradijacija na nagnutu površinu \bar{I}_{RC} :

$$\bar{I}_{RC} = \rho \cdot \bar{I}_H \left(\frac{1 - \cos\Sigma}{2} \right) \quad (2.3.8)$$

gdje je:

- ρ – koeficijent refleksije upadnog zračenja od Zemlje.

Direktna iradijacija \bar{I}_{BH} na horizontalnu površinu:

$$\bar{I}_{BH} = \bar{I}_H - \bar{I}_{DH} \quad (2.2.9)$$

Časovni ugao izlaska Sunca za kolektor H_{SRC} :

$$H_{SRC} = \min\{\cos^{-1}(-\operatorname{tg}L \cdot \operatorname{tg}\delta), \cos^{-1}[(L - \Sigma) \cdot \operatorname{tg}\delta]\} \quad (2.2.10)$$

Faktor nagiba direktne iradijacije \bar{R}_B :

$$\bar{R}_B = \frac{\cos(L - \Sigma) \cdot \cos\delta \cdot \sin H_{SRC} + H_{SRC} \cdot \sin(L - \Sigma) \cdot \sin\delta}{\cos L \cdot \cos\delta \cdot \sin H_{SR} + H_{SR} \cdot \sin L \cdot \sin\delta} \quad (2.2.11)$$

Direktna solarna iradijacija na nagnutu površinu \bar{I}_{BC} :

$$\bar{I}_{BC} = \bar{I}_{BH} \cdot \bar{R}_B \quad (2.2.12)$$

3. Toplotni prijemnici sunčevog zračenja

Prijemnici kod kojih se energija Sunčevog zračenja direktno transformiše u toplotu su danas tehnički, tehnološki i ekonomski najjednostavniji i najprimjenljiviji za široku upotrebu. U ovoj grupi se razlikuju dvije osnovne vrste prijemnika – u zavisnosti od temperaturnog nivoa radnog medijuma koji se u njima može dostići:

- niskotemperaturni prijemnici, i
- visokotemperaturni prijemnici.

U grupu niskotemperaturnih prijemnika spadaju svi prijemnici kod kojih se radna temperatura radnog medijuma kreće najčešće do 100°C. U ovu grupu se ubrajaju i cijevni vakuum kolektori, mada se temperatura primarnog radnog medijuma u apsorberima kreće i do 200 stepeni. Kod visokotemperaturnih prijemnika se Sunčevi zraci, zahvaćeni sa veće površine, fokusiraju (koncentrišu) na neku manju površinu, pri čemu se, u zavisnosti od konstrukcije, ostvaruju visoke radne temperature - i do nekoliko hiljada stepeni Celzijusa (komercijalni tipovi kompaktnih prijemnika ostvaruju temperature od nekoliko stotina stepeni). Ovakvi sistemi se takođe mogu koristiti za pripremu tople vode, sušenje i dr., ali su prevashodno namijenjeni "proizvodnji" električne energije u tzv. "solarnim elektranama" koje imaju termoenergetski sistem sličan sistemu klasičnih termoelektrana (jedino što je u ovom slučaju proizvodnja pare obezbijeđena dejstvom sunčevog zračenja). S obzirom na mogućnost obezbijeđenja visokih temperatura, poznata su korištenja ovakvih vrsta PSE i u metalurške svrhe - za topljenje metala

Prema radnom medijumu kojim se toplota sa prijemnika odvodi prema potrošaču, ovi prijemnici se dele na:

- prijemnike sa tečnim rashladnim sredstvom, i
- prijemnike sa vazduhom kao rashladnim sredstvom.

Kod prijemnika sa tečnim rashladnim sredstvom (nosiocem toplote), radni medijum može biti voda ili neka druga tečnost (antifriz, ulje i sl.). Kod prijemnika sa vazduhom kao radnim medijumom toplotu sa apsorbera odnosi vazduh, te mu je konstrukcija znatno jednostavnija. U zavisnosti od konstrukcijske koncepcije prijemnika postoji niz podjela prema određenim

karakteristikama konstrukcije – oblika ili upotrijebljenog materijala, ali u ovom kontekstu oni se dijele na:

- elementne prijemnike, i
- integralne prijemnike.

Ravni, niskotemperurni prijemnici za termalnu konverziju Sunčevog zračenja, koje danas proizvodi svjetska solarna industrija (za potrebe privrede i vanprivrede uopšte), zasnivaju se na koncepciji kojom se obezbjeđuje njihova univerzalna aplikacija na objekte. Zbog toga se tehnički izvode kao zasebne cjeline u čiji sklop ulaze neophodni elementi kao što su: transparent, apsorber, termička izolacija i odgovarajuće kućište koje hidroizoluje unutrašnjost prijemnika od dejstva spoljne sredine. Ovakva koncepcija, zbog univerzalnosti primjene, zahtjeva složeniju tehnologiju proizvodnje i složeniju konstrukciju prijemnika, što je u direktnoj vezi sa višom cijenom proizvoda, odnosno njihovom nižom ekonomičnošću. Međutim, integralni prijemnici se direktno aplikuju na južno orijentisanoj površini objekta (krovište, fasada) i ne zahtijevaju posebno kućište, pošto površina objekta predstavlja zadnju graničnu površinu prijemnika. Na taj način dio objekta predstavlja prijemnik Sunčeve energije integralnog tipa. Jedna od suštinskih podjela prijemnika toplotnog dejstva Sunčevog zračenja odnosi se istovremeno i na sistem prenosa toplote potrošaču, te se klasificuju kao:

- prijemnici u aktivnom solarnom sistemu, i
- prijemnici u pasivnom solarnom sistemu.

Pasivni solarni sistemi predstavljaju takve sisteme kod kojih se toplota Sunčevog zračenja direktno prenosi na grijni medijum - najčešće vazduh, koji je ograničen staklenim zidom objekta (staklenik aplikovan uz objekat). Toplota se, unutar grijanog objekta, prenosi prolazom kroz zid i prirodnim strujanjem zagrijanog vazduha (kroz otvore na zidu) u grijanu prostoriju. Svi ostali sistemi, kod kojih je prijemnik poseban element sistema u kojem radni medijum prinudno struji, predstavljaju aktivne solarne sisteme. Postoje i hibridna rešenja oba pomenuta sistema.

3.1. Ravni - pločasti prijemnici sunčeve energije (PSE)

Nižetemperurni prijemnici Sunčeve energije zasnivaju se na koncepciji koja omogućuje njihovu aplikaciju na različite objekte i na različite noseće konstrukcije. Zbog toga se tehnički izvode kao zasebne cjeline u čiji sklop ulaze neophodni elementi kao što su: transparent, apsorber, termička izolacija i odgovarajuće kućište koje hidroizoluje unutrašnjost PSE od dejstva spoljne sredine. Na kućištu se nalaze cijevi ili kanalski priključci za dotok (rashlađenog) i odvod (zagrijanog) radnog medijuma i - u zavisnosti od tipa konstrukcije i proizvođača - priključci za nesmetanu aplikaciju prijemnika na odgovarajuću konstrukciju. Apsorber je kod svih tipova PSE zatvoren u odgovarajućem kućištu, tako da se na određenom rastojanju sa njegove prednje - prijemne strane nalazi najčešće jedna ili dvije transparentne pokrivke, a sa njegove zadnje i bočnih strana nalazi se termička izolacija. Zaptivni i spojni elementi obezbjeđuju potrebnu hidrozaptivnost i čvrstinu sklopa svih elemenata koji sačinjavaju konstrukciju prijemnika. Prema vrsti radnog medijuma koji se koriste za odvođenje toplote od prijemnika – korisniku, dijele se na:

- nisko temperurne PSE sa tečnim radnim medijumom koji se nazivaju: VODENI PSE, mada se često koriste i tečna sredstva na bazi mješavine vode i antifriba, ili samo antifriz,
- nisko temperurne PSE sa vazduhom kao nosiocem toplote koji se nazivaju: VAZDUŠNI PSE.

Značajna je i podjela nižetemperurnih prijemnika Sunčeve energije prema konstruktivnoj koncepciji sistema u kojem se prijemnik koristi:

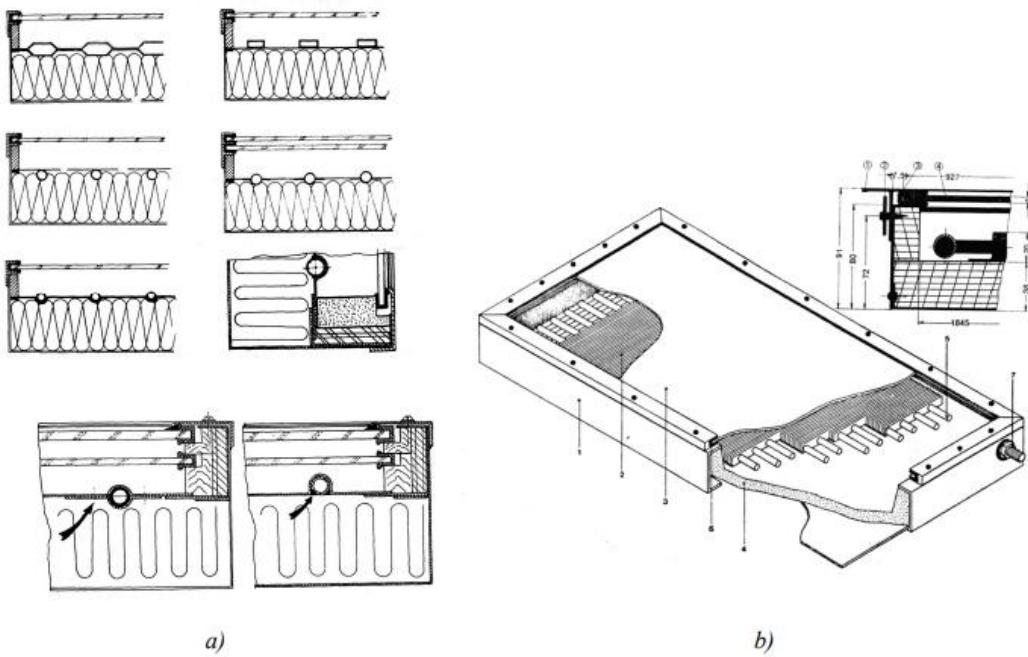
- PSE za primjenu kod aktivnih sistema grijanja Sunčevom energijom (aktivni solarni sistemi) i
- PSE za primjenu kod pasivnih sistema grijanja Sunčevom energijom (pasivni solarni sistemi).

Prijemnici namijenjeni za sisteme pasivnog solarnog grijanja konstruktivno su prilagođeni objektu koji se greje, tako da je dio površine objekta prilagođen prijemu Sunčeve energije, a dobivena toplota se predaje korisniku prirodnom cirkulacijom vazduha ili vode (najčešće vazduha), kondukcijom, konvekциjom i radijacijom. Solarni kolektori predviđeni za rad u sistemu aktivnog solarnog grejanja najčešće se izvode kao posebne jedinice, određene jedinične površine, koje se postavljaju na posebne noseće konstrukcije ili aplikuju direktno na grijani objekat. Posebnu grupu

niskotemperurnih PSE čine specijalne vrste prijemnika za neku posebnu namijenu kao npr. u poljoprivredi (za grijanje objekata staklenika i plastenika), skladišnih prostora, za predsušenje i sušenje poljoprivrednih proizvoda), u industriji (za sušenje industrijskih proizvoda i dr.), u domaćinstvima i turizmu (za grijanje sanitарне i bazenske vode) i dr. Zavisno od insolacionih uslova, tipa i konstrukcije PSE - može se sa jednog metra kvadratnog PSE godišnje dobiti oko 500 do 800 [kWh] toplotne energije, što je približno ekvivalentno toplotnoj energiji koja se dobiva sagorijevanjem 50 do 80 litara lož - ulja. U zimskom periodu je, u našem podneblju, ukupno energetsko dejstvo sunčevog zračenja manje od ljetnog, ali je još uvijek dovoljno efikasno za korištenje. Tako npr. iz komercijalnih tipova solarnih kolektora, može se u grijanoj sezoni dobiti - po jednom metru kvadratnom i jednom danu - energija koja se kreće (u zavisnosti od mjeseca u godini i lokaciji potrošača) - od 1,2 do 3,0 [kWh]. To znači da PSE za 30 dana u mjesecu može predati nekom potrošaču toplote od 36 do 90 [kWh] sa jednog metra kvadratnog kolektora. PSE čija je površina deset puta veća, može obezbijediti zimi od 360 do 900 [kWh] energije mjesечно, a kolektor površine od 30 [m²] - od 1.080 do 2.700 [kWh] mjesечно - što je sa aspekta potrebe grijanja već značajna količina toplote. U grijanoj sezoni je moguće dobiti od dejstva sunčevog zračenja oko 360 [kWh] toplotne energije sa jednog kvadratnog metra PSE, odnosno oko 11.000 [kWh] sa površine od 30 [m²]. Pošto se temperatura toplonoše u solarnom kolektoru (pri preporučenim brzinama strujanja) u zimskom periodu kreće najčešće od 40 do 60 [°C], jasno je da se kod sistema centralnog toplovodnog grijanja u periodu najnižih temperatura ne mogu u dovoljnoj mjeri koristiti. Međutim, čim su spoljni uslovi povoljniji, odnosno, kada je spoljna temperatura oko 0 [°C] i više, mogućnost korištenja toplote iz PSE je veća. Tada kotlovska instalacija najčešće radi sa temperaturama od 60/45 [°C]. To znači, da se najbolji efekti za grijanje porodičnih kuća i stanova mogu ostvariti u prelaznim periodima. I takav doprinos energije je vrlo značajan. Ukoliko se u sistemu toplovodnog grijanja primjenjuje podno grijanje sa podnim panelom, koje radi sa nižim temperaturama toplonoše - efekti su još bolji. Bolji efekti se ostvaruju primjenom vazdušnog sistema grijanja. Energetski efekti solarnih sistema pri grijanju kuća ili stanova zavise od više faktora, među kojima ispravno i optimalno projektovanje ima prvorazrednu ulogu. Termičke karakteristike grijanog objekta direktno utiču na količinu toplotnih gubitaka, a time i na potrebe za toplotnom energijom.

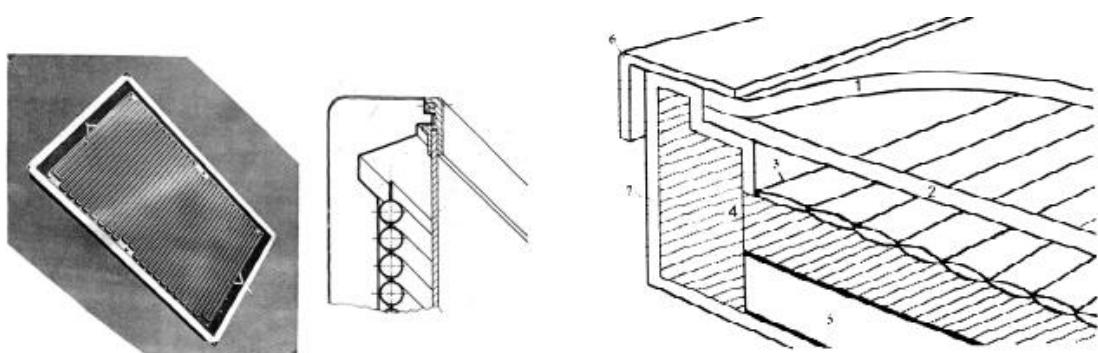
Izgled i konstrukcija ravnih - pločastih prijemnika sunčeve energije

Po dijelovima iz kojih je sastavljen, opštem izgledu i načinu funkcionisanja, solarni prijemnik sa tečnošću kao nosiocem topote se ne razlikuje od vazdušnih solarnih prijemnika. Razlike se odnose na izgled i konstrukciju apsorbera i mjesto i način strujanja rashladnog fluida. Kod vodenih prijemnika odnošenje topote iz apsorbera ostvaruje se samo na jedan način: strujanjem radne tečnosti kroz kanale koji su, bez obzira na konstrukciju apsorbera, u fizičkoj vezi sa apsorbujućom površinom. To znači da rashladni fluid ne dolazi u dodir sa transparentom ili drugim elementima prijemnika, kao što je to slučaj kod vazdušnih prijemnika. Na slici 3.1.1 (a i b) prikazan je niz konstrukcijskih rešenja apsorbera koji se u tehnici solarnih vodenih prijemnika danas najčešće koriste. Svi ovi prijemnici imaju prosječnu veličinu prijemne površine koja se najčešće kreće od 1,4 do 2 kvadratna metra. Ove dimenzije su uglavnom uslovljene dimenzijama raspoloživih poluproizvoda koji se ugrađuju, transportnim i manipulativnim uslovima, kao i univerzalnošću njihove namjene (radi smeštaja na različite objekte). Limitirajući faktor veličine često je vezan za transparentnu pokrivku, koja ne sme biti velika zbog mehaničkih karakteristika (savijanje uslijed sopstvene mase i slično), termičkih dilatacija koje bi ugrozile nepropusnost prijemnika na spoljna dejstva i, konačno, radi ukupne krutosti prijemnika i slično.



Slika 3.1.1. a) Djelomični presjeci nekoliko uobičajenih varijanti konstrukcije ravnih PSE sa tečnim radnim nosiocem toplote

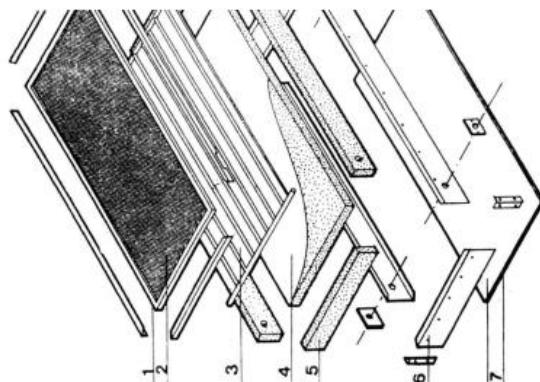
b) Ravan prijemnik sa lamelnim apsorberom 1-kućište, 2-lamele apsorbera, 3-staklo, 4-termoizolacija, 5-cijev, 6-gumena zaptivka, 7-priklučak za tečnost



Slika 3.1.2 a) Presjek i izgled jednog karakterističnog tipa PSE izgrađenog od plastičnih materijala

b) Presjek PSE sa apsorberom tipa ploča-ploča i dvostrukim transparentom

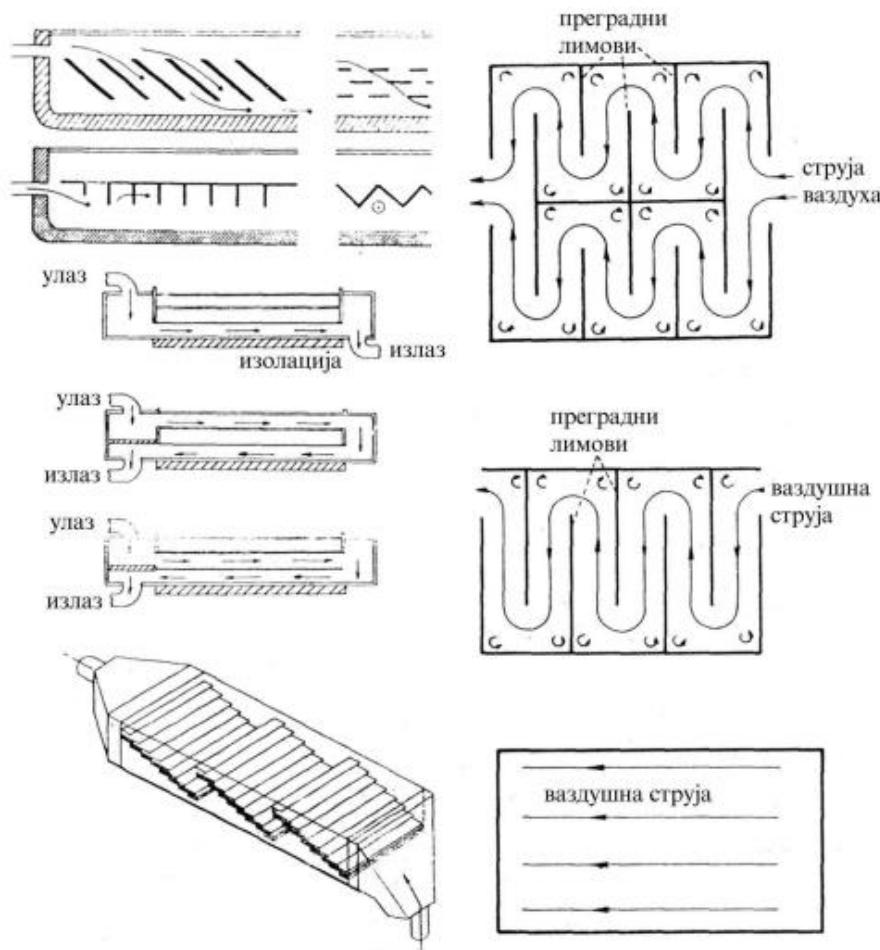
1 i 2-transparenti od akrila, 3-apsorber, 4-termička izolacija od poliuretana, 5-mineralna vuna, 6-ram



Slika 3.1.3. Dijelovi PSE sa apsorberom tipa cijev-ploča i jednostrukim transparentom, 1-profilisana gumena zaptivka, 2-staklena ploča, 3-apsorber, 4-termička izolacija sa alu-folijom, 5-termička izolacija od PU-pjene, 6—ram kućište, 7-zadnja ploča

Integralni (integrisani) ravni - pločasti prijemnik sunčeve energije

Koncepcija tzv. "integralnih solarnih kolektora" bazira na potrebi obezbjeđenja jednostavnijih i jeftinijih solarnih kolektora koji mogu u potpunosti obezbijediti iste efekte grijanja vode ili vazduha kao i klasični tipovi konstrukcija solarnih kolektora. To se ostvaruje integrisanjem funkcije solarnih kolektora i dijela građevinskog objekta (fasade ili krovišta), tako što se vrši direktno formiranje solarnih kolektora na objektu, pri čemu dio objekta (zid ili krovište) predstavljaju graničnu površinu ovako formiranog solarnog kolektora. Efekti ovakve konstrukcije su obično dvostruki: poboljšava se termička karakteristika zida ili krovišta (smanjuju topotni gubici) i obezbjeđuje projektovana količina topotne energije. Često, u takvim situacijama, su troškovi izrade dela fasade ili krova manji, obzirom da integralni solarni kolektor formira spoljnu oblogu tih površina. Osim integralnih tipova solarnih kolektora sa vazduhom kao nosiocem topote, postoje i rešenja kod kojih se kao radni medijum koristi tečnost. Ova rešenja su nešto složenija od vazdušnih integralnih solarnih kolektora, pošto zahtijevaju složeniju konstrukciju apsorbera.



Slika 3.1.4 Različite konstrukcije prijemnika sa vazduhom kao nosiocem toplote

3.2. Vakuumski kolektori

U komercijalnoj primjeni se nalaze cijevni (masovna primjena) i ravni vakuum solarni kolektori (znatno manji obim primjene). Cijevni vakuumski kolektori (Slika 3.1.5) su većinom iz proizvodno-tehničkih razloga klasifikovani po formi, u red cijevi. Pojas apsorbera pokriven selektivnim slojem sa povećanom apsorpcionom moći, pričvršćen je u toplotno i mehanički otpornoj staklenoj cijevi. Toplotni gubici su znatno redukovani pomoću vakuma među apsorberom i staklenom cijevi.

Vakuum ograničava prostiranje toplote, ili toplotne gubitke strujanjem (konvekcijom) ili gubitke pričinjene toplotnom sprovodljivošću vazduha. Vakuum cijevne kolektore je moguće podijeliti na kolektore sa direktnim strujanjem toplonosnog medija i kolektore koji rade na principu toplotnih cijevi (tzv. heat-pipe). Kod kolektora sa direktnim strujanjem, toplonosni medijum protiče od razdelnika ka kraju cijevi, oduzima toplotu od apsorbera, koji se nalazi u vakuumu i teče opet u sabirnik. Prednost kolektora sa direktnim strujanjem je u tome što nije potreban ni minimalni nagib kolektora. U slučaju kolektora koji radi na principu toplotne cijevi, u cijevi se nalazi tečnost koja se isparava pri nižim temperaturama. Ova para se diže u cijevi čak do gornjeg kraja, gdje je smješten mali razmenjivač toplote. Na ovom razmenjivaču toplote (kondenzatoru) para se kondenuje i odaje svoju toplotu indirektno toplonosnom mediju. Oticana tečnost se opet zagrijava, isparuje i započinje novi kružni tok ispočetka. Da bi ovaj kružni tok funkcionisao, kolektor mora imati nagib minimum od 30°.

U nepovoljnost kvalitetnih vakumskih kolektora spadaju viši investicioni troškovi po jedinici dobijene toplote. Koriste se za grijanje sanitарне potrošne vode za pranje i tuširanje, grijanje vode u sistemima centralnog grijanja, grijanje bazenske vode i sl. Vakuum cijevni kolektori su posebno pogodni za integraciju u sisteme sa centralnim grijanjem, sisteme sa podnim i zidnim grijanjem i hlađenjem kao i kod sistema kod kojih se traži veća količina potrošne tople vode. Vakuumski kolektor se sastoji od 15 do 30 vakumskih cijevi koje su povezane sa razmenjivačem toplote kroz koji protiče fluid koji se zagrijeva. Cijena cijevnih vakumskih kolektora je do 50% veća od klasičnih kolektora.



Slika 3.1.5 Vakuumski kolektor



Slika 3.1.6. Vakuumski ravni kolektor

Ravni vakuumski kolektori (Slika 3.1.6) u sebi spajaju pogodnost ravnih kolektora i vakuma kao toplotne izolacije. Svoju opravdanost nalaze u oblastima sa velikim procentom prašine, smoga ili u blizini morskih obala sa visokim sadržajem aerosoli u vazduhu.

Prijemnici sa koncentrisanjem (fokusiranjem) sunčevih zraka – koncentratori

Vrste koncentrišućih Sistema

Prijemnici sa koncentrisanjem Sunčevih zraka, koji su danas najčešće u komercijalnoj primjeni se dijele prema mogućnosti kretanja ("praćenja" Sunca) na statične i pokretnе (heliostatske). Kod statičnih sistema nepokretni su i koncentrator i prijemnik - apsorber, zbog čega se tokom dana mijenja upadni ugao zraka na prijemni sistem. Pokretni sistemi za koncentrisanje Sunčevih zraka se uglavnom izvode sa pokretnim koncentratorom (ogledalom), a nepokretnim prijemnikom - apsorberom. Reflektivni koncentratori (ogledala) predstavljaju prijemnike Sunčevog zračenja kod kojih se svjetlost reflektuje sa njihove površine i usmjerava u pravcu žiže. Koncentrišuće površine prijemnika se mogu generalno podjeliti, u zavisnosti od zakrivljenosti reflektivne površine, na ravne i krive. Koncentratori sa ravnim ogledalima imaju veći broj ravnih ogledala sa kojih se Sunčeva svjetlost odbija ka žižnoj zoni u kojoj je smješten prijemnik - apsorber. Veličina žiže je u direktnoj funkciji od veličine elementa ogledala koji u integraciji sa drugim elementima iste veličine obrazuju koncentrator.

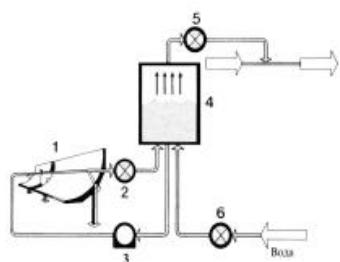
Koncentrišući srednje temperaturni sistemi

Srednje temperaturni solarni sistemi (koncentrišući sistemi sa linijskom žižom) rade sa radnim temperaturama iznad 100 0C – najčešće sa temperaturama od 200 do 300 0C. Ovakvi sistemi baziraju na zakrivljenim reflektujućim površinama – ogledalima (parabolocilindrični ili sl. – tzv. „koritasti“) kod kojih postoji potreba (zbog veće efikasnosti i efektivnosti u radu) zakretanja (praćenja visine ili dnevnog hoda Sunca na nebu) – uglavnom po jednoj osi. Sistemi za prijem i koncentrisanje Sunčevih zraka, kod kojih je ravnomjerno okretanje reflektora i prijemnika (apsorbera) ka Suncu, izrađuju se sa reflektorom čiju geometriju definišu krive površine dobijene translacijom ili rotacijom krive oko jedne ose. U zavisnosti od zahtijevane preciznosti navođenja prema Suncu, ovi sistemi (ogledalo-apSORBER) se grade sa jednim ili dva stepena slobode kretanja. Jedan stepen slobode kretanja obezbeđuje sistemu okretanje ka Suncu od jutra do večeri, pri konstantnom nagibu prema horizontu, što onemogućava precizno orijentisanje prijemnika prema Suncu. Dva stepena slobode kretanja omogućuju okretanje sistema oko dvije, međusobno upravne ose, praktično omogućujući prijemniku usmjeravanje ka bilo kojoj tački neba, odnosno precizno "praćenje" Sunca. U praksi se ovo navođenje realizuje na više načina. Jedan stepen slobode

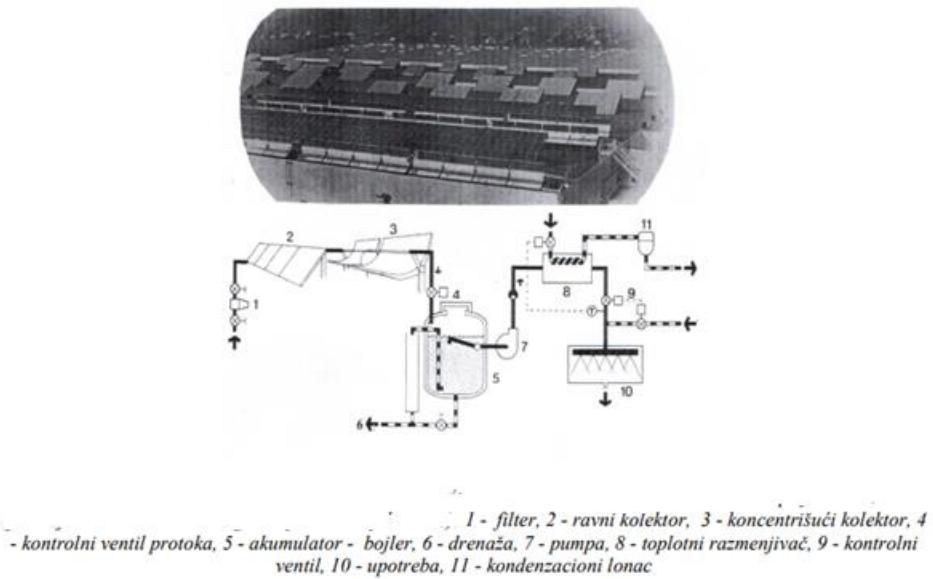
kretanja se u praksi izvodi kod sistema sa koritastim kristalnim ogledalima (cilindrična, parabolocilindrična i dr.). S obzirom da se kod fokusirajućeg sistema toplota iz žižne zone odvodi tečnošću kao nosiocem toplote, ovaj sistem najčešće se izvodi tako da je prijemnik (apsorber) nepokretan, a reflektor (ogledalo) pokretan, sa osom uležištenja koja se poklapa sa osom prijemnika. Kontinualno navođenje prema Suncu kod ovakvog sistema vrši se sa zakretanjem ogledala oko ose apsorbera (jedan stepen slobode kretanja), pri čemu se tjemena linija reflektora, žižna linija i Sunce nalaze u istoj ravni. Optičke karakteristike parabolocilindričnog koncentratora zavise od optičkih osobina površine reflektora, osjenčanja, od vezne konstrukcije, prijemnika i dr. Postrojenje na slici 3.1.7 prikazuje sistem namijenjen proizvodnji pare u procesnoj industriji, a postrojenje na slici 3.1.8 - sistem namijenjen dobivanju tople industrijske vode. Na slici 3.1.9 dat je izgled i funkcionalna šema solarno - toplotno - električnog pogonskog postrojenja sa parabolocilindričnim (jednoosnim) koncentratorima sunčeve energije. Ovo postrojenje ima izlaznu neto snagu električne energije od 500 kW pri snazi Sunčevog zračenja od 920 W/m². Akumulator topline - rezervoar za akumulaciju topline ima radnu zapreminu od 114 m³ (oko 0,8 MWh), a sredstvo za akumulaciju topline je ulje tipa San Therm 55. Radni fluid turbinskog postrojenja je voda, odnosno vodena para.



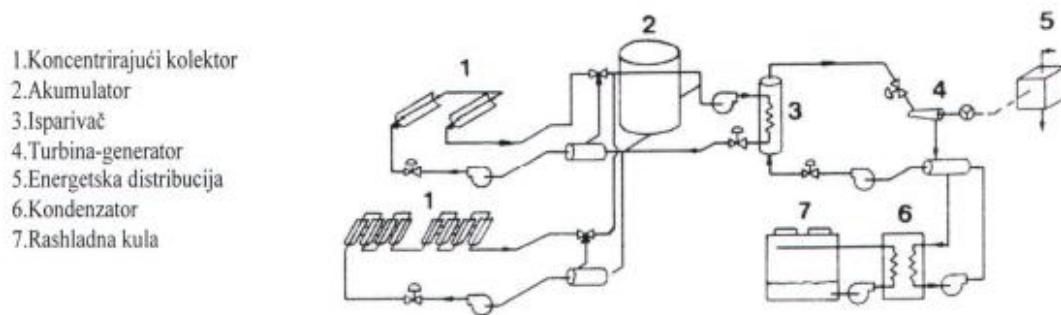
- 1. Koncentrirajući kolektor
- 2. Trokraki ventil
- 3. Kolektorska pumpa
- 4. Akumulator -bojler
- 5. Kontrolni ventil pare
- 6. Kontrolni ventil



Slika 3.1.7 Izgled i funkcionalna šema sistema sa parabolocilindričnim koncentratorima
(postrojenje je namijenjeno proizvodnji procesne industrijske pare)



Slika 3.1.8. Izgled i funkcionalna šema spregnutog sistema sa parabolocilindričnim i ravnim prijemnicima



Slika 3.1.9. Izgled i funkcionalna šema solarno-toplotno-električnog sistema sa parabolocilindričnim koncentratorima (snaga postrojenja 500kW)

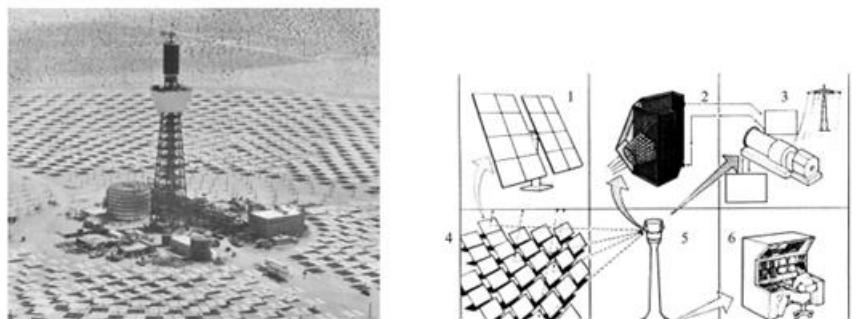
Helistatski makrokonzentrator

Veličinu koncentratora ograničava noseća konstrukcija prijemnika - posebno zato što se radi postizanja energetskih efekata mora vršiti njegovo navođenje prema Suncu. Stoga se u praksi prišlo rešenju (kada su u pitanju sistemi velikih snaga) kod kojeg je koncentrator sastavljen od međusobno odvojenih jedinica ravnih ogledala pokretnih oko dvije ose, koja su locirana na posebnim nosačima na zemljištu i koja reflektuju svjetlost ka žiči - apsorberu u kojem se nalazi razmjenjivač toplote. Ovaj sistem koristi stotine, pa i hiljade heliostatnih ogledala (ogledala koja prate kretanje Sunca) koji reflektuju sunčevu zračenje na apsorber centralnog prijemnika. Ovakva elektrana može imati snagu od 30 do 400 MW. U centralnom prijemniku na solarnom tornju nalazi se kao toplonoša - radni medijum - rastopljene soli koje sunčevi zraci zagrijavaju do temperature

od 450 do 565°C. Kada je potrebna električna energija sa ovog postrojenja, vrele soli se pumpama potiskuju do parogeneratorskog sistema u kojem se dobija pregrejana para koja se dalje odvodi do konvencionalne parne turbine/parogeneratora. Zapremine rezervoara su jedna od bitnih tačaka u projektovanju ovakvog sistema. Rezervoari su dovoljne zapremine da snabdijevaju generatore punim kapacitetom bez dogrijavanja i do 13 h. Zahvaljujući skladištenju, rad turbine i osobine električne struje ostaju konstantni bez obzira na razlike u intenzitetu solarnog zračenja i struja se može proizvoditi dok se zalihe ne potroše.

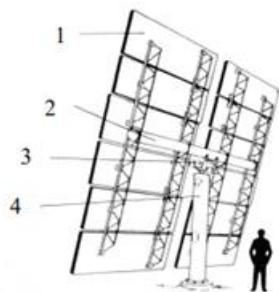
Heliostatski makrokoncentrator, prikazan na slici 3.1.10 ima primjenu u proizvodnji električne energije. Sunčevi zraci se odbijaju od velikog broja ogledala i usmjeravaju se ka žiži u kojoj je smješten prijemnik gdje se uslijed visokih temperatura stvara pregrijana para pod pritiskom, koja dalje ekspandira u turbini.

Generator električne energije, pogonjen parnom turbinom, transformiše mehanički rad u električnu energiju, koja se dalje predaje elektroenergetskom sistemu. Ogledala su kod ovog sistema okretna na svom nosaču, tako da mogu pratiti "kretanje" Sunca tokom dana i godine, uvijek usmjeravajući reflektovane zrake ka apsorberu. Svaka pokretna jedinica ogledala zasebno prati Sunce i usmerava reflektovanu svjetlost na neprekidnu žižu - pošto je položaj svakog pokretnog ogledala (heliostata) u sistemu različit u odnosu na druga. Ovakav tip solarnih elektrana, po dosadašnjim iskustvima, imaju tehnološki opravdanu primjenu u oblastima sa većom osunčanošću. U južnoj Evropi također se mogu graditi tornjevi zbog dovoljne količine sunčevog zračenja tokom cijele godine. Primer za to je Španija koja je jedna od zemalja koja ima izgrađene ovakve tipove solarnih elektrana. U tom smislu i trenutnom stanju ovih tehnologija - područje Vojvodine ne ispunjava potrebne uslove za tehnološki opravdanu primjenu heliostatskih solarnih elektrana.



1 - heliostat, 2 - prijemnik - isparivač, 3 - turbina sa elektrogeneratorom, 4 - polje heliostatskih ogledala, 5 - toranj sa prijemnikom, 6 - komandno odeljenje

Slika 3.1.10. Izgled pilot makrosolarnog postrojenja snage 10MW i elementi makrosolarnog sistema

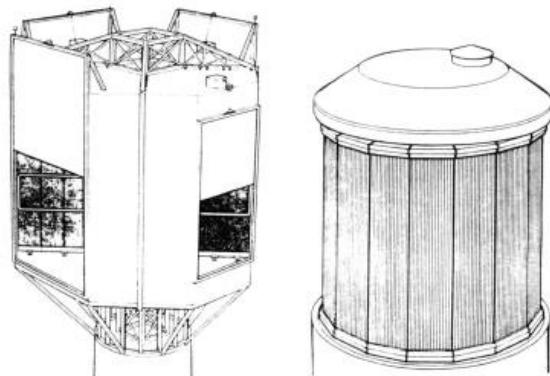


1 - modul ogledala, 2 - osovina i nosač modula za promenu nagiba, 3 - motorni mehanizam za promenu nagiba i orijentacije, 4 - glavni nosač

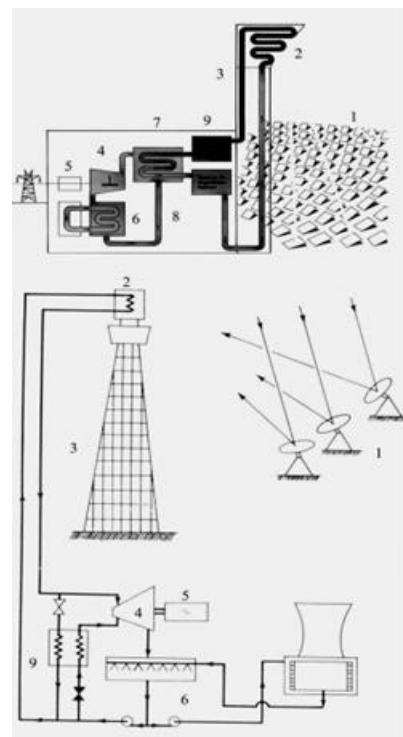
Slika 3.1.11. Dijelovi heliostata



Slika 3.1.12. Izgled heliostatskog ogledala sa mehanizmom za zakretanje



Slika 3.1.13 Tipični izgled centralnih prijemnika



1 - heliostati, 2 - centralni prijemnik, 3 - toranj.
4 - turbina, 5 - generator, 6 - kondenzator,
7 - isparivač, 8 - radni medijum,
9 - toplotni akumulator

Slika 3.1.14. Šema sistema makrosolarne elektrane

"Solar Two" postrojenja

Solar Two se pokazao kao najuspješniji projekat jer ima najbolje rešenje za skladištenje energije i najmanje gubitke u pretvaranju toplotne energije u električnu. To je postignuto upotrebom rastopljenih azotnih soli čiju su tehnologiju razvili Southern California Edison i Ministarstvo energetike S.A.D., dok je Boing (Rocketdyne odeljenje) projektovao i izgradio prijemnik-apsorber, koji se sastoji od serije ploča koje sadrže po 32 tanke cijevi od nerđajućeg čelika kroz koje protiču rastopljene soli sinusoidnom putanjom. Ploče su raspoređene u obliku cilindrične čaure koju prožima cjevovod koja ujedno sadrži noseću konstrukciju i kontrolnu opremu. Cijevi su obložene crnom Pyromark™ bojom koja je otporna na visoke temperature, toplotni provodnik i apsorbuje 95% sunčevog zračenja. Najnovija tehnologija laserskog zavarivanja, primjenjeni materijali i konstrukcijska rešenja, i mjerna oprema omogućavaju prijemniku da izdrži bez oštećenja rapidne promjene temperature (npr. sa 270°C do 570°C za manje od minuta). Soli za skladištenje energije su sastava 60% natrijum nitrat i 40% kalijum nitrat sa tačkomtopljenja na 220°C i u tečnom stanju je do temperature od 290°C. Sistem za skladištenje energije se sastoji od dva rezervoara kapaciteta po 875000 litara i termalnog kapaciteta 110 MWh sa prirodnim hlađenjem.



Slika 3.1.15 Solar-Two postrojenje

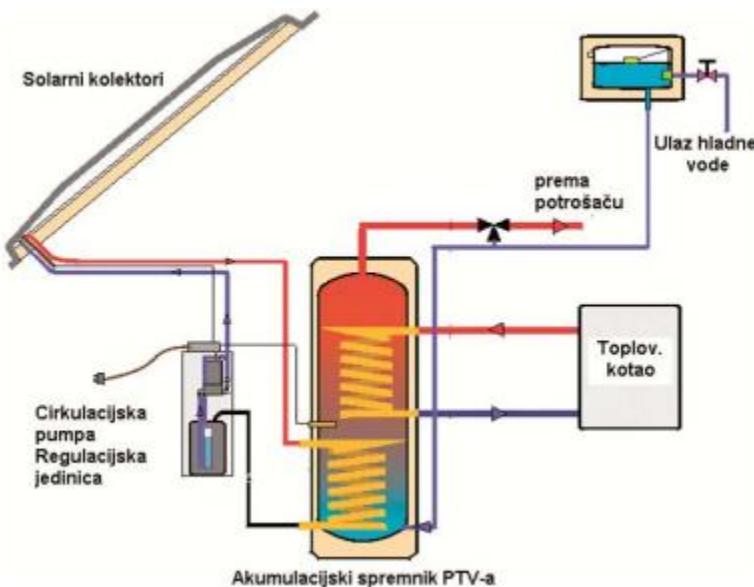
Solarni toranj i njegova korisnost

Do danas, najveći izgrađeni sistemi su tzv. "solarni tornjevi" kapaciteta 10 MW. S obzirom na uspeh ovih projekata, pokrenuta je inicijativa za izgradnju tornjeva od 30 do 100 MW, a što se tiče tehnološkog razvoja kapaciteti i od 400 MW više nisu nedostizni. Najveću potrebu za ovakvim sistemima imaju zemlje u razvoju jer su ovakva solarna postrojenja dovoljno efikasan način da se dopuni električna mreža u trenucima najveće potrošnje. Još jedan aspekt posmatranja tehnologije solarnih tornjeva je vezan i za potencijalnu lokaciju za izgradnju koja je obično neki neiskorišten teren (krševit, pustinjski ili neki drugi predio koji nije industrijalizovan ili naseljen). Od značaja je i potreba snabdjevenija vodom za opsluživanje sistema. Površina koju zauzima jedno postrojenje je manja od površine koju zauzima hidroelektrana, ili hibridna elektrana, a daleko manja nego elektrane koje koriste fosilna goriva gdje je uzet u obzir i rudnik ili bušotina prirodnog gasa koje se obično nalaze u okviru ovakvih kompleksa. Treba istaći da se tehnologija solarnih tornjeva može koristiti i pri izgradnji hibridnih elektrana gdje bi električna energija dobivena iz sunčeve bila iskorištena kao dopuna elektrodistributivne mreže u trenucima visoke potrošnje, za rasterećenje elektrane na fosilna goriva (u istim periodima ili prilikom remonta).

Tokom rada solarnog tornja nema emisije štetnih gasova i tečnosti. U slučaju izlivanja, soli će se skameniti pre nego što dođe do zagađenja zemljišta. Posle se otpad može kupiti i reciklirati ako je potrebno. Ukoliko se radi o hibridnom postrojenju, emisija gasova se odvija samo u nesolarnim dijelovima postrojenja.

3.2.Solarni sistemi za pripremu potrošne tople vode (PTV)

Za direktno iskorištanje Sunčeve energije danas se najčešće koriste niskotemperurni (40-60 °C) toplovodni sunčani sistemi (vidi sliku 3.2.1).

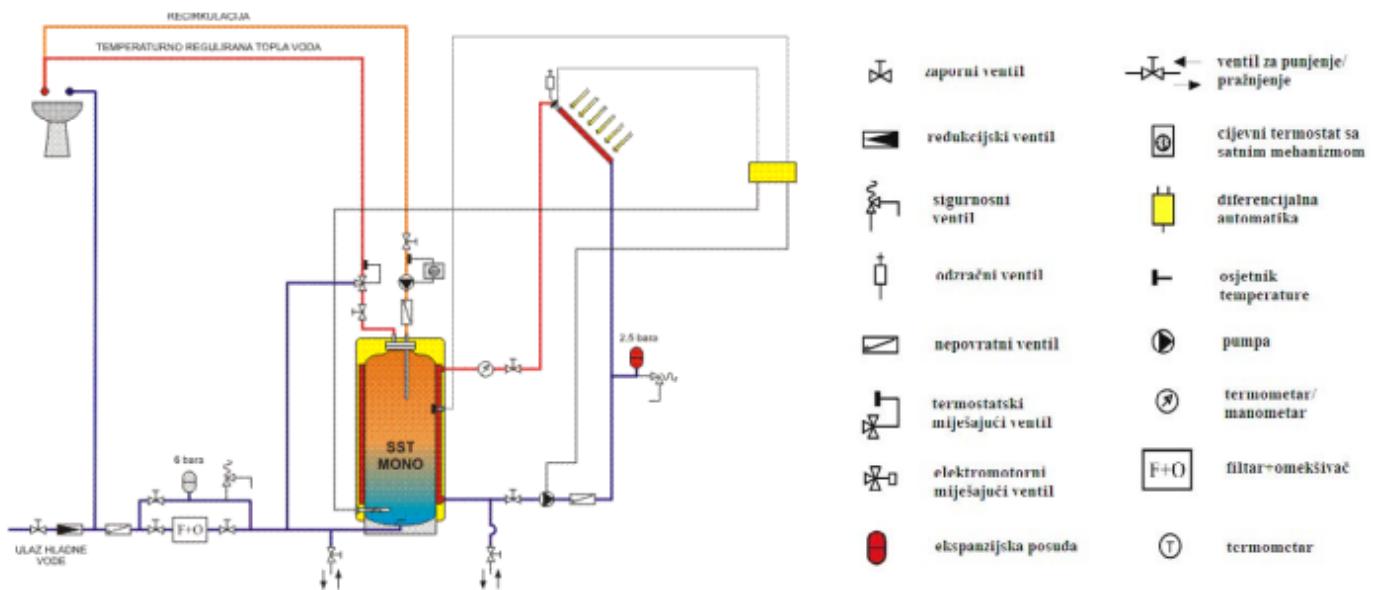


Slika 3.2.1 Solarni sistem za pripremu PTV sa pločastim kolektorom

Najveći broj instaliranih sistema 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 sistema 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 sistemi s prirodnom cirkulacijom koja nastaje uslijed razlike gustoća, odnosno razlike temperature radnog fluida u kolektoru i u spremniku, slika 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 sistemi gdje je spremnik pričvršćen za gornju stranicu kolektora. Zbog vanjskog smještaja taj će spremnik imati znatno veće topotne gubitke (niske temperature, vjetar) nego kad je smješten unutar objekta. Alternativno, kod sistema 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 prečnika, uz izbjegavanje dodatnih otpora strujanja (koljena, ventili) kako bi se ukupni pad pritiska 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 uticaj na njegovu efikasnost. Prednost u odnosu na sisteme 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 sistema i instalacije je niža. Termosifonski sistemi 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 tokom ljeta, no u zimskim mjesecima, osim velikih toplotnih gubitaka vanjskog spremnika, problem predstavlja i opasnost od smrzavanja vode u spremniku kad el. zaštita od smrzavanja zakaže.

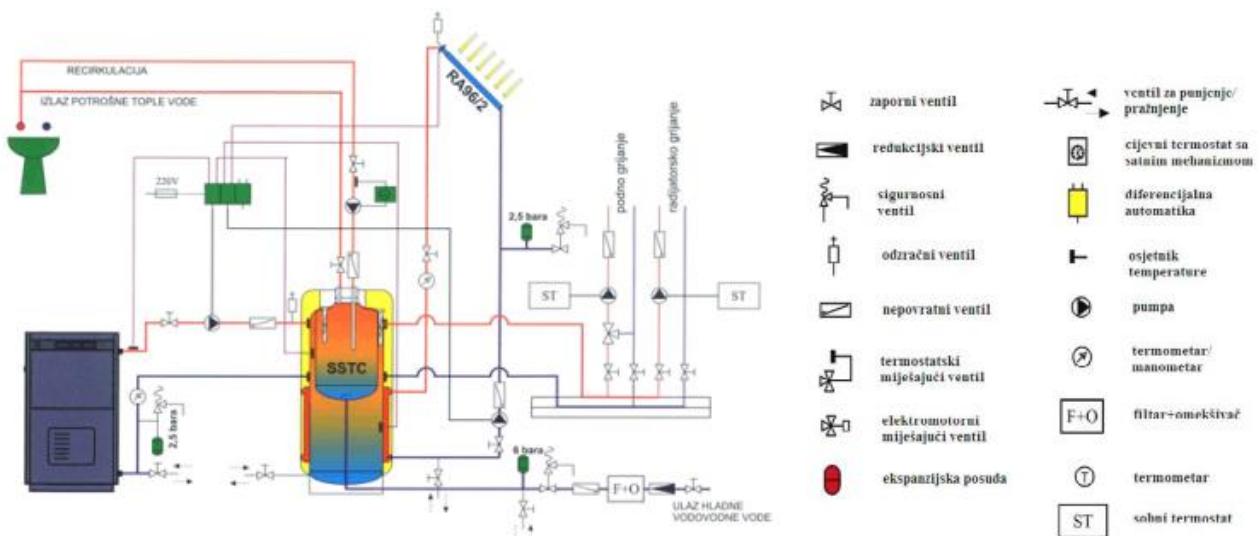
Na slici 3.2.2 prikazana je shema jednostavnog sistema s prisilnom cirkulacijom ostvarenom cirkulacijskom pumpom i jednim spremnikom za pripremu PTV-a. U prikazanom primjeru spremnik nema klasični izmjenjivač toplote u obliku cijevi, kao na slici 3.2.1, već radni medij kolektorskog kruga struji kroz dvostruki plašt spremnika od njegovog vrha do dna. Na taj način toplotu predaje vodi u spremniku. Polaz fluida kolektorskog kruga nalazi se na najnižem, tj. najhladnjem 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.



Slika 3.2.2. Sistem sa jednim spremnikom za pripremu PTV-a

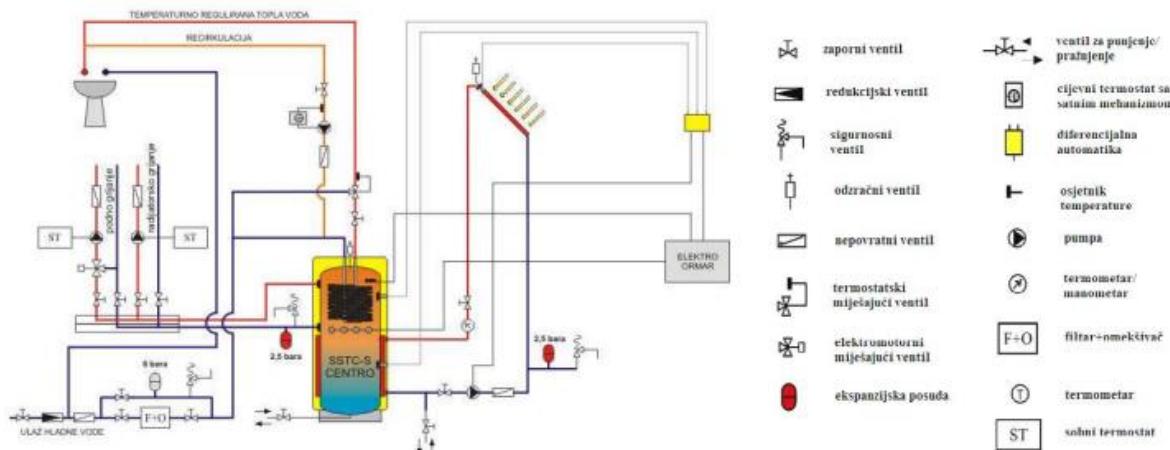
U načelu, sistemi s prisilnom cirkulacijom koriste diferencijalnu automatiku za isključivanje pumpe kada razlika temperatura fluida na izlazu iz kolektora i vode u spremniku postane manja od neke zadane vrijednosti (najčešće 3-5 °C). Time se sprječava rashlađivanje spremnika. Automatika će ponovo uključiti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

Na slici 3.2.3. prikazan je primjer kombinovanog sistema za pripremu PTV-a i grijanje prostora. Ovdje se koriste spremnici za vodu iz sistema grijanja koji u sebi imaju jedan manji s PTV-om. PTV iz manjeg spremnika izmjenjuje toplotu 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 zagrijivač vode. Kod ovakvog Sistema 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.

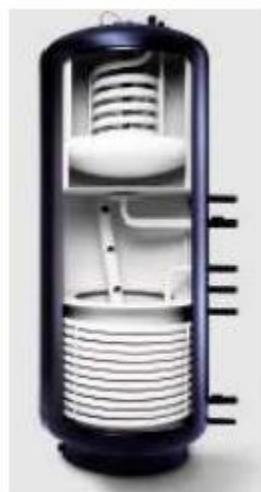


Slika 3.2.3. Primjer kombinovanog sunčanog sistema za pripremu PTV-a i grijanje prostora s dvostrukim spremnikom

Za zagrijavanje PTV-a umjesto akumulacijskog spremnika može se koristi i protočni zagrijivač, slika 3.2.4. 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 toplota 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 grijaca. U sistemu sa dvostrukim spremnikom (slika 3.2.3.) zbog mogućnosti akumulacije PTV-a vrijeme je zagrijavanja PTV-a dulje. To znači da se izmjena toplote 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 zagrijivači kombinuju sa manjim akumulacijskim spremnikom, kakav je prikazan na slici 3.2.5.

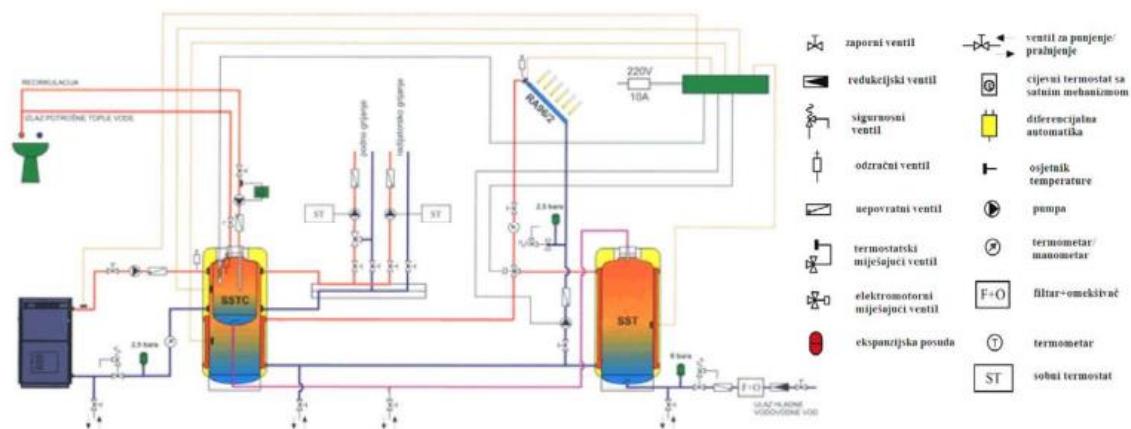


Slika 3.2.4. Kombinovani sunčani sistem za pripremu PTV-a i grijanje prostora s protočnim grijачem (izmjenjivačem) PTV-a



Slika 3.2.5. Spremnik s protočnim grijачем 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 umjesto jednog spremnika, slika 3.2.6.



Slika 3.2.6. Kombinirani sunčani sistem za pripremu PTV-a i grijanje prostora dva spremnika

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 sistem. Na taj način se prvi spremnik brže zagrijava na željenu temperaturu, a zbog zagrijavanja drugog spremnika niže temperature vode prosječna efikasnost kolektora tokom perioda rada je veća nego što bi bila da se zagrijava samo jedan veći spremnik. Takvi su sistemi posebice prikladni za korištenje u turističkim objektima, npr. privatnim kućama s apartmanima gdje su potrebe za PTV-om tokom 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 protiče ili se pak taj spremnik može u potpunosti isključiti iz rada. Općenito, kod svih sistema izmjenjivači toplote moraju biti tako dimenzionirani da izmjene svu toplotu prikupljenu kolektorima pri određenoj minimalnoj temperaturnoj razlici kolektorskog fluida i vode u spremniku koja može nastupiti tokom rada. U suprotnom dolazi do povećanja polazne temperature fluida kolektorskog kruga i sniženja efikasnosti kolektora sve dok se ne izmjeni sva prikupljena toplota. Kako je već objašnjeno u prethodnim poglavljima, ukoliko potrebnu izmjenjivačku površinu nije moguće smjestiti u spremnik ili je naprsto jeftinije koristiti manje izmjenjivače, potrebni toplotni učinak moguće je postići povećanjem temperature radnog fluida, i to bilo spajanjem kolektora u serijski spoj i/ili korištenjem kolektora s cijevnom serpentinnom, što svakako smanjuje efikasnost kolektora.

4. Solarna geometrija

Zračenje koje prima Zemlja zavisi od određenog mesta na njenoj površini , čiji se položaj mijenja prema Suncu tokom godine s obzirom na nagib ose Zemljinog obrtanja prema ravni njene ekliptike.

Položaj nekog mesta na Zemljinoj površini određen je geografskom širinom, časovnim uglom i deklinacijom.

Geografska širina ϕ predstavlja ugaono rastojanje tačke P od ravni ekvatora, odnosno ugao koji zaklapaju duž OP i njena projekcije na ravan ekvatora.

Časovni ugao h je ugao između projekcije duži koja spaja centar Zemlje i tačku P na ravan ekvatora i prave koja prolazi kroz centar Sunca i Zemlje. U trenutku kada je Sunce u najvišoj tački iznad nekog mesta, časovni ugao je nula pa u stvari ovaj ugao predstavlja vrijeme u toku dana u odnosu na najviši položaj Sunca. Iz ovog proizlazi da se Zemlja obrne za 15° u toku 1 časa:

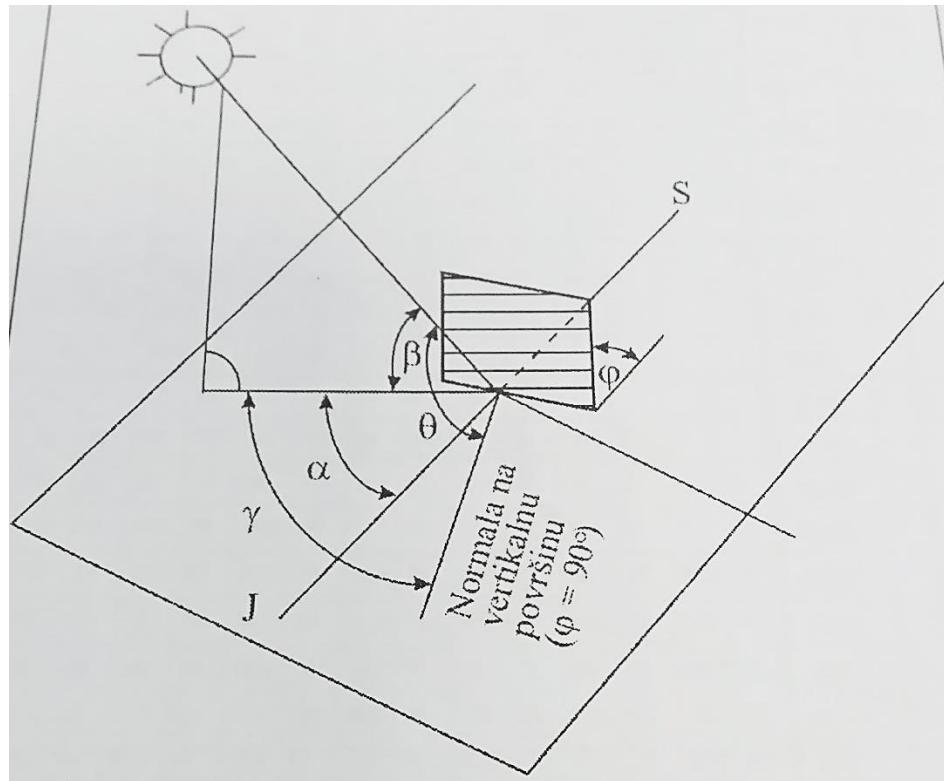
$$1h = 360^\circ / 24 = 15^\circ$$

Deklinacija je ugaono rastojanje direktnih sunčevih zraka, odnosno duži koja spaja središte Zemlje i Sunca i projekcije ove duži na ravan Zemljinog ekvatora. Računa se prema sljedećem izrazu:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (4.1)$$

Trenutni položaj Sunca prema nekoj tački na Zemlji određuje se uglom visine Sunca β .

Visinski ugao ili samo visina Sunca je ugao koji zaklapaju direktni sunčevi zraci sa horizontalnom ravni (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Uglovi položaja Sunca: α – azimut Sunca prema jugu; β – visina Sunca; γ – Sunčano – zidni azimu, θ – upadni ugao, φ – ugao nagiba površine na koju dospijeva sunčeve zračenje

U istom trenutku veličina ovog ugla je različita na različitim mjestima na površini Zemlje, a varira i tokom godine sa promjenom međusobnog udaljenja Zemlje od Sunca, pa zavisi od geografske širine, časovnog ugla i deklinacije Sunca. Računa se prema sljedećem izrazu:

$$\sin\beta = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cosh \quad (4.2)$$

Azimut određuje položaj Sunca prema stranama svijeta i predstavlja ugaono rastojanje između horizontalne projekcije direktnih sunčevih zraka i pravca sjever-jug. Izražava se u stepenima istočno ili zapadno od pravca juga, a često i kao ugao od 0° do 360° prema pravcu sjevera. zračenja. Numerički se određuje prema relaciji:

$$\cos\alpha = (\sin\beta \cdot \sin\phi - \sin\delta) \quad (4.3)$$

Upadni kut θ je ugao pod kojim sunčevi zraci padaju na određenu površinu, u odnosu na njenu normalu. Definisan je uglom visine sunca i nagibom površine prema horizontalnoj ravni:

$$\cos\theta = \cos\beta \cdot \cos\gamma \cdot \sin\varphi + \sin\beta \cdot \cos\varphi \quad (4.3)$$

Kada je površina vertikalna, $\varphi = 90^\circ$, gornja jednačina postaje:

$$\cos\theta = \cos\beta \cdot \cos\gamma \quad (4.4.)$$

za horizontalan položaj površine $\varphi = 0^\circ$, pa je:

$$\cos\theta = \sin\beta \quad (4.5)$$

4.1.Sunčano vrijeme

Vrijeme računato prema nultom meridijanu koji prolazi kroz Grinič predstavlja tzv. vrijeme po Griniču ili univerzalno vrijeme. Lokalno vrijeme se odnosi na određenu tačku na zemlji i uvijek je ispred univerzalnog ako se nalazi zapadno od nultog meridijana i to za po 4 minuta za svaki stepen razlike geografske širine. Prema tome svako mjesto na Zemlji ima svoje lokalno ili sunčevu vrijeme i vrijeme po časovniku.

Lokalno sunčevu vrijeme (LSoV) nije jednako vremenu po časovniku. Ono je jednako za cijelu vremensku zonu kojoj pripadaju sva mjesta u rasponu od 15° geografske dužine. Meridijan koji prolazi kroz sredinu jedne vremenske zone naziva se standardni vremenski meridijan. Ovaj vremenski meridijan za srednjoevropsku zonu koja obuhvata veću zonu od 15° bi bi cca. 10° istočno od nultog meridijana.

Lokalno solarno vrijeme se od standardnog vremena (LStV) razlikuje za 4 minuta na svaki stepen udaljenja mjesta od standardnog vremenskog meridijana (StM).

Ako je određeno mjesto istočno od standardnog meridijana, razlika se oduzima od standardnog vremena; u suprotnom se dodaje, računajući prema geografskoj širini mjesta (LL).

Jednačina za izračunavanje lokalnog solarnog vremena je :

$$LS_oT = LStV - 4(StM - LL) + VJ \quad (4.1.1)$$

5. F-Chart metoda

F-chart je metod simulacije rada solaranog sistema. Ova metoda je posebno korisna za uproštenje simulacije solarnih sistema bez postavljanja složenih bilansnih jednačina. Cilj metode je izračunavanje stepena pokrivanja f- udjela mjesecne toplotne energije dobivene solarnim sistemom u ukupnoj mjesecnoj potrebnoj toplotnoj energiji.

Metoda se zasniva na obračunu mjesecnog iznosa energije isporučene sistemom tople vode sa skladištenjem, s obzirom na mesečne vrednosti prolaska solarnog zračenja i temperature okoline. Stepen pokrivanja f određuje se u zavisnosti od parametara X i Y.

Parametar X je odnos toplotnih gubitaka kolektora i ukupnog toplotnog opterećenja koje je potrebno zadovoljiti solarnim sistemom.

Parametar Y je odnos apsorbovane dozračne energije i ukupnog toplotnog opterećenja koje je potrebno zadovoljiti solarnim sistemom.

Dvije bezdimenzionalne veličine izračunavaju se kao:

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{REF} - \bar{T}_a) \Delta \tau \frac{A_c}{L} \quad (5.1)$$

$$Y = F_R (\tau \alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \frac{\bar{\tau} \bar{\alpha}}{(\tau \alpha)_n} H_T N \frac{A_c}{L} \quad (5.2)$$

gdje je:

- A_c – površina kolektora [m^2],
- F_R – faktor odvođenja toplote kolektora [%],
- F'_R – faktor efikasnosti kolektorskog kruga [%],
- U_L – koeficijent toplotnih gubitaka kolektorskog kruga $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$,
- $\bar{\tau} \bar{\alpha}$ – prosječni mjesecni proizvod transmisije i apsorpcije [%],
- $(\tau \alpha)_n$ – normalni proizvod transmisije i apsorpcije [%],

- $\Delta\tau$ – broj sati u mjesecu [h],
- $\overline{T_a}$ – prosječna mjeseca temperatura ambijenta [$^{\circ}\text{C}$],
- N – broj dana,
- L – mjeseca potrebna toplotna energija [kWh],
- H_T – dnevna ozračenost ukupnim Sunčevim zračenjem, pod određenim ugloom $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{dan}}\right]$,
- T_{REF} – referetna temperatura, $T_{REF} = 100^{\circ}\text{C}$.

Kolektorski gubici, koji su predstavljeni parametrom X , podrazumijevaju dodatnu korekciju. Dobivenu vrijednost za parametar X je potrebno najprije pomnožiti sa korekcijskim faktorom za volumen spremnika tople vode, a zatim sa korekcijskim faktorom za pripremu PTV.

Korekcijski faktor volumena spremnika:

$$\frac{X_1}{X} = \left(\frac{V_S}{V_{ref}} \right)^{-0,25} \quad (5.3)$$

gdje je:

- V_S – stvarni volumen spremnika [l],
- V_{ref} – referentni volumen spremnika [l].

Referentni volumen spremnika V_{ref} :

$$V_{ref} = 0,75 \cdot A \quad (5.4)$$

Korekcijski faktor za pripremu PTV:

$$\frac{X_1}{X} = \frac{(11,6 + 1,18 \cdot t_{TW} + 3,86 \cdot t_{HW} - 2,32 \cdot \overline{T_a})}{(100 - \overline{T_a})} \quad (5.5)$$

Mjeseca potrebna toplotna energija za grijanje PTV L je jednaka:

$$L = N \cdot n \cdot V_p \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (t_{TW} - t_{HW}) [kWh] \quad (5.6)$$

gdje je:

- N – broj dana u mjesecu,
- n – broj osoba,
- V_p – dnevna potrošnja vode po osobi ,
- ρ_w – gustina vode,
- c_w – specifični toplotni kapacitet za vodu, ,
- t_{TW} – temperatura tople vode,
- t_{HW} – temperatura hladne vode.

Stepen pokrivanja f se određuje iz sljedeće relacije:

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215 \quad (5.7)$$

6. Standard ISO 9806-2017

Standard ISO 9806-2017 – "Solarna energija-Toplotni solarni koelktori-Metode ispitivanja", pokriva trajnost, pouzdanost i ispitivanje efikasnosti gotovo svih vrsta kolektora dostupnih na tržištu, koje uključuju testove otpornosti na visoke temperature, izloženost, vanjski topotni udar, unutrašnji topotni udar, prodror kiše, otpornost na udarce i mehaničko opterećenje.

U ovom standardu detaljno su opisani uvjeti koje treba obezbijediti prilikom izvođenja postupka ispitivanja.

Neke od osnovnih odredbi koje je potrebno ispoštovati prilikom ispitivanja ravnih kolektora su sljedeće:

- Ispitivanje kolektora je potrebno izvoditi pri vanjskim uvjetima gdje nema značajnijeg učešća reflektovane energije sunčevog zračenja, odnosno gdje je koeficijent refleksije za tlo ili neku drugu površinu manji od 0,2.
- Uzorak kolektora na kojem se vrši ispitivanje treba da bude dovoljno velikih dimenzija kako bi dobiveni rezultati bili mjerodavni pri onim radnim uvjetima kada kolektor bude dio jednog izvedenog sistema.
- Tokom ispitivanja vrijednost ukupnog sunčevog zračenja mora biti veća od 700 W/m^2 , sa dozvoljenim odstupanjem $\pm 50 \text{ W/m}^2$. Difuzni udio ne smije biti veći od 30 %. Ako je razina difuznog zračenja veća od 30 %, ta se mjerena ne smiju koristiti. Tokom razdoblja ispitivanja, brzina okolnog zraka mora biti između 2 m/s i 4 m/s. Protok fluida kroz kolektor bi trebao biti $0,02 \text{ kg/s}$, ukoliko proizvođač drugačije nije naveo.
- Upadni ugao sunčevog zračenja izmjeran između normale na ravan aperture kolektora i direktnog sunčevog zračenja za vrijeme testa ne smije biti veći od 20° .

- Standard nema posebne uvjete vrijednosti za ulaznu temperaturu, nego se kaže da kolektor treba ispitati na četiri različite ulazne temperature te da maksimalna temperatura treba biti najmanje oko 80 °C ako se kao fluid koristi voda.
- Prilikom određivanja funkcije efikasnosti kolektora, potrebno je provesti 16 različitih ispitivanja, i to po četiri za svaki temperaturni nivo.
- Prema europskoj normi EN 9806-2017 funkcija trenutne toplotne efikasnosti je predstavljena krivom drugog reda u zavisnosti od redukovane temperature:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(t_m - t_a)}{I_t} - a_2 \left(\frac{t_m - t_a}{I_t} \right)^2 \quad (6.1)$$

gdje je:

- η_0 – optička učinkovitost.

Redukovana temperaturna razlika data je izrazom:

$$\dot{t}_m = \frac{t_m - t_a}{I_t} \quad (6.2)$$

Sada je izraz funkcija treuntne toplotne efikasnosti:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \dot{t}_m - I_t (\dot{t}_m)^2 \quad (6.3)$$

7. TRNSYS

TRNSYS je program za simulaciju prolaznih sustava s modularnom strukturom. Prepozna jezik opisa sistema u kojem korisnik određuje komponente koje čine sistem i način na koji su povezani.

TRNSYS biblioteka uključuje mnoge komponente koje se obično nalaze u sistemima toplotne i električne energije, kao i komponentne rutine za rukovanje unosom vremenskih podataka ili drugih funkcija prisiljavanja ovisnih o vremenu i izlaz rezultata simulacije.

Modularna priroda TRNSYS-a daje programu ogromnu fleksibilnost i olakšava dodavanje programu matematičkih modela koji nisu uključeni u standardnu TRNSYS biblioteku. Za matematičko modeliranje solarnih Sistema u TRNSYS-u uglavnom se koriste programski jezici: FORTRAN, C, C++.

TRNSYS je vrlo prikladan za detaljne analize bilo kojeg sistema čije ponašanje zavisi o vremenu.

TRNSYS je postao referentni softver za istraživače i inženjere širom svijeta.

Glavne aplikacije uključuju:

- solarne sisteme (solarni tolotni i fotonaponski sistem),
- niskoenergetske zgrade i klimatizacijske sisteme,
- obnovljive izvore energije,
- kogeneracije i gorivne ćelije,

odnosno sve što zahtjeva dinamičku simulaciju.

Literatura

- [1] Miroslav Lambić, Solarne tehnologije toplotni i fotonaponski sistemi, Beograd, 2013.
- [2] Branislav Todorović, Klimatizacija, Beograd, 2009.
- [3] Branislav Todorović, Projektovanje postrojenja za centralno grejanje, Beograd 2009.
- [4] Duffie, J.; Beckman, W. Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [5] ISO 9806-17 International Standard, Test Methods