

Vakuumski cevni kolektorji (s toplotnimi cevmi)

Dr. F. Mahjouri

Thermo Technologies

5560 Sterrett Place, Suite 115

Columbia, Maryland 21044

WWW.THERMOTECHS.COM

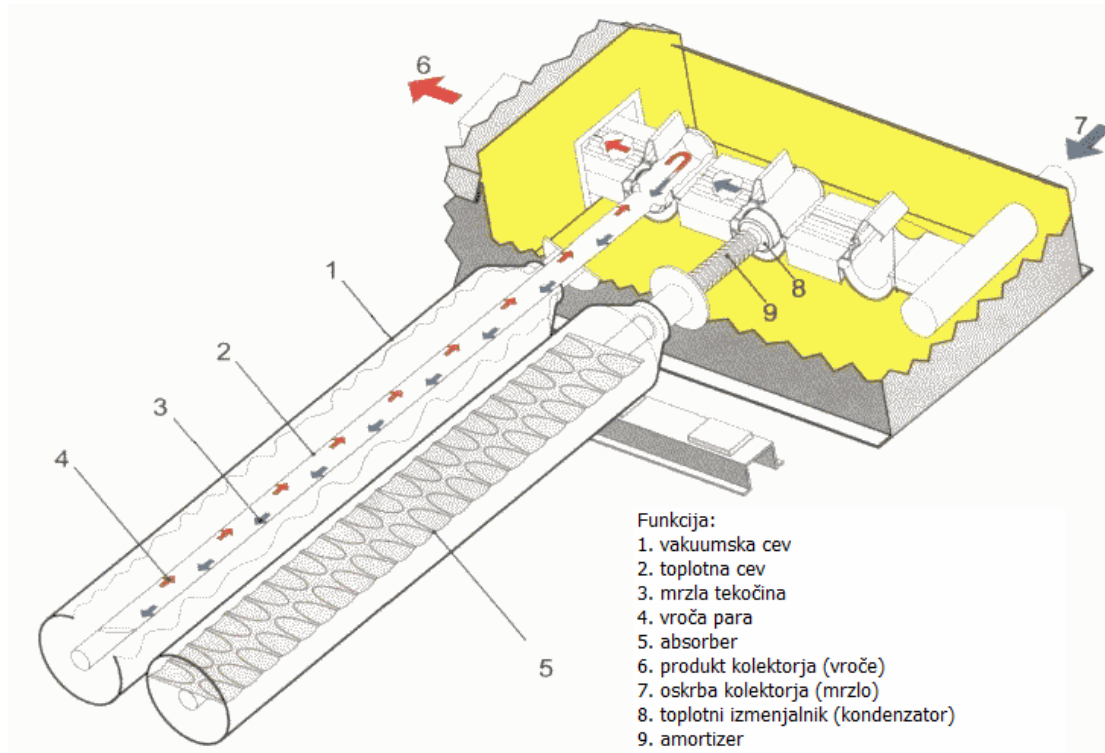
e-mail: mahjouri@thermotechs.com

UVOD

Zaradi delovanja izpraznjenih toplotnih cevi (EHPT) pri visoki temperaturi in njihove zelo nizke izgube toplotnega sevanja so te idealne za solarno ogrevanje vode, prostora, sušilne klimatske naprave, termično ogrevanje in naprave za ogrevanje v industrijskih procesih. Krovno cevno steklo brez železa in vakuum znotraj cevi ščitijo absorpcijski nanos in vse materiale pred korozijo in neugodnimi vremenskimi razmerami. Ovoj vakuumske cevi minimizira toplotne izgube in zagotavlja visoko vzdržljivost kolektorja in njegovo stabilno delovanje. Srce EHPT je toplotna cev. Toplotna cev je izparilno-kondenzacijska naprava za hitri prenos toplote. Latentna toplota izparevanja se prenaša s pomočjo izparevanja tekočine na vodni osnovi v dovodnem območju sončne toplote in kondenzacije njene pare v odvodnem območju. Toplotni vir je absorpcijska plošča, ki je vseskozi zvezana s toplotno cevjo. Kondenzator (območje odvajanja toplote) je v neposrednem stiku z zbiralnikom, ki služi kot toplotni izmenjalnik. Nadalje, ima toplotna cev diodno funkcijo, t.j. prenos toplote je vedno v eni smeri – od absorberja do zbiralnika (torej od kolektorja do rezervoarja sanitarne vode) in nikoli obratno. Termodinamični ventil naravna toplotni tok v toplotni cevi na najmanjšo stopnjo, ko se temperatura delovanja kolektorja približa prednastavljenemu maksimumu. Regulacija ventila se doseže z uporabo kovine s spominom. Kovina pri programirani temperaturi spremeni svojo elastičnost in potisne čep, ki zapira prehod toplovoda pri kondenzatorju. To ima dva učinka. Prvič, omejen je tok vroče pare od izparitvenega območja do kondenzatorja. Drugič, kondenzirana tekočina toplotnega prenosa je delno ujeta v kondenzatorju. Posledično je količina efektivne toplotno prevodne tekočine znotraj toplotne cevi sorazmerno zmanjšana. Tako ta termodinamični ventil nadzoruje temperaturo delovanja na ravni kolektorja.

1. TEHNOLOGIJA TOPLOTNE CEVI

Osnovna toplotna cev je zaprta posoda, ki jo sestavlja kapilarno šibka struktura in majhna količina izparljive tekočine.



Slika 1: S titanom, nitridom in oksidom obdano absorpcijsko rebro prenese toploto do kondenzatorja prek toplotne cevi. Toplotna cev je vseskozi povezana z absorpcijskim rebrom znotraj vakuumsko zaprte cevi, kot prikazano. Kondenzatorji so vstavljeni v komoro v zbiralniku, kjer kroži toplotno prevodna tekočina.

Toplotna cev izkorišča krog izhlapevanja in kondenzacije, ki sprejema toploto iz zunanjega vira. Ta zunanji toplotni vir dvigne tekočino toplotne cevi do območja vrelišča. Tekočina v toplotni cevi izhlapi (latentna toplota) in potem sprosti latentno toploto z obratno transformacijo (kondenzacijo) pri odseku toplotnega odvoda. Ta proces se stalno ponavlja s pomočjo gravitacijskega mehanizma obratnega toka kondenzirane tekočine nazaj do toplotnega območja. Toplotna cev ima visoko prevoden toplotni prevodnik. Zaradi njegovih termično-fizikalnih lastnosti je stopnja prevodnosti tisočkrat večja kot tista najboljših trdnih toplotnih prevodnikov istih razsežnosti. V EHPT zapečaten bakrena cev (toplotna cev) je povezana z bakrenim rebrom (absorpcijsko ploščo), ki napolni prazno stekleno cev. Majhen bakren

kondenzator je pritrjen na vrhu vsake toplotne cevi. Ti kondenzatorji so vstavljeni v komoro toplotnega izmenjalnika obdanega s super izolatorjem, ki se nahaja v zbiralniku na vrhu sistema solarnega kolektorja.

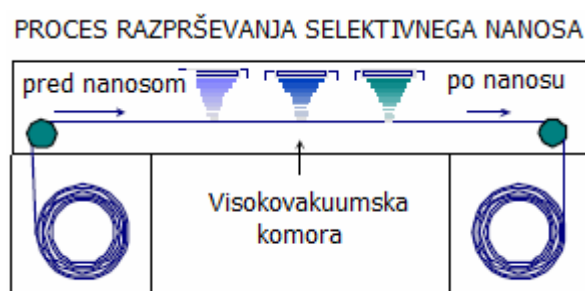
Ko na absorber posije sonce, tekočina v toplotni cevi zavre in vroča para se dvigne do kondenzatorja na vrhu. Voda ali glikol, teče skoz zbiralnik in hladi kondenzorje. Ta toplotno prevodna tekočina kroži skozi še en toplotni izmenjalnik in odda svojo toploto sredstvu (tipično pitni vodi), ki je shranjeno v solarnem rezervoarju.

Največja temperatura delovanja toplotne cevi je kritična temperatura uporabljenega toplotno prevodnega sredstva. Ker ni možno izhlapevanje/kondenzacija nad kritično temperaturo, se termodinamični krog prekine, ko temperatura izparilnika preseže kritično temperaturo.

V solarnem kolektorju se kondenzacijsko območje nahaja na višjem nivoju kot območje izhlapevanja. Težnost kondenzirano tekočino vrne nazaj na območje izhlapevanja. Zato ni potrebna kapilarno šibka struktura.

2. FOTO-TERMALNA PRETVORBA

Solarni kolektor absorbira sončno sevanje in ga pretvori v toploto (foto-termična pretvorba). EHPT absorbira največje sončno sevanje z najmanjšo možno termalno in optično izgubo. Lastnosti absorpcijskega nanosa, steklena tesnila, mehanski amortizer in vakuumaska izolacija so najpomembnejši deli solarnega kolektorja EHPT. Absorpcijski nanos iz titana, nitrida in oksida (TINOX) je visoko selektiven absorber. Ima visoko absorpcijo (nizka odbojnost) za sončni spekter in nizko izsevnost za infrardeče toplotno sevanje.



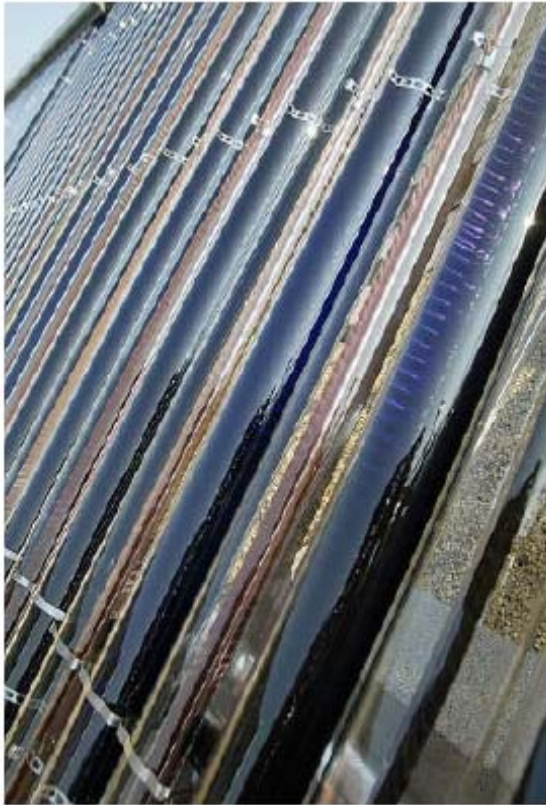
Slika 2a: Razprševanje je fizikalni proizvodni postopek, ki vključuje nanos kovinskih delcev na podlago. Proizvodni proces poteka v visokovakuumski komori in proces nanosa vključuje tri faze: nanos stabilizacijske plasti, nanos polprevodne plasti (plast, ki absorbira sevanje) in nanos proti-odbojne plasti.

Nanos uporabljen v EHPT je sestavljen iz zelo tanke plasti TINOX (debelina okoli 60 nm). Nanesena je z uporabo patentiranega procesa izparevanja na bakreni podlagi. Ta tehnologija pomeni dodaten pomemben korak k ekologiji. Proizvodni postopek s TINOX je nestrupen in brez emisij.



Slika 2b: Absorber z razpršenim selektivnim nanosom je visoko odporen na dolgotrajno kondenzacijo pare, visoko koroziven žveplov dioksid in visoko temperaturo delovanja. Testirana efektivna odpornost je enakovredna življenjski dobi izdelka, ki presega 30 let.

V vakuumski komori so nad bakrenim rebrom nameščene tri ciljne ploščice. Z ustvarjanjem visokonapetostnega polja med ciljnim ploščicami in bakrenim rebrom ter magnetnega polja vzporednega ciljnim ploščicam pozitivni ioni helija sprostito titanove atome iz ciljne ploščice. Atomi zadenejo bakreno rebro in zaradi velike kinetične energije atomov se pritrdijo na vrh bakrenega rebra. Med postopkom gre to bakreno rebro mimo treh ciljnih ploščic. Najprej se na bakreno rebro nanese stabilizacijska plast čistega titana. Ta plast da površini bakrenega rebra dolgotrajno stabilnost. Drugič, titanovi atomi reagirajo s kisikom in oblikujejo absorpcijsko plast titanovega oksida (TINOX) na prvi plasti. V tej polprevodni plasti so titanovi atomi usmerjeni v taki smeri, da se lahko absorbira 98% prihajajočega sončnega sevanja. Končno je na absorpcijsko plast dodana proti-odbojna plast. Proti-odbojna plast ima zelo nizek indeks odbojnosti in lahko prepusti 98 do 99 % sončnega obsevanja, da ga absorbira polprevodna plast.



Slika 2c: Zaradi visoko kvalitetnih materialov in avtomatiziranega procesa proizvodnje so kolektorji z izpraznjenimi toplotnimi cevmi vzdržljivi in zanesljivi.

Nanosi TINOX dosežejo svoje visoke temperature s selektivnim absorpcijskim obnašanjem. Zatrejo odbojne izgube v območju infrardečih valovnih dolžin z zelo nizkim koeficientom izsevnosti. Pri kratkih valovnih dolžinah je visok absorpcijski koeficient odgovoren za odlično absorpcijo sevanja:

Emisija $\epsilon_{\mu} = (212^{\circ} \text{ F}) = 0,05$

Absorpcija $\alpha_{\text{sol}} > 0,94$

Maksimalna temperatura v vakuumu $T_{\text{Max}} = 707^{\circ} \text{ F}$

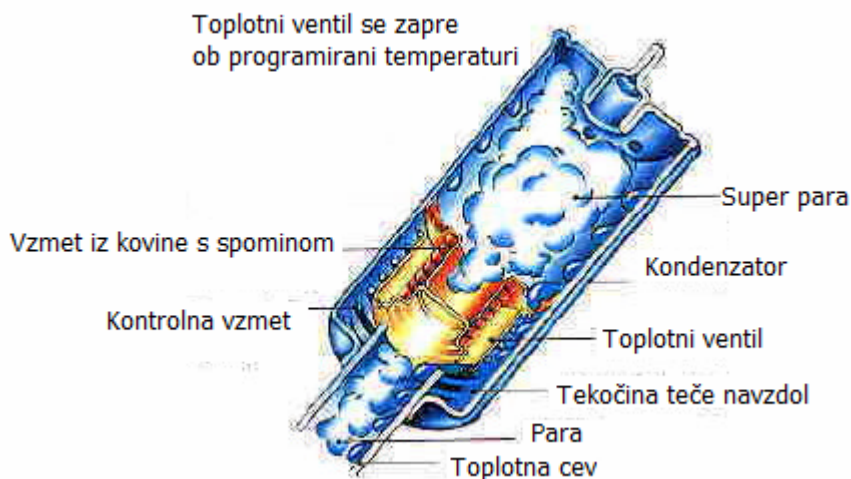
Temperatura pri 50 % učinkovitosti $T_{50\%} = 536^{\circ} \text{ F}$

3. TEHNIKE ZA OMEJEVANJE TEMPERATURE DELOVANJA TOPLOTNE CEVI

Sončno sevanje je pretrgano in se spreminja stohastično. Obremenitev termalne energije se tudi spreminja s časom. Zato se solarni kolektor sooča s potencialnim pregrevanjem, ko sta zvišanje temperature zaradi sončnega sevanja in obremenitev močno neskladni.

3.1 Kritična temperatura toplotne cevi

Ena tehnika za omejevanje maksimalne temperature delovanja cevi je izbor tekočine toplotne cevi s primernimi fizikalnimi lastnostmi in pravilno količino. Tako bo pri kritični temperaturi toplotna cev vsebovala le paro (nič tekočine), kar povzroči, da se mehanizmi prenosa toplote ustavijo. Druga omejitvena strategija je termo-dinamični ventil.



Slika 3a: Vzmet iz kovine s spominom je stisnjena z drugo vzmetjo. Vrat toplotne cevi je odprt in omogoča tok pare v kondenzator. Toplotna cev prenaša toploto v kondenzator.

3.2 Termodinamični ventil

V novo razviti cevi Memotron se maksimalna temperatura delovanja obvladuje s pomočjo kovine s spominom (termodinamičnim ventilom), ki je nameščena znotraj kondenzatorja v toplotni cevi. Ventil naravnava toplotni tok v toplotni cevi na najmanjšo raven, ko se temperatura delovanja kolektorja približa svoji meji.

Kovina je programirana, da pri prednastavljeni temperaturi spremeni svojo elastičnost. To omogoči, da tekočina kondenzatorja ostane v kondenzatorju. Ko je dosežena programirana temperatura, se vzmet iz kovine s spominom raztegne in

potisne čep proti vratu toplotne cevi in tako prepreči vrnitev kondenzirane tekočine in ustavi prenos toplote.

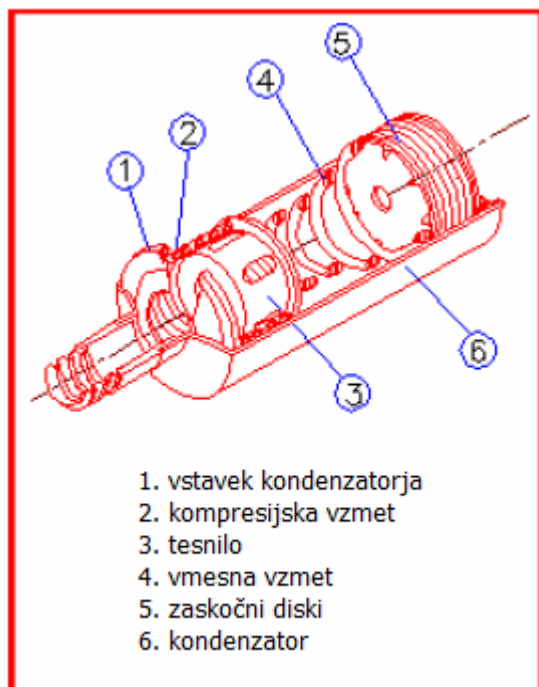


Figure 3b: *Vzmet iz kovine s spominom se je raztegnila in potisnila čep ter zaprla vrat toplotne cevi. Kondenzirana tekočina je ujeta v kondenzatorju. Tok pare in prenos toplote sta ustavljena.*

Pri temperaturah pod maksimalno programirano mejo se vzmet skrči in dovoli, da se kondenzirana tekočina vrne na nižje dele toplotne cevi. Potem izpari zaradi toplote absorpcijske plošče in prenese termično energijo v kondenzator. Patentirana cev Memotron uporablja najsodobnejšo tehnologijo in nudi popolno varnost prek učinkovitega nadzora temperature.

4. VISOKOVAKUUMSKE TEHNIKE TESNENJA

Glavno zanimanje za izpraznjene solarne kolektorje je, da vakuum (10 –5 torr) v bistvu eliminira prevodnostne in konvekcijske izgube. Vakuumska komora, ki je najboljša možna izolacija za solarne kolektorje, zatira toplotne izgube in tudi zaščiti absorpcijsko ploščo pred zunanjimi neugodnimi pogoji. To vodi k odličnemu delovanju, ki daleč prekaša vse ostale vrste solarnih kolektorjev. Zaradi atmosferskega pritiska in tehničnih problemov v povezavi z zatesnitvijo ohišja kolektorja je konstrukcija izpraznjenega ploščatega kolektorja izjemno zahtevna. Za

premagovanje ogromnega atmosferskega pritiska moramo vpeljati veliko notranje podpore za prosojno krovno steklo.

4.1 Mehanični proces izpraznitve

Masovna izdelava fluorescentnih žarnic je bila precedenčni primer za načrt solarnega cevne kolektorja. Gradnja izpraznjenega solarnega cevne kolektorja in vzdrževanje njegovega visokega vakuuma je, podobno kot pri žarnicah in televizijskih ceveh, uveljavljen produkcijski postopek. Za zmanjševanje toplotnih izgub prek interne plinaste atmosfere (konvekcijske izgube), mora idealna vakuumska izolacija izpraznjenega solarnega cevne kolektorja, pridobljena s pomočjo primerne procesa izpraznitve, vzdržati 25 in več let življenjske dobe naprave.

4.2 Kemični proces izpraznitve

Visoki vakuum (10^{-5} torr) se doseže s skrbno preprečitvijo vseh možnih odtekanj plina iz notranjih trdnih materialov v vakuumsko komoro. Toda praktične izkušnje kažejo, da vzdrževanje visoke ravni vakuuma v cevi skozi dolgo časovno obdobje predstavlja izziv. Ugotovljeno je bilo, da se številni izpraznjeni solarni kolektorji soočajo s problemom vakuumske degradacije zaradi slabih tesnilnih tehnik. Zato so visoko zanesljiva vakuumska tesnila za EHTP ključni kriteriji kvalitete, ker tesnila vzdržijo termično napetost in temperaturne šoke.

Za absorpcijo razplinjevanja materiala zaradi visoke temperature delovanja, se vakuum vzdržuje prek barijskega geterja vstavljenega v cev kolektorja. Dozo barija je treba izračunati glede na ciljni življenjski cikel sistema. Cevi Thermomax so načrtovane tako, da ohranijo svojo visokovakuumskost za obdobje 25-30 let pod normalnimi pogoji delovanja. Stagnacija sistema zmanjšuje pričakovano življenjsko dobo cevi.

5. TERMALNI IN MEHANIČNI AMORTIZER

EHTP uporablja tehniko tesnjenja steklo na kovino za doseganje hermetičnega visokovakuumskega tesnjenja. Steklo in zlitine so skrbno izbrani na osnovi koeficientov termičnega raztezanja. Ta skladnost termičnega raztezanja se izogne napetosti v tesnilu in vzdržuje integriteto tesnila. 23letna praksa izdelave je pokazala, da so patentirana tesnila steklo na kovino močna in vzdržljiva. Ta tesnila oblikujejo vezno plast, ki je elastična in tolerantna do premikov stekla med menjavanjem skrajnih temperatur.

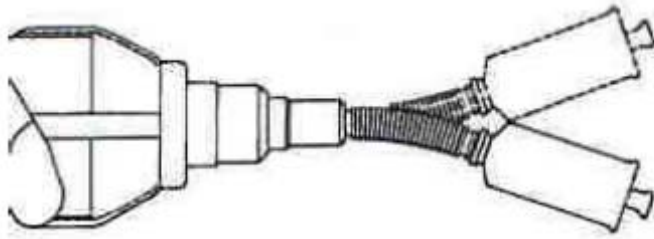


Figure 4: Patentiran sistem fleksibilnega vratu absorbira tako termalne kot mehanične šoke.

Fleksibilen vezni sistem iz nerjavečega jekla absorbira mehanične sile, ki jih povzročijo okvirne strukture zaradi temperaturnih razlik.

6. DELOVANJE IZPRAZNJENE TOPLLOTNE CEVI

Evropski in severnoameriški neodvisni preizkusni organi potrjujejo izvrstno delovanje kolektorjev EHTP. Testi švicarskega Technikum Rapperswill so dali naslednje enačbe toplotne učinkovitosti (Poročilo o testiranju št. 264, avgust 1997):

$$\eta = 0,84 - 2,02 (T_m - T_a)/G - 0,0046 [(T_m - T_a)/G]^2$$

Testi, ki jih je izvedel Florida Solar Energy Center iz ZDA

(Poročilo o testiranju FSEC Solar Collector št. 97005, maj 1998), so konsistentni s poročili o testiranju učinkovitosti Technikum

Rapperswill:

Linearna regresija:

$$\eta = 0,82 - 2,19 (T_m - T_a)/G$$

Regresija drugega reda:

$$\eta = 0,81 - 1,23 (T_m - T_a)/G - 0,0122 G [(T_m - T_a)/G]^2$$

kjer:

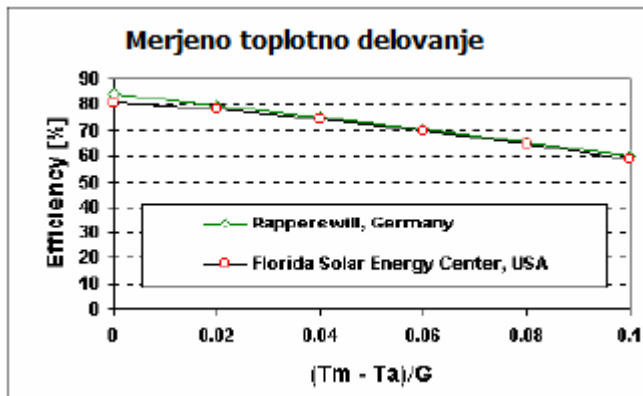
T_m = povprečna temperatura kolektorja, $(T_{\text{odtok}} + T_{\text{pritok}})/2$ [°C]

T_a = temperatura okoljskega zraka [°C]

G = Sončno sevanje [W/sq m]

Ti rezultati testa so prikazani v naslednjem grafu:

($G = 800$ W/sq m)



Slika 5: Rezultati testov nacionalnih in mednarodnih organov.

7. UPORABA KOLEKTORJEV Z IZPRAZNJENIMI TOPLOTNIMI CEVMI

Izpraznjeni solarni kolektorji so posebej oblikovani za celoletno delovanje v regijah z visoko vlažnostjo in regijah z mrzlimi zimami. So lahki in modularni in omogočajo integracijo v skoraj vse arhitekturne načrte. Visoka učinkovitost EHPT zmanjša površino kolektorjev v primerjavi z običajnimi ploščatimi. Ti kolektorji so oblikovani tako, da omogočajo fleksibilnost usmeritve cevi in so relativno neobčutljivi na kot postavitve (med 25 – 65 stopinj).



Slika 6: Fleksibilnost in nizka odpornost cevi Thermomax na veter ponujata edinstvene oblike. V zgornji instalaciji so uporabljene kot krilo.

Kolektorji EHPT prek toplotnega izmenjalnika prenesejo toploto v bakreno cev v zbiralniku. To prekine stik med kolektorjem in toplotno prevodno tekočino (voda, antifriz) in omogoča zbiralniku, da sprejme pritiske mestne vode. Zato je kolektor primeren za odprte zanke, zaprte zanke, odtekanje navzdol, odtekanje nazaj ali za sisteme ponovnega kroženja.



Figure 7: *Solarni sistem z izpraznjenimi toplotnimi cevmi v Pentagonu je največji solarni toplotni sistem te vrste v severni Ameriki z nominalno največjo toplotno močjo 75,6 kW.*

Izpraznjeni solarni kolektorji so edinstveni v tem, da so zelo učinkoviti pri visokih temperaturah, celo v neugodnih vremenskih razmerah. To pomeni, da bo vsak dan ne glede na temperaturo kolektorja v toplotno zalogo (rezervoarja sanitarne vode) dodana enaka količina termične energije.

Zato se lahko namesto velikih solarnih rezervoarjev za sanitarno vodo uporabi manjši rezervoar, ki je bil zasnovan za visoke temperature.



Slika 8: *Cevi Thermomax v Kennedy Space*

Station na Floridi oskrbijo 53.000 BTUH (200 + °F) za pogon sušilnih hladilnih enot.

Ker obstaja visoka korelacija med sončno energijo in hladilno obremenitvijo, so hladilni sistemi na sončno energijo zelo privlačni. Kolektorji EHPT neposredno

poganjajo absorpcijske hladilne stroje in sušilne klimatske naprave. Pozimi solarne klimatske naprave nudijo toplo vodo in ogrevanje prostora.



Slika 9: Sistem sončne termične energije z močjo 6,3 kW prikazan zgoraj v Sedoni v Arizoni je glavni vir ogrevanja prostora.

8. POVZETEK

Naprednim solarnim termičnim sistemom Thermomax je uspel pravi preboj v solarni termični tehnologiji. Nadaljujejo s tradicijo inovacij, ki so jo začeli pred petimi desetletji, ko je NASA izumila tehnologijo toplih cevi. Thermomax prinaša to izjemno tehnologijo na trg kot ekonomsko konkurenčno opcijo za sončno energijo. 23 uspešnih let solarnega ogrevanja vode je prineslo vključitev solarnih kolektorjev z izpraznjenimi toplotnimi cevmi (EHPT) v visokotemperaturno ogrevanje industrijskih procesov, napredne termične hladilne sisteme, ogrevanje stanovanjskih prostorov in domačih toplovodnih sistemov. Robotske izdelave kolektorjev z izpraznjenimi toplotnimi cevmi so podobne industriji žarnic izpolnjujejo sisteme kakovosti ISO 9001 in ISO

9002. Postopki izdelave kolektorjev z izpraznjenimi toplotnimi cevmi so popolnoma avtomatizirani in naravnani na masovno produkcijo. Temperaturo delovanja EHPT regulirajo fizikalne lastnosti tekočine v toplotni cevi in termodinamični ventil. Visokovakuumski ovoj (10 –5 torr) eliminira prevodnostne in konvekcijske izgube in ščiti absorpcijski nanos. Z zadnjim razvojem absorpcijskega nanosa iz titana, nitrida in oksida (TINOX) se lahko doseže temperature nad 450 ° F. Nanos TINOX nudi večjo absorpcijo in nižjo emisijo, kar ima za posledico izboljšano delovanje in vzdržljivost kolektorja.

Nadalje, zaradi vakuumskega ovoja vremenski vplivi, kot sta kondenzacija in vlaga, ne bodo povzročili zgodnjega kvarjenja notranjih materialov in učinkovitosti.