

MODELIRANJE MERODAVNIH TERMIČKIH I MEHANIČKIH POJAVA U HLADNJAKU FN PRETVARAČA KSZ

*Olivera Ećim, Marija Todorović**

Ključne reči: fotonaponsko pretvaranje, koncentrisano sunčevo zračenje, termodinamička analiza, dinamičko ponašanje, termičko - mehanički naponi

SAŽETAK:

Dat je koncept konstrukcionog rešenja hladnjaka prijelnika koncentrisanog eunčevog zračenja za široko područje vrednosti faktora koncentracije, za fotonaponsko pretvaranje. Apsorbovana toplota se prenosi na tok rashladnog fluida koji struji kroz kanale integrisane u zid hladnjaka i efikasno se odvodi obezbeđujući rad FN ćelija na optimalnoj temperaturi. U radu je analitički određena i parametarski analizirana termodinamička efikasnost datog sistema, uzimajući u obzir merodavne gubitke energije zračenja i toplote. S posebnom pažnjom je ispitana osetljivost modela od faktora koncentracije sunčevog zračenja. Uporedo sa opisom dinamičkog termičkog ponašanja je razvijen i model opisa termo - mehaničkih napona i naprezanja i sprovedena odgovarajuća analiza.

1. UVOD

U nedavno publikovanoj analizi stanja razvoja FN tehnologija, medju novijim sistemima za koncentrisano zračenje, koji tek treba da uđu u fokus većeg istraživačko razvojnog interesa, nalaze se FN ćelije sa visoko efikasnim tankim filmovima [7] kao što su ćelije na osnovi $CuInSe_2$. Pritom se za efikasno nanošenje filmova optimalnih FN osobina razvijaju posebni substrati materijala odgovarajućih osobina. Dalji uspeh razvoja novih FN sistema, posebno sa koncentracijom zračenja, ne zavisi samo od rezultata istraživanja optičkih i električnih pojava i struktura već i od dobrog uvida u

* Olivera Ećim, dipl. maš.ing,

dr Marija Todorović, dipl.maš.ing, redovni profesor,

Odeljenje za energetska efikasnost i obnovljive izvore energije Poljoprivrednog fakulteta u Beogradu, Nemanjina 6, 11080 Zemun.

mehaničke i termičke pojave karakteristične za elemente konstrukcija FN modula i sistema.

Fotonaponski efekat koncentrisanog sunčevog zračenja (KSZ) može da bude skoro dva puta veći od efekta fotonaponskog pretvaranja nekoncentrisanog zračenja ([1], [4], [7]). Pri radu sa koncentrisanim zračenjem neophodno je hlađenje FN ćelija. Za odvođenje toplote se koristi prenosni fluid. Pritom se unapređenjem ukupne efikasnosti procesa fotonaponskog pretvaranja koncentrisanog zračenja spontano dolazi do neophodnosti korišćenja i toplote hlađenja. Sistem postaje kombinovan - hibridni i njime se kogenerišu tj. proizvođe električna i toplotna snaga jednovremeno. Cilj razvoja ovakvog sistema je dalje povećanje efikasnosti proizvodnje električne snage i, uz efikasno hlađenje FN ćelija, odvođenje što veće toplotne snage. Prema tome, nosač FN ćelija treba da bude njihov efikasan hladnjak i u isto vreme visoko efikasan toplotni prijemnik.

2. RAZVOJ KONSTRUKCIJE HLADNJAKA FN - PRETVARAČA

Za razvoj fotonaponskih tehnologija KSZ može da bude od posebnog značaja koncept ([1], [4]) inovativnog prijemnika energije KSZ. Koncentrisano sunčevo zračenje usmereno refleksionom površinom koncentratora pada na površinu fotonaponskog prijemnika, malim delom se reflektuje, delom se fotonaponski pretvara u električnu snagu a delom termički apsorbuje i u obliku toplotnog protoka se prostire kroz podlogu - nosač fotonaponskih ćelija, odnosno kroz zid apsorbera hladnjaka koji čini integralni deo zida nosača FN ćelija. Sa površina apsorbera toplota prelazi konvekcijom na rashladni - prenosni fluid koji prostrujava i opstrujava apsorber. Šema fizičkog modela sistema FN pretvarača koncentrisanog sunčevog zračenja, uključujući i tanjirasti koncentratore, data je na slici 1, a šematski prikaz preseka hladnjaka sa apsorberom - nosačem fotonaponskih ćelija i tanjirastim koncentраторom je dat na slici 2. Poboljšanju vrednosti integralne efikasnosti sistema fotonaponskog i toplotnog pretvaranja posebno doprinose visoko reflektujuće površine unutrašnjih strana zida hladnjaka koje umanjuju spregu toplotnih gubitaka infracrvenim zračenjem, konvekcijom i kondukcijom.

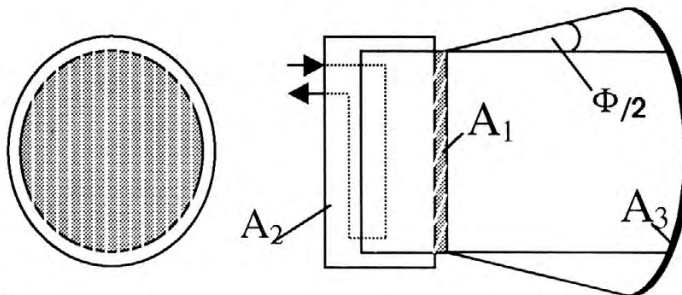
3. TERMODINAMIČKA ANALIZA

Temperatura FN pretvarača definiše se formalno kao temperatura spoja uređaja pri uslovima ispitivanja. Ona se može odrediti analitički ako je materijal FN ćelija homogen i poznat i ako se detaljno analiziraju i matematički opišu procesi energetskog pretvaranja i procesi prostiranja toplote. Međutim, analitičko određivanje merodavne temperature novijih uređaja sa novorazvijenim FN ćelijama izrazite nehomogenosti materijala, znatno je teže. Temperatura normalnih radnih uslova FN ćelija ili modula predstavlja temperaturu istih u režimu ustaljenog rada pri temperaturi okolnog vazduha od 20 C, intenzitetu sunčevog zračenja od 800 W/m² i

brzini vetra od 1 m/s. Najčešće se standardnom normalnom radnom temperaturom FN ćelija smatra temperatura od 25C, ali se dešava da u raznim klimatskim uslovima temperature budu i znatno više. Temperature FN ćelija više od 60C se ne smatraju radnim i hlađenjem je potrebno obezbediti da se iste ne dostignu. Koncentracija sunčevog zračenja, uz povećanje efikasnosti FN ćelija, donosi i određene probleme, pre svega u odnosu na serijsku otpornost koja je veoma osetljiva na kvalitet optike koncentratora odnosno uniformnost fluksa koncentrisanog zračenja.

Energetski bilans apsorbera hladnjaka FN ćelija. Površinu FN ćelija, koju smatramo da je jednaka nosećoj površini apsorbera odnosno samog hladnjaka, označimo sa A_1 i uvedimo sledeće pretpostavke: u unutrašnjem prostoru hladnjaka između zidova i apsorbera se nalazi fluid koji delimično apsorbuje infracrveno zračenje; sve površine su sive i izotemske; apsorber emituju i reflektuju zračenje u difuznom obliku; unutrašnje površine zidova prijemnika reflektuju zračenje spekularno a emisija njihovog zračenja se smatra dovoljno malom da se može zanemariti; upadno zračenje po jedinici površine je uniformno za svaku površinu. Toplotni protok zračenja E_1 koji napušta površinu A_1 sloja FN ćelija na apsorberu se sastoji od dve komponente: neposredne emisije zračenja i difuzno reflektovanog dela dozračenog energije $r_1 I_1$, pri čemu su oznakama ϵ_1 , T_1 , r_1 i H_1 , označene respektivno - koeficijent emisije, temperatura i koeficijent refleksije površine FN ćelija kao i specifičan protok zračenja koji pada na površinu FN ćelija.

$$E_1 = \epsilon_e \sigma T_1^4 + \rho_1 H_1, \quad H_1 = \rho_3 I_o (A_3/A_1) \quad (1)$$



Slika 1. Šema fizičkog modela sistema FN pretvarača KSZ: A1 - unutrašnje površine zidova hladnjaka nosača FN ćelija, A2 - ravan FN ćelija, A3 - refleksiona površina tanjirastog koncentratora

U isto vreme dozračeni protok energije H_1 na A_1 se sastoji takođe od dva dela: protoka dozračenog neposredno sa koncentratora zračenja P_{abs} i protoka odzračenog sa same površine A_1 posle refleksije sa A_2 koja je jednaka $\rho_2 A_1 E_1 F_{1 \rightarrow 2}$, pri čemu je ρ_2 koeficijent refleksije unutrašnje površine zida hladnjaka a $F_{1 \rightarrow 2}$ je faktor izgleda površine A_1 ka samoj sebi posle refleksije sa A_2 .

$$A_1 H_1 = \rho_2 A_1 E_1 F_{1 \rightarrow 2} + P_{abs} \quad (2)$$

Kako je površina A_2 spekularna i paralelna sa A_1 , sve zračenje koje napušta A_1 , a reflektovano je sa A_2 se vraća na A_1 , i zato je $F_{1(2) \rightarrow 1} = F_{1 \rightarrow 2}$. Jednačine (1) i (2) rešavanjem daju sistem:

$$A_1 E_1 = \frac{A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 + \rho_1 P_{abs}}{1 - \rho_1 \rho_2 F_{1 \rightarrow 2}}, \quad A_1 H_1 = \frac{A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \rho_2 F_{1 \rightarrow 2} + P_{abs}}{1 - \rho_1 \rho_2 F_{1 \rightarrow 2}} \quad (3)$$

Neto toplotni protok hlađenja FN ćelija, odnosno toplotna snaga koja se odvodi od površine A_1 označena je sa q_1 i predstavlja toplotu koju je primio hibridni sistem. Može se izraziti kao razlika emitovanog i apsorbovanog protoka zračenja kao što sledi:

$$q_1 A_1 = A_1 (\varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \rho_1 H_1) = A_1 (E_1 - H_1) = \frac{A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 (1 - \rho_2 F_{1 \rightarrow 2}) - \varepsilon_1 P_{abs}}{1 - \rho_1 \rho_2 F_{1 \rightarrow 2}} \quad (4)$$

Energetski bilans hladnjaka U skladu sa pretpostavkom da je unutrašnja površina zida hladnjaka ogledalasta - spekularna i da ne emituje zračenje i smatrajući da koncentrisano zračenje koje dolazi sa koncentratora ne mimoilazi ivice spoljne površine hladnjaka - nosača FN ćelija, energetski protok dozračen na površinu hladnjaka A_2 biće jednak protoku koji dolazi na površinu apsorbera hladnjaka A_1 $E_1 F_{1 \rightarrow 2}$, tako da sledi:

$$A_2 E_2 = \rho_2 A_1 E_1 F_{1 \rightarrow 2}, \quad A_2 H_2 = A_1 E_1 F_{1 \rightarrow 2}, \quad q_2 A_2 = -\rho_2 A_1 E_1 F_{1 \rightarrow 2} \quad (5)$$

Pored emisije toplote zračenjem, toplota prolazi kroz zid hladnjaka od prenosnog fluida na spoljašnji vazduh spregom prelaza i provođenja toplote kroz zidove hladnjaka. Od posebnog značaja je pritom prelaz toplote konvekcijom sa unutrašnje strane zida na prenosni fluid, jer se odgovarajući toplotni protok korisno odvodi. Prelaz toplote sa spoljne strane zida hladnjaka odnosno FN ćelija je najčešće u režimu prelaza toplote kombinovanom konvekcijom (sprega prirodne i vetra). Taj deo toplotnog protoka predstavlja neposredne toplotne gubitke koji umanjuju integralnu efikasnost energetskog pretvaranja.

4. ODREĐIVANJE TEMPERATURNOG POLJA

U nedavno publikovanoj analizi stanja razvoja FN tehnologija, medju novijim sistemima za koncentrisano zračenje, koji tek treba da uđu u fokus većeg istraživačko - razvojnog interesa, nalaze se FN ćelije sa visoko efikasnim tankim filmovima [7] kao što su ćelije na osnovi $CuInSe_2$. Pritom se za efikasno nanošenje filmova optimalnih FN osobina razvijaju posebni substrati materijala odgovarajućih osobina. Dalji uspeh razvoja novih FN sistema, posebno sa koncentracijom zračenja, ne zavisi samo od rezultata istraživanja optičkih i električnih pojava i struktura već i od dobrog uvida u mehaničke i termičke pojave karakteristične za elemente konstrukcija FN modula i sistema.

Predmet daljeg ispitivanja u radu je, stoga, prostiranje koncentrisanog sunčevog zračenja u disku o kružnoj ploči izrađenoj od delimično prozračnog materijala koji može da bude upotrebljen kao substrat FN filma odnosno nosač FN ćelija. Detaljna analiza prenosa i energetskog pretvaranja energije sunčevog zračenja i međudejstva dugotalasnog toplotnog zračenja i prenosa toplote kondukcijom i konvekcijom, je neophodna osnova za određivanje temperature nosača u dodiru sa slojem filma FN ćelija kao i termičkih naprezanja materijala posebno najopterećenijeg dela - zida nosača FN ćelija.

Deo zračenja neiskorišćenog fotonaponskim pretvaranjem materijal ploče propušta, deo se reflektuje a deo se apsorbuje u ploči. Apsorbovano zračenje se ispoljava povećanjem unutrašnje energije i temperature ploče. Zavisno od intenziteta zračenja, debljine ploče i uslova fluidne sredine s jedne i druge strane ploče (vrsta rashladnog fluida, njegova temperatura i uslovi integralnog prenosa propuštenog zračenja i toplote) u ploči se pojavljuju gradijenti temperature a kao njihova posledica i termički naponi.

Fizički model. Posmatramo cilindričnu ploču, izrađenu od silike, izloženu dejstvu sunčevog zračenja. S unutrašnje strane ploče struji prenosni fluid uz razmenu toplote konvekcijom sa unutrašnjom stranom zida prekrivke ($z=0$), dok se sa spoljašnje strane ploče ($z=L$) razmenjuje toplota prirodnom ili kombinovanom konvekcijom sa okolnim vazduhom. Početna temperatura ploče je u svim njenim tačkama ista. Protok koncentrisanog sunčevog zračenja je uniforman po površini ploče i ne varira u vremenu; materijal ploče je homogen i izotropan a sve mehaničke i termičko-fizičke osobine materijala su konstantne. Nestacionarno temperaturno polje u ploči je određeno Fourier-ovom parcijalnom diferencijalnom jednačinom provođenja toplote u cilindričnom koordinatnom sistemu:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\mu I_0 e^{-\mu z}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

gde je, α koeficijent temperaturne vodljivosti materijala, ρ gustina materijala, C_p specifična toplota materijala i λ koeficijent provodljivosti toplote materijala. Protok energije sunčevog zračenja apsorbovanog po jedinici površine ploče $q = \mu I_0 \exp(-\mu L)$, zavisi od sledećih veličina: koeficijent apsorpcije materijala μ i direktnog zračenja na površini ploče I_0 . Početni uslov, uslovi simetrije i granični uslovi određeni su sledećim jednačinama:

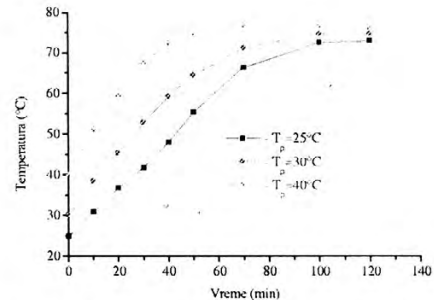
$$\begin{aligned} T(r, z, 0) = T_p, \quad \frac{\partial T}{\partial r}(0, z, t) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r}(r, 0, t) = q_{in} - \frac{h_{sp}}{\lambda} [T_o - T(r, 0, t)] \\ \frac{\partial T}{\partial r}(R, z, t) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r}(r, 0, t) = \frac{I_0 (A_3/A_1) - P_{fin} + q_{fin}}{\lambda} e^{-\mu L} - \frac{h_{un}}{\lambda} [T(r, L, t) - T_f] \end{aligned} \quad (7)$$

gde je: T_0 temperatura vazduha sa strane $z=L$, h_{sp} koeficijent prelaza toplote sa spoljašnje strane ploče ($z = 0$), T_p početna temperatura ploče, h_{un} koeficijent prelaza

toplote sa unutrašnje strane ploče ($z=L$) i T_f srednja temperatura rashladnog fluida za čije određivanje je potrebno dodati datom sistemu jednačinu bilansa toplotnog protoka koji rashladni fluid prima konvekcijom od površine zida sa kojom je u dodiru i toplotnog protoka koji se strujanjem istog fluida odvodi iz hladnjaka.

Primenom datog modela je ispitivano temperaturno polje nosača FN ćelija od silike u obliku cilindrične ploče prečnika 50 mm. Merodavne mehaničke i termofizičke osobine silike su usvojene prema [5]. Numeričkim simulacijama je praćeno temperaturno polje ploče debljine 1mm izložene dejstvu dela sunčevog zračenja propuštenog slojem FN filma u zavisnosti od vremena, i to za tri različite početne temperature, 25, 30, 40 C.

Na slici 2 su dati rezultati ispitivanja. Za proračun je usvojena vrednost intenziteta koncentrisanog direktnog sunčevog zračenja od 1300 W/m^2 . Temperatura spoljnog vazduha je smatrana stalnom i na nivou od 25°C . Vidi se da se ploča zagreva tokom vremena u uslovima stalnog intenziteta zračenja i da temperatura površine ploče posle određenog vremena dostiže temperature bliske maksimalnim dozvoljenim vrednostima za FN slojeve.



Slika 2. Promena temperature površine ploče nosača FN filma u zavisnosti od vremena

5. ZAKLJUČAK

Sa porastom intenziteta zračenja i faktora koncentracije temperatura ploče raste a uporedo raste i velicina napona. Zavisno od krutosti konstrukcije, širenje ploče će se zaustaviti u trenutku kada ploča dodirne okvir. Daljim povećanjem temperature, naponi u ploči će se povećavati do vrednosti maksimalnog dozvoljenog napona, kada se može javiti prskotina u materijalu. Ako je materijal krt, maksimalni dozvoljeni napon na zatezanje veci je od napona na pritisak i pod pretpostavkom da se temperatura raspoređuje simetrično oko centra, prskotina će se prvo javiti u središtu ploče. Elastični okvir dozvolice dalje neometano širenje ploče, s tim sto se u tom slučaju u razmatranje mora uključiti i zagrevanje okvira, nastalo prenosom toplote od strane ploče.

Promena intenziteta zračenja i posebno prekidnost začenja, dovode do izuzetno dinamičnih promena temperaturnog polja koje uslovljavaju pojavu termičkih napona i stresova u materijalima konstrukcija FN pretvarača. Stoga, ispitivanje temperaturnog polja u elementima datih struktura predstavlja važan deo prilaza određivanju i analizi termičkih napona. Dalja ispitivanja naponskih stanja izazvanih prelaznim režimima kao i trajnim zagrevanjem materijala nosača FN ćelija kao i

spregnutih elemenata strukture modula odnosno sistema FN pretvarača koncentrisanog zračenja, u celini treba nastaviti sa znatno većom pažnjom jer rezultati mogu da budu ključ daljeg razvoja efikasnih, pouzdan i trajnih, i u isto vreme po ceni prihvatljivih, sistema.

LITERATURA

- [1] M.S. Todorović, S. Mentus, O. Ećim, Lj. Simić, F. Kosi, G. Koldžić: Cogeneration and Hybridization with Concentrated Solar Radiation for Decentralized Energy Supply , *The European Congress on Renewable Energy Implementation*, Atina, 1997.
- [2] M.Todorović, O. Ećim, R. Milenković: Numeričko modeliranje merodavnih termičkih i mehaničkih pojava u prijemniku energije koncentrisanog sunčevog zračenja , *Poljoprivredna tehnika*, vol. 21-2, 1997, pp. 33-46.
- [3] A. Elbella, Y. B. Safdari, A. Nadgauda: Analysis of Failure in a Partialy Solar Radiation Absorbing Medium Due to Thermal Stresses , *Solar Engineering*, vol.2, 1992, str. 1101-1105.
- [4] O. Ećim, M. Todorović: Uticaj faktora koncentracije sunčevog zračenja na efikasnost toplotnog pretvarawa i proizvodwu električne energije , *Međunarodni kongres KGH*, Zbornik radova, Beograd, 1996. pp. 74-85.
- [5] O. Ećim, M. Todorović: Analiza temperaturnog poqa u polu-prozračnom materijalu pri dejstvu sunčevog zračenja - prilaz određivanju termičkih napona , *Međunarodni naučno-stručni skup Vazduhoplovstvo 97*, Zbornik radova, Beograd, 1997, pp B-39 - B-45.
- [6] A. Steinfeld, A. Imhof, E.A. Fletcher: High Temperature Solar Receivers With Internal Infrared Mirrors , *6th Inter. Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Spain, 25 Sep - 2 Oct 1992, pp 501-510.
- [7] L.L.Kazmerski: Photovoltaics: A Review of Cell and Module Technologies , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 1, no.1/2, 1997, pp. 71-170.

MODELLING OF RELEVANT THERMODYNAMIC AND MECHANICAL PHENOMENA IN CONCENTRATED SOLAR RADIATION PV DEVICE

ABSTRACT:

For photovoltaic conversion of concentrated solar radiation is presented an innovative cooler. Its conceptual design and intrinsic thermal phenomena have been described. A part of solar radiation absorbed as a heat is efficiently conducted through the PV cells supporting wall and transferred to the adjacent cooling liquid as well as to the additional metal highly heat - conductivity cooler body with its integrated liquid passages immersed directly inside the circulating stream of liquid. This results in further increase of the heat removal efficiency. Thermal and thermal-mechanical analysis is performed and relevant mathematical models have been presented.