

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2495

**SUSTAVI UPRAVLJANJA
FOTONAPONSKIM AGREGATOM S
MOGUĆNOŠĆU AKTIVNOG HLAĐENJA
PANELA**

Vlatko Kvesić

Zagreb, lipanj 2012.

Sadržaj

1.Uvod	1
2. Komponente fotonaponsko-toplinskog sustava	2
2.1 Fotonaponsko-toplinski panel	3
2.2 Pumpa	4
2.3 Utjecaj temperature na karakteristike fotnaponskog panela	5
3. Izračun ukupne ozračenosti panela	7
4. Matematički model fotonaponsko-toplinskog sustava	9
4.1 <i>Toplinski kapacitet modula</i>	9
4.2 <i>Snaga kratko valne radijacije</i>	10
4.3 <i>Snaga dugovalne radijacije</i>	11
4.4 <i>Snaga prijenosa topline konvekcijom</i>	12
4.5 <i>Dobivena električna snaga panela</i>	13
4.6 <i>Odvedena toplinska snaga preko fluida</i>	13
4.7 <i>Konačni oblik dinamičkog modela kolektora</i>	15
5.Rezultati simulacije prije optimizacije	16
6.Rezulati simulacije nakon optimizacije	20
7.Zaključak	24
Literatura	26
Sažetak	27

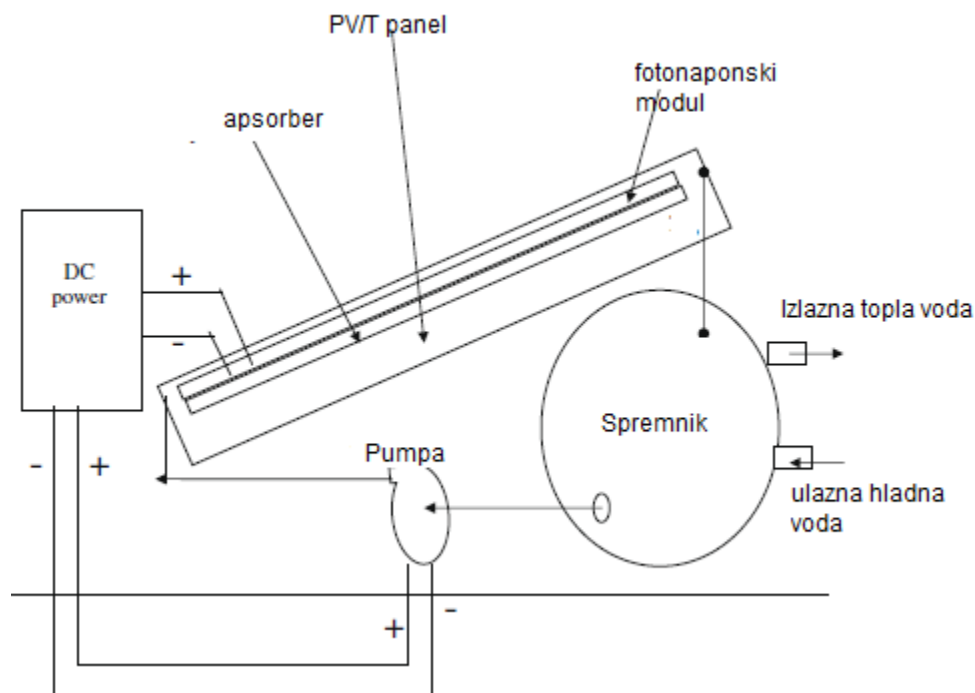
1.Uvod

U ovom radu dana je analiza hibridnih solarnih sustava, koji se sastoje od fotonaponskih modula i toplinskih kolektora (hibridni PV/T sustavi). Kada se solarna ćelija osvijetli, odnosno kada apsorbira sunčevu dozračenost, fotonaponskim se efektom na njezinim krajevima pojavljuje elektromotorna sila koja spojena na trošilo daje struju te tako solarna ćelija postaje izvorom električne energije. No ipak, tek mali dio energije sunčeve dozračenosti se pretvara u električnu energiju dok se većina pretvara u toplinsku energiju predanu panelu uslijed čega dolazi do povećanja temperature modula. Povećanjem temperature pada električne efikasnosti oko 0.5%/K. Novija istraživanja su ustvrdila, da s odgovarajućim masenim protokom fluida s niskom ulaznom temperaturom, uspijeva se ostvariti zadovoljavajuće poboljšanje električne efikasnosti. Višak toplinske energije odstranjen fluidom može se koristiti za pripremu potrošne tople vode kućanstva ili kao topla voda u bazenima čime se povećava ukupna efikasnost sustava. Povećanjem protoka fluida potrebna je veća snaga auktora (tj. pumpe) što smanjuje netto električnu efikasnost sustava. U ovom radu opisana je metoda upravljanja snagom pumpe, odnosno protokom fluida, s ciljem povećanja efikasnosti fotonaponskog sustava. Ciljevi promatranja u radu su:

- 1) Komponente samog fotonaponsko-toplinskog panela
- 2) Energetska bilanca na fotonaponsko-toplinskom panelu
- 3) Optimizacija sustava

2. Komponente fotonaponsko-toplinskih sustava

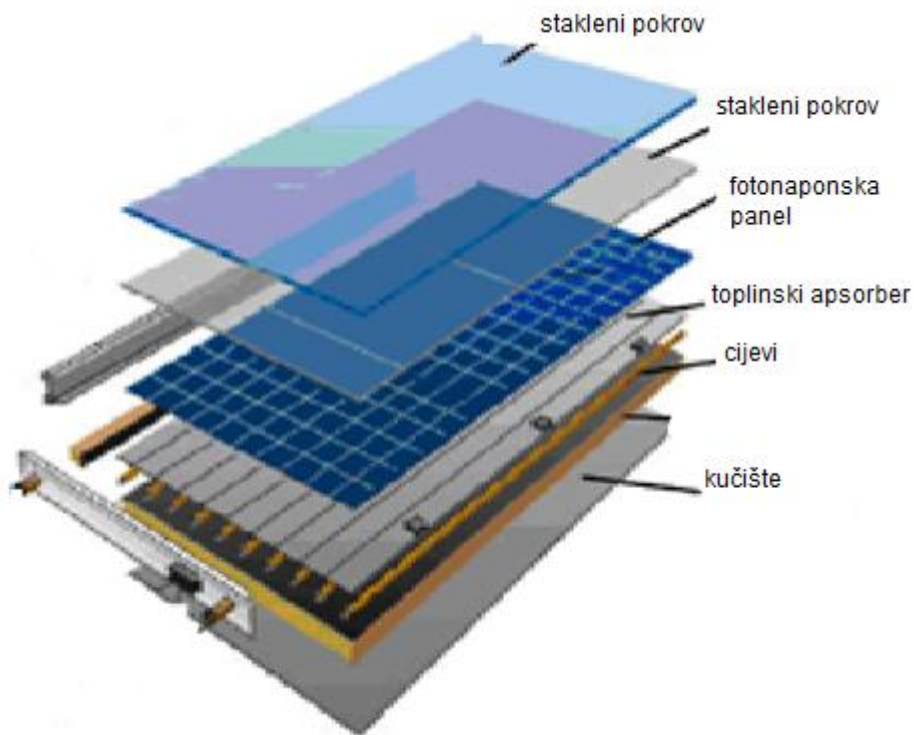
Fotonaponski toplinski sustavi sastoje se od fotonaponsko-toplinskog panela koji je u našem slučaju površine 24.895m^2 , toplinskog spremnika te cirkulacijske pumpe. Na fotonaponskom panelu dolazi do pretvorbe energije sunčeve dozačenosti u električnu energiju. Toplinski dio sustava čini apsorberska ploča koja ima za ulogu prijenos dobivene toplinske energije s panela na fluid. U spremniku topline dolazi do izmjene topline, gdje se pri vrhu spremnika odvodi dobivena topla voda, dok se na dnu spremnika dovodi hladna voda. Hladna voda se preko cirkulacijske pumpe šalje zadanim masenim protok kroz pozadinu panela.



Slika 2.1 Shema fotonaponsko-toplinskog sustava s vodom kao rashladnim medijem

2.1. Fotonaponsko-toplinski panel

Fotonaponsko-toplinski sustavi napravljeni su tako da se jednostavno fotonaponske solarne ćelije nadodaju direktno iznad solarnog apsorbera. Fotonaponski-toplinski sustav čine iduće komponente:



Slika 2.2 Komponente fotonaponski-toplinskog sustava^[5]

- 1) Stakleni pokrov koji propušta svjetlost do apsorbera da stvori efekt staklenika. On se sastoji od jedne ili više ploča
- 2) Fotonaponske ćelije koje pretvaraju energiju sunčeve dozračenosti u istosmjernu električnu energiju
- 3) Apsorberska ploča koja ima za ulogu prijenos topline sa kolektora na fluid koji prolazi cijevima
- 4) Kućište koje osigurava cjelovitost sustava
- 5) Toplinski izolator koji ograničava gubitke topline zbog kondukcije sa zidom

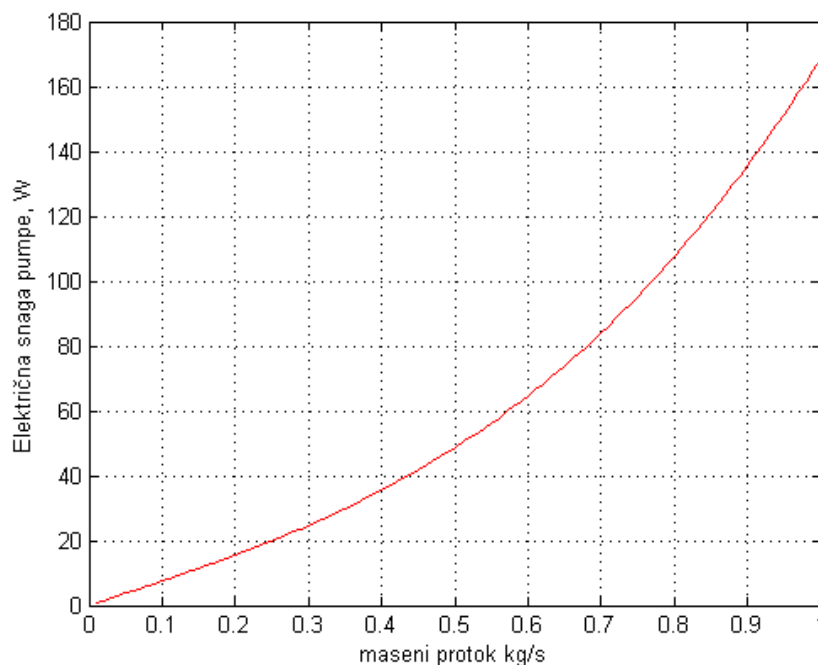
2.2. Pumpa

Pumpa je dio fotonaponsko-toplinsko sustava koja ima za ulogu održavanje željenog protoka kroz pozadinu panela, čime se ostvaruje odvođenje dobivene toplinske energije panela te samim time i hlađenje istog. Za održavanje željenog protoka potrebna električna snaga pumpe dana je izrazom:

$$P_{pumpe} = \frac{K\dot{m}^3}{2A_c^2\rho^2\eta} \quad (2.1)$$

gdje je K ukupni koeficijent gubitaka i sastoji se od gubitaka uzrokovanim otporom cijevi, koljena i ventila sustava te viskoznosti fluida, \dot{m} maseni protok, ρ gustoća fluida, A_c površina poprečnog presjeka cijevi, η učinkovitost pumpe.

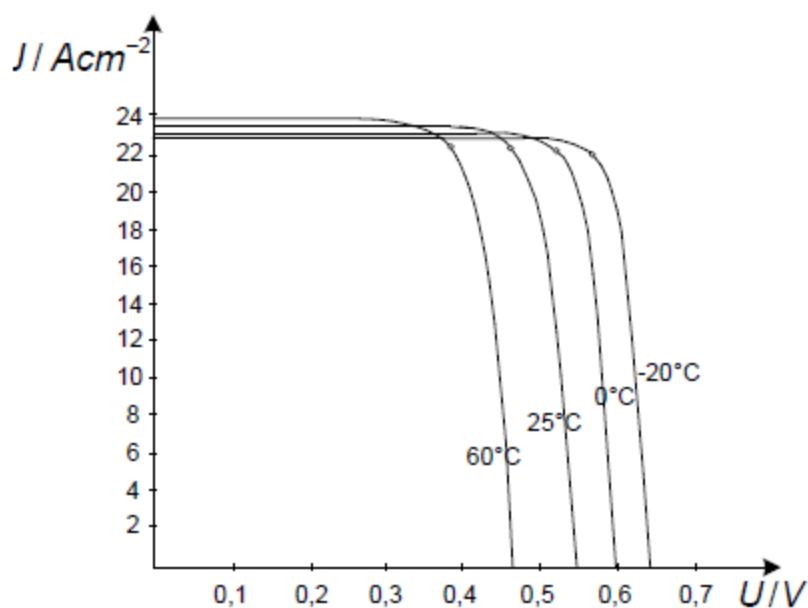
Iz izraza 2.1 vidljivo je da je jedina promjenjiva varijabla maseni protok fluida dok su svi ostali parametri konstantni i ovise o fizikalnim karakteristikama sustava i fluida. Potrebna električna snaga za rad pumpe je zapravo izrazito nelinearna funkcija koja kubno raste s povećanjem masenog protoka što je prikazano na slici 2.3.



Slika 2.3 Ovisnost potrebne električne snage pumpe o masenom protoku fluida

2.3 Utjecaj temperature na karakteristike fotonaponskog panela

Promjenom temperature mijenjaju se i karakteristike fotonaponske ćelije. Za proračun karakteristike ćelije posebno je bitno poznavati kako temperatura utječe na sljedeće parametre: struja kratkog spoja I_{ks} , struja ćelije I , napon otvorenog kruga U_{ok} , maksimalnu snagu P_m i djelotvornost ćelije η . Uobičajeno je da efikasnost opada oko 0.5% za porast temperature panela od 1 °C. Razlog tome je što s povećanjem temperature smanjuje se širina zabranjenog pojasa što uzrokuje malo povećanje struje zasićenja, ali zbog povećanja temperature raste i kinetička energija molekula što utječe da se električno polje p-n spoja smanjuje. Smanjenje električnog polja uzrokuje da se elektroni i šupljine brže rekombiniraju, što u konačnici predstavlja smanjenje napona otvorenog kruga



Slika 2.4 Ovisnost napona i struje s porastom temperature^[4]

Opadanje vrijednosti napona otvorenog kruga više je izraženo od porasta struje kratkog spoja, što rezultira i ukupnim opadanjem snage te djelotvornosti sunčane ćelije što je prikazano slikom 2.4.

Promjena temperature uglavnom utječe na iznos napona otvorenog kruga, dok je promjena fotostruje gotovo zanemariva. Reverzna struja zasićenja I_{ks} ovisi o temperaturi i može se zapisati kao^[4]:

$$I_{ks} = AT^3 \exp\left(-\frac{qU_{ok} - E_g}{kT}\right) \quad (2.2)$$

gdje je A površina kolektora, T temperatura kolektora, q-elementarni naboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C), U_{ok} -napon otvorenog kruga, E_g -širina zabranjenog pojasa (eV), k-boltzmanova konstanta ($1,3806 \cdot 10^{-23}$ J/K)

Deriviranjem gore navedene jednadžbe po temperaturi i zanemarimo li promjenu struje kratkog spoja s temperaturom, dobivam^[4]:

$$\frac{dU_{ok}}{dT} = \frac{eU_{ok} - E_g}{eT} - \frac{3k}{e} \quad (2.3)$$

Uvrštavanjem standardnih vrijednosti za širinu zabranjenog pojasa poluvodičkog materijala koji se koristi za izradu fotonaponskih ćelija kao i vrijednosti napona otvorenog kruga na sobnoj temperaturi u izraz 2.3, uočava se da napon otvorenog kruga opada s porastom temperature:

Tablica 2.1 Ovisnost promjene napona o temperaturi^[4]

	E_g [eV]	U_{ok} [V], T=273 K	dU_{ok}/dT [mV/K]
Si	1,12	0.65	-1,98
Si	1,12	0.55	-2,35
GaAs	1,4	1.05	-1,54
GaAs	1,4	0.85	-2,27

3. Izračun ukupne ozračenosti panela

Električna snaga fotonaponskog panela u najvećoj mjeri je određena upadnom sunčevom dozračenosti. Sunčeva dozračenost na nagnutu plohu može se izraziti kao suma triju komponenti^[1]:

$$I_{tt} = I_{b,T} + I_{d,T} + I_{r,T} \quad (3.1)$$

gdje je $I_{b,T}$ direktna Sunčeva dozračenost na nagnutu plohu, $I_{d,T}$ difuzna sunčeva dozračenost na nagnutu plohu, $I_{r,T}$ reflektirana sunčeva dozračenost na nagnutu plohu. Svaka od pojedinih komponenti sunčeve dozračenosti na nagnutu plohu računa se prema sljedećim izrazima^[1]:

$$I_{b,T} = I_b \cos \theta \quad (3.2)$$

$$I_{d,T} = I_d \cos^2 \frac{\beta}{2} \left[1 + F \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] \left[1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z \right] \quad (3.3)$$

$$I_{r,T} = \rho (I_b \cos \theta_z + I_d) \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (3.4)$$

gdje je I_b direktna (normalna) sunčeva dozračenost, I_d difuzna horizontalna sunčeva dozračenost, β nagnutost kolektora u odnosu na horizontalnu plohu, ρ albedo tla, F modulacijski faktor, θ kut između smjera Sunca i normale nagnute plohe, θ_z zenitni kut Sunca.

Vrijedi da je^[1]:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3.5)$$

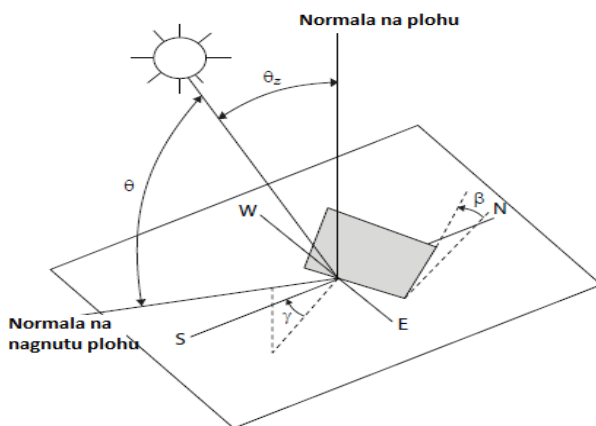
gdje je γ_s azimutni kut Sunca, γ azimutni kut nagnute plohe.

Modulacijski faktor izračunava se iz jednadžbe^[1]:

$$F = 1 - \frac{I_d}{I_t} \quad (3.6)$$

gdje je I_t ukupna sunčeva dozračenost na horizontalnu plohu te se računa prema izrazu^[1].

$$I_t = I_b \cos \theta_z + I_d \quad (3.7)$$



Slika 4.1 Zenitni kut θ_z , kut između smjera Sunca i normale nagnute plohe θ , kut nagiba plohe β , azimutni kut na nagnutu plohu γ ^[7]

4. Matematički model fotonaponsko-toplinskog sustava

Kao što je opisano u poglavlju 2.3 jedan od faktora koji utječu na rad fotonaponskog panela je temperatura. Sunčeva dozračenost se većim djelom apsorbira u tijelo modula. Dio te energije pretvori se u električnu energiju i preda trošilu, dok se dio pretvara u unutrašnju energiju materijala od kojeg je napravljen panel te dolazi do povišenja temperature. Ta se toplina odvodi s fluidom koji cirkulira kroz cijevi u apsorberu. Proces razmjene toplini koji se pri tome javljaju su konvekcija, kondukcija, radijacija.

Uzimajući sve te parametre u obzir dobivamo jednadžbu promjene temperature modula:

$$C_{modula} \frac{dT_{modula}}{dt} = q_{lw} + q_{sw} + q_{conv} - P_{out} - Q_t \quad (5.1.)$$

gdje je C_{modula} toplinski kapacitet modula, T_{modula} temperatura modula, q_{lw} snaga dugovalne radijacije, q_{sw} snaga kratkovalne radijacije, q_{conv} snaga odvođenja topline konvekcijom, P_{out} dobivena električna snaga panela, Q_t odvedena toplinska snaga preko fluida.

Za točan proračun potrebno je poznati svaku od navedenih komponenti jednadžbe što će biti opisano u nastavku.

4.1 Toplinski kapacitet modula

Kako bi se mogao odrediti toplinski kapacitet modula potrebno je poznavati građu samog panela. U našem slučaju, kao što je navedeno u prvom poglavlju, panel se sastoji od tri sloja: staklenog pokrova, monokristalnih silicijskih fotonaponskih ćelija te apsorpcijskog pokrova. Pretpostavlja se da je temperatura modula uniformna kroz sva tri sloja. Svaki pojedinačni sloj ima svoj vlastit toplinski

kapacitet te toplinski kapacitet modula definiran je kao suma svih pojedinačnih slojeva te on ovisi o vrsti materijala pojedinog sloja te debljini soja^[2]:

$$C_{modula} = \sum_{k=1}^m A d_k \rho_k C_k \quad (5.2)$$

gdje je A površina panela, d_k debljina pojedinog sloja, ρ_k gustoća pojedinog sloja, C_k toplinski kapacitet pojedinog sloja.

Za naš slučaj karakteristike svakog pojedinog sloja dane su tablici 1. Površina panela je 24.895 m².

Tablica 5.1.1. Karakteristike komponenti modula^[2]

Sloj modula	ρ_k (kg/m ³)	C_k (J/kgK)	d_k (m)	$A \cdot d_k \cdot \rho_k \cdot C_k$ (J/K)
Monokristalne silicijske ćelije	2330	677	0.0003	11 780.89
Apsorpcijski sloj	1200	1250	0.0005	18 637.5
Stakleni pokrov	3000	500	0.003	112 027.5
Ukupno				142.45 kJ/K

4.2 Snaga kratko valne radijacije

Efektivna snaga kratkovalne radijacija koja dolazi na prednju stranu fotonaponsko-toplinskog panela je funkcija intenziteta direktne i difuzne komponente ozračenosti panela te apsorpcijskog faktora panela. S toga dana je relacijom^[2]:

$$q_{sw} = I_{tt} A \alpha \quad (5.3)$$

gdje je α -apsorpcijski faktor panela, I_{tt} -ukupna dozračenost na panel

Apsorpcijski koeficijent je funkcija položaja i konfiguracije fotonaponskog panela te apsorpcijskih i refleksijskih svojstava konstrukcije panela, staklenog pokrova itd.

Za silicij teorijski apsorpcijski faktor je 77%. U praksi koeficijent se mijena u rasponu od 20-30% ovisno o položaju sunca ako je panel nepomičan.

4.3 Snaga dugovalne radijacije

Snaga dugovalne radijacije dana je Stefan-boltzmanovim zakonom.

Pretpostavlja se da je temperatura stražnje strane panela približno jednaka temperaturi zgrade na kojoj se nalazi panel, te uzimajući to u obzir može se zanemariti komponenta dugovalne radijacije na stražnjoj strani panela. Zbog toga potrebno je promatrati samo komponentu snage dugovalne radijacije na prednjoj strani panela. To je funkcija ovisna o temperaturi neba, emisijskog faktora te nagiba panela. Te opisana je izrazom^[2]:

$$q_{lw} = A\sigma(\cos^2(\frac{\beta}{2})\epsilon_{sky}T_{sky}^4 - \epsilon_{modula}T_{modula}^4) \quad (5.4)$$

gdje je ϵ_{sky} emisijski faktor neba, ϵ_{modul} emisijski faktor panela, T_{sky} temperatura neba, β nagib panela, σ štefan-boltzmanova konstanta ($5.6705 \cdot 10^{-8}$

W/m²K⁴).

Za emisijski faktor modula uzimam vrijednost 0.9. Za vedro nebo, emisijski koeficijent neba iznosi 0.95 a temperatura neba dana je izrazom^[2]:

$$T_{sky} = T_{ambient} - 20 \quad (5.5)$$

gdje je $T_{ambient}$ temperatura okolnog zraka. Kada je naoblaka, emisijski faktor neba je jedan, a temperatura neba jednaka je temperaturi okolnog zraka^[2].

$$T_{sky} = T_{ambient} \quad (5.6)$$

4.4 Snaga prijenosa topline konvekcijom

Snaga prijenosa topline konvekcijom definirana je Newtonovim zakonom hlađenja između prednje strane panela sa okolnim zrakom^[2]:

$$q_{conv} = -h_c A (T_{modula} - T_{ambienta}) \quad (5.7)$$

gdje je h_c faktor prijenosa topline te on je kombinacija prirodne i prisilne konvekcije. Pri čemu kada nema vjetra možemo zanemariti faktor prisilne konvekcije.

Koeficijent prirodne konvekcije između okolnog zraka i modula definiran je raznim aproksimacijama jedna od njih dana je izrazom^[2]:

$$h_{c,free} = 1.31 \sqrt[3]{T_{modula} - T_{ambienta}} \quad (5.8)$$

Prirodna konvekcija je dominantna najčešće na stražnjoj strani fotonaponskog panela koja je zaštićena od utjecaja vjetra, ali također i na prednjoj strani kada nema vjetra. Faktor prisilne konvekcije je funkcije brzine vjetra i dosta je teško opisati je analitički. Postoje razne verzije koje opisuju faktor prisilne konvekcije jedna od njih je^[2]:

$$h_{c,forced} = 5.67 + 3.86v \quad (5.9)$$

gdje je v brzina vjetra.

Za vrijeme prosječnog dana prijenos topline konvekcijom je zbroj prisilne i prirodne konvekcije te je dana izrazom^[2]:

$$q_{conv} = -A(h_{c,free} + h_{c,forced})(T_{modula} - T_{ambienta}) \quad (5.10)$$

4.5 *Dobivena električna energija panela*

Električna snaga dobivena na panelu je funkcija ukupne dozračenosti panela te temperature panela. Pri čemu električna snaga panela raste s dozračenosti, a opada s porastom temperature kako je opisano u prethodnim poglavljima. Električna snaga dobivena na panelu je izračunata iz već poznate tablice koja pokazuje vrijednost dobivene električne snage panela pri određenoj dozračenosti i temperaturi panela. Tablica je dana u programskom rješenju rada u obliku matrice. Dimenzije matrice su 1501x101, gdje vektor redaka predstavlja ukupnu dozračenost na nagnutu plohu u rasponu od 1 do 1501 W/m², dok vektor stupaca predstavlja temperaturu modula u rasponu od -30 do 70 °C.

4.6 *Odvedena toplinska snaga preko fluida*

Odvedenu toplinsku snagu preko fluida možemo definirati kao i kod standardnih solarnih kolektora bez fotonaponskog pokrova. Jedina razlika je što je transmisijsko-apsorpcijski produkt manji. Vrijednosti transmisijsko-apsorpcijskog produkta kod standardnih solarnih kolektora bez fotonaponskog pokrova su između 0.7 do 0.75 za prozorsko staklo te od 0.85 do 0.9 za specijalizirane staklene pokrove^[8], dok je kod hibridnih sustava ta vrijednost dosta manji i iznosi oko 0.53^[6]. Razlog tome je što se dio sunčeve dozračenosti apsorbira već na samom fotonaponskom pokrovu. Transmisijsko-apsorpcijski produkt je umnožak apsorpcijskog faktora i transmisijskog faktora. Apsorpcijski faktor je definiran kao sposobnost tijela da apsorbira sunčevu dozračenost, dok transmisijski faktor kao količina sunčeve dozračenosti koja prođe kroz tijelo panela^[8].

Sustav ima ispod apsorbera cijevi kroz koji struji hladna voda i odvodi toplinsku energiju s panela, što uzrokuje smanjenje temperature panela, a samim time i veću efikasnost dobivene električne energije panela. Istovremeno se dobiva toplinska energija koja se može koristiti za pripremu potrošne tople vode u kućanstvu, što uvelike povećava efikasnost sustava u cjelini.

Toplinska snaga koja se odvede s panela je prema Hottel-Willierovoj jednadžbi jednaka^[6]:

$$Q_u = A[I_{tt}(\alpha\tau) - U_L(T_{modula} - T_{ambienta})] \quad (5.11)$$

gdje je U_L ukupni faktor toplinskih gubitaka, $\alpha\tau$ apsorpcijsko transmisijski produkt. Temperaturu modula teško izračunavati u svakom trenutku te zbog toga radi se preformulacije gore navedene jednadžbe u oblik^[6]:

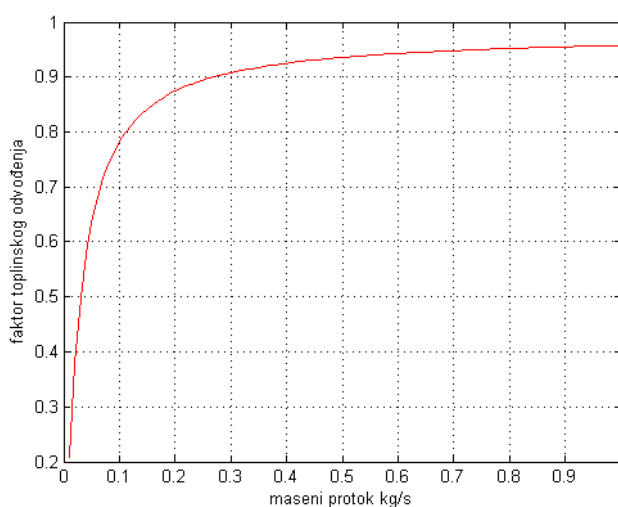
$$Q_u = AF_R[I_{tt}(\alpha\tau) - U_L(T_{ul} - T_{ambient})] \quad (5.12)$$

gdje je F_R faktor toplinskog odvođenja, T_{ul} ulazna temperatura fluida u kolektor. Faktor toplinskog odvođenja definira je kao^[6]:

$$F_R = \frac{\dot{m}c}{U_L A} \left[1 - e^{-\frac{U_L F' A}{\dot{m}c}} \right] \quad (5.13)$$

gdje je \dot{m} maseni protok fluida kroz kolektor, c -specifični toplinski kapacitet vode, F' geometrijski faktor ovisan o konstrukciji panela, promjeru cijevi te razmaku između cijevi.

Iz jednadžbe 5.13 možemo vidjeti kako je faktor toplinskog odvođenja izrazito nelinearna funkcija. Sve varijable osim masenog protoka su konstantne te su ovisne o konstrukciji samog sustava i fizikalnim karakteristikama fluida. Na slici 5.6. prikazana je ovisnost faktora toplinskog odvođenja o masenom protoku fluida.



Slika 5.6. Ovisnost faktora toplinskog odvođenja o masenom protoku fluida

Iz slike 5.6. možemo uočiti da se iznos faktor toplinskog odvođenja naglo povećava do protoka od 0.3kg/s nakon čega on jako sporo mijenja svoju vrijednost s promjenom protoka. Samim time odvođenje topline se jako slabo mijenja s povećanjem protoka. Prema jednadžbi 2.1 potrebna električna snaga pumpe se kubno povećava s povećanjem protoka pri čemu možemo zaključiti da pri velikim protocima opada efikasnost cjelokupnog sustava.

4.7 Konačni oblik dinamičkog modela kolektora

Uvrštavanjem svih komponenti prijenosa topline koje su opisane i prethodnim poglavljima u jednadžbu (2.1) dobivamo:

$$C_{modula} \frac{dT_{modula}}{dt} = I_{tt}(t)A\alpha + A\sigma \left(\cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \epsilon_{sky} T_{sky}^4 - \epsilon_{modula} T_{modula}^4 \right) - A(h_{c,free} + h_{c,forced})(T_{modula} - T_{ambienta}) - P_{out} - A \frac{\dot{m}c}{U_{LA}} \left[1 - e^{-\frac{U_{LF}A}{\dot{m}c}} \right] [I_{tt}(\alpha\tau) - U_{L}(T_{ul} - T_{ambient})] \quad (5.14)$$

Iz dobivene jednadžbe vidimo kako je temperatura panela funkcija ovisna o meteorološkim podacima (ukupne dozračenosti panela, brzini vjetera, temperatura okolnog zrak), konstrukciji panela, nagnutost panela, ulaznoj temperaturi u panel te o masenom protoku. Iz svih tih parametara jedina varijabla pogodna za upravljanja sustavom opisanim izrazom 5.14 je maseni protok fluida. Upravljanje masenim protokom je moguće ostvariti preko uložene snage u pumpu opisano izrazom 2.1.

Sada na osnovi gore navedene jednadžbe možemo pokrenuti simulacija rada ne optimiziranog sustava.

6. Rezultati simulacije prije optimiranja rada sustava

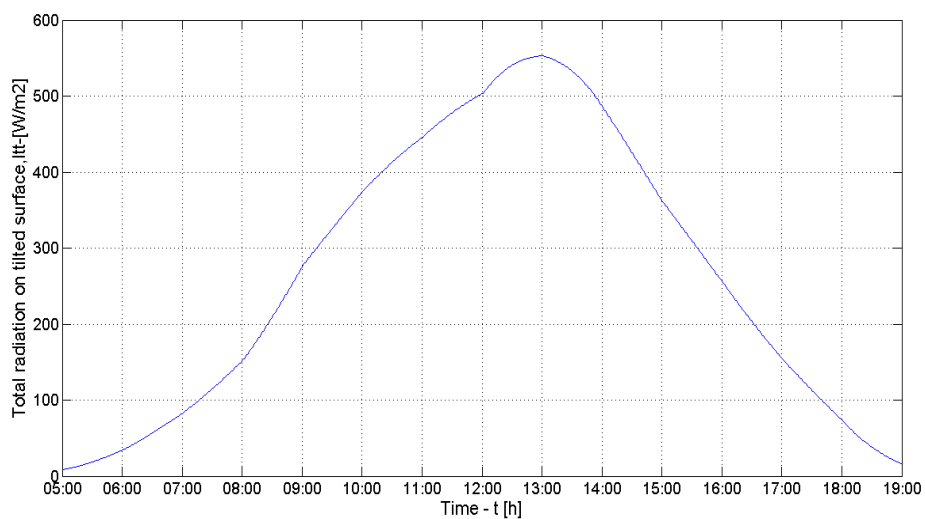
Prije nego prikazemo rezultate simulacije prvo je potrebno definirati sve parametre korištene u sustavu:

Tablica 4. Parametri fotonaponsko toplinskog sustava

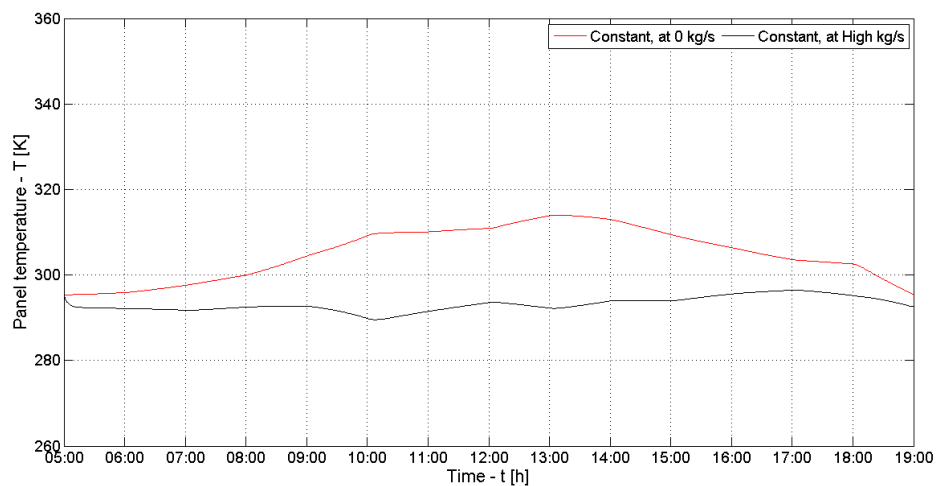
Parametri panela	Korištene vrijednosti
Ukupna površina (A)	24.895 m ²
Apsorpcijski faktor (α)	0.7 ^[7]
Emisijski faktor modula (ϵ)	0.9 ^[2]
Geometrijski faktor (F')	0.92 ^[1]
Koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka	5 W/m ² K ^[8]
Transmisijsko-apsorpcijski faktor	0.53 ^[6]
Parametri pumpe	Korištene vrijednosti
Koeficijent mehaničkih gubitaka (K)	15 ^[3]
$\eta_{el,pumpe}$	0.8 ^[3]
Polumjer cijevi (r)	0.011m
Maksimalna snaga (P_{high})	50W
Karakteristike fluida	vrijednosti
gustoća (ρ)	1000 kg/m ³
Toplinski kapacitet (c)	4186 J/kgK
Ulazna temperatura u panel	18 °C
Ostali parametri	vrijednosti
Štefan-boltzmanova konstanta (σ)	5.6705*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
Emisijski faktor neba (ϵ_{sky})	1
Nagib plohe (β)	38.98 °C

Ostale vremenski promjenjive podatke potrebne za simulaciju (temperaturu zraka, ozračenost plohe, azimutni i zenitni kut...) nalaze se u programskom rješenju rada u obliku vektora u jednominutnoj rezoluciji.

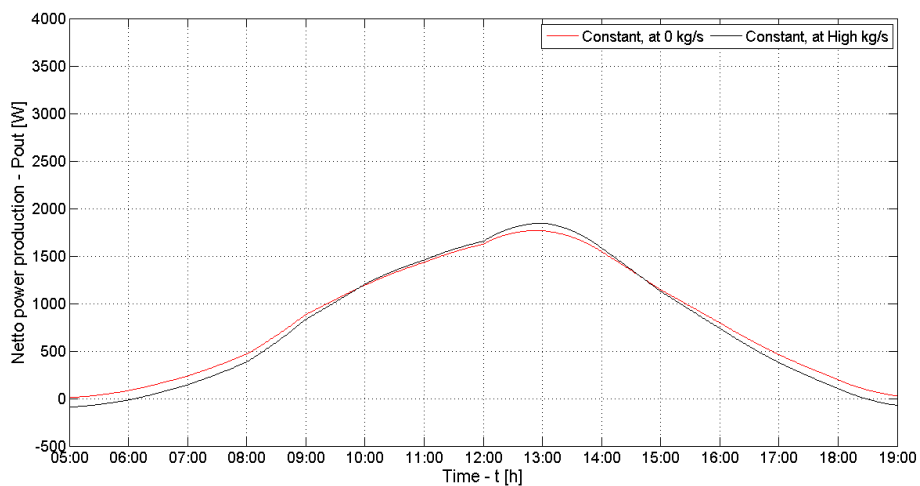
Prikazani rezultati: ozračenosti panela na nagnutu plohu, temperature panela,netto dobivena električna snaga cjelokupnog sustava,električna efikasnost fotonaponskog panela, te netto električna efikasnost sustava za 29.06.2005.:



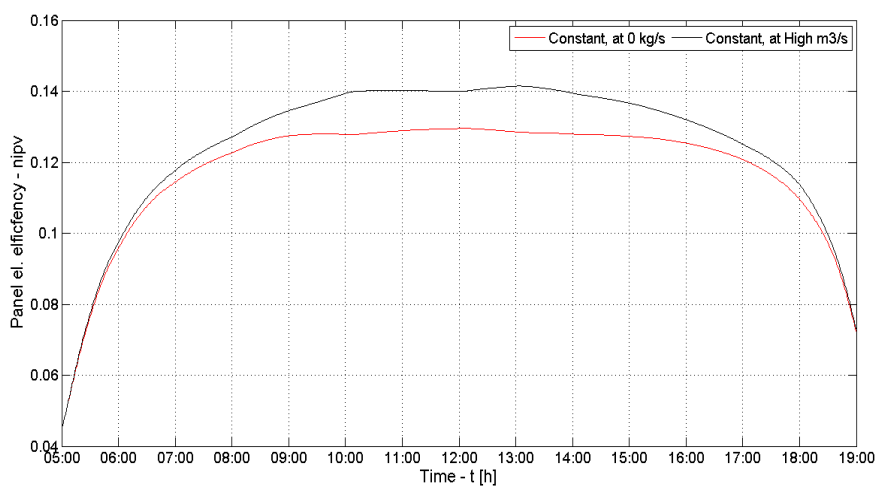
Slika 6.1 ukupna dozračenost panela za 29.06.2009.



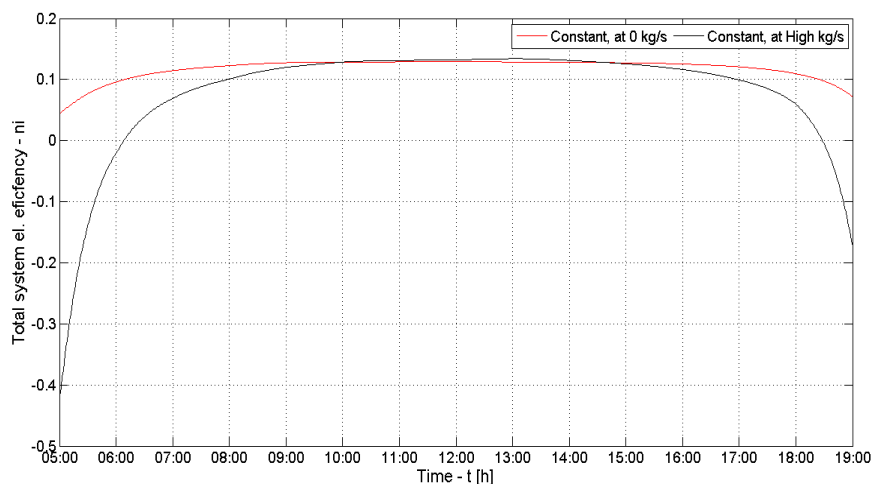
Slika 6.2 Temperatura fotonaponsko-toplinskog panela za (29.06.2005):
i) crveni graf-protoku nula, ii) crni graf-maksimalni protok



Slika 6.3 Dobivena netto električna snaga fotonaponsko sustava za 29.06.2005:
i) crveni graf- protok nula, ii) crni graf-maksimalni protok



Slika 6.4 Korisnost fotonaponskog panela za 29.06.2005:
i) crveni-graf- protok nula, ii) crni graf-maksimalni protok

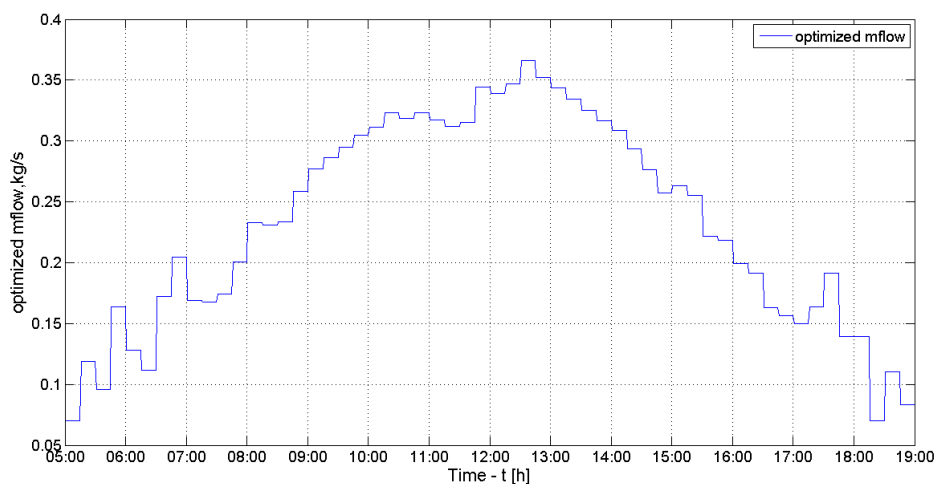


Slika 6.5 Ukupna električna efikasnost sustava (razlike dobivene snage panela i uložene u pumpu) za 29.05.2005: i) crveni graf- protok nula, ii) crni graf- maksimalni protok

Iz dobivenih simulacija vidljivo je da se temperatura panela smanji pri maksimalnom protoku za 15 kelvina za najtopliji dio dana (od 10h do 16h). Smanjenjem temperature panela povećava se električna efikasnost samog panela za 1.5% u istom razdoblju dana što je vidljivo iz slike 6.4. Za neto električnu efikasnost i neto dobivenu električnu snagu sa slike 6.3 i slike 6.5 može se iščitati da je sustav energetske efikasan pri maksimalnom protoku samo za najtopliji dio dana. Kada temperatura panela nije iznad 40⁰C energetske je neisplativo, a samim time i ekonomski hladiti panel pri maksimalnom konstantnom protoku. Razlog tome je da je mala dozačaćenost na panel u jutarnjim i predvečernjim satima, što se vidi sa slike 6.1. Zbog male dozačaćenosti na panel električna snaga dobivena na panelu je mala, dok uložena električna snaga u pumpu ostaje konstanto visoka što ima za posljedicu neefikasnost sustava u cjelini. Sa slike 6.4 vidljivo je da ujutro i predvečer neto električna efikasnost je čak i negativna tj. potrebno je ulagati električnu energiju iz mreže kako bismo ostvarili željeni rad pumpe. Zbog toga je potrebno optimizirati sustav tako da maseni protok fluida u sustavu prati ukupnu dozačaćenost na panelu kroz.

7. Rezultati simulacije sustava nakon optimizacije

Korištenjem gotovog optimizacijskog algoritma, priloženog u programskim rješenjima rada, dobili smo vrijednosti optimalnog protoka u 15 minutnoj rezoluciji. Dobiveni optimalni protok za 29.06.2005 u jedno minutnoj rezoluciji je prikazan slikom 7.1

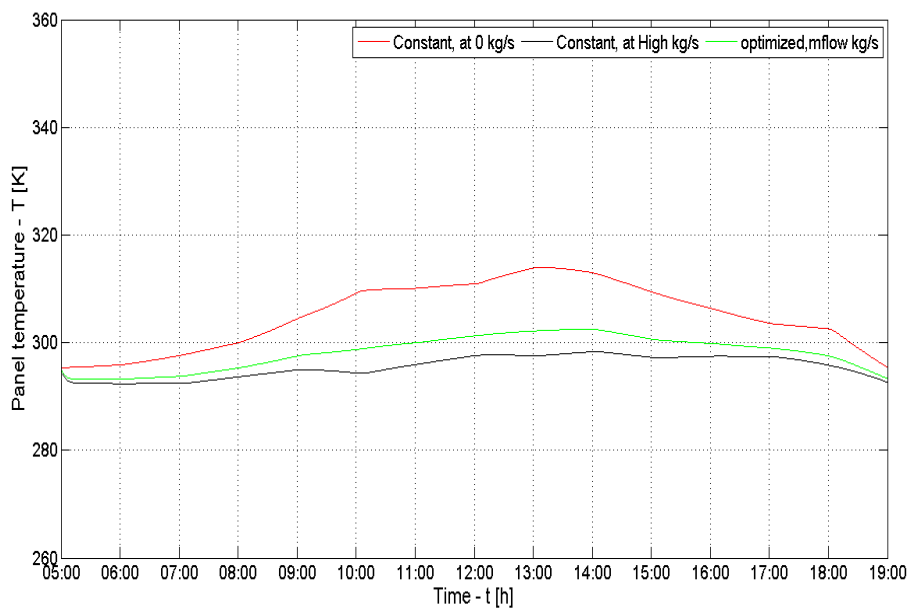


Slika 7.1. Optimizirani protok fluida kroz panel u jedno minutnoj rezoluciji

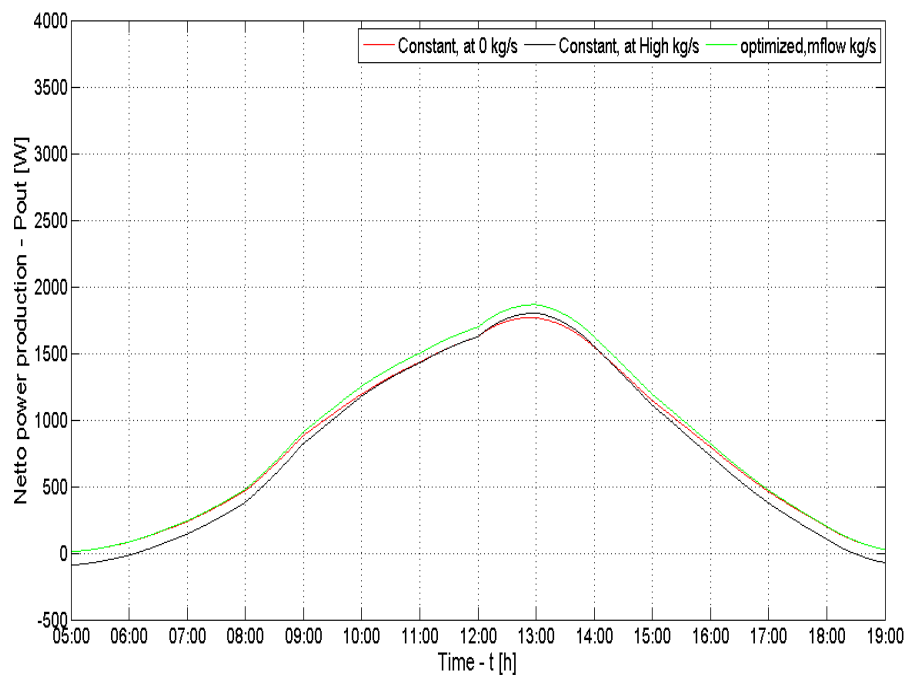
Optimizacijskim algoritmom ostvareno je kao što je vidljivo iz slike 7.1 da optimizirani protok prati promjenu ukupne dozračenosti na panel, a samim time promjenu temperature panela kroz dan. Zbog toga dobiveni protok ima oblik parabole, što je i očekivano budući da je najmanji potrebn protok ujutro i predvečer kada je temperatura panela najmanja te je potrebno najmanje hlađenje panela, dok u poslijepodnevnim satima je najveći budući da je tada temperatura samog panela najveća. Rezultat toga je znatno poboljšanje neto dobivene snage panela te ukupne efikasnosti sustava, što je i prikazano slikama 7.3. te 7.5.

Na osnovi dobivenog optimiziranog masenog protoka fluida kroz panel dobivamo rezultate simulacije koje prikazuju temperaturu panela, neto dobivenu električnu snagu fotonaponsko-toplinskog sustava, električnu korisnost samog

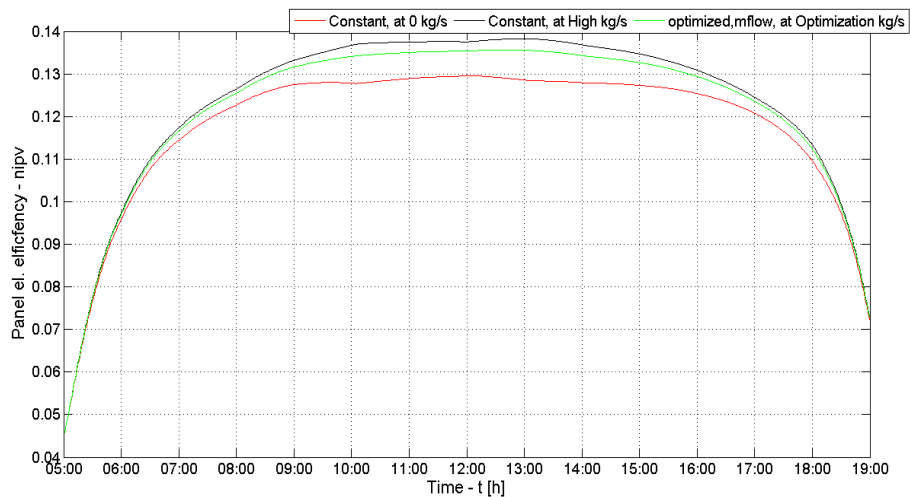
panela te ukupnu električnu korisnost sustava za 29.06.2005 kada je protok nula, pri maksimalnom protoku te pri optimiziranom protoku.



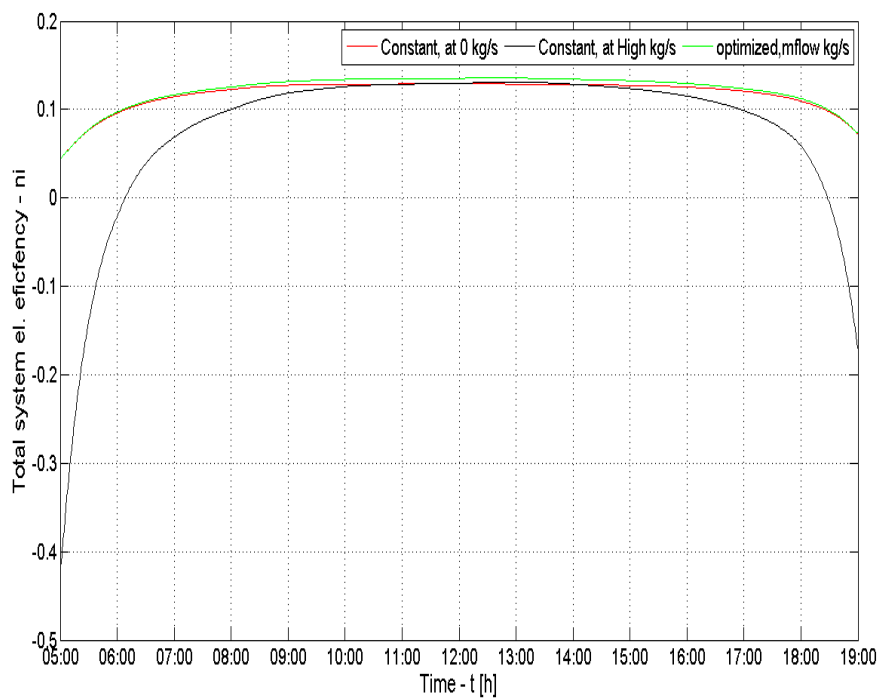
Sika 7.2. Temperatura fotonaponskog panela u ljetnom danu (29.06.2005):
i) crveni graf-protoku nula, ii) crni graf-maksimalni protok, iii) zeleni graf- optimiziranom protoku



Slika 7.3. Dobivena električna snaga fotonaponsko sustava za ljetni dan (29.06.2005): i) crveni graf-protok nula, ii) crni graf-maksimalni protok, iii) zeleni graf- optimiziranom protoku



Slika 7.4. Korisnost fotonaponskog panela za ljetni dan (29.06.2005):
 i) crveni graf- protok nula, ii) crni graf- maksimalni protok, iii) zeleni graf- optimiziranom protoku

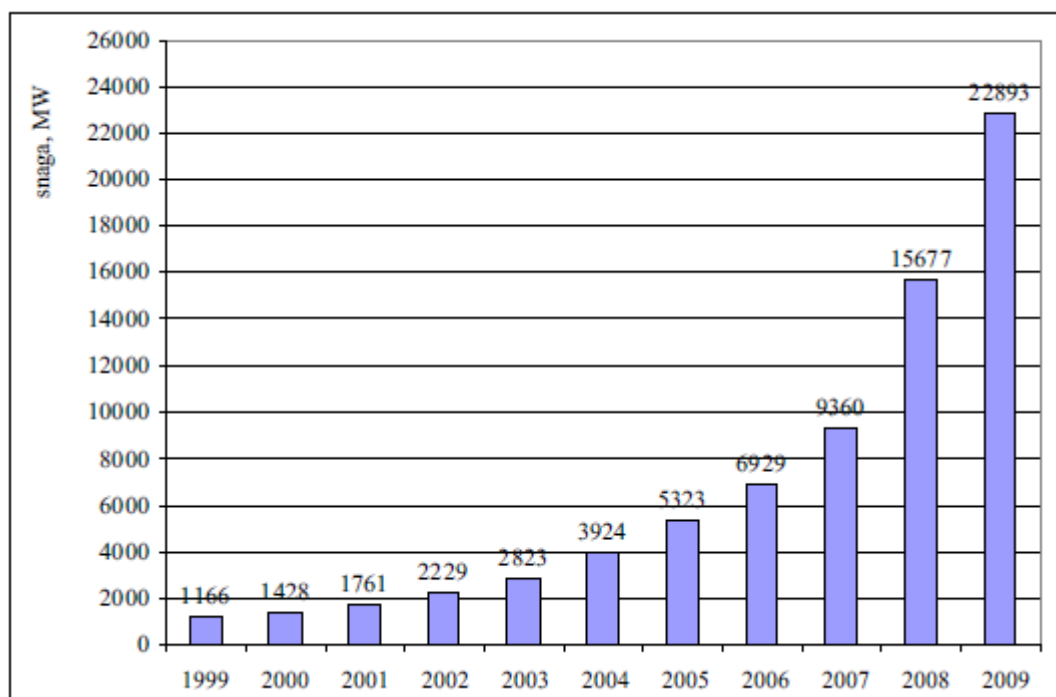


Slika 7.5. Ukupna električna efikasnost sustava (razlike dobivene snage panela i uložene u pumpu) za ljetni dan (29.05.2005): i) crveni graf- protok nula, ii) crni graf- maksimalni protok, iii) zeleni graf- optimiziranom protoku

Cilj optimizacijskog algoritma je da netto dobivena električna snaga sustava bude što veća. Za promatrani sustav treba vrijediti da funkcija koja predstavlja razliku dobivene električne snage na panelu i potrebne uložene električne snage u pumpu mora imati maksimalnu vrijednost. Budući da je jedina upravljiva varijabla u sustavu maseni protok fluida potrebno je optimizacijski algoritam provesti po toj varijabli. Upravljanje masenim protokom bi se ostvarilo sa upravljanjem uložene električne snage na pumpi u 15 minutnoj rezoluciji. Iz dobivenih rezultata simulacije može se vidjeti kako postoji znatno poboljšanje električne efikasnosti cjelokupnog sustava te dobivene netto električne snage sustava. Ne postoje više gubitci efikasnosti za razdoblje u danu kada je mala dozačćenost na panel budući da je tada i mali protok kroz sustav. U predvečernjim i jutarnjim satima maseni protok je oko 0.1 kg/s što zahtjeva da električna snaga potrebna za rad pumpe iznosi tek nekoliko wata, za protok od 0.1 kg/s potrebna snaga pumpe je 1.52 W. U najtoplijem dijelu dana kada je najveća temperatura panela potrebno je i najintenzivnije hlađenje panela, maseni protok u tom razdoblju dana raste i do 0.4 kg/s za što je potreban snaga pumpe od 40.9 W. Možemo zaključiti kako optimizacijskim algoritmom smo dobili željeno vladanje sustava tj. da maseni protok prati promjene varijabli koji utječu na dobivenu električnu snagu panela, ukupnu dozačćenost i temperaturu panela. Upravo zbog toga postoji dosta kvalitetnije vladanje sustava u razdoblju dana kada je mala dozačćenst u usporedbi s konstantno visokim protokom te kvalitetnije vladanje za najtopliji dio dana u usporedbi s ne hlađenim sustavom. Energetska bilanca za promatrani dan prikazana je u zaključku.

8. Zaključak

Činjenica je da su konvencionalni izvori energije (ugljen, nafta, plin, nuklearna goriva) ograničeni i iscrpljivi, a energetska sektor većim je dijelom uzrok emisije SO_2 , NO_x , te osobito stakleničkog plina ugljikova dioksida CO_2 , koji najvećim dijelom doprinosi globalnom zatopljenju i klimatskim promjenama. Zbog gore navedenih razloga energiju je potrebno dobivati iz obnovljivih izvora energije. Gdje je Sunčeva energija neiscrpan te apsolutno ekološki prihvatljiv izvor energije. Upravo zbog toga u zadnjih 10. godina javlja se eksponencijalan rast ukupne instalirane snage fotonaponskih sustava, što je prikazano slikom 8.1



Slika 8.1 ukupna snaga instaliranih fotonaponskih sustava^[1]

No još uvijek je glavni problem energetska i ekonomska neefikasnost nekonvencionalnih izvora energije u usporedbi s konvencionalnim. Upravo zbog toga u ovom radu dana dinamička analiza poboljšanja efikasnosti sustava. Mogli smo vidjeti kako energetska efikasnost sustava korištenjem hibridnih fotonaponskih-toplinskih raste zbog dobivene toplinske energije koja se može koristiti u domaćinstvu, no zbog potrebnog napajanja pumpe električna efikasnost

opada pri konstantno visokom protoku. Zbog toga je potrebno optimizirati sustav po jedinjoj upravljivoj veličini u sustavu masenom protoku tako da prati promjenu dozračenosti na panel i temperature panela kako bismo uspjeli dobiti najveću neto dobivenu električnu snagu. U konačnici prikazana je energetska bilanca sustava u tablici 8. za promatrani dan za slučaj kada koristimo samo fotonaponski modul, kada koristimo hibridni sustav pri konstantno visokom protoku te kada koristimo hibridni sustav pri optimiziranom protoku.

Tablica 8. Energetska bilanca sustava za 29.06.2005.

Vrsta modula	PV-modul	PV/T –modul pri konstantno visokom protoku	PV/T –modul pri optimiziranom protoku
Prosječna neto električna efikasnost sustava, [%]	11.83	7.97	12.24
Prosječna toplinska efikasnost sustava, [%]	0	61.85	59.51
Ukupna efikasnost , [%]	11.83	69.82	71.75
Dobivena neto električna energija, [kWh]	11.879	11.070	12.361
Dobivena toplinska energija, [kWh]	0	58.1256	55.9249

Iz dobivenih rezultat vidi se kako sustav pri optimiziranom protoku daje znatno poboljšanje neto električne efikasnosti od 4.27% uz malo smanjenje toplinske efikasnosti sustava od 2.34% u usporedbi sa sustavom kada koristimo konstantno visoki protok. Dok u usporedbi sa samim fotonaponskim modulom imamo poboljšanje neto električne efikasnosti od 0.41% ali zato znatno poboljšanje sustava u cjelini. Treba napomenuti da u promatranoj toplinskoj energetskoj analizi sustava prosječna toplinska efikasnost uzeta je za predanu toplinsku snagu fluidu koji prolazi kroz pozadinu panela, ne za dobivenu toplinsku snagu iz izmjenjivaču topline u spremniku. Upravo zbog tog razloga se javlja dosta visoka toplinska efikasnost, budući da se javljaju još dodatni gubici topline u spremniku.

Literatura

- [1] Majdandžić, Ljubomir, *Solarni sustavi*. Zagreb, Graphis Zagreb, 2010
- [2] Jones, A. D. , Underwood, C. P. *A thermal model for photovoltaic systems: Module temperature model*, School of the Built Environment, University of Northumbria, 1999.
- [3] The royal academy of engineering, *The Mathematics of Pumping Water AECOM Design Build Civil, Mechanical Engineering*
- [4] Betti Tihomir, *Testiranje fotonaponskih modula u realnim uvjetima*, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, 2005.
- [5] M. Ben Ammar, M. Ben Ammar, M. Chaabene. *A dynamic model of hybrid photovoltaic/thermal panel*. International Renewable Energy Congress November 5-7, 2009 - Sousse Tunisia.
- [6] P.G Charalambous^a, S.A. Kalogirou^b, G.Maidment^a, T.G Karayiannis^b, *Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review*, ^a Department of Engineering Systems, London South Bank University, 103 Borough Road, London, U.K. SE1 0AA, ^b Higher Technical Institute, P.O.Box 20423, Nicosia 2152, Cyprus, 2004.
- [7] Vašak Mario, Gulin Marko, Čeović Josip, Nikolić Dražen, Pavlović Tomislav and Perić Nedeljko, *Meteorological and weather forecast data-based prediction of electrical power delivery of a photovoltaic panel in a stochastic framework*, Department of Control and Computer Engineering
Faculty of Electrical Engineering and Computing of University of Zagreb
Unska 3, 10000 Zagreb.
- [8] Soteris A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, United States of America, 2009.
- [9] Rajner Zoran, *Energetski efikasno upravljanje fototoplinskim sustavom*, Department of Control and Computer Engineering
Faculty of Electrical Engineering and Computing of University of Zagreb
Unska 3, 10000 Zagreb, 2011.

SUSTAVI UPRAVLJANJA FOTONAPONSKIM AGREGATOM S MOGUĆNOŠĆU AKTIVNOG HLAĐENJA PANELA

Sažetak

U ovom radu dana je dinamička analiza rada hibridnih fotonaponskih toplinskih sustava sa cirkulacijskom pumpom za odvođenje dobivene toplinske energije preko fluida koji prolazi kroz apsorber. Opisan je sam model sustava te njegove komponente. Prikazan je detaljni matematički model sustava pri čemu smo promatrali u simulacijama tri slučaja, prvo kada je snaga pumpe nula tj. kada nema rashladnog fluida u sustavu, zatim pri konstantnoj maksimalnoj snazi pumpe te uz optimiziran rad pumpe. Iz rezultata simulacije utvrđeno je kako sustav uz optimizaciju daje veliko poboljšanje električne efikasnosti uz malo smanjenje toplinske efikasnosti u usporedbi s konstantnim protokom.

Ključne riječi: hlađeni fotonaponsko-toplinski sustavi, cirkulacijska pumpa, optimizacija protoka

Abstract

This paper presents a dynamic analyzes of water cooled hybrid photovoltaic-thermal systems. At first it is given a description of the components of the system, and then a detailed mathematical model of the system. Finally, the results of simulations show the gained netto electrical power of the system and netto electrical efficiency for three cases where there is no mass flow, for constant high mass flow, and for optimized mass flow. From the results we can conclude that we have a large improvement of netto electrical efficiency whit optimized mass flow and a bit poorer performances of thermal efficiency compared with system that have constant high mass flow.

Key words: water cooled hybrid photovoltaic-thermal systems, water pump, optimized mass flow

Životopis

Rođen sam 24. listopada 1990. godine u Zenici u Bosni i Hercegovini. Prva dva razreda osnovne škole završio sam u Hamburgu nakon čega sam upisao Osnovnu školu Rikard Katalinić Jeretova u Opatiji gdje sam završio osnovnoškolsko obrazovanje. U Metkoviću sam pohađao matematičku gimnaziju od 2005. do 2009. godine nakon čega sam upisao Fakultet elektrotehnike i računarstva. Trenutno kao redovan student završavam preddiplomski studij.