

RADNI PARAMETRI KONKAVNOG PARABOLIČNOG SOLARNOG KONCENTRATORA

Pogančić, Bruna

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:497086>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

BRUNA POGANČIĆ

ZAVRŠNI RAD

**RADNI PARAMETRI KONKAVNOG
PARABOLIČNOG SOLARNOG KONCENTRATORA**

Split, rujan, 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Obnovljivi izvori energije

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Bruna Pogančić

Naslov rada: Radni parametri konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora

Mentor: dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

Komentor: /

Split, rujan, 2021

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Preddiplomski stručni studij „Konstrukcijsko strojarstvo“
Predmet: Obnovljivi izvori energije
Nastavnik: dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

ZAVRŠNI RAD

ZADATAK

Studentica: Bruna Pogančić

Naslov teme: Radni parametri konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora

U završnom radu potrebno je:

- teoretski objasniti princip rada uređaja koji koriste koncentriranu sunčevu energiju, s naglaskom na konkavne parabolične solarne koncentratore;
- prikazati nekoliko primjera te dati pregled njihovih radnih parametara i tehničkih karakteristika;
- izraditi tehnički opis i specifikaciju postojećeg konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora koji je izgrađen u laboratoriju Odsjeka za strojarstvo, uz grafičke, shematske i prema potrebi nacrtne priloge;
- izvršiti mjerenje radnih parametara konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora kojim će se demonstrirati njegove tehničke mogućnosti i ograničenja;
- obraditi i interpretirati rezultate mjerenja, s posebnim naglaskom na prikaz učinkovitosti grijača i cjelokupnog sustava pri pretvorbi sunčeve energije u toplinsku energiju;
- iznijeti zaključke;
- navesti literaturu i izvore podataka.

Sažetak

U završnom radu izvršeno je mjerenje radnih parametara konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora, pri čemu je korištena nova izvedba grijača s konkavnom površinom. U uvodnom dijelu objašnjen je način rada sustava koji koriste koncentriranu energiju sunca s posebnim naglaskom na konkavne parabolične solarne koncentratore, odnosno „solarne tanjure“. U praktičnom dijelu rada opisan je laboratorijski konkavni parabolični solarni koncentrator. Mjerenje radnih parametara konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora izvršeno je u realnim uvjetima pri čemu su prikupljeni podaci o dozračenoj sunčevoj energiji, te volumnog protoka i temperatura cirkulirajuće vode. Na osnovu izmjerenih vrijednosti izračunate su i grafički prikazane promjene vrijednosti snage koncentratora i grijača, te učinkovitosti sustava. Konačno, s obzirom da su od prije postojeća mjerenja izvršena korištenjem grijača s ravnom površinom, izvršena je usporedba dobivenih rezultata i razlika u radu sustava s obzirom na vrstu grijača.

Ključne riječi: parabolični solarni koncentrator, izvedba grijača, učinkovitost

Summary (Operating Parameters of a Concave Parabolic Solar Concentrator)

In the final work, the operating parameters of the concave parabolic solar concentrator were measured, using a new version of the heater with a concave surface. The introductory part explains the operation of systems that use concentrated solar energy with special emphasis on concave parabolic solar concentrators, or "solar dishes". In the practical part of the paper, a laboratory concaves parabolic solar concentrator. The measurement of the operating parameters of the concave parabolic solar concentrator was performed in real conditions, where data on the irradiated solar energy, as well as the volume flow and temperature of the circulating water were collected. Based on the measured values, changes in the values of concentrator and heater power and system efficiency were calculated and graphically presented. Finally, since the pre-existing measurements were performed using a flat-surface heater, a comparison of the results obtained and the differences in the operation of the system with respect to the type of heater was performed.

Keywords: parabolic solar concentrator, heater design, efficiency

SADRŽAJ

Sažetak	i
Summary (Operating Parameters of a Concave Parabolic Solar Concentrator)	i
1. Uvod.....	1
2. Koncentrirana sunčeva energija.....	2
2.1. Karakteristike paraboličnog solarnog koncentratora.....	3
2.2. Tehnologije izrade solarnih koncentratora	4
2.3. Parametri konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora	6
3. Opis sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora.....	9
4. Mjerenje radnih parametara konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora.....	16
4.1. Rezultati mjerenja.....	16
4.2. Usporedba rezultata mjerenja	22
5. Zaključak.....	27
Literatura	28

Popis slika

Slika 2.1. – Vrste Sunčevog zračenja [6]	2
Slika 2.2. – Elementi paraboličnog sunčevog koncentratora [7].....	3
Slika 2.3. – Vrste solarnih kolektora [8]	4
Slika 2.4. - Elektrana solarnih tanjura u Shenandoah, Georgia [2]	6
Slika 2.5. - Solarna elektrana Maricopa, Arizona [2].....	6
Slika 2.6. – Ovisnost učinkovitosti sustava i izravnog normalnog zračenja [2]	7
Slika 3.1. – Shema idejnog rješenja paraboličnog solarnog tanjura [4].....	9
Slika 3.2. - Sjena od grijača stvorena na površini prilikom rada solarnog tanjura.....	10
Slika 3.3. - Konkavna prednja površina grijača izrađena od bakra.....	11
Slika 3.4. - Grijač nakon izoliranja i bojenja prednje površine.....	12
Slika 3.5. – Fokusiranje sunčevog zračenja na grijaču	12
Slika 3.6. – Prikaz odvoda i dovoda vode koja se nalazi u spremniku	13
Slika 3.7. - Prikaz cirkulacijske pumpe i ultrazvučnog mjerača protoka.....	14
Slika 3.8. - Shema hidrauličkog sustava [4].....	15
Slika 3.9. - Shema spajanja sustava upravljanja [4].....	16
Slika 3.10. - Spojeni fotoosjetljivi osjetnik i piranometar.....	17
Slika 4.1. – Parabolični solarni koncentrator u radu	18
Slika 4.2. – Piranometar i pirheliometar spojeni na solarni koncentrator	19
Slika 4.3. - Piranometar i pirheliometar u radu	20
Slika 4.4. - Rezultati ukupnog Sunčevog zračenja.....	21
Slika 4.5. - Snaga solarnog paraboličnog koncentratora i promjena temperature vode pri odvodu i dovodu u spremnik.....	22
Slika 4.6. – Izračunata i izmjerena Sunčeva zračenja te snaga koncentratora	23
Slika 4.7. – Učinkovitost sustava i temperatura odlaznog voda.....	24
Slika 4.8. - Ovisnost protoka i temperaturne razlike po jedinici vremena	24
Slika 4.9. - Fokusiranje Sunčevog zračenja na grijaču : a) stari grijač [3], b) novi grijač	25
Slika 4.10. – Prethodni podatci izmjerenog i izračunatog sunčevog zračenja [3]	26
Slika 4.11. – Usporedba temperature polaznog i povratnog voda konkavnog i ravnog grijača [3].....	27
Slika 4.12. – Usporedba snage ravnog i konkavnog grijača, usporedba snage koncentratora [3]	28
Slika 4.13. – Usporedba učinkovitosti sustava [3]	29

1. Uvod

Energija Sunca je trenutno najkorišteniji obnovljivi izvor energije. Još su i drevne civilizacije prepoznale potencijal Sunčeve energije kada je Diokles, grčki matematičar, oko 200. pr. Kr. predstavio mogućnost fokusiranja Sunčeve zrake pomoću paraboličnih zrcala. Inspiriran otkrićem Dioklesa, kemičar Antoine Laurent de Lavoisier 1774. godine razvio je stroj koji bi fokusiranjem Sunčeve energije postigao temperaturu potrebnu za izgaranje površine u koju je zraka fokusirana. Uređaj se sastojao od velike staklene leće te je daljnjim razvojem 1878. godine izumljen parabolični koncentrador koji je napajao tiskaru tako da bi fokusiranim zrakama zagrijavao parni kotao koji je pokretao motor. Od tada iskoristivost Sunčeve energije raste, kao i zanimanje za održivom energijom, što je rezultiralo mnogim inovacijama i načinima za direktno pretvaranje sunčeve energije u toplinsku energiju ili električnu energiju.

Parabolični solarni koncentradori koji se danas koriste sastavljeni su od osnovnih i sporednih elemenata.

U osnovne elemente spadaju:

- toplinski stroj
- parabolični tanjur
- prijemnik
- generator

a sporedni elementi su:

- sustav za praćenje sunca
- nosiva konstrukcija
- sustav za upravljanje

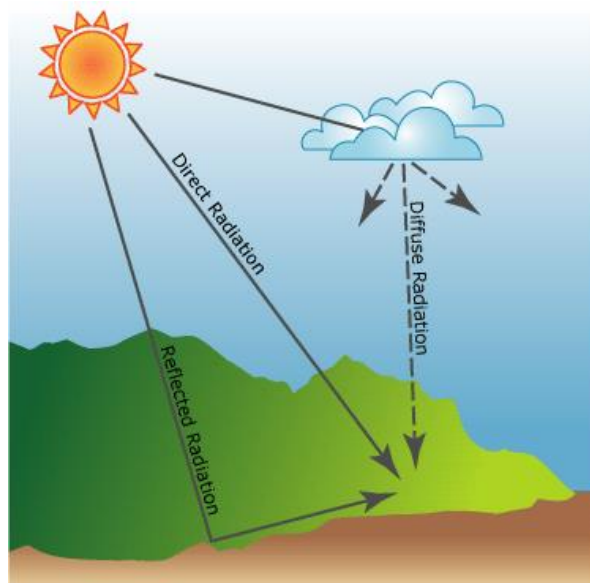
Solarni koncentrador direktno koristi Sunčevu energiju i pretvara je u toplinsku ili električnu energiju. Posebno je zanimljiv jer zbog konstrukcijskog rješenja ima mogućnost pratiti položaje Sunca zakretanje u dvije osi, što povećava njegovu iskoristivost i omogućava prikupljanje Sunčeve energije tijekom cijelog dana.

2. Koncentrirana sunčeva energija

Sunčeva energija dozračena na Zemljinu površinu može se podijeliti na dvije vrste zračenja:

- Izravno zračenje
- Difuzno zračenje

Razlika u ta dva zračenja je ta što izravno zračenje dopire direktno od Sunca, dok se kod difuznog zračenja ono raspršuje u različitim smjerovima prije no što dopiye do Zemljine površine te zajedno ta dva zračenja tvore globalno ili ukupno sunčevo zračenje (Slika 2.1). Fokusiranjem sunčeve energije u jednu točku omogućava se zagrijavanje i dostizanje visokih temperatura potrebnih za pretvaranje te energije u toplinsku, mehaničku ili električnu energiju, što predstavlja veliki energetski potencijal ako se uzme u obzir prosječna količina dozračene energije Sunca od 1000 W/m^2 .



Slika 2.1. – Vrste Sunčevog zračenja [6]

Da bi se izračunala količina koncentrirane sunčeve energije, uzima se u obzir okoliš u kojem se vrši mjerenje. Rezultati će biti različiti na području gdje je oblačnije i vlažnije naspram suhog i vrućeg područja. Mjerenje se vrši prema direktnim Sunčevim zrakama koje dopiru okomito na površinu Zemlje, a relevantna mjera je DNI (eng. Direct Normal Irradiation), tj. izravno normalno zračenje. Iz navedenog proizlazi da će DNI značajno manji na vlažnim i hladnim područjima, u odnosu na suhom i toplom području. Pri niskim DNI također će biti

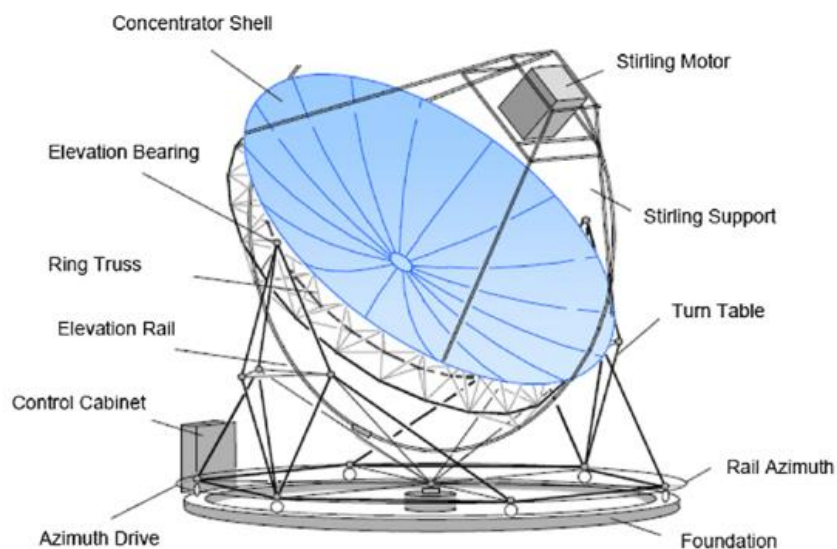
prevelikih toplinskih gubitaka, stoga se koncentrirane solarne elektrane najčešće grade u suptropskim klimama gdje se temperatura kreće od 10°C i preko 27°C.

2.1. Karakteristike paraboličnog solarnog koncentratora

Kako bi se Sunčeva energija nakon prikupljanja paraboličnim solarnim koncentratorom pretvorila u električnu energiju, potrebno je da solarni koncentrator ima četiri osnovna elementa:

- parabolični tanjur, koji će fokusirati Sunčevu energiju,
- prijemnik, koji stvara toplinsku energiju iz fokusirane Sunčeve energije,
- toplinski stroj, koji će iz toplinske energije generirati mehaničku energiju, te
- generator, koji će mehaničku energiju koristiti za proizvodnju električne energije.

Parabolični solarni koncentrator izveden je kao sustav koji se zakreće oko dvije osi u svrhu kontinuiranog praćenja položaja Sunca na nebu, pri čemu prikuplja direktnu komponentu Sunčevog zračenja koja na površinu koncentrator pada pod okomitim kutom. Takvo kretanje je omogućeno nosivom konstrukcijom, sustavom za upravljanje i uređajem za praćenje položaja Sunca (Slika 2.2).

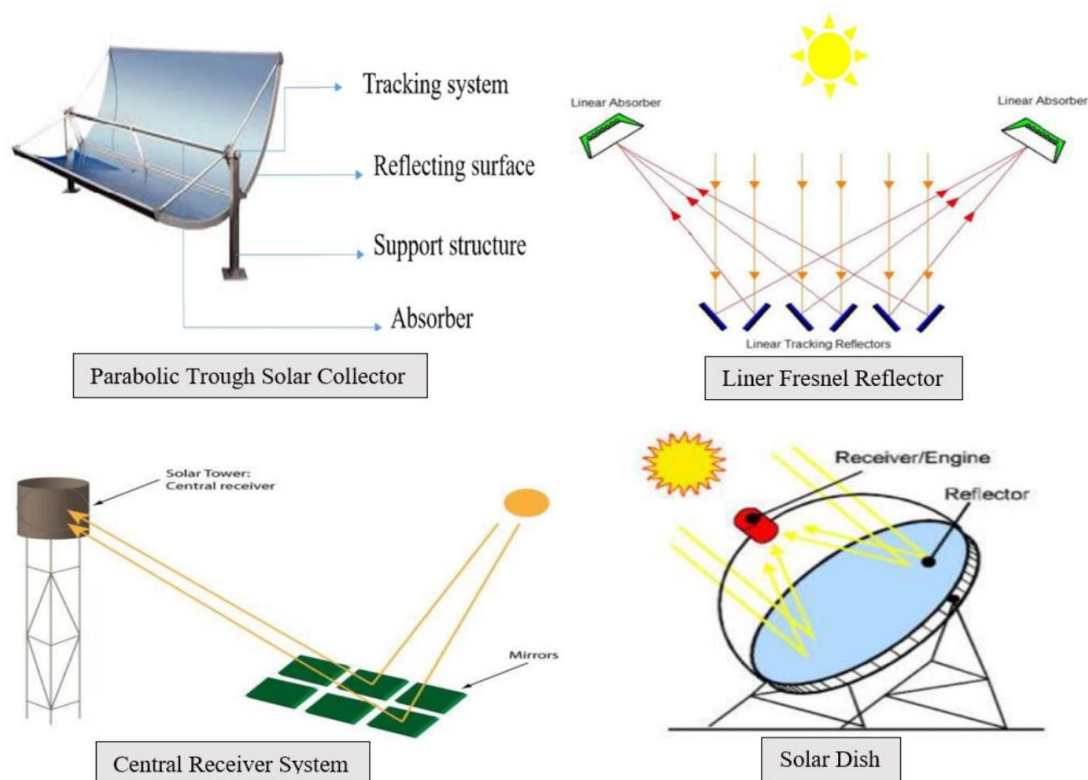


Slika 2.2. – Elementi paraboličnog sunčevog koncentratora [7]

Sustav upravo zbog takvog načina rada i dimenzija ima relativno visoku učinkovitost jer se dosegnutim temperaturama preko 800°C prilikom zagrijavanja sustava postiže pretvorba toplinske energije u mehaničku ili električnu pri učinkovitostima i preko 30% [2].

2.2. Tehnologije izrade solarnih koncentratora

Osnovne karakteristike po kojima se razlikuju solarni koncentratori su vrsta prijemnika i način koncentriranja Sunčevog zračenja. Sustavi koncentratora koji fokusiraju zračenje u jednu točku su solarni toranj i parabolični tanjur, dok linearni fokus imaju linearni Fresnel i parabolični (prolazni) kolektor (Slika 2.3).



Slika 2.3. – Vrste solarnih kolektora [8]

Iako parabolični (prolazni) kolektor ima najmanji omjer koncentracije, to je trenutno najrasprostranjenija tehnologija od preko 90% sveukupne tehnologije solarnih koncentratora. Koriste pokretni prijemnik i zakrivljena zrcala visokog odraza koja spojena u dugi red čine korito dugo i do 100 m, koje reflektira sunčevo zračenje u linearni prijemnik.

Za razliku od paraboličnog (prolaznog) kolektora, linearni Fresnel koristi ogledala različitih oblika, na različitim mjestima koja također imaju sekundarna ogledala u slučaju zakrivljena žarišne linije. Tako postavljena linija ogledala omogućuju reflektiranje sunčevog zračenja na fiksni prijemnik.

Linearni Fresnel prati sunce u jednoj osi, dok solarni toranj za praćenje Sunca koristi dvije osi po kojima se kreću stakla koja reflektiraju sunčevo zračenje u prijemnik na vrhu tornja. Ta su ogledala povezana preko računala i mnogo su jeftinija nego stakla koja se koriste za proizvodnju linearnog Fresnel-a.

Parabolični tanjur koristi prijemnik u koji se koncentrira sunčevo zračenje reflektirano s konkavnog koncentratora koji prati sunce preko dvije osi. U sustavima se trenutno za potrebe pretvorbe toplinske energije u mehaničku energiju koristi Stirlingov motor. Radi na principu klipnog motora s zatvorenim kružnim tokom i dovođenjem vanjskog izvora topline, kao što je Sunčeva energija.

Prednosti Stirlingovog motora su:

- Nema emisije ispušnih plinova
- Miran rad
- Pogodan za korištenje različitih vrsta goriva
- Visok stupanj djelovanja
- Može koristiti različite izvore toplinske energije

Nedostatci Stirlingovog motora su:

- Veliki troškovi kod proizvodnje
- Teže upravljanje parametrima motora

Usljed ovih nedostataka još se radi na razvoju motora za potrebe rada paraboličnih tanjura, a kako bi ta tehnologija imala širu primjenu.

Zbog relativno male snage koju imaju elektrane paraboličnih solarnih koncentratora, idealne su za decentralizirano korištenje ili za potrebe kućanstva. Snage ovih elektrana kreću se od 5 kW do 25 kW. Na slici 2.4. prikazana je prva elektrana, puštena u rad 1990. godine, sastavljena od 114 solarnih paraboličnih tanjura u Shenandoah, Georgia. Prva elektrana pogonjena Stirlingovim motorom nalazi se u Maricopa, Arizona. Na slici 2.5. prikazana je ta elektrana sastavljena od 60 paraboličnih solarnih tanjura koji su u radu od 2010. godine [2].



Slika 2.4. – Elektrana solarnih tanjura u Shenandoah, Georgia [2]

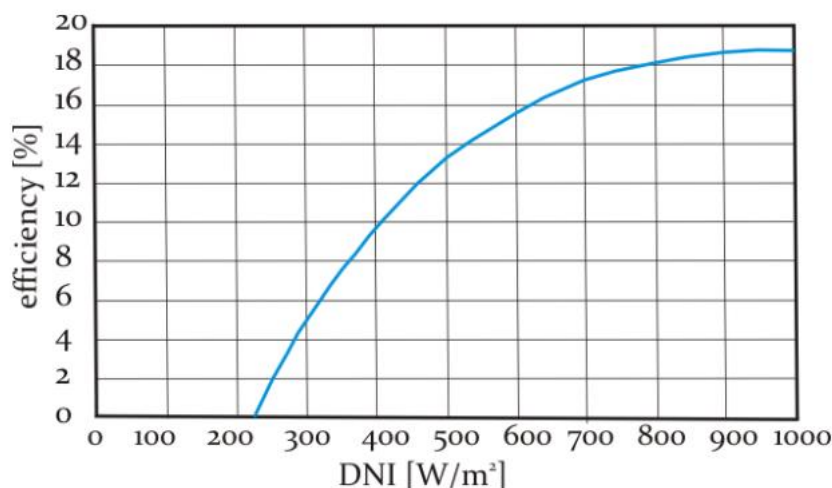


Slika 2.5. – Solarna elektrana Maricopa, Arizona [2]

2.3. Parametri konkavnog paraboličnog solarnog koncentrataora

Jedan od važnijih parametara konkavnog paraboličnog solarnog koncentrataora je količina dozračenog izravnog normalnog sunčevog zračenja, što utječe na raspoloživu snagu sustava. Također, promjenom vrijednosti izravnog sunčevog zračenja mijenja se i učinkovitost pretvorbe energije. Učinkovitost će biti najveća pri najvećem izravnom normalnom zračenju.

Prema slici 2.6. može se vidjeti da se najveća učinkovitost postiže pri najvišim vrijednostima izravnog sunčevog zračenja. Kako bi se povećala količina reflektirane energije potrebno je osigurati dovoljno veliku površinu paraboličnog tanjura. Konačno, pri odabiru toplinskog stroja potrebno je odabrati toplinski motor koji će raditi s što je moguće boljom učinkovitošću za vrijeme manjeg izravnog normalnog zračenja [2].



Slika 2.6. Ovisnost učinkovitosti sustava i izravnog normalnog zračenja [2]

Na parabolični solarni koncentrador utječe i omjer koncentracije C . Zbog simetričnosti solarnog tanjura, uzima se u obzir samo žarišna točka u kojoj dolazi do direktnog zračenja. To bi za omjer koncentracije značilo da se računa preko površine otvora paraboličnog koncentratora A_a (m²) i površine grijača A_r (m²):

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.1)$$

Promjenom oblika paraboličnog koncentratora mijenjati će se i omjer koncentracije. Omjer koncentracije će se smanjiti ako ima nepravilnosti na reflektivnoj površini i ako ta površina nema visoku refleksiju [2].

Većim omjerom koncentracije postiže se veća temperatura, a većom temperaturom se postiže bolja učinkovitost toplinskog motora koju određuju energetska učinkovitost ζ i Carnotova učinkovitost η_C :

$$\eta_{HE} = \eta_C \cdot \zeta \quad (2.2)$$

Energetska učinkovitost može se dobiti iz omjera dobivenog rada u motoru i maksimalne učinkovitosti motora:

$$\zeta = \frac{W}{W_{max}} \quad (2.3)$$

Carnotova učinkovitost predstavlja učinkovitost rada motora na različitim temperaturama:

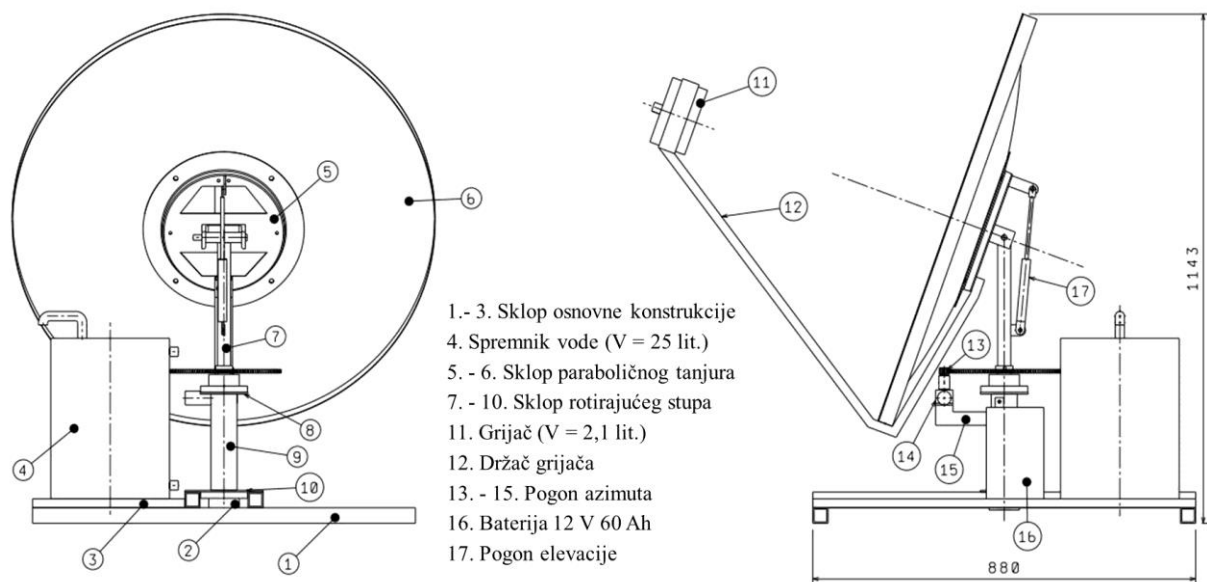
$$\eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.4)$$

Da bi se postigla maksimalna toplinska učinkovitost prijemnika, potrebno je uzeti u obzir geometrijsku veličinu i kvalitetu zrcala, kao i položaj, točnost praćenja, oblik i dimenziju otvora prijemnika, jer pogrešnim odabirom se smanjuje učinkovitost te dolazi do gubitaka topline. Također će o prijemniku i zrcalu ovisiti faktor presretanja koji je opisan omjerom reflektiranog sunčevog zračenja na prijemnik. Faktor presretanja će izravno utjecati na prijenos energije u sustavu, gdje će se prijenos energija znatno smanjiti ako se smanji faktor presretanja [2].

Ako sustav sam sebi osigurava energiju potrebnu za napajanje sustava za praćenje, to će isto smanjiti ukupnu učinkovitost sustava, dok se na učinkovitost generatora ne može utjecati jer je već postignuta visoka učinkovitost, koja je fizikalno i realno ostvariva [2].

3. Opis sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora

U svrhu izrade laboratorijskog konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora (ili solarnog tanjura) korištena je satelitska antena. Sustav je projektiran i izveden u okviru prijašnjeg završnog rada, dok su rezultati mjerenja rada sustava korištenjem grijača s ravnom površinom već prije publicirani [3]. Satelitska antena ima ukupnu površinu od $0,765 \text{ m}^2$, te je presvučena samoljepljivom reflektirajućom folijom, kako bi sustav mogao reflektirati Sunčevo zračenje te ga koncentrirati na površinu grijača. Shematski prikaz idejnog rješenja prikazan je na slici 3.1. S obzirom da grijač stvara sjenu na tanjur prilikom direktnog izlaganja Sunčevom zračenju (Slika 3.2.), izračunata je efektivna površina na koju dozračuje sunčevo zračenje u iznosu od $0,7207 \text{ m}^2$. Proračunom geometrije solarnog tanjura određena je fokalna duljina od 710 mm [4].



Slika 3.1. – Shema idejnog rješenja paraboličnog solarnog tanjura [4]

Sustav funkcionira na temelju zatvorenog kruženja vode pri čemu se voda zagrijava pri prolasku kroz grijač na čiju površinu je fokusirano sunčevo zračenje. Cirkulacija vode omogućena je upotrebom cirkulacijske crpke. Pri projektiranju sustava nije predviđeno postavljanje toplinskog stroja (Stirlingov motor) u svrhu pretvorbe energije, već je za to odabran grijač u obliku zatvorene posude s priključkom za dovod i odvod zagrijane vode. U prvoj izvedbi grijača isti je izveden s ravnom površinom na koju dozračuje koncentrirana

energija Sunca. Za potrebe ovog završnog rada korištena je nova izvedba grijača, koji umjesto ravne ima konkavnu površinu za prihvat koncentrirane energije Sunca. Grijač je izveden kao posuda napravljena od nehrđajućeg čelika SAE 304, dok je prednja površina izrađena od čistog bakra (99,5%, DIN SE-Cu 2.070), prema slici 3.3. Na slici se može vidjeti izgled prednje konkavne površine.



Slika 3.2. – Sjena od grijača stvorena na površini prilikom rada solarnog tanjura

Grijač je toplinski izoliran s 20 mm sloja kamene vune ($\lambda = 0,039 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pri $50 \text{ }^\circ\text{C}$), koja je dodatno zaštićena samoljepljivom aluminijskom folijom. Konkavna površina izrađena od bakra obojana je crnom matiranom bojom zbog većeg upijanja Sunčevog zračenja (Slika 3.4), dok je korištena boja otporna na temperature do 800°C .

Na slici 3.5. prikazano je fokusiranje sunčevog zračenja na konkavni grijač [4].



Slika 3.3. – Konkavna prednja površina grijača izrađena od bakra



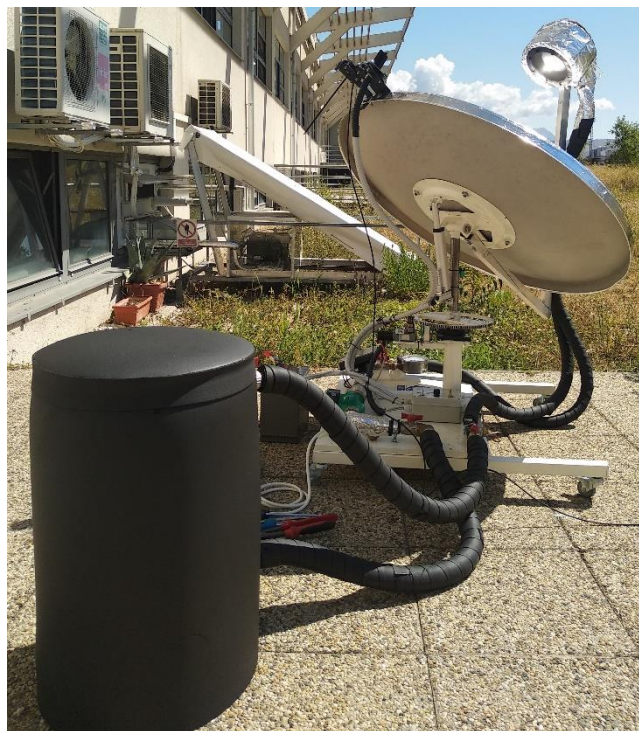
Slika 3.4. – Grijač nakon izoliranja i bojenja prednje površine

Na grijač su spojene dvije cijevi za dovod i odvod vode u grijač, dok je odvod vode iz grijača direktno priključen na akumulacijski spremnik. Akumulacijski spremnik izveden je kao atmosferska posuda izrađena od nehrđajućeg čelika SAE 304 (Slika 3.6). Zapremina spremnika iznosi oko 25 l, dok su dimenzije spremnika $\varnothing 273 \times 3$ mm i visina 450 mm. Kako

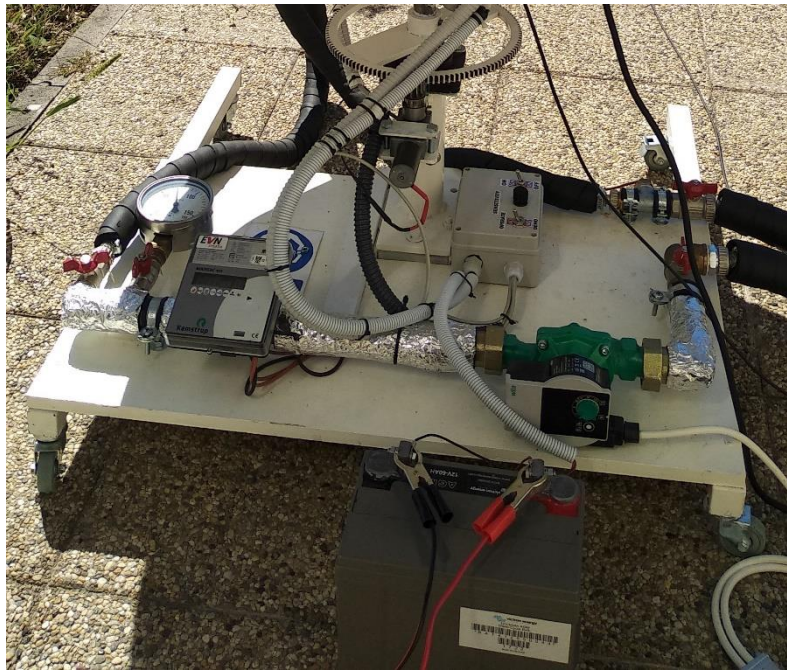
bi se smanjio gubitak toplinske energije pohranjene u spremniku, isti je izoliran s dva sloja fleksibilne izolacijske ploče debljine 19 mm ($\lambda = 0,033 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pri 0°C). Na vrhu spremnika izveden je priključak za dovod zagrijane vode, dok je pri dnu spremnika izveden priključak za odvod vode prema grijaču (Slika 3.6). Volumni protok vode reguliran je frekventno upravljanom crpkom, dok se mjerenje volumnog protoka, temperature polaznog i povratnog voda vrši pomoću ultrazvučnog mjerača protoka visoke preciznosti (Slika 3.7) [4].



Slika 3.5.- Fokusiranje sunčevog zračenja na grijaču

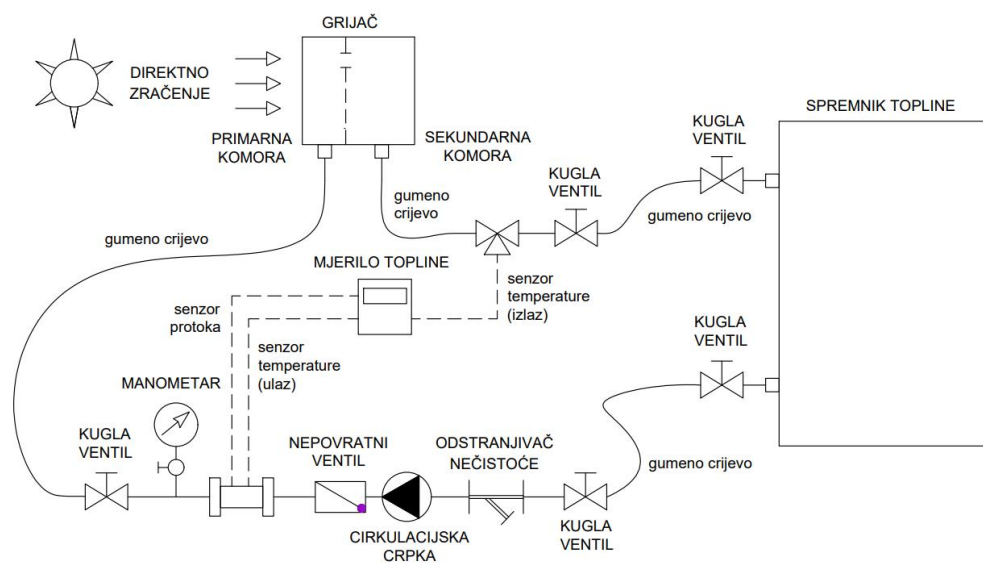


Slika 3.6. – Prikaz odvoda i dovoda vode koja se nalazi u spremniku



Slika 3.7. - Prikaz cirkulacijske pumpe i ultrazvučnog mjeraca protoka

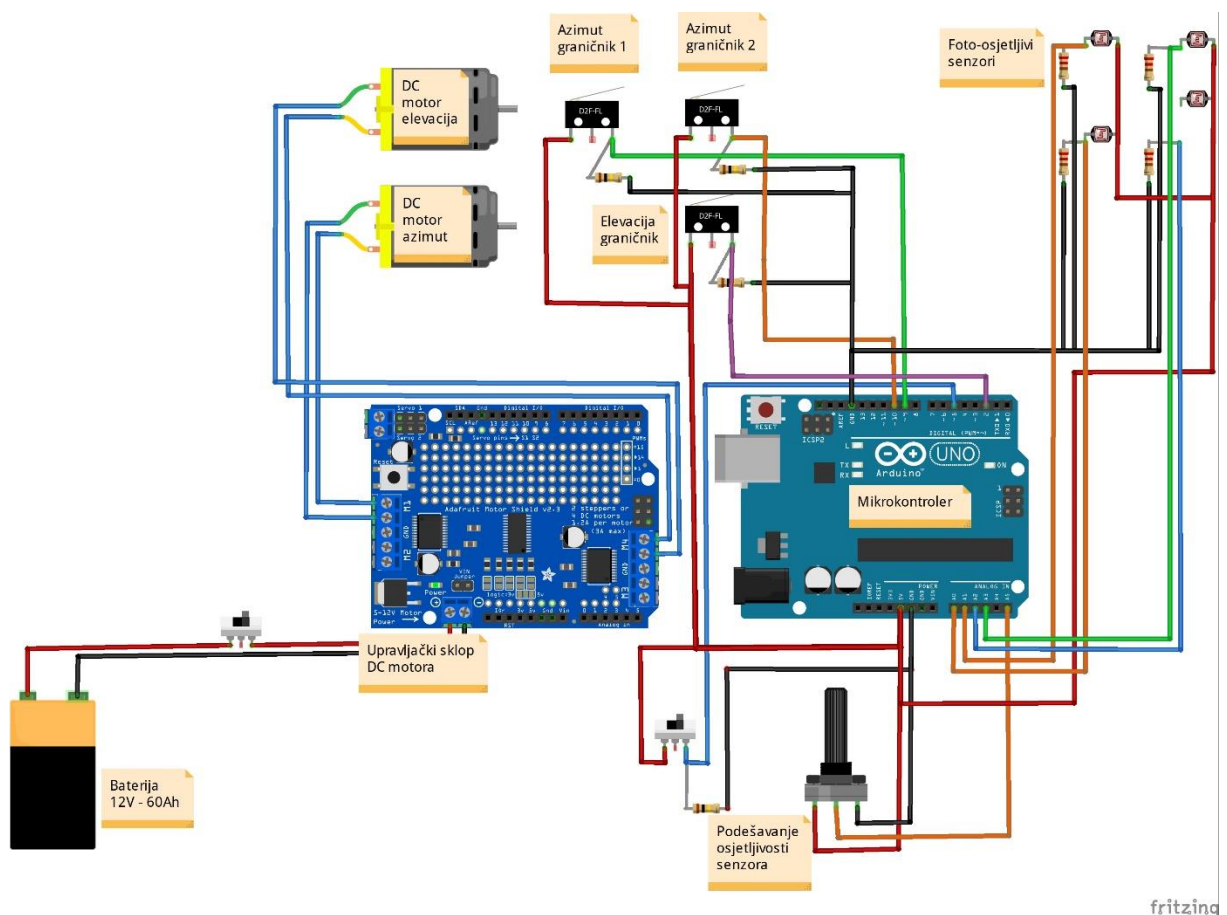
Hidraulička shema sustava prikazana je na Slici 3.8. Sustav je opremljen mjernom i regulacijskom opremom, pri čemu je veza između grijača, spremnika topline i mjerno-regulacijskog sustava ostvarena gumenim armiranim crijevima koje su dodatno toplinski izolirane fleksibilnom izolacijom debljine 9 mm ($\lambda = 0.033 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pri 0°C).



Slika 3.8. – Shema hidrauličkog sustava [4]

Kako bi se zadržao točan položaj fokusirane sunčeve energije na fokalnoj dužini, potrebno je precizno pozicionirati solarni tanjur prema Suncu, kako bi sunčeve zrake uvijek padale okomito na konkavni parabolični koncentrador. Cijeli sustav kojim se solarni tanjur pozicionira u potrebni položaj pogonjen je energijom iz akumulatorske baterije 12 V i 60 Ah, pri čemu je za potrebe rada cirkulacijske crpke korišten mrežni izmjenjivač. Ostali sustavi direktno su spojeni na izvor istosmjernje struje, napona 12 V. Sustav za pozicioniranje u skladu s položajem Sunca, te izvršni elementi upravljani su pomoću mikroprocesorskog kontrolnog sustava (Slika 3.9). Linearni aktuator koristi se za podešavanja kuta elevacije (vertikalni pomak) dok se za podešavanje kuta azimuta (horizontalni pomak) koristi zupčasti prijenos. Precizno pozicioniranje postiže se primjenom četiri fotoosjetljiva otpornika, spojena u križnom sjenilu (Slika 3.10).

Na sustav je spojen piranometar (model Huxeflux LP02) koji preko senzora mjeri dozračenu sunčevu energiju (Sl. 3.10.) [4].



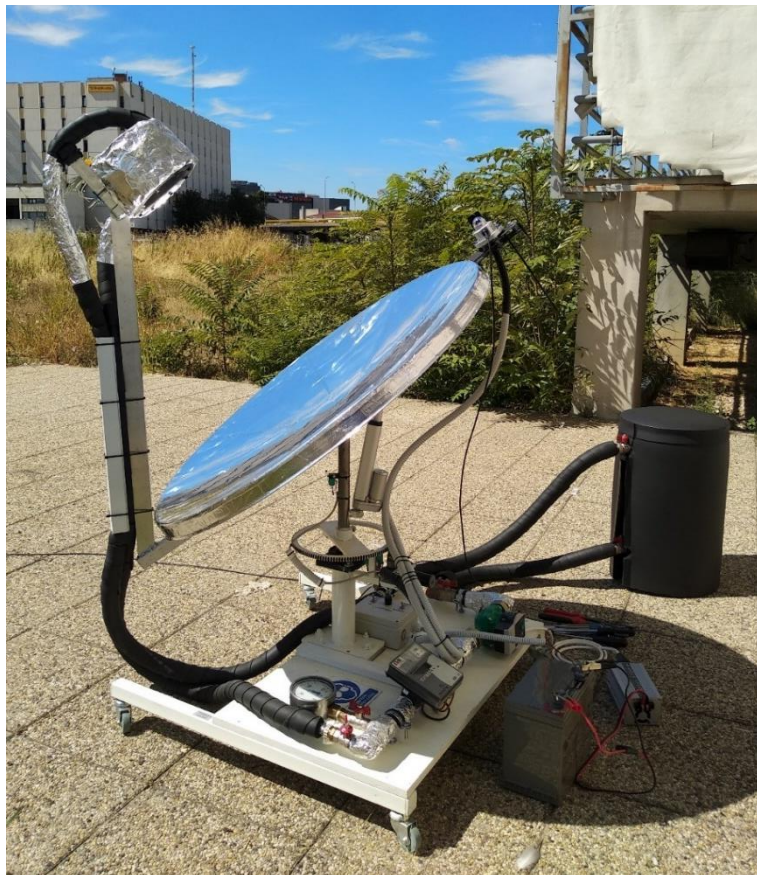
Slika 3.9. – Shema spajanja sustava upravljanja [4]



Slika 3.10. – Spojeni fotoosjetljivi osjetnik i piranometar

4. Mjerenje radnih parametara konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora

Namjena sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora je zagrijavanje vode koja se pohranjuje u spremniku volumena 25 l. U svrhu reprezentativnog mjerenja radnih parametara odabran je dan bez naoblake s obzirom da sustav koristi samo izravnu komponentu sunčevog zračenja. Tijekom mjerenja evidentirana je promjena dozračene energije Sunca tijekom perioda mjerenja, te volumni protok i temperature polaznog i povratnog voda recirkulirajuće vode. Prikladnim proračunima definirane su vrijednosti trenutne snage koncentratora, trenutne snage grijača, trenutne učinkovitosti sustava, te ukupna učinkovitost nakon završetka rada sustava.

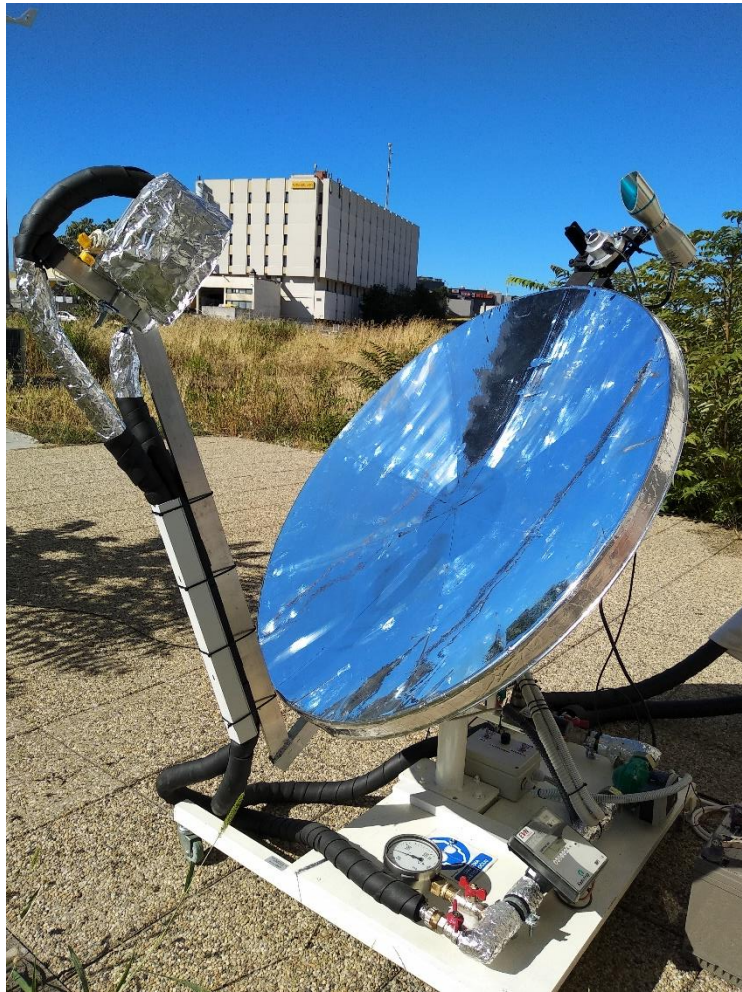


Slika 4.1. – Parabolični solarni koncentrator u radu

4.1. Rezultati mjerenja

U svrhu izrade završnog rada izvršena su dva mjerenja, probno mjerenje u svrhu upoznavanja s radom sustava i podešavanja radnih parametara, te konačno mjerenje čiji rezultati su

prezentirani u nastavku. Oba mjerenja provedena su na lokaciji Kopilica 21, u Splitu (N: 43°31'21“, E: 16°27'6“), dana 30. kolovoza 2021., pri jutarnjoj temperaturi zraka od 25°C, te u vremenskom periodu od 8:45 do 14:00 sati. Na obodu tanjura solarnog koncentratora postavljene su na prikladnim nosačima uređaj za mjerenje ukupnog sunčevog zračenja (piranometar), te uređaj za mjerenje izravnog sunčevog zračenja (pirheliometar), kao što je prikazano na slici 4.2.



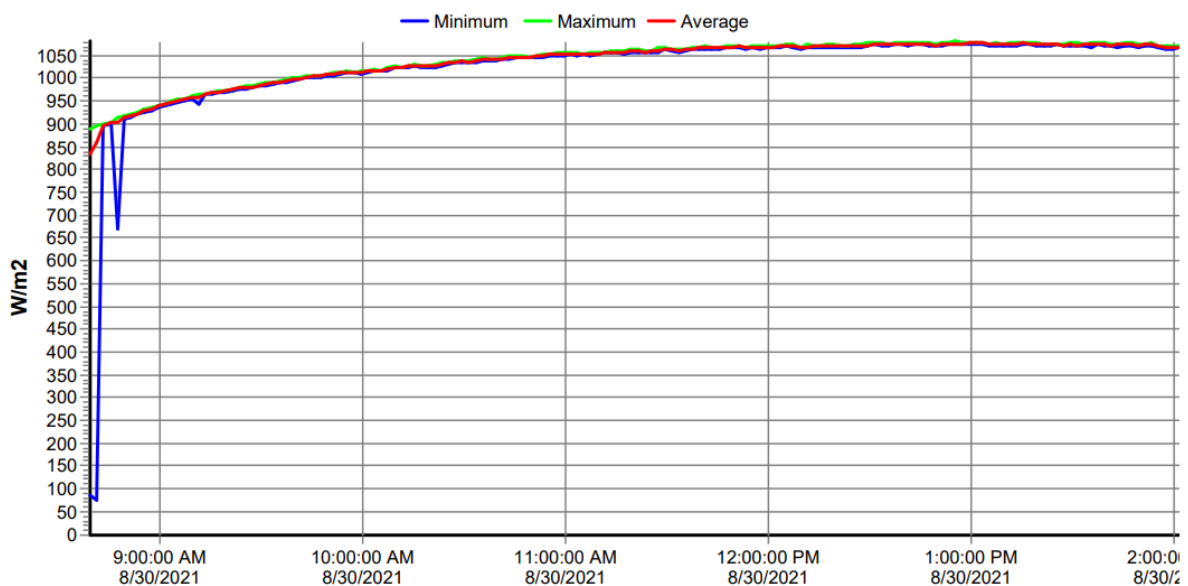
Slika 4.2. – Piranometar i pirheliometar spojeni na solarni koncentrator

Vrijednosti ukupnog Sunčevog zračenja očitavane su i snimane putem piranometra i pripadajućeg snimača podataka (eng. dataloggera). Primjenom programa za očitavanje i vizualizaciju izmjerenih podataka može se grafički prikazati promjena intenziteta sunčevog zračenja tijekom perioda mjerenja. Na slici 4.4. može se minimalna, maksimalna i prosječna vrijednost ukupne dozračene sunčeve snage (W/m^2) od početka mjerenja u 8:45 sati do

završetka mjerenja u 14:00 sati. Prema slici 4.4. može se vidjeti da je maksimalno ukupno Sunčevo zračenje očitano u 13:00 sati u iznosu od 1078 W/m^2 .



Slika 4.3. – Piranometar i pirheliometar u radu



Slika 4.4. – Rezultati ukupnog Sunčevog zračenja

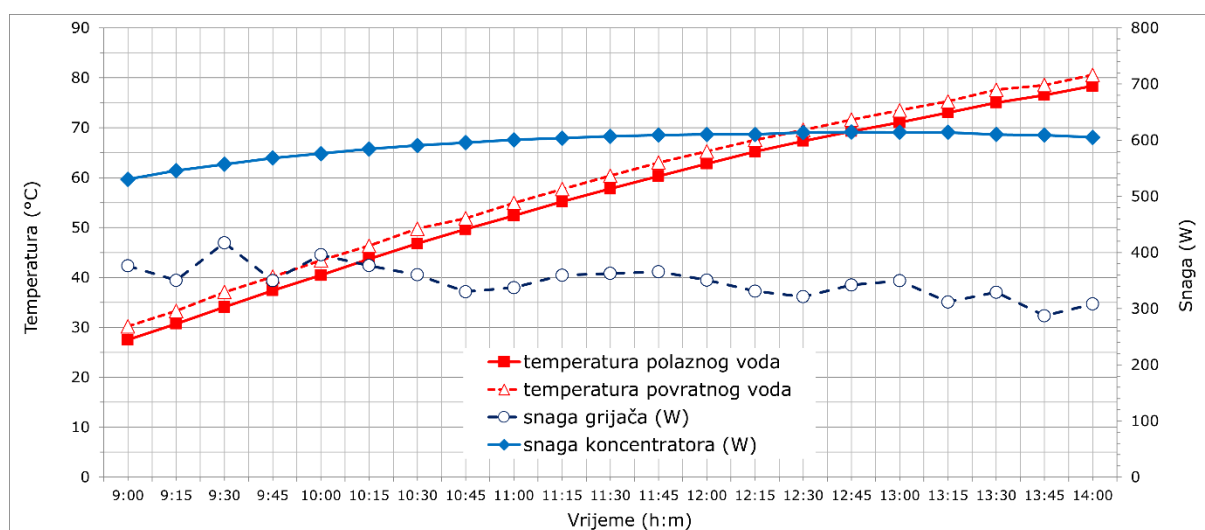
Također se na prvom mjerenju može uočiti značajno smanjenje minimalnog ukupnog Sunčevog zračenja, što se može pripisati početnom podešavanju piranometra i stvaranju sjene tijekom podešavanja mjerne opreme.

Očitanje radnih parametara sustava izvršeno je svakih 15 minuta što je odabrano kao dovoljno dug vremenski period za evidentiranje trenda promjene radnim parametara a uzimajući u obzir inertnost njihove promjene. U spremniku se nalazilo 20 l vode početne temperature vode od 24,4°C. Tijekom mjerenja temperaturna razlika između vode polaznog i povratnog voda (ulaz i izlaz iz grijača) iznosila je oko 2,5°C. Očitanjem volumnog protoka na ultrazvučnom mjerачu protoka proizlazi da je prosječno volumni protok iznosio oko 120 l/h (2 l/min). Svakim očitanjem razlike temperatura vode između polaznog i povratnog voda, te volumnog protoka vode, izvršen je proračun trenutne snage grijača prema jednadžbi (4.1):

$$Q_R = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

gdje je Q_R snaga grijača, \dot{V} je volumni protok vode, ρ gustoća vode, c toplinski kapacitet vode, a Δt je razlika temperature vode. Rezultati proračuna pokazali su da se snaga grijača mijenjala između 287,2 W i 417,2 W (Slika 4.5).

Snaga koncentratora Q_C rezultat je produkta izračunate vrijednosti direktne snage Sunčevog zračenja i efektivne površine solarnog tanjura (0,7207 m²). Snaga koncentratora iznosila je između 500 i 600 W, s najvećom vrijednošću od 614,3 W (Slika 4.5).



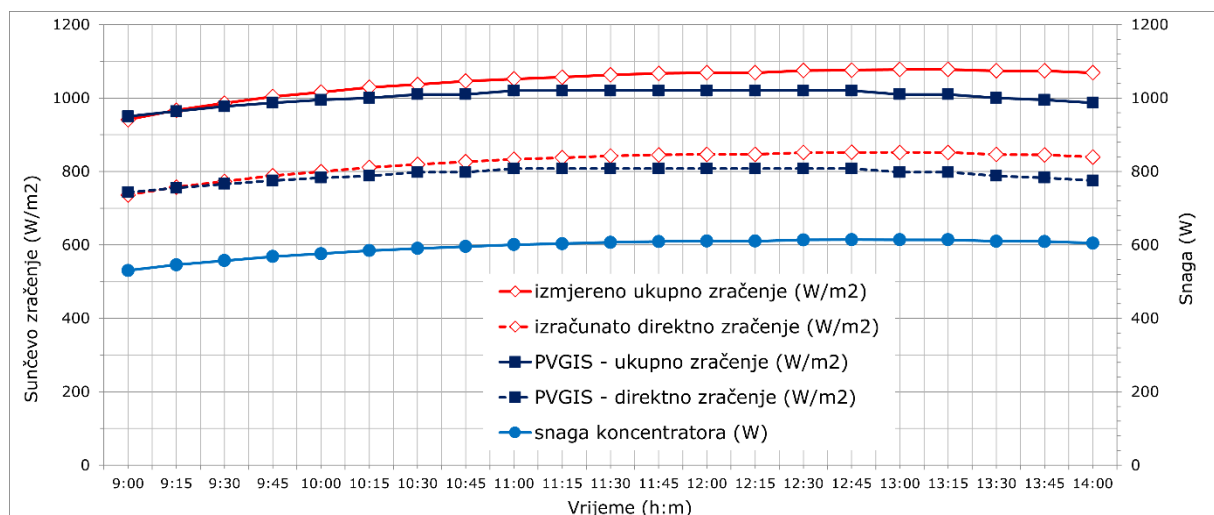
Slika 4.5. – Snaga solarnog paraboličnog koncentratora i promjena temperature vode pri odvodu i dovodu u spremnik

Na početku mjerenja temperatura polazne vode iznosila je oko 27°C , dok je na kraju mjerenja temperatura polazne vode (izlaz iz spremnika, prije ulaska u grijač) iznosila je oko $78,4^{\circ}\text{C}$. Konačno, temperatura vode na izlazu iz grijača (prije ulaska u spremnik), na kraju mjerenja dosegla je temperaturu od oko $80,6^{\circ}\text{C}$.

Rezultati ovisnosti temperature i snage u vremenu prikazani su na slici 4.5.

Iako je tijekom mjerenja korišten instrument za mjerenje direktne komponente sunčevog zračenja (pirheliometar), dobiveni podaci mjerenja nisu korišteni u svrhe izrade ovog rada. S obzirom da je već publicirana analiza radnih parametara izvršena uz primjenu grijača s ravnom površinom [5], pri čemu je za mjerenje količine sunčevog zračenja korišten mjerni instrument za mjerenje ukupnog sunčevog zračenja (piranometar), i ovdje će biti primijenjen korekcijski faktor prema proračunu izrađenom na osnovu podataka preuzetih s kalkulatora sunčeve energije PVGIS.

Kao što je već napomenuto, za izračun direktne komponente sunčevog zračenja korišten je omjer izravne komponente i ukupnog Sunčevog zračenja [5]. U svrhu prikaza snage koncentrataora, korištena je izračunata direktna komponenta sunčevog zračenja i efektivna površina tanjura. Sa slike 4.6. može se vidjeti da je snaga koncentrataora bila oko 600 W, dok se izračunati iznos direktnog zračenja kretao od $702,8 \text{ W/m}^2$ do $851,7 \text{ W/m}^2$.



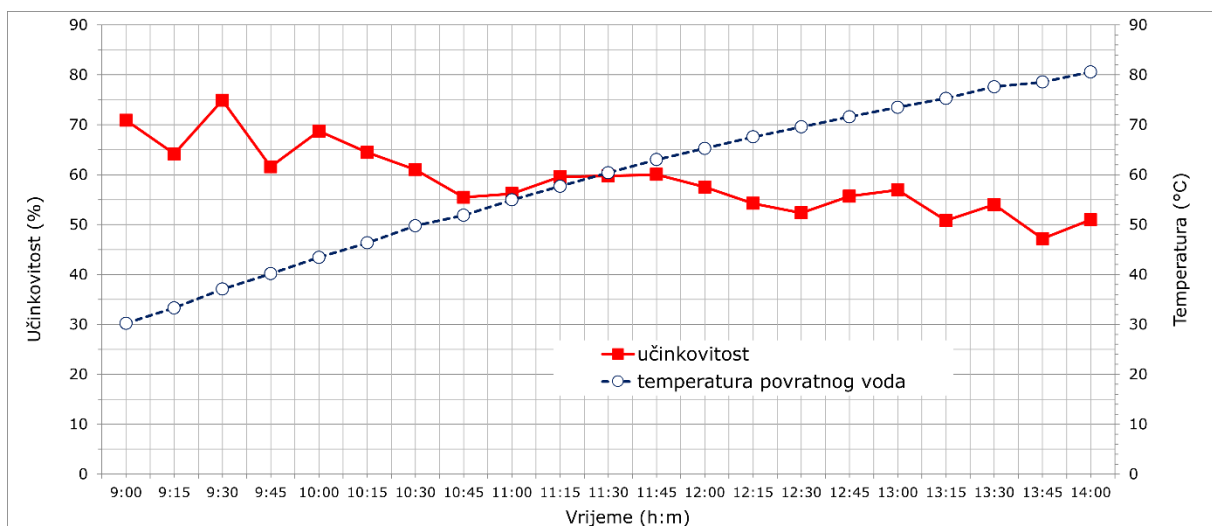
Slika 4.6. – Izračunata i izmjerena Sunčeva zračenja te snaga koncentrataora

Omjerom trenutne snage grijača i trenutne snage koncentrataora može se ilustrirati trenutna iskoristivost procesa pretvorbe energije Sunca u toplinsku energiju na grijaču, kao što je

prikazano na slici 4.7. Prosječna vrijednost učinkovitosti pretvorbe energije na grijaču iznosi oko 58,9 %. Može se vidjeti da porastom temperature vode dolazi do pada učinkovitost pretvorbe toplinske energije jer se s povećanjem temperature povećavaju i toplinski gubici prema okolišu. Pri najnižoj temperaturi vode učinkovitost je najviša i iznosila je oko 71 %, dok na kraju mjerenja, odnosno, pri najvišoj temperaturi vode, učinkovitost je iznosila oko 51 %. Pri tome je korištena slijedeća jednadžba za izračun učinkovitosti grijača:

$$\eta_{\text{prosječno}} = \frac{Q_R}{Q_C} \cdot 100 (\%) \quad (4.2)$$

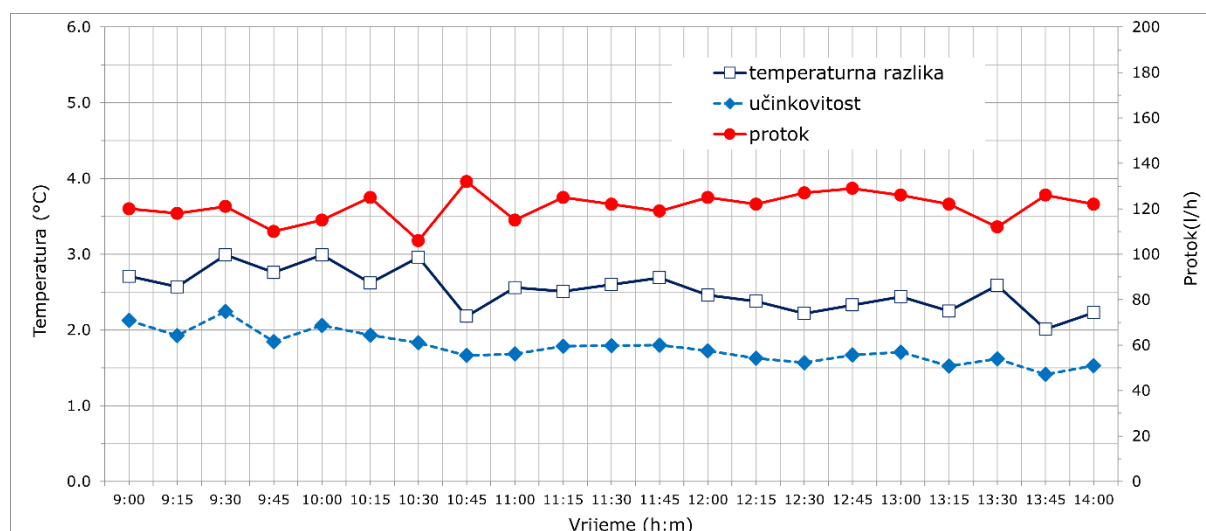
Analizom ukupno pohranjene toplinske energije u spremnik, a u odnosu na dozračenu energiju Sunca i vremenski period mjerenja, proizlazi ukupna učinkovitost pretvorbe energije sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora u iznosu od oko 41 %.



Slika 4.7. – Učinkovitost sustava i temperatura povratnog voda

Iz slike 4.8. može se vidjeti promjena volumnog protoka tijekom mjerenja koja je direktno utjecala na trenutnu vrijednost snage grijača. Povećanjem temperature cirkulirajuće vode i njenih fizikalnih svojstava bilo je potrebno tijekom mjerenja vršiti korekciju volumnog protoka kako bi se isti održao što je bilo više moguće u vrijednosti od oko 120 l/h.

Prema Slici 4.8 vrijednost volumnog protoka kretala se između 106 l/h do 132 l/h.



Slika 4.8. – Ovisnost protoka i temperaturne razlike po jedinici vremena

4.2. Usporedba rezultata mjerenja

Tijekom mjerenja koje je već publicirano [3] korišten je grijač koji je imao ravnu površinu na koju je fokusirana energija Sunca. U ovom završnom radu korištena je nova izvedba grijača koji ima konkavnu površinu na koju dozračuje fokusirana energija Sunca (Slika 4.9). Oba grijača imaju jednaku izvedbu posude, dok je jedina razlika u izvedbi prednje površine izrađene od bakarnog lima. Izvedbom novog grijača pokušala se povećati efikasnost pretvorbe energije na grijaču. Kako bi se teoretski poboljšala pretvorba energije novi grijač je izveden s konkavnom površinom, ali je pri tome korišten deblji bakarni lim uslijed zahtjeva proizvodnog postupka željene geometrije prednje ploče grijača. Time je nažalost povećan i toplinski otpor prednje ploče grijača, te snižen intenzitet kondukcije toplinske energije.

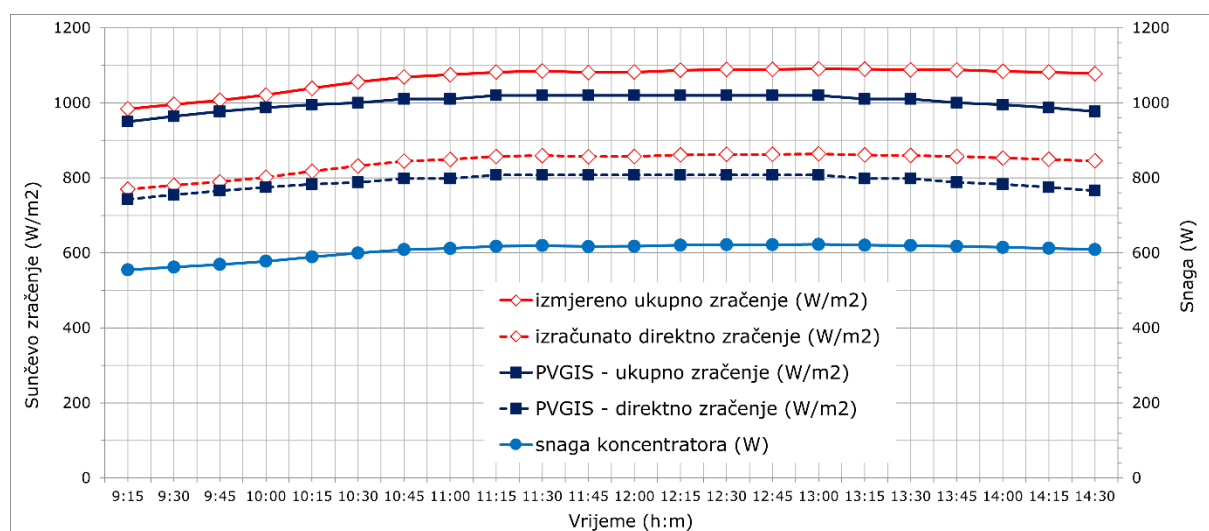
Koristeći rezultate prethodnog mjerenje dobivene kalkulatorom sunčeve energije PVGIS, može se prikazati razlika između vrijednosti dozračenih energija Sunca za oba provedena mjerenja (za različite izvedbe grijača).

Prema slici 4.10, tijekom prethodnog mjerenja (ravni grijač) postignute su nešto više vrijednosti dozračene energije Sunca, pri čemu je maksimalno izmjereno ukupno zračenje dosegnuto u 13:00 h u iznosu od 1091 W/m^2 [3], dok je tijekom mjerenja provedenog u okviru ovog završnog rada također u 13:00 h dosegnuta najviša vrijednost od 1078 W/m^2 .

Najviša izračunata vrijednost direktnog Sunčevog zračenja u 12:45 h doseže vrijednost od $861,2 \text{ W/m}^2$ [3], u okviru novog mjerenja ista iznosi oko $852,4 \text{ W/m}^2$, također u 12:45 h.



Slika 4.9. – Fokusiranje Sunčevog zračenja na grijaču: a) ravni grijač [3], b) konkavni grijač

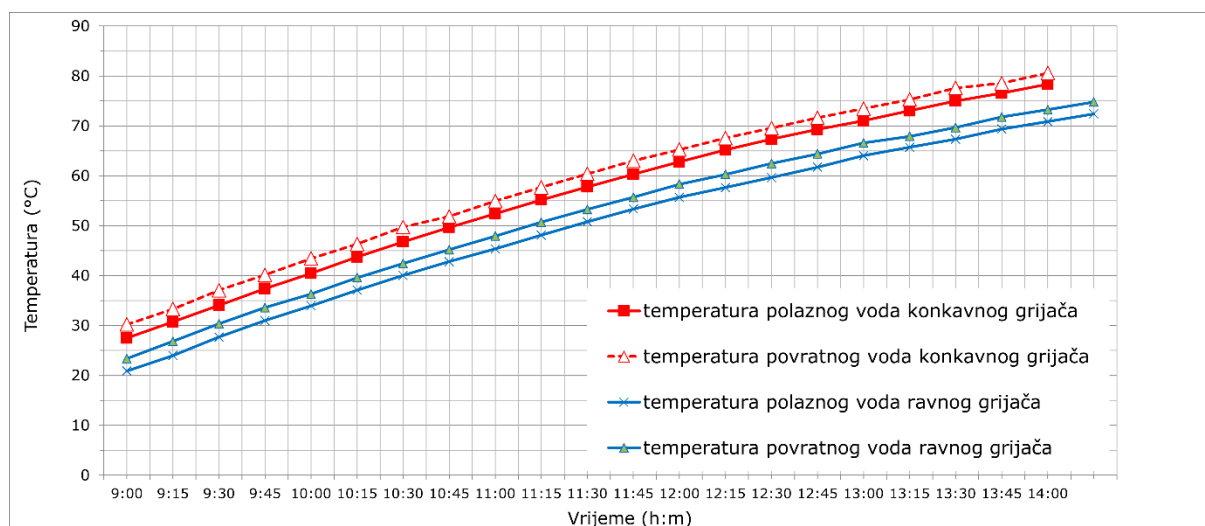


Slika 4.10. – Prethodni podatci izmjerelog i izračunatog Sunčevog zračenja [3]

Iz navedenog proizlazi da su tijekom oba mjerenja vrijednosti Sunčevog zračenja bile približno jednake što omogućuje usporedbu obaju izvedbi grijača. Uspoređujući rezultate izmjerenih radnih parametara za oba mjerenja proizlazi da unatoč promjeni grijača nije došlo do značajnije promjene u radu konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora.

Na slici 4.11 prikazan je promjena temperatura polaznog i povratnog voda za oba mjerenja. Početna temperatura vode pri upotrebi ravnog grijača iznosila je $18,2^{\circ}\text{C}$, dok je početna temperatura vode pri upotrebi konkavnog grijača iznosila oko $24,4^{\circ}\text{C}$. Iz slike 4.11 vidljiv je jednaki trend porasta temperatura vode, ali i jednaki trend razlike između temperatura polaznog i povratnog voda. Kontinuiranim porastom temperatura, temperatura polaznog voda za ravni grijač dosegla je temperaturu od oko $72,4^{\circ}\text{C}$, dok je temperatura povratnog voda bila oko $74,8^{\circ}\text{C}$ ($\Delta t = 2,4^{\circ}\text{C}$). Za konkavni grijač temperatura polaznog voda dosegla je temperaturu od oko $78,4^{\circ}\text{C}$, dok je temperatura povratnog voda bila oko $80,6^{\circ}\text{C}$ ($\Delta t = 2,2^{\circ}\text{C}$). Proizlazi da je u oba režima rada povećanje temperature vode od početka do kraja mjerenja iznosilo oko 54°C .

Proizlazi da je razlika u temperaturama za oba grijača uzrokovana različitim vrijednostima početne temperature vode na početku mjerenja. Na slici 4.11. vidi se jednaki prirast temperature vode za oba grijača, na osnovu čega se može zaključiti da bi u slučaju da su početne temperature vode za oba grijača bile jednake, bile jednake i konačne temperature vode.

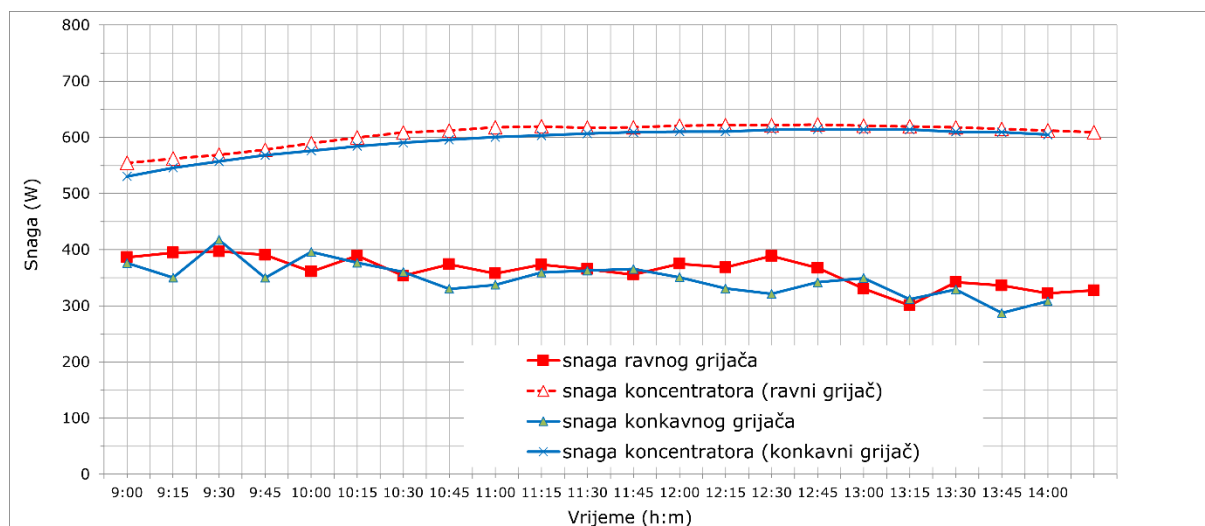


Slika 4.11. – Usporedba temperature polaznog i povratnog voda konkavnog i ravnog grijača

[3]

Na slici 4.12 može se vidjeti da je snaga koncentratora za oba grijača bila približno jednake vrijednosti, čak malo veća u slučaju ravnog grijača što može biti uslijed nešto većih vrijednosti zračenja Sunca tijekom mjerenja s ravnim grijačem. Snaga koncentratora je općenito varirala tijekom mjerenja između vrijednosti od 530 W do 623 W.

Vrijednosti izračunate snage grijača prikazane su također na slici 4.12. Iz slike je vidljivo da su snage grijača približno jednake, uz male oscilacije koje su uzrokovane količinom dozračene sunčeve energije i promjenjivosti volumnog protoka vode. Oba sustava pokazuju padajući trend vrijednosti snage, što je u skladu sa smanjenjem iskoristivosti i povećanjem temperature vode u sustavu. Na početku mjerenja snaga grijača iznosi oko 400 W, dok pri kraju mjerenja se približava vrijednosti od 300 W.



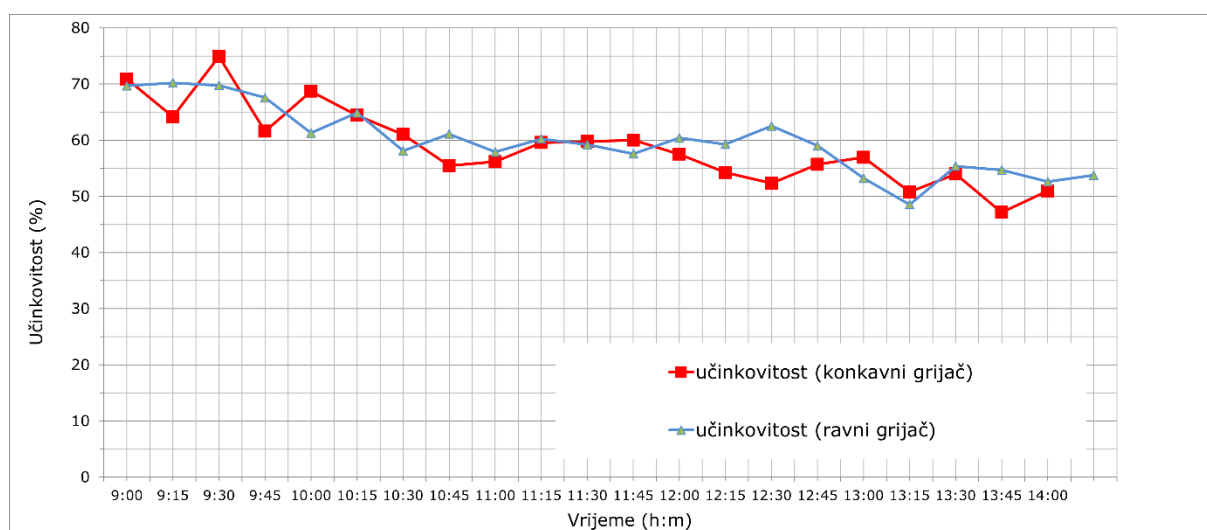
Slika 4.12. – Usporedba snage ravnog i konkavnog grijača, usporedba snage koncentratora [3]

Na slici 4.13 prikazana je vrijednost trenutne učinkovitosti sustava za oba grijača. Iz slike je vidljivo da je i trenutna učinkovitosti obaju sustava približno jednakih vrijednosti. Vrijednosti prosječne učinkovitosti grijača istog su reda veličine. Tijekom rada sustava s konkavnim grijačem postignuta je prosječna učinkovitost grijača od oko 58,9 %, dok je ista tijekom rada sustava s ravnim grijačem iznosila oko 59,9 %.

Manja razlika u vrijednostima uočena je pri analizi ukupne učinkovitosti pretvorbe energije Sunca u toplinsku energiju pohranjenu u spremniku. Ukupna učinkovitost predstavlja omjer ukupno pohranjene toplinske energije u spremniku (Wh) i ukupne dozračene energije Sunca

(Wh) na površinu solarnog tanjura. Tijekom rada sustava s konkavnim grijačem postignuta je ukupna učinkovitost od oko 41 %, dok je pri radu s ravnim grijačem postignuta ukupna učinkovitost od 38,6 % [3]. Rezultat toga može biti uslijed povećanja toplinske izolacije spremnika vode, koje je naknadno izvedeno nakon rada sustava s ravnim grijačem.

Također, na porast učinkovitosti utjecala je i viša temperatura okolnog zraka što je smanjilo ukupne toplinske gubitke prema okolini. Pri mjerenju s ravnim grijačem (u travnju) temperatura zraka je bila oko 20°C, dok je mjerenje s konkavnim grijačem (u kolovozu) izvršeno pri temperaturi zraka od oko 25°C [3].



Slika 4.13. – Usporedba učinkovitosti sustava [3]

5. Zaključak

U završnom radu prikazani su radni parametri laboratorijskog sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora, te je izvršena usporedba rada sustava pri različitim izvedbama grijača, s ravnom i konkavnom površinom na koju dozračuje fokusirana energija Sunca.

Tijekom rada sustava izvršeno je mjerenje ukupnog sunčevog zračenja, volumnog protoka vode koja se zagrijava pomoću energije Sunca, te temperatura vode prije i nakon grijača. Iz izmjerenih vrijednosti izvršen je proračun snage koncentratora, snage grijača, trenutne i prosječne učinkovitosti grijača, te ukupne učinkovitosti procesa pretvorbe energije Sunca u toplinsku energiju pohranjenu u volumenu od 20 litara vode.

Usporedbom sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora s ravnim grijačem i s grijačem koji ima konkavnu površinu proizlazi da oba sustava rada pri radnim parametrima istog reda veličine. Odnosno, izvedbom novog grijača nije postignuto povećanje učinkovitosti kao što se očekivalo.

Ostvareni porast temperature vode tijekom rada oba sustava je približno jednak i iznosi oko 54°C. Grafičkim prikazom rezultata uočen je i isti trend porasta temperatura za oba mjerenja. Snaga koncentratora bila je također približno jednaka za oba sustava, između 530 W i 623 W tijekom perioda mjerenja. Snage grijača istog su reda veličine, uz neke manje razlike prvenstveno uzrokovane uslijed promjenjivosti volumnog protoka vode. Snaga grijača iznosila je od 300 do 400 W. Izračunate prosječne vrijednosti učinkovitosti grijača gotovo su jednake vrijednosti, te iznose oko 58,9 % za sustav s konkavnim grijačem i oko 59,9% za sustav s ravnim grijačem. Tijekom rada sustava s konkavnim grijačem postignuta je ukupna učinkovitost od oko 41 %, dok je pri radu s ravnim grijačem postignuta ukupna učinkovitost od 38,6 %, što je vjerojatno uzrokovano povećanjem sloja toplinske izolacije spremnika vode, a ne uslijed upotrebe grijača s konkavnom površinom.

Nastavak analize radnih parametara laboratorijskog sustava konkavnog paraboličnog solarnog koncentratora trebao bi uključiti rezultate mjerenja direktne komponente sunčevog zračenja upotrebom pirheliometra, postizanje približno konstantne vrijednosti volumnog protoka vode, te eventualnu izvedbu konkavnog grijača iz tanjeg bakarnog lima.

Literatura

1. Günther M., Shahbazfar R.: *Solar Dish Technology*, Chapter 2, Advanced CSP Teaching Materials, 2011.
2. Günther M., Shahbazfar R.: *Solar Dish Technology*, Chapter 7, Advanced CSP Teaching Materials, 2011.
3. Hrgović M.: *Net Efficiency of a Parabolic Dish Concentrator*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, Hrvatska
4. Jankoski Z., Gabrić I., Vrljićak I.: *Od satelitske antene do solarnog paraboličnog tanjura*, Domaće rješenje za više energije od Sunca, EGE 1/2019
5. Jankoski Z., Gabrić I., Vrljićak I.: *Od satelitske antene do solarnog paraboličnog tanjura*, Mjerenjem do povećanja učinkovitosti, EGE 3/2019
6. Chalkias C., Faka A., Kalogeropoulos K.: *Assessment of the Direct Sun-Light on Rural Road Network through Solar Radiation Analysis Using GIS*, Open Journal of Applied Sciences, 2013.
7. Hafez A. Z., El-Metwally K., Soliman A., Ismail I.: *Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis*, Energy Conversion and Management, kolovoz, 2016.
8. Ramde E. W., Tchao E. T., Fiagbe Y. A., Kponyo J. J., Atuah A. S.: *Pilot Low-Cost Concentrating Solar Power Systems Deployment in Sub-Saharan Africa: A Case Study of Implementation Challenges*, Sustainability, kolovoz, 2020.