

Odabir rješenja solarnog toplovodnog sustava u zgradi gotovo nulte energije

Bigović, Dorotea

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:834296>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-06**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dorotea Bigović

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Dorotea Bigović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći navedenu literaturu i znanja stečena tijekom studija.

Posebno se zahvaljujem svome mentoru, dr. sc. Damiru Doviću na strpljenju i savjetima koje mi je dao pri izradi završnog rada te na literaturi koja mi je pomogla pri pisanju rada.

Dorotea Bigović

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Dorotea Bigović

Mat. br.: 0035208979

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Odabir rješenja solarnog toplovodnog sustava u zgradi gotovo nulte energije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Solution of the solar hot water system in nearly zero-energy building**

Opis zadatka:

U sklopu završnog rada potrebno je dati rješenje solarnog toplovodnog sustava za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode (PTV) u odabranoj zgradi gotovo nulte energije smještenoj u klimatskom području Zagreba.

Dijelove, dimenzije i toplinski učin sustava prilagoditi veličini i toplinskim potrebama zgrade te minimalnim uvjetima na zgrade gotovo nulte energije iz odgovarajućih tehničkih propisa.

Proračune je potrebno provesti koristeći:

- satnu metodu iz norme za proračun solarnih toplovodnih sustava HRN EN 15316-4-3:2017;
- satnu metodu za dinamički proračun spremnika tople vode prema HRN EN 15316-5:2017 s podjelom spremnika na jedan volumni dio (Metoda B).

Solarni toplovodni sustav je potrebno tako dimenzionirati da njime prikupljena toplinska energija pokriva najmanje 30% ukupnih godišnjih energetske potreba zgrade za grijanje prostora i pripremu PTV-a, te da pri tome period povrata investicije u predmetni sustav bude najmanji.

Rezultate proračuna usporediti s onima dobivenim računalnim programom MGIPU Energetski certifikator.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:

1. rok: 18 veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Damir Dović

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD U SOLARNE SUSTAVE	1
2. SUNČEVO ZRAČENJE [2]	2
2.1. Solarni kolektori	3
2.2. Pločasti kolektori [3]	3
2.3. Vakuumski kolektori [3]	4
3. SOLARNI TOPLOVODNI SUSTAVI.....	5
3.1. Efikasnost solarnih sustava	7
4. METODE PRORAČUNA SUSTAVA	9
4.1. Norma EN 15316-4-3:2017; Metoda 3 [5].....	9
4.2. Norma EN 15316-5:2017; Metoda B [6]	12
4.3. MGIPU Energetski certifikator [7].....	15
5. ULAZNI PODACI I DEFINIRANJE MODELA	16
6. REZULTATI I ANALIZA	19
6.1. Period povrata investicije [2]	19
6.2. Tehnološki i ekonomski optimum.....	20
6.3. Energija prikupljena solarnim sustavom	23
6.4. Usporedba rezultata sa MGIPU Energetskim certifikatorom.....	26
6.5. Pomoćna energija	28
6.6. Akumulacijski spremnik	29
6.7. Temperatura vode u spremniku.....	31
6.8. Dodatni grijač.....	32

7. ZAKLJUČAK	34
LITERATURA	36

POPIS SLIKA

Slika 1 Shema solarnog sustava sa pločastim kolektorima [1]	1
Slika 2 Prikaz direktnog i difuznog zračenja [2].....	2
Slika 3 Pločasti kolektor sa označenim osnovnim dijelovima [3]	3
Slika 4 Vakuumski kolektor [3]	4
Slika 5 Toplovodni sustav s jednim spremnikom [2].....	5
Slika 6 Toplovodni sustav s dvostrukim spremnikom [2].....	6
Slika 7 Toplovodni sustav s protočnim grijačem [2]	6
Slika 8 Toplovodni sustav s dva spremnika [2]	7
Slika 9 Efikasnost različitih vrsta kolektora [2]	8
Slika 10 i 11 Usporedba gubitaka topline $Q_{sol;loop;ls,h}$ i toplinske energije na izlazu iz kolektorskog kuga $Q_{sol;loop;out}$ za dvije različite vrijednosti koeficijenta $H_{sol;loop}$	10
Slika 12 Shema matematičkog modela spremnika [6]	13
Slika 13 MGIPU Energetski certifikator, dio za uređivanje solarnih sustava.....	15
Slika 14 Prikaz raspodjele dnevne potrošnje PTV-a.....	16
Slika 15 Mjesečne vrijednosti sunčevog zračenja na nagnutu plohu	17
Slika 16 Dnevni profil grijanja.....	18
Slika 17 Podaci za zahtijevanu toplinu za grijanje iz MGIPU-a.....	18
Slika 18 Podaci za zahtijevanu toplinu za PTV iz MGIPU-a	18
Slika 19 Godišnja efikasnost sustava za različite površine kolektora i zapremnine spremnika....	20
Slika 20 Postotak pokrivenosti potreba za grijanje i PTV	21
Slika 21 Period povrata investicije.....	22
Slika 22 Temperatura u spremniku pri volumenu od 500 l i površini kolektora 6 m ²	22
Slika 23 Energija prikupljena solarnim sustavom.....	23
Slika 24 Prikaz temperature u spremniku i vanjske temperature	24
Slika 25 Prikaz udjela isporučene energije solarnim sustavom i potrebne za grijanje.....	24
Slika 26 Prikaz udjela isporučene energije solarnim sustavom i potrebne energije za PTV	25
Slika 27 Prikaz iskoristivosti kolektora u svim mjesecima.....	25
Slika 28 Usporedba prikupljene energije solarnim sustavom s dvjema metodama	26
Slika 29 Usporedba isporučene energije za grijanje	27
Slika 30 Usporedba isporučene energije za PTV	27
Slika 31 Pomoćna energija iz dvije metode	28
Slika 32 Usporedba gubitaka topline spremnika iz dvije metoda	29
Slika 33 Utjecaj koeficijenta izmjene topline na gubitke spremnika	30

Slika 34 Linearna aproksimacija koeficijenta $H_{sto;ls}$	30
Slika 35 Tehnički podaci Bosch spremnika [8]	31
Slika 36 Kretanje temperature u spremniku kroz više mjeseci	32
Slika 37 Energija dodatnog grijača	33
Slika 38 Cijene plina [10].....	33
Slika 39 Cijene struje [11].....	33

POPIS TABLICA

Tablica 1 koeficijenti za izračun toplinskih gubitaka petlje [5]	10
Tablica 2. Zadane vrijednosti parametara prema tipu i namjeni spremnika [6].....	13
Tablica 3. Karakteristike kolektora	17
Tablica 4. Godišnja efikasnost sustava za različite površine kolektora i zapremnine spremnika.	20
Tablica 5. Postotak pokrivenosti potreba za grijanje i PTV	21
Tablica 6. Usporedba godišnje isporučene energije	28
Tablica 7. Koeficijenti za izračun snage pumpe [5]	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A_{sol}	m^2	ukupna instalirana površina
$A_{sol;mod}$	m^2	površina jednog modula
N_{col}	-	broj kolektora
$H_{sol;loop}$	W/K	koeficijent toplinskih gubitaka u kolektorskoj petlji
$P_{sol;pmp}$	kWh	snaga pumpe kolektora
$P_{sol;ctrl}$	kWh	snaga regulacijskog sustava kolektora
L_i	m	duljina cjevovoda
$H_{pipe;i}$	W/Km	koeficijent toplinskih gubitaka izoliranog segmenta cijevi
d_a	m	debljina izolacije
λ_D	W/mK	toplinska vodljivost materijala
h_a	Wm^2/K	koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi
Ψ_j	W/m	koeficijent gubitaka izoliranih cijevi
$\vartheta_{col;avg,h}$	$^{\circ}C$	prosječna temperatura u kolektoru
$\vartheta_{sol;loop,h}$	$^{\circ}C$	temperatura na ulazu u kolektor
$\vartheta_{e,h}$	$^{\circ}C$	vanjska temperatura
$\vartheta_{sol;amb,h}$	$^{\circ}C$	temperatura zraka u prostoriji gdje je smješten kolektor
$I_{sol,h}$	W/m^2	sunčevo zračenje na kolektor
\dot{m}_{col}	kg/s	maseni protok kroz kolektor
c_w	J/kgK	toplinski kapacitet vode
T_h^*	Km/W	reducirana temperaturna razlika
$\eta_{col,h}$	-	učinkovitost kolektora u jednom satu
η_0	-	vršna učinkovitost kolektora
$K_{hem}(50^{\circ})$	-	faktor polukružne promjene kuta upadnog zračenja
a_1	W/m^2K	koeficijent toplinskih gubitaka kroz kolektor 1. reda

a_2	W/m^2K^2	koeficijent toplinskih gubitaka kroz kolektor 2. reda
$Q_{sol;gen;h}$	kWh	toplinska energija na apsorberu
$Q_{sol;out;h}$	kWh	toplinska energija na izlazu iz kolektora
t_{ci}	h	vremenski interval
$Q_{sol;loop;ls;h}$	kWh	toplinski gubici kolektorskog kruga
$Q_{sol;loop;out;h}$	kWh	isporučena toplinska energija solarnog sustava
$W_{sol;aux;h}$	kWh	ukupna pomoćna energija u satu
$V_{sto;tot}$	l	volumen spremnika
$C_{p;W}$	Wh/kgK	specifični toplinski kapacitet vode
$H_{sto;ls}$	W/K	koeficijent toplinski gubitaka u stanju pripravnosti
S	W	gubitak topline spremnika
$Q_{sto;ls}$	kWh	toplinski gubici u spremniku
$f_{sto;dis;ls}$		faktor gubitaka topline razvoda spojenog sa spremnikom
$\vartheta_{sto;t}$	°C	temperatura u spremniku
$\vartheta_{sto;tmp1}$	°C	temperatura u spremniku nakon korištenja PTV-a
$\vartheta_{W;out;min}$	°C	minimalna temperatura vode za PTV
$\vartheta_{sto;tmp2}$	°C	temperatura u spremniku nakon korištenja energije za grijanje
$\vartheta_{H;out;min}$	°C	minimalna temperatura vode za grijanje
$Q_{W;out}$	kWh	isporučena energija za potrošnu toplu vodu
ρ_w	kg/m^3	gustoća vode
$\Delta\vartheta_{sto}$	°C	porast temperature uzrokovan dobivenom energijom od kolektora
$\vartheta_{sol;loop;in}$	°C	temperatura na polazu u kolektorsku petlju
$Q_{H;out}$	kWh	isporučena energija za grijanje
$Q_{H;sto;out;req}$	kWh	zahtijevana energija za grijanje
$Q_{W;sto;out;req}$	kWh	zahtijevana energija za potrošnu toplu vodu
C_{invest}	kn	cijena investicijskih troškova
C_{col}	kn	cijena jednog kolektora

C_s	kn	cijena spremnika po volumenu
V_s	l	volumen spremnika
S	kn/a	ušteta na troškovima za gorivo
η_{kotoa}	-	učinkovitost kotla
H_d	J/kg	donja ogrijevna vrijednost goriva
C_G	kn/kg	cijena goriva
$\vartheta_{sol;mn}$	°C	temperatura vode u spremniku nakon dogrijavanja
$\Delta\vartheta_{exh}$	°C	srednja temperatura izmjenjivača
$Q_{H;sto;bu;in}$	kWh	energija za dogrijavanje
$H_{exh;sol}$	W/K	koeficijent izmjene topline izmjenjivača
m_{sol}	kg/s	maseni protok solarnog kruga

SAŽETAK

U ovome radu proveden je proračun za solarni toplovodni sustav čija je namjena priprema potrošne tople vode (PTV) i grijanje prostora u višestambenoj zgradi gotovo nulte energije smještenoj u klimatskom području Zagreba. Sustav je dimenzioniran tako da prikupljena toplinska energija pokrije 30% ukupnih godišnjih energetske potrebe zgrade, vodeći računa da period povrata investicije bude najmanji mogući. Algoritam proračuna proveden je prema satnoj metodi iz norme za proračun solarnih toplovodnih sustava HRN EN 15316-4-3:2017 i normi za dinamički proračun spremnika tople vode HRN EN 15316-5:2017 prema Metodi B u kojoj je spremnik podijeljen na jedan volumni dio. Obje metode su detaljno objašnjene te je provedena analiza dobivenih rezultata. Na kraju su dobiveni rezultati uspoređeni sa rješenjima dobivenim u računalnom programu MGIPU Energetski certifikator.

Ključne riječi: solarni toplovodni sustav, potrošna topla voda, prikupljena toplinska energija

SUMMARY

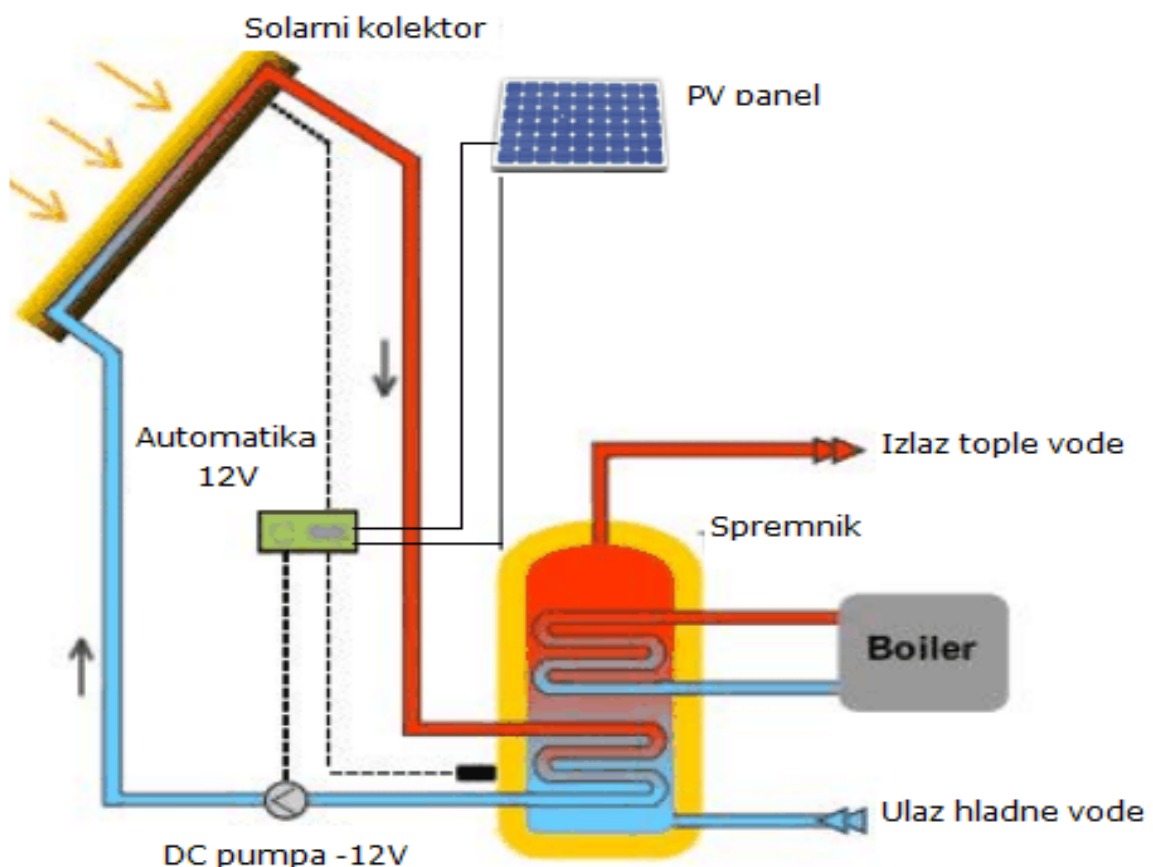
Optimization of solar system whose purpose is preparation of hot water and heating the living space of an apartment building with near zero energy placed in climate area around Zagreb is carried out in this bachelor`s thesis. Solar system is designed in such a way that gathered solar energy covers at least 30 % of overall yearly energy needs of the buiding`s residents, while taking into account of the length of return on investment period. Algorithm, by which the optimization is made, is conducted according to hourly method taken from the norm HRN EN 15316-4-3:2017 and from the method B from the norm, for calculation of constantly changing temperatures within the hot water storage tank, HRN EN 15316-5:2017. Both methods are thoroughly explained and analysis of the results is conducted. In the end, obtained results are compared with solutions that are provided by MGIPU energy certifier computer program.

Key words: solar hot-water system, domestic hot water, gatherd solar energy

1. UVOD U SOLARNE SUSTAVE

U današnje vrijeme sve je veća upotreba obnovljivih izvora energije, što zbog podizanja svijesti o očuvanju okoliša, iscrpljivanju i teškoj dostupnosti fosilnih goriva, ali i smanjenju ovisnosti o nestabilnim tržištima fosilnih goriva. Energija koja dolazi od Sunca zračenjem, osigurava uvjete da život na Zemlji bude moguć i svi oblici energije koji su dostupni čovječanstvu su direktno ili indirektno potekli od Sunca. Primjeri direktnog korištenja Sunčeve energije su za grijanje i hlađenje zgrada, za zagrijavanje potrošne tople vode, zagrijavanje vode u bazenima, desalinizaciju vode, proizvodnju električne struje itd.

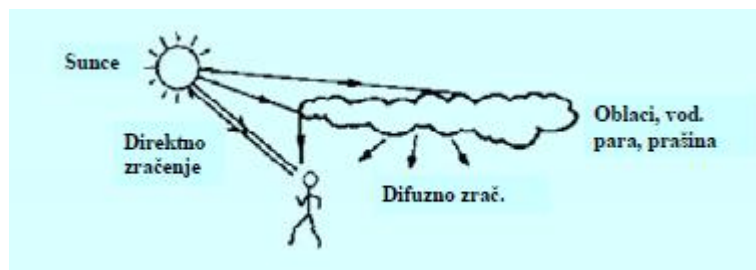
Najveći potencijal energetske uštede leži u sektoru zgradarstva jer se u zgradama troši oko 40% ukupne potrošnje energije. Potrošnja energije u zgradi ovisi o karakteristikama energetskih sustava u njoj, ali i o klimatskim uvjetima podneblja na kojem se nalazi. Sustavi grijanja i hlađenja čine najveće potrošače energije u zgradi i stoga odabirom obnovljivih izvora energije kao što su solarni kolektori, ti sustavi se mogu učiniti energetski efikasnijima.



Slika 1 Shema solarnog sustava sa pločastim kolektorima [1]

2. SUNČEVO ZRAČENJE [2]

Sunce, reakcijama fuzije u središtu, oslobađa ogromne količine energije reda veličine 3.8×10^{20} MW koja se zračenjem širi u svim smjerova. Samo mali dio tog zračenja, koji otprilike iznosi 1.7×10^{14} kW, dopijeva na Zemlju. Dio tog zračenja se odmah odbija na granici zemljine atmosfere, dio se odbija od oblaka i dio od zemljine površine. Zračenje koje se nije reflektiralo se djelomično apsorbira u atmosferi, a djelomično u zemljinoj kori. Taj udio zračenja koji dolazi do površine zemlje može se kao zbroj direktnog i difuznog zračenja. Direktno zračenje je ono koje neometano dolazi do površine zemlje, a difuzno je nastalo raspršivanjem direktnog zračenja na oblacima, molekulama zraka, vodenoj pari i prašini.



Slika 2 Prikaz direktnog i difuznog zračenja [2]

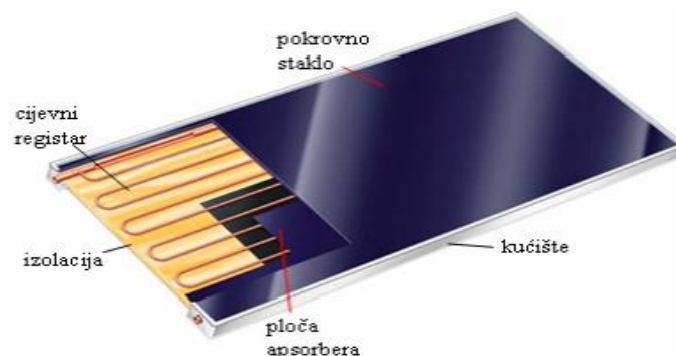
Zemlja rotira oko Sunca, ali rotira i oko svoje osi, koja je nagnuta u odnosu na ravninu ekliptike, što utječe na kut upada sunčevih zraka, a samim time i na jačinu zračenja. Zemlja u 365 dana napravi jedan krug oko Sunca te kako se mijenja njen položaj dolazi do promjene kuta između ekvatorijalne ravnine i smjera sunčevih zraka što daje za posljedicu promjenu godišnjih doba. Zbog toga je za vrijeme ljetnih mjeseci sjeverna polutka direktnije izložena sunčevu zračenju pa je tako Sunce prividno više „iznad“, a zimi je bliže horizontu. Kod ugradnje sunčevih kolektora važno je na kojoj geografskoj širini se nalazi sustav jer će to bitno utjecati na dozačenu energiju. Također je važno i odrediti kut nagiba kolektora i optimirati ga da se prikupi što je više moguće sunčevog zračenja. Primjerice za ljetnih mjeseci, solarni kolektori će prikupiti više zračenja kada su postavljeni na manjim kutovima. No ponekad kada se solarni sustav ugrađuje u već izgrađene zgrade ili kuće, nije moguće utjecati na nagib kolektora jer je on već određen nagibom krova na koji će se ugraditi.

2.1. Solarni kolektori

Solarni kolektori su posebna vrsta izmjenjivača topline koji apsorbirano Sunčevo zračenje pretvaraju u toplinsku energiju radnog fluida (voda, zrak, ulje). Sakupljena Sunčeva energija se pomoću cirkulirajućeg fluida prenosi ili direktno u sustav za grijanje i potrošnu toplu vodu ili prvo u spremnik vode u kojemu se energija akumulira i tek onda se koristi za potrebe kućanstva. Kolektori su glavni dio solarnog sustava za PTV (potrošnu toplu vodu) i grijanje, a uz njih u sustavu najvažniji su još spremnik tople vode, pomoćni izvor topline, cirkulacijska pumpa (za sustave sa prisilnom cirkulacijom) te regulacijski sustav. Dva tipa solarnih kolektora koji se danas najčešće koriste su pločasti i vakuumski kolektori.

2.2. Pločasti kolektori [3]

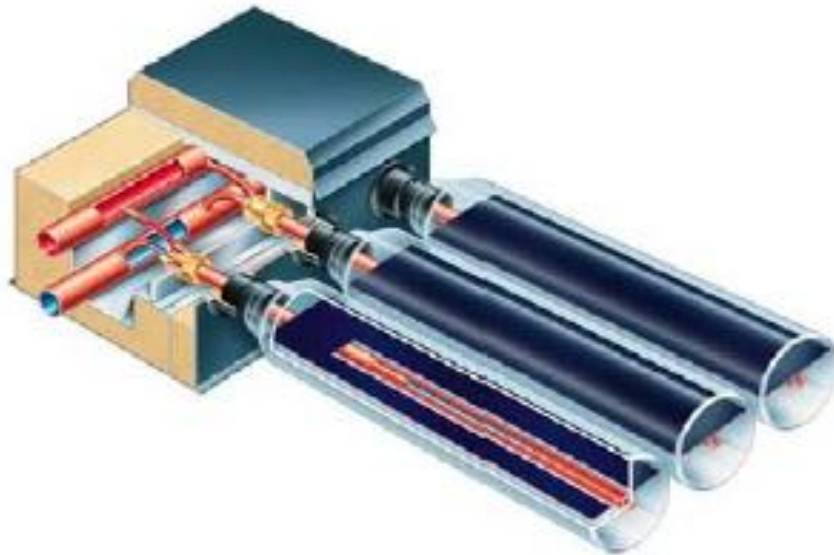
Koriste se za zagrijavanje fluida kao što je voda, voda uz antifriz te zrak. Glavna uloga im je sakupiti što je više moguće Sunčevog zračenja, ali uz minimalne troškove. Također se očekuje da vijek trajanja bude duži, u prosjeku je 20 godina, te otpornost na koroziju, ultraljubičasta zračenja, kamenac i ostala moguća vanjska oštećenja. Dijelovi od kojih se sastoje pločasti kolektori su apsorberska ploča na koju je pričvršćen cijevni registar, pokrovno staklo, izolacija i kućište. Na apsorbersku ploču obično dolazi premaz sa visokim koeficijentom apsorpcije za kratkovalna zračenja te niskim koeficijentom emisivnosti za dugovalno zračenje. Slična svojstva posjeduje i pokrovno staklo sa zajedničkim ciljem povećanja apsorpcije Sunčevog zračenja i povećanja ukupne efikasnosti. Cijevni registri izrađuju se u obliku „ljestvi“ ili obliku serpentine. Odabir jednog ili drugog tipa ovisi o klimatskom području gdje se postavlja kolektor jer serpentinasti oblik omogućuje veće temperature na izlazu iz kolektora te je stoga prikladniji za hladnije klime dok oblik ljestvi daje niži prirast temperature na izlazu i pogodniji je za toplije klime. Danas je ovaj tip kolektora u najširoj uporabi i najčešće se upotrebljava u niskotemperaturnim režimima.



Slika 3 Pločasti kolektor sa označenim osnovnim dijelovima [4]

2.3. Vakuumski kolektori [3]

Ovaj tip kolektora se razvio radi potrebe za smanjenjem konvektivnih gubitaka između apsorbera i okoline što se postiglo tako da je izvučen zrak između apsorbera i pokrovnog stakla. Kod vakuumskih kolektora apsorber se smješta u vakuumirane staklene cijevi kako bi se smanjila napreznja da ne dođe do pucanja pokrovnog stakla. No zbog korištenja staklenih cijevi, omjer korisne površine apsorbera i ukupne projicirane površine kolektora je manje u usporedbi sa pločastim kolektorima. Zbog toga im efikasnost može biti niža od pločastih kolektora iako imaju manje toplinske gubitke pri istim uvjetima rada. Vakuumski kolektori će postizati veće temperature na izlazu upravo zbog manjih toplinskih gubitaka pa su zbog toga pogodniji za korištenje u hladnijim klimama i radi toga su drugi najčešće korišteni tip kolektora.

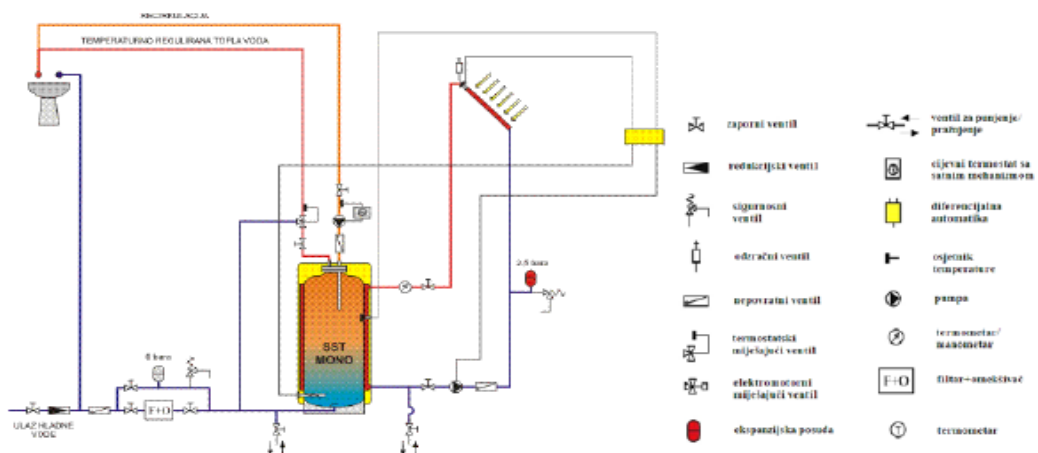


Slika 4 Vakuumski kolektor [4]

3. SOLARNI TOPLOVODNI SUSTAVI

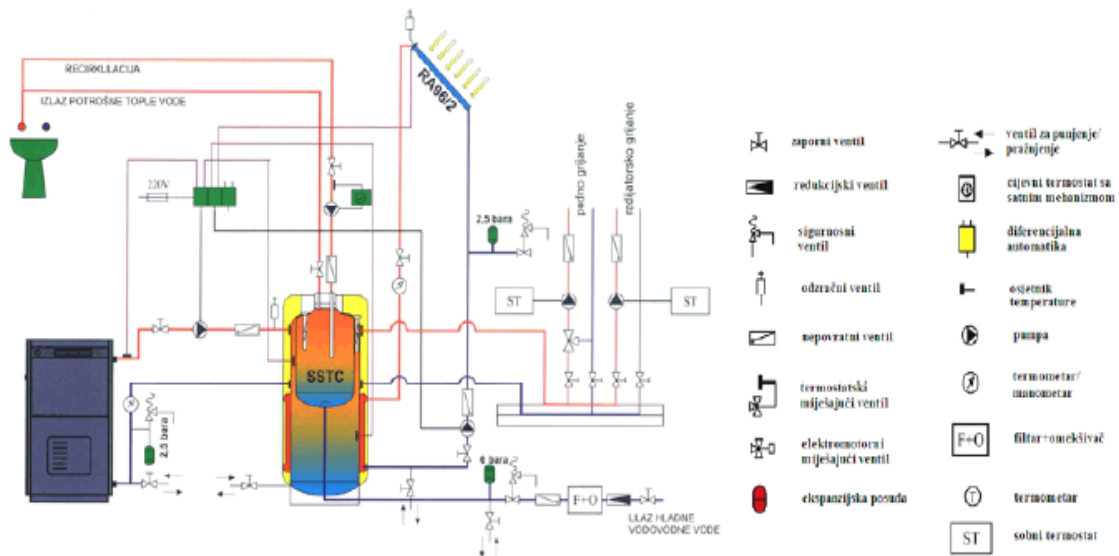
Najčešća primjena solarnih sustava je za grijanje potrošne tople vode, a rjeđe se koriste za niskotemperaturno grijanje prostora iz razloga što je grijanje potrebno u hladnim mjesecima, a tada je sunčevo zračenje najmanje. Osnovni dijelovi sustava su sunčevi kolektori i akumulacijski spremnik. Cirkulacija radnog fluida može biti prisilna pomoću pumpe ili prirodna uslijed djelovanja uzgonskih sila. Da bi se uspostavila prirodna cirkulacija potrebno je akumulacijski spremnik postaviti iznad gornjeg ruba kolektora, ali kako su kolektori obično smješteni na krovovima kuća ili zgrada to izaziva dodatne probleme. Cjevovodi kolektorskog kruga trebaju biti što kraći da pad tlaka bude što manji inače protok u krugu je prenizak što utječe na efikasnost kolektora i zbog vanjskog smještaja spremnika povećavaju se toplinski gubici prema okolini. No sustavi s prirodnom cirkulacijom imaju prednost jer ne koriste pumpu koja troši električnu energiju i nema regulacijskog sustava što značajno snižava cijenu instalacije. Kod sustava s prisilnom cirkulacijom pumpa ima ulogu stvaranja protoka kroz kolektorski krug. Uz pumpu se najčešće još ugrađuje diferencijalna automatika za isključivanje pumpe u slučaju da razlika temperatura vode na izlazu iz kolektora i vode u spremniku padne na neku zadanu vrijednost, obično 3-5°C, čime se sprječava dodatno rashlađivanje spremnika. Prednosti ovih sustava su što pozicija spremnika ne ovisi o položaju kolektora, stoga se može postaviti u podrum ili kotlovnici. Sustavi s prisilnom cirkulacijom dolaze u nekoliko izvedbi:

- toplovodni sustavi s jednim spremnikom – spremnik nema izmjenjivač topline, nego radni medij struji kroz dvostruki plašt spremnika od vrha do dna zagrijavajući na taj način vodu u spremniku. Polaz medija u kolektorskom krugu je u najhladnijoj, što je ujedno i najniža, točka spremnika kako bi rad kolektora bio efikasniji.



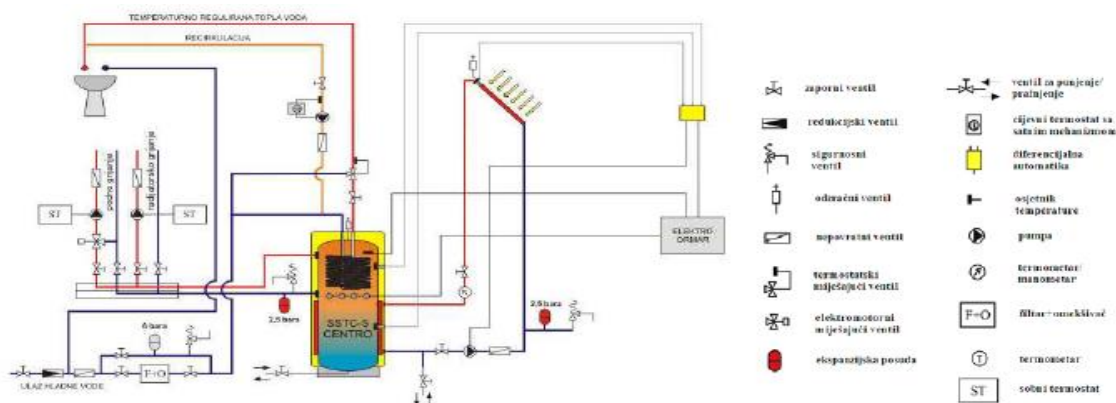
Slika 5 Toplovodni sustav s jednim spremnikom [2]

- toplovodni sustavi s dvostrukim spremnikom – sustavi koji se koriste za grijanje prostora i pripremu PTV-a. Unutar spremnika za vodu iz sustava grijanja je manji spremnik koji se koristi za PTV. Izmjena topline odvija se između izmjenjivača u donjem dijelu spremnika i vodom iz većeg spremnika te između manjeg i većeg spremnika, a u gornjem dijelu spremnika nalazi se izmjenjivač pomoćnog izvora topline. Svježa voda direktno se dovodi u manji spremnik i time je osigurano daje voda najveće temperature u gornjem dijelu, a voda najniže temperature u donjem dijelu spremnika stoga će i temperatura spolaza fluida biti najniža moguća.



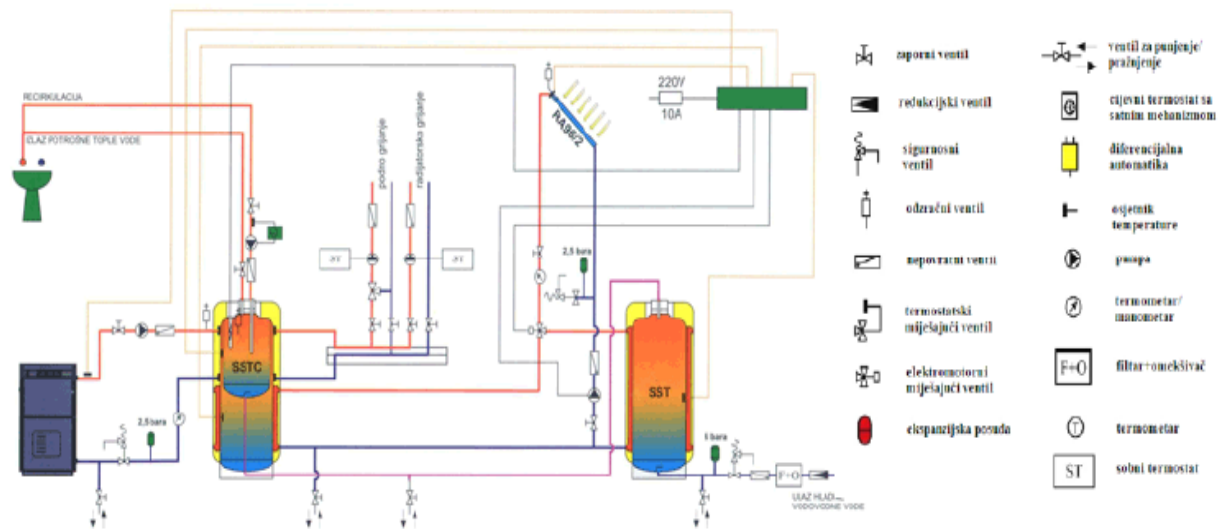
Slika 6 Toplovodni sustav s dvostrukim spremnikom [2]

- toplovodni sustavi s protočnim grijačem – umjesto manjeg spremnika za PTV, može se koristiti protočni grijač iz razloga da se izbjegne miješanje svježije hladne vode i zagrijane tople vode u spremniku. U gornjem dijelu spremnika temperatura vode mora biti desetak stupnjeva iznad tražene temperature PTV-a kako bi se izmijenila sva potrebna toplina zbog toga najčešće dolazi do paljenja pomoćnog grijača.



Slika 7 Toplovodni sustav s protočnim grijačem [2]

- toplovodni sustavi s dva spremnika – kod sustava većih kapaciteta gdje potreban spremnik zapremnine veće od 600 l, u kolektorski krug ugrađuju se dva manja spremnika. Najprije se jedan spremnik zagrijava do željene temperature zatim se preko troputnog ventila radni fluid usmjerava prema izmjenjivaču drugog spremnika. U hladnim mjesecima kada je sunčevo zračenje znatno manje zagrijava se samo jedan spremnik dok se drugi može isključiti iz rada.

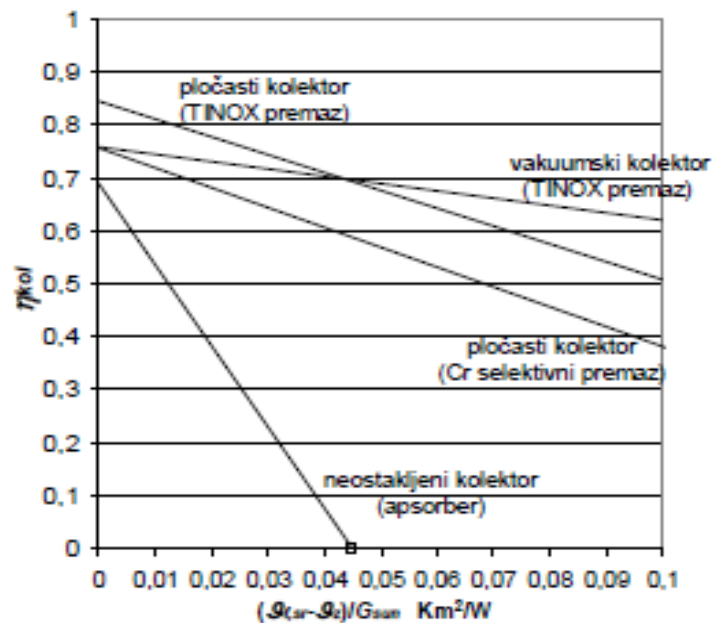


Slika 8 Toplovodni sustav s dva spremnika [2]

Broj i površinu kolektora, zapremninu spremnika i ostale dijelove sustava potrebno je optimirati da se prikupljenom sunčevom energijom pokrije 30% ukupnih godišnjih potreba zgrade za grijanje prostora i pripremu PTV-a. No najveći problem predstavljaju zimski mjeseci u kojima je ozračenost do pet puta manja nego ljeti, a potrebe za grijanjem su daleko veće. Potrebno je voditi računa da se površina kolektora ne predimenzionira radi želje da se pokriju potrebe zimi jer to dovodi do pregrijavanja sustava ljeti, kao i do povećavanja investicijskih troškova.

3.1. Efikasnost solarnih sustava

Najveći utjecaj na efikasnost cijelog sustava imaju kolektori. Efikasnost kolektora ovisi o odabranom tipu kolektora, o godišnjim dobima (vanjska temperatura u zimskim mjesecima je niža i smanjeno je sunčevo zračenje stoga rastu gubici prema okolini i efikasnost kolektora se smanjuje), velik utjecaj imaju svojstva pokrovnog stakla i apsorbera te orijentacija i kut nagiba kolektora. Izraz za efikasnost dobiven je eksperimentalnim mjerenjima i prema njemu je jasno vidljivo da efikasnost ovisi o razlici srednje temperature radnog medija i vanjske temperature kao i o sunčevom zračenju i što je ta razlika temperatura veća, veća je i izmjena topline vanjskog zraka i radnog medija i dolazi do povećanja toplinskih gubitaka.



Slika 9 Efikasnost različitih vrsta kolektora [2]

Na slici 9 su prikazane krivulje efikasnosti različitih vrsta kolektora i prema prikazanim rezultatima može se zaključiti da neostakljeni kolektori imaju daleko manju efikasnost od vakuumskih i pločastih, no zbog toga su cijenom puno prihvatljiviji. Zbog velikih gubitaka, ta vrsta kolektora je prikladna samo za niskotemperaturne režime ($24-32^{\circ}\text{C}$) kao što je zagrijavanje bazenske vode ili zagrijavanje vode u ljetnim mjesecima. Iako vakuumski kolektori imaju manje gubitke od pločastih, efikasnost u ljetnim mjesecima im je niža. Zbog toga se može zaključiti da će u toplijoj polovici godine treba veća površina kolektora da bi se prikupila ista količina energije kao kod pločastih, dok je u zimskim mjesecima obrnuto. Iz tih razloga vakuumski tip kolektora se više postavlja u hladnijim klimama.

Akumulacijski spremnik ima velik utjecaj na kolektorski krug i na raspodjelu topline u sustavu stoga utječe i na cjelokupnu efikasnost. Polazna temperatura kolektorske petlje je zapravo temperatura najhladnijeg dijela spremnika i što je ona niža, efikasnost sustava će biti veća. U obzir treba uzeti i lokaciju spremnika. Postavi li se spremnik unutar grijanog prostora, toplinski gubici će biti minimalni. Bezobzira gdje se nalazi, spremnik bi trebao biti dobro izoliran i po mogućnosti imati što kraći cjevovod radi većih ušteda.

4. METODE PRORAČUNA SUSTAVA

4.1. Norma EN 15316-4-3:2017; Metoda 3 [5]

Ovom normom opisan je proračun solarnih sustava satnom metodom za karakterističan dan u svakom mjesecu. Proračun je iterativan jer je efikasnost kolektora ovisna o temperaturi u spremniku, a temperatura u spremniku ovisi o energiji koju predaje radni fluid čiji iznos ovisi o efikasnosti kolektora.

Ulazne veličine:

\dot{m}_{col} – maseni protok solarne petlje [kg/s] (tablično i prema broju kolektora)

$A_{sol;mod}$ – površina modula kolektora [m²]

N_{col} – broj kolektora [-]

$P_{sol;pmp}$ – snaga pumpe u solarnoj petlji [W] (izračunat prema izrazu iz norme)

$P_{sol;ctr}$ – snaga sustava regulacije [W] (izračunat prema izrazu iz norme)

$H_{sol;loop}$ – koeficijent gubitaka kolektorske petlje [W/K] (izračunat prema izrazu iz norme)

$\vartheta_{e,h}$ – vanjska temperatura [°C] (DHMZ tablice)

$\vartheta_{sol;amb,h}$ – temperature negrijanog prostora [°C]

$I_{sol,h}$ – satna insolacija na kolektor [W/m²] (DHMZ tablice)

c_W – specifični toplinski kapacitet vode [J/kgK]

η_0 – vršna učinkovitost kolektora [-]

$K_{hem}(50^\circ)$ - faktor promjene kuta upadnog zračenja [-]

a_1 – koeficijent toplinskih gubitaka prvog reda [W/m²K]

a_2 – koeficijent toplinskih gubitaka drugog reda [W/m²K²]

Proračun

Ukupna instalirana površina kolektora računa se prema izrazu:

$$A_{sol} = A_{sol;mod} \cdot N_{col} \quad [m^2] \quad (1)$$

Koeficijent gubitaka kolektorske petlje može se računati prema izrazu (2) ili (3):

$$H_{sol;loop} = c_1 + c_2 A_{sol;mod} N_{col} \quad [W/K] \quad (2)$$

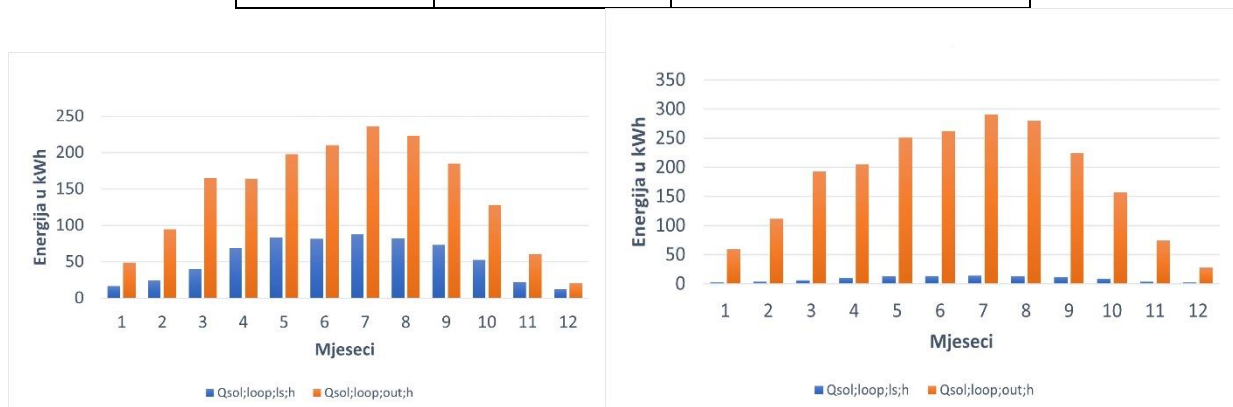
$$H_{sol;loop} = \sum_{i=1}^n L_i H_{pipe,i} \quad [W/K] \quad (3)$$

Jednadžba (2) predviđena je za korištenje kada dimenzije, duljina cjevovoda i ostale karakteristike kolektorskog kruga nisu poznate. Koristi se u eksperimentalne svrhe na zamišljenom modelu solarnog sustava te se koeficijenti c_1 i c_2 očitavaju iz donje tablice preuzete iz norme. Ova jednadžba pokazala se nepouzdana te vrijednost koeficijenta gubitaka kolektorske petlje iznosa 9 W/K koja se njome dobije precjenjuje toplinske gubitke cjevovoda te se na kraju uspostavi da omjer gubitaka i dobivene energije premašuje 30% što znatno smanjuje iskoristivost sustava (slika 9). Da bi se dobili realniji rezultati koristila se jednadžba (3) umjesto jednadžbe (2). Za veličinu L pretpostavila se prosječna duljina cjevovoda u obiteljskim kućama koja iznosi 10 m, a za koeficijent gubitaka topline jednog izoliranog segmenta cijevi uzela se vrijednost 0,1 W/mK. Time se postigao puno manji iznos toplinskih gubitaka od 1 W/mK te se na slici 10 vidi kako udio gubitaka u ukupno dobivenoj energiji ne prelazi ni 10%. Koeficijent gubitaka izoliranih cijevi $H_{\text{pipe};i}$ izračunao se pomoću jednadžbe preuzete iz Algoritma za određivanje energetskehtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama. Odabrane su cijevi promjera 13 mm, debljina izolacije d_a 50 mm, toplinska vodljivost materijala λ_D 0,04 W/mK te koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi h_a 8 Wm²/K. [9]

$$\Psi_j = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_D} \ln \frac{d_a + 1}{d_i + h_a d_a}} \text{ [W/m]} \quad (4)$$

Tablica 1 koeficijenti za izračun toplinskih gubitaka petlje [5]

SIMBOL	VRIJEDNOST	MJERNA JEDNINICA
c_1	5	W/K
c_2	0,5	W/Km ²



Slika 10 i 11 Usporedba gubitaka topline $Q_{\text{sol};\text{loop};\text{ls};\text{h}}$ i toplinske energije na izlazu iz kolektorskog kruga $Q_{\text{sol};\text{loop};\text{out};\text{h}}$ za dvije različite vrijednosti koeficijenta $H_{\text{sol};\text{loop}}$

Prije iterativnog postupka pretpostavlja se da je učinkovitost kolektora 40% da bi se procijenila prosječna temperatura vode u kolektoru:

$$\vartheta_{\text{col;avg;h}} = \vartheta_{\text{sol;loop;in;h-1}} + \frac{0,4 \cdot I_{\text{sol;h}} \cdot A_{\text{sol}}}{\dot{m}_{\text{col}} \cdot c_{\text{W}} \cdot 2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5)$$

S dobivenom prosječnom temperaturom računa se reducirana razlika temperatura u kolektoru:

$$T_{\text{h}}^* = \frac{\vartheta_{\text{col;avg;h}} - \vartheta_{\text{e;h}}}{I_{\text{sol;h}}} \left[\frac{\text{Km}}{\text{W}} \right] \quad (6)$$

Učinkovitost kolektora:

$$\eta_{\text{col;h}} = \eta_0 \cdot K_{\text{hem}}(50^{\circ}) - a_1 \cdot T_{\text{h}}^* - a_2 \cdot T_{\text{h}}^{*2} \cdot I_{\text{sol;h}} [-] \quad (7)$$

Apsorbirana energija kolektora

$$Q_{\text{sol;gen;h}} = \eta_0 \cdot I_{\text{sol;h}} \cdot A_{\text{sol}} \cdot t_{\text{ci}} \cdot 0,001 \quad [\text{kWh}], \quad (8)$$

gdje je t_{ci} vremenski period koji u satnoj metodi iznosi 1 h

Toplinska energija na izlazu iz kolektora:

$$Q_{\text{sol;out;h}} = \eta_{\text{col;h}} \cdot I_{\text{sol;h}} \cdot A_{\text{sol}} \cdot t_{\text{ci}} \cdot 0,001 \quad [\text{kWh}] \quad (9)$$

Toplinski gubici cjevovoda u kolektorskom krugu iznose:

$$Q_{\text{sol;loop;ls;h}} = H_{\text{sol;loop}} \cdot (\vartheta_{\text{col;avg;h}} - \vartheta_{\text{sol;amb;h}}) \cdot t_{\text{ci}} \cdot 0,001 \quad [\text{kWh}] \quad (10)$$

$\vartheta_{\text{sol;amb;h}}$ – temperatura negrijanog prostora, računa se kao aritmetička sredina vanjske i unutarnje temperature (pretpostavka da se cjevovod nalazi u negrijanom prostoru)

Energija na izlazu iz kolektorskog kruga:

$$Q_{\text{sol;loop;out;h}} = Q_{\text{sol;out;h}} - Q_{\text{sol;loop;ls;h}} \quad [\text{kWh}] \quad (11)$$

U slučaju da je energija na izlazu iz kolektorskog kruga manja ili jednaka snazi solarne pumpe pomnoženoj sa koeficijentom 3, nije isplativo uključiti pumpu da radni fluid cirkulira jer dozračena energija ne pokriva toplinske gubitke i troškove rada pumpe, stoga se u tom slučaju dozračena energija smatra da je jednaka nuli.

U idućoj iteraciji potrebno je računati prosječnu temperaturu u kolektoru prema izrazu:

$$\vartheta_{\text{col;avg;h}} = \frac{\vartheta_{\text{sol;loop;in;h-1}} + \vartheta_{\text{sol;loop;in;h}}}{2} + \frac{Q_{\text{sol;loop;out;h}} \cdot 1000}{\dot{m}_{\text{col}} \cdot c_{\text{W}} \cdot 2}, \quad (12)$$

gdje je $\vartheta_{\text{sol;loop;in;h}}$ temperatura na izlazu iz spremnika u tekućem satu, a $\vartheta_{\text{sol;loop;in;h-1}}$ temperatura na izlazu iz spremnika iz prethodnog sata.

Iteraciju je potrebno provesti 4 puta sve dok omjer razlike $Q_{\text{sol;loop;out;h}}$ i $Q_{\text{sol;loop;out;h-1}}$ i $Q_{\text{sol;loop;out;h-1}}$ ne bude manji od 0,05. Iterativni proračun je tada gotov i može se sa sigurnošću utvrditi da greške kod konačnih rezultata nisu veće od 5%.

Ukupna potrošnja pomoćne energije:

$$W_{\text{sol;aux;h}} = (P_{\text{sol;crt}} + P_{\text{sol;pmp}}) \cdot t_{\text{ci}} \quad [\text{kWh}] \quad (13)$$

uz uvjet ako je dozračena energija jednaka nuli, treba isključiti pumpu te je rad pumpe jednak nuli.

4.2. Norma EN 15316-5:2017; Metoda B [6]

U ovoj normi opisan je proračun spremnika koji se može provesti na dva načina: metodom A i metodom B. Metoda A uzima u obzir temperaturnu stratifikaciju unutar spremnika i predviđena je za analiziranje solarnih sustava. No radi pojednostavljenja u ovom radu korištena je metoda B gdje se pretpostavlja jednolika raspodjela temperature u cijelom spremniku. Kako metoda B inače nije predviđena za proračun solarnih sustava, originalni proračun je u nekim dijelovima izmijenjen kako bi se mogao koristiti za solarne sustave. U nastavku su opisane jednadžbe za toplinske gubitke u spremniku, temperaturu unutar spremnika, polaznu temperaturu u kolektorskom krugu te pomoćna energija dodatnog grijača za grijanje prostora i PTV kada dobivena solarna energija nije zadovoljila energetske potrebe zgrade.

Ulazne veličine:

$V_{\text{sto;tot}}$ – volumen spremnika topline [l]

$H_{\text{sto;ls}}$ – koeficijent gubitaka topline u stanju pripravnosti [-]

$f_{\text{sto;dis;ls}}$ – faktor gubitaka topline u stanju pripravnosti [-]

$\vartheta_{\text{sto;amb}}$ – temperatura prostorije u kojoj se nalazi spremnik [°C]

$C_{p;w}$ – specifični toplinski kapacitet vode [kWh/kgK]

ρ_w – gustoća vode [kg/m³]

$\vartheta_{w;\text{out min}}$ – minimalno potrebna temperatura vode za PTV [°C]

$Q_{w;\text{sto;out;req}}$ – zahtijevana toplina za PTV [kWh]

$Q_{H;\text{sto;out;req}}$ – zahtijevana toplina za grijanje [°C]

Koeficijent gubitaka topline u stanju pripravnosti je izračunat prema slijedećoj jednadžbi gdje su vrijednosti parametara c_1 , c_2 , c_3 , c_4 i c_5 određeni prema tablici 2. za tip spremnika koji je predviđen za solarne sustave.

$$H_{\text{sto;ls}} = \frac{1000}{c_4 c_5} (c_1 + c_2 V_{\text{sto;tot}}) \quad [\text{W/K}] \quad (14)$$

Tablica 2. Zadane vrijednosti parametara prema tipu i namjeni spremnika [6]

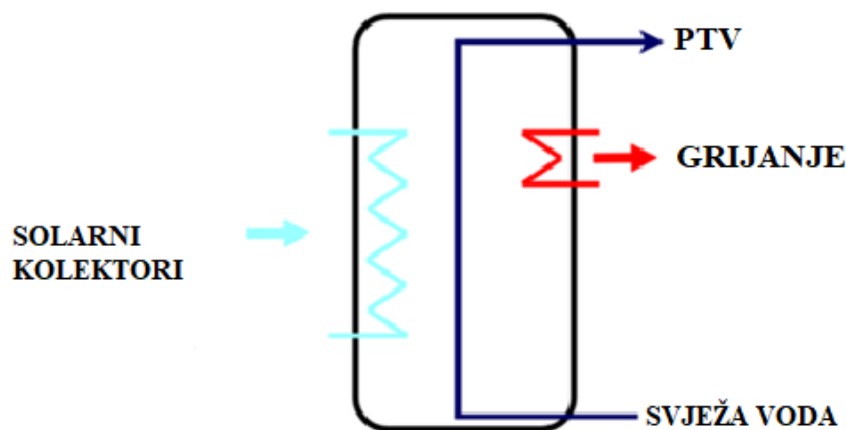
Tip spremnika	Standard	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Spremnik s električnim grijačem Horizontalni	EN 60379 EN 50440	0,939	0,0104	1	45	24
Spremnik s električnim grijačem Vertikalni; V > = 75l	EN 60379 EN 50440	0,224	0,0663	2/3	45,	24
Spremnik s električnim grijačem Vertikalni; V < 75l	EN 60379 EN 50440	0,1474	0,0719	2/3	45	24
Spremnik za solarni sustav	EN 12977-3 EN 12977-4	0	0,16	0,5	1000	1

Koeficijent gubitaka topline u stanju pripravnosti može se izračunati na drugi način pomoću formule:

$$H_{sto;ls} = \frac{S}{45} \quad [\text{W/K}] \quad (15)$$

gdje S označava gubitke spremnika u stanju pripravnosti.

U poglavlju 6.6. je detaljnije pokazano koji način se pokazao boljim za izračun koeficijenta $H_{sto;ls}$ uz objašnjenje popraćeno dijagramima.



Slika 12 Shema matematičkog modela spremnika [6]

Proračun

Toplinski gubici u spremniku računaju se prema izrazu:

$$Q_{sto;ls} = f_{sto;dis;ls} \cdot \frac{H_{sto;ls}}{1000} \cdot (\vartheta_{sto;t-1} - \vartheta_{sto;amb}) \cdot t_{ci} \quad [\text{kWh}] \quad (16)$$

Temperatura vode u spremniku nakon korištenja PTV-a:

$$\vartheta_{sto;tmp1} = \vartheta_{sto;t-1} + \frac{(-Q_{W;out} - Q_{sto;dis;ls} + Q_{sol;loop;out;h}) \cdot 1000000}{\rho_w \cdot c_{p,w} \cdot V_{sto;tot}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (17)$$

$\vartheta_{sto;t-1}$ – temperatura vode u spremniku iz prethodnog sata

$Q_{W;out}$ – isporučena energija za PTV; računa se prema izrazu:

$$[\text{kWh}] \quad (18)$$

uz uvjet ako je $\vartheta_{sto;t-1} < \vartheta_{W;out \min}$ (referentna temperature vode 45°C), isporučena energija je jednaka nuli.

Temperatura vode u spremniku nakon isporuke vode za grijanje prostora:

$$\vartheta_{sto;tmp2} = \vartheta_{sto;tmp1} + \frac{-Q_{H;out} \cdot 1000000}{\rho_W \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto;tot}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (19)$$

$Q_{H;out}$ – isporučena energija za grijanje koja se računa prema izrazu:

$$Q_{H;out} = \min \left(Q_{H;sto;out;req}; \frac{\rho_W \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto;tot} \cdot (\vartheta_{sto;tmp1} - \vartheta_{H;out \min})}{1000000} \right), \quad (20)$$

vođeci računa ako je isporučena energija za grijanje manja od nule, uzima se da je nula.

Nastavak proračuna prema danoj normi kod B metode je bio problematičan jer spremnik nije u jednadžbama bio povezan sa kolektorskim krugom te se proračun korigirao kako bi se pojednostavljena metoda B mogla koristiti u proračunavanju solarnih sustava. Sljedeće jednadžbe prepravljene su po uzoru na metodu A.

Porast temperature uzrokovan dobivenom energijom od kolektora:

$$\Delta\vartheta_{sto} = \frac{Q_{sol;loop;out} \cdot 1000000}{\rho_W \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto;tot}} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (21)$$

Konačna temperatura u spremniku nakon prikupljene sunčeve energije:

$$\vartheta_{sto;t} = \vartheta_{sto;tmp2} + \Delta\vartheta_{sto} \quad (22)$$

Temperatura na polazu u kolektorsku petlju:

$$\vartheta_{sol;loop;in} = \max \left(\vartheta_{sol;mn} - \frac{Q_{sol;loop;out}}{\dot{m}_{sol} \cdot 4,186 \cdot CONN}; \vartheta_{sto;t} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (23)$$

$$\vartheta_{sol;mn} = \vartheta_{sto;t} + \Delta\vartheta_{exh} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (24)$$

$$\Delta\vartheta_{exh} = \frac{Q_{sol;loop;out} \cdot 1000}{H_{sol} \cdot t_{ci}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (25)$$

Energija pomoćnog grijača je dobivena na sljedeći način:

$$Q_{H;sto;bu;in} = (Q_{W;sto;out;req} - Q_{W;out}) + (Q_{H;sto;out;req} - Q_{H;out}) \quad [\text{kWh}] \quad (26)$$

4.3. MGIPU Energetski certifikator [7]

Energetski certifikator je računalni program za određivanje energetskih svojstava zgrade. Programom je moguće proračunati primarnu energiju koja uključuje energiju za grijanje, hlađenje, ventilaciju i pripremu PTV-a te izračun toplinskih dobitaka i gubitaka. Omogućen je i dinamički satni proračun potrebne toplinske energije za grijanje zgrade ($Q_{H,sto;out,req}$) te na kraju pregled energetskog certifikata. Prikladan je za proračun svih vrsta tehničkih sustava te za zgrade različitih namjena (obiteljske kuće, uredske zgrade, hoteli, bolnice, sportski objekti, itd.). Program su zajednički izradili Sveučilište u Zagrebu i Fakultet organizacije i informatike u Varaždinu te se njime koriste ovlaštene osobe za energetsko certificiranje, energetski pregled zgrade i redoviti pregled sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije. Besplatan je i može se preuzeti na internetskim stranicama Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja.

U sklopu ovog zadatka bilo je potrebno usporediti rad solarnog sustava koji je proračunat prethodno opisanim normama s vrijednostima koje su se dobile pomoću Energetskog certifikatora. U programu se solarni sustav proračunava prilagođenom f-chart metodom prema normi EN 15316-4-3 iz 2007. godine, dok je proračun proveden u ovom radu napravljen prema normi EN 15316-4-3 iz 2020. godine. Kod definiranja termotehničkih sustava u programu se može birati izvor topline (dizalice topline, kotlovi, daljinsko grijanje itd.) stoga je u ovom slučaju odabran solarni sustav kao izvor topline uz postojanje dodatnog grijača, ali on se veže uz kotao koji nije dio solarnog sustava i ne razmatra se u ovom radu. Očitani podaci o potrebnoj energiji za grijanje i PTV iz programa su upotrijebljeni kao ulazni podaci u oba proračuna prethodno opisana.

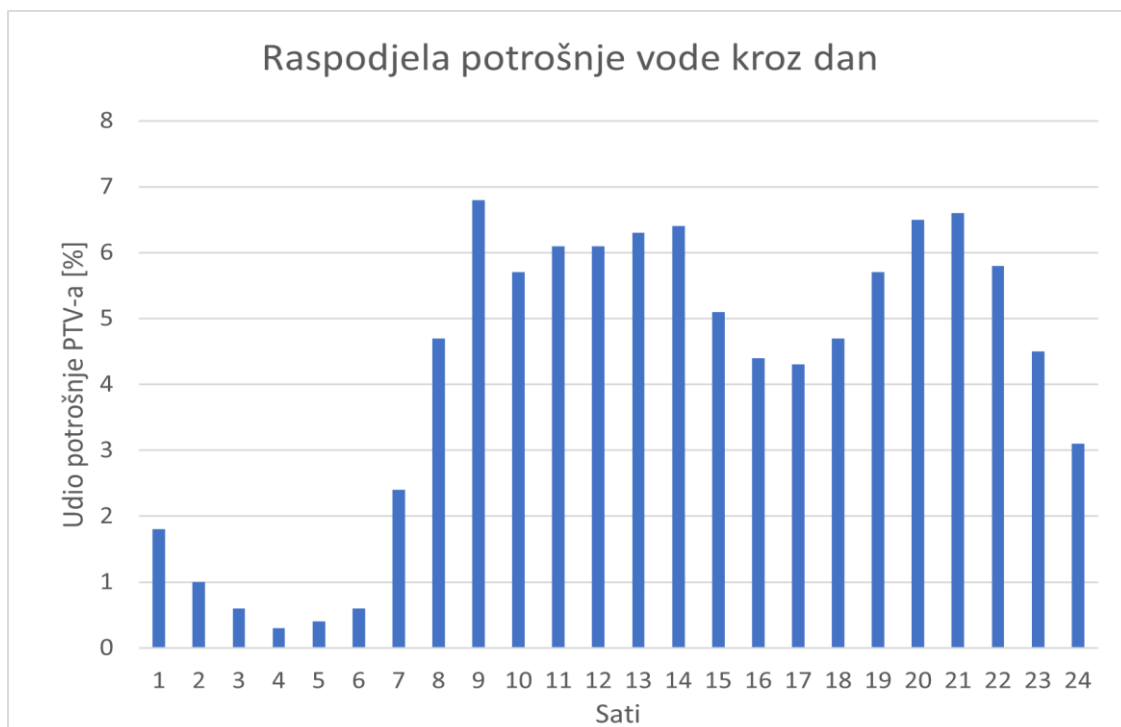
Mjesec	Naziv	$Q_{H,gen,out}(Sobni)$ [kWh]	$Q_{H,gen,out}(GVK)$ [kWh]	$Q_{H,gen,out}$ [kWh]	$Q_{W,gen,out}$ [kWh]	$Q_{HW,gen,out}$ [kWh]	$Q_{gen,ts}$ [kWh]	$Q_{gen,ts,env,bl}$ [kWh]	$Q_{p,ts,bl}$ [kWh]	$Q_{HW,gen,ts,bl}$ [kWh]
Siječanj	Podstustav proizvodnje grijanja	1759,57	0,00	1759,57	316,28	2075,85	85,15	9,93	0,00	
Veljača	Podstustav proizvodnje grijanja	921,07	0,00	921,07	285,67	1206,74	-21,27	6,37	0,00	
Ožujak	Podstustav proizvodnje grijanja	435,95	0,00	435,95	316,28	752,23	64,25	4,19	0,00	
Travanj	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	306,08	306,08	114,07	0,00	0,00	
Svibanj	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	316,28	316,28	130,61	0,00	0,00	
Lipanj	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	306,08	306,08	132,19	0,00	0,00	
Sipanj	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	316,28	316,28	140,23	0,00	0,00	
Kolovoz	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	316,28	316,28	135,71	0,00	0,00	
Rujan	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	306,08	306,08	122,81	0,00	0,00	
Listopad	Podstustav proizvodnje grijanja	0,00	0,00	0,00	316,28	316,28	234,81	101,91	0,00	
Studeni	Podstustav proizvodnje grijanja	295,59	0,00	295,59	306,08	601,66	4,31	3,34	0,00	
Prosinac	Podstustav proizvodnje grijanja	1358,11	0,00	1358,11	316,28	1674,39	-77,54	7,78	0,00	
UKUPNO =		4770,28	0,00	4770,28	3723,97	8494,25	895,03	133,52	0,00	50

Mjesec	$\theta_{e,avg}$ [°C]	I_m [°W/m ²]	$E_{sol,in}$ [kWh/m ²]	$Q_{H,sol,us}$ [kWh]	P_H [%]	A_H [m ²]	$\theta_{H,ref}$ [°C]	ΔT_H [K]	X_H [%]	Y_H [%]	$Q_{H,sol,out}$ [kWh]	$Q_{W,sol,us}$ [kWh]	P_W [%]
Siječanj	-0,60	63,80	47,500	1759,57	0,85	6,78	100,00	100,60	1,227	0,124	82,06	316,28	0,12
Veljača	2,20	99,60	66,900	921,07	0,76	6,11	100,00	97,80	1,853	0,300	159,54	285,67	0,21
Ožujak	6,50	152,00	113,100	435,95	0,58	4,64	100,00	93,50	3,147	0,814	218,02	316,28	0,41
Travanj	11,20	180,60	130,000	0,00	0,00	0,00	100,00	88,80	0,000	0,000	0,00	306,08	1,00
Svibanj	15,90	206,00	153,300	0,00	0,00	0,00	100,00	84,10	0,000	0,000	0,00	316,28	1,00
Lipanj	19,20	215,70	155,300	0,00	0,00	0,00	100,00	80,80	0,000	0,000	0,00	306,08	1,00
Sipanj	21,10	222,20	165,300	0,00	0,00	0,00	100,00	78,90	0,000	0,000	0,00	316,28	1,00
Kolovoz	20,10	208,70	155,300	0,00	0,00	0,00	100,00	79,90	0,000	0,000	0,00	316,28	1,00
Rujan	16,40	192,10	138,300	0,00	0,00	0,00	100,00	83,60	0,000	0,000	0,00	306,08	1,00
Listopad	11,10	139,70	103,900	0,00	0,00	0,00	100,00	88,90	0,000	0,000	0,00	316,28	1,00

Slika 13 MGIPU Energetski certifikator, dio za uređivanje solarnih sustava

5. ULAZNI PODACI I DEFINIRANJE MODELA

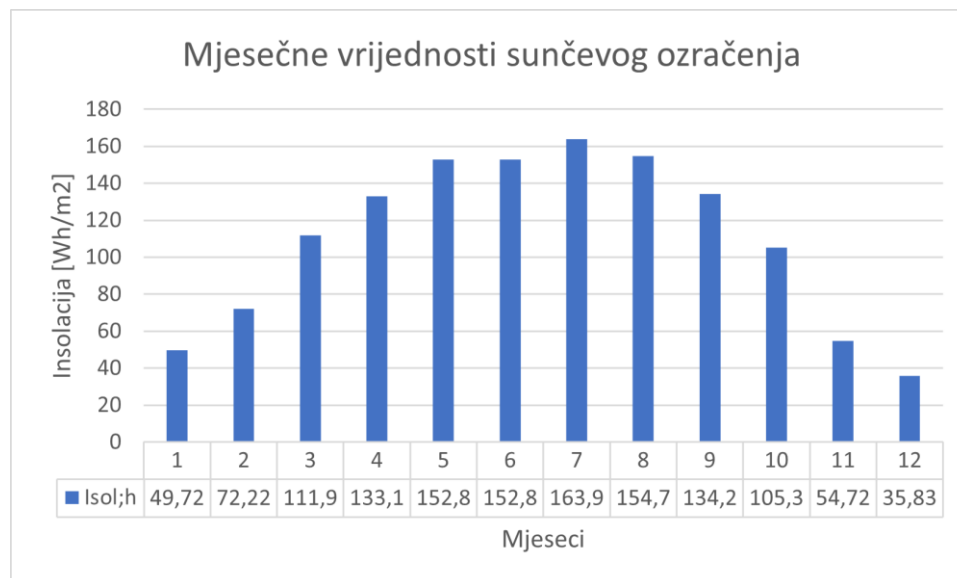
Za referentnu zgradu odabrana je niskoenergetska obiteljska kuća sa 2 etaže i ukupne korisne površine 155 m². Smatra se da zgrada sadrži više od 3 stambene jedinice te da je dnevna potrošnja PTV-a 261,42 l/dan (referentna temperatura vode iznosi 45°C). Vrijednosti potrebne energije za grijanje i PTV očitane su iz Energetskog certifikatora kako bi se rezultati dobiveni normama i rezultati dobiveni programom mogli uspoređivati. Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje iznosi 31,3 kWh/m², a za PTV iznosi 23,2 kWh/m². Raspodjela dnevne potrošnje PTV-a u jednom danu prikazana je u dijagramu, a profil potrošnje preuzet je iz norme EN 12831-3:2017, aneks B za obiteljsku kuću. Za sustav su odabrani pločasti kolektori koji su orijentirani prema jugu pod nagibom od 45° te su karakteristike za odabrani tip kolektora prikazane u tablici. Odabrana su 3 kolektora gdje površina jednog iznosi 2,1 m² stoga je ukupna instalirana površina 6,3 m². U tablici prikazana je raspodjela godišnje insolacije na nagnutu plohu pod 45° te se može uočiti da je u zimskim mjesecima zračenje najmanje kada je potrebno najviše energije, tada će se pomoćni grijač puno češće koristiti. Podaci iz tablice preuzeti su iz norme EN 15316-4-3.



Slika 14 Prikaz raspodjele dnevne potrošnje PTV-a

Tablica 3. Karakteristike kolektora

A_{sol;mod}	2,1	m ²
η₀	0,8	/
a₁	3,5	m ²
a₂	0	W/m ² *K
K_{hem(50)}	0,95	W/m ² *K ²
N_{sol;mod}	3	/
A_{sol}	6,3	m ²



Slika 15 Mjesečne vrijednosti sunčevog zračenja na nagnutu plohu

Na slici 15 gdje je prikazana raspodjela godišnje insolacije na nagnutu plohu pod 45°, može se uočiti da je u zimskim mjesecima zračenje najmanje kada je potrebno najviše energije, tada će se pomoćni grijač puno češće koristiti. Pretpostavljeno je da sezona grijanja traje od 10. do 3. mjeseca s time da je dnevni profil potreba za grijanjem dobiven satnom metodom u Energetskom certifikatoru. Primjer mjeseca veljače je prikazan na slici 16 i na taj način očitani su i ostali mjeseci. Na slici 17 prikazan je stupac iz kojega su se očitani podaci za potrebu toplinu grijanja iz Energetskog certifikatora, a na slici 18 uokviren je redak iz kojega se očitava potrebna energija za PTV.



Slika 16 Dnevni profil grijanja

Potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje

Grijanje i hlađenje (satno) | Grijanje i hlađenje (mjesечно) | Energija za PTV | Faktori iskoristenja

Karakterističan dan mjeseca: Veljača

tr.1 [°K]	H tr.2 [W/K]	H tr.3 [W/K]	φ ia [W]	φ m,g [W]	φ m [W]	φ st [W]	φ m,tot [W]	θ m,t [°C]	θ m,ac.1-1 [°C]	θ m [°C]	θ s [°C]	θ air [°C]	φ HC.nd [W]	θ air,ac [W]	θ m,ac.1 [W]	Q H.nd [kWh]	Q C.nd [kWh]
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2332.57	19.45	19.50	19.48	19.62	20.00	2077.19	20.00	19.45	2.08	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2402.49	19.40	19.45	19.43	19.59	20.00	2180.58	20.00	19.40	2.18	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2459.06	19.37	19.40	19.38	19.56	20.00	2270.00	20.00	19.37	2.27	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2498.89	19.33	19.37	19.35	19.54	20.00	2356.95	20.00	19.33	2.36	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2542.74	19.31	19.33	19.32	19.52	20.00	2417.96	20.00	19.31	2.42	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2578.26	19.28	19.31	19.29	19.50	20.00	2470.24	20.00	19.28	2.47	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2618.78	19.26	19.28	19.27	19.49	20.00	2497.60	20.00	19.26	2.50	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-24.77	352.64	3001.68	19.29	19.26	19.28	19.52	20.00	2378.23	20.00	19.29	2.38	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	443.78	723.55	3661.66	19.39	19.29	19.34	19.62	20.00	2018.30	20.00	19.39	2.02	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	959.85	1132.09	4248.98	19.56	19.39	19.47	19.75	20.00	1554.32	20.00	19.56	1.55	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	1477.72	1542.05	4746.14	19.77	19.56	19.66	19.93	20.00	977.49	20.00	19.77	0.98	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	1378.75	1463.70	4346.55	19.94	19.77	19.86	20.04	20.00	576.91	20.00	19.94	0.58	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	1446.14	1517.05	4208.74	20.09	19.94	20.02	20.14	20.00	232.00	20.00	20.09	0.23	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	1385.79	1469.27	3966.60	20.22	20.09	20.16	20.23	20.02	0.00	20.02	20.22	0.00	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	1595.84	1635.55	4353.46	20.38	20.22	20.30	20.41	20.20	0.00	20.20	20.38	0.00	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	1026.11	1184.54	3357.60	20.43	20.38	20.40	20.41	20.20	0.00	20.20	20.43	0.00	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	208.73	537.48	1836.17	20.30	20.43	20.37	20.22	20.00	0.00	20.00	20.30	0.00	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	1323.69	20.12	20.30	20.21	20.07	20.00	492.72	20.00	20.12	0.49	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	1533.71	19.97	20.12	20.04	19.96	20.00	878.56	20.00	19.97	0.88	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	1720.85	19.84	19.97	19.90	19.88	20.00	1195.22	20.00	19.84	1.20	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	1895.62	19.73	19.84	19.78	19.80	20.00	1438.58	20.00	19.73	1.44	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2043.01	19.64	19.73	19.68	19.74	20.00	1638.19	20.00	19.64	1.64	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2180.08	19.56	19.64	19.60	19.69	20.00	1781.76	20.00	19.56	1.78	0.00
66.89	103.31	100.92	385.53	470.23	-272.49	156.53	2273.66	19.50	19.56	19.53	19.65	20.00	1925.01	20.00	19.50	1.93	0.00
								19.71	19.71	19.71	19.83	20.02	33357.80	20.02	19.71	33.36	0.00

Slika 17 Podaci za zahtijevanu toplinu za grijanje iz MGIPU-a

Potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje

Grijanje i hlađenje (satno) | Grijanje i hlađenje (mjesечно) | Energija za PTV | Faktori iskoristenja

#	1
Zona	Zona 1
Vrsta zgrade	Stambeni dio
A _k [m ²]	154.21
d _{grijanje} [dan]	188.00
d _{izv.grijanja} [dan]	177.00
Tip zgrade	Stambena zgrada s više od 3 stambene jedinice
Q _{W,A,a} [kWh/m ² a]	16.00
Q _{W,g} [kWh]	1852.32
Q _{W,c} [kWh]	1743.94
Q _W [kWh]	3596.27

Slika 18 Podaci za zahtijevanu toplinu za PTV iz MGIPU-a

6. REZULTATI I ANALIZA

6.1. Period povrata investicije [2]

Da bi ugradnja solarnih sustava bila isplativa, cijena konvencionalnog sustava u kombinaciji sa solarnim mora biti niža od ugradnje samo konvencionalnog sustava. Visina investicijskih troškova pretežito ovisi o površini kolektora i zbog toga se cijena investicije prikazuje kao zbroj varijabilnih troškova koji ovise o ukupnoj površini kolektora, cijene spremnika koja se povećava ugradnjom spremnika veće zapremnine i fiksnih troškova koji se odnose na ugradnju, pumpe i ostale dijelove sustava.

$$C_{\text{invest}} = C_{\text{kol}}A_{\text{kol}} + C_{\text{fix}} + C_s V_s \quad (27)$$

Period povrata investicije računa se prema jednostavnoj formuli koja ne uključuje utjecaj kamate ni inflacije:

$$P = \frac{C_{\text{invest}}}{S} \quad (28)$$

gdje S ušteda na troškovima za gorivo koje bi se potrošilo kroz godinu da nema dodatne prikupljene sunčeve energije za PTV i grijanje te se računa:

$$S = \frac{Q_{\text{sol;loop;out}}}{\eta_{\text{kotao}} H_d} C_G \left[\frac{\text{kn}}{\text{a}} \right] \quad (29)$$

H_d – donja ogrjevna moć goriva [J/kg]

C_G – cijena goriva [kn/kg]

$Q_{\text{sol;loop;out}}$ – ukupna godišnja prikupljena sunčeva energija

Kod optimizacije površine kolektora i zapremnine spremnika potrebno je paziti da se komponentne ne predimenzioniraju da ne bi došlo do velikih viškova topline i pregrijavanja cijevi u ljetnim mjesecima. Pri optimiranju nastojao se zadovoljiti kriterij da prikupljena energija pokriva najmanje 30% ukupnih godišnjih energetske potrebe zgrade za grijanje prostora i PTV, a da uz to period povrata investicije bude najmanji mogući. U donjoj tablici prikazani su ulazni podaci koji su uvršteni u pojednostavljen izraz za izračunavanje perioda povrata investicije.

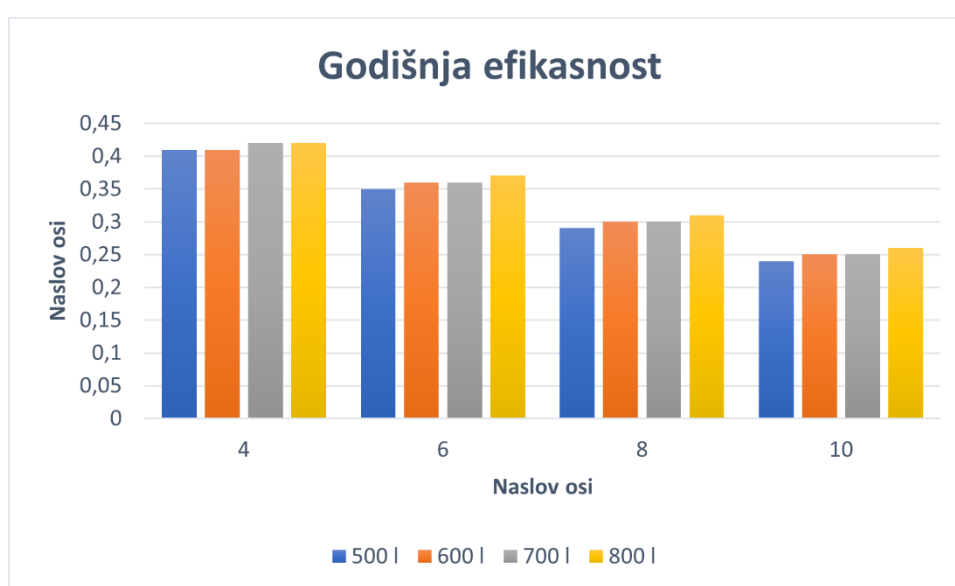
Cijena fiksnih troškova se procjenjuje da je 50 % zbroja cijene kolektora i cijene spremnika. Cijena kolektora 1866,36 kn/m² te je ukupna cijena za 3 kolektora iznosila 5599 kn. Cijena spremnika se povećavala 15 % sa porastom zapremnine od 100 l te je na kraju za odabrani spremnik od 600 l iznosila 8947 kn. U obzir se mora uzeti efikasnost kotla iznosa 0,9. Cijena goriva prikazana je na slici 39 u poglavlju 6.8.

6.2. Tehnološki i ekonomski optimum

Mijenjajući i zapremninu spremnika i površinu kolektora dobile su se razne kombinacije od kojih je odabrana ona koja je zadovoljila ekonomske zahtjeve da period povrata investicije bude što manji i tehnološke gdje bi efikasnost sustava treba biti optimalna. Efikasnost kolektora ovisi o prosječnoj temperaturi u kolektorima koja ovisi o površini kolektora, ali i o temperaturi u spremniku. Rezultati su pokazali što je temperatura u spremniku veća, manja je efikasnost i obrnuto. Temperatura u spremniku je bila još jedan kriterij prema kojemu se odabrala zadovoljavajuća kombinacija. Ona ne bi smjela biti veća od 80°C, naime ako bi vrijednosti temperature prelazile 80°C u karakterističnom danu srpnja u stvarnosti bi se moglo dogoditi da sunčevo zračenje znatno odstupa od uprosječenih vrijednosti karakterističnog dana te da se temperatura u spremniku podigne i za 10-15°C i na taj način voda se pregrije i ošteti instalaciju. Na efikasnost je najviše utjecao broj kolektora jer što je manja površina apsorbera niže su i temperature u spremniku. U tablici 4. su dane vrijednosti godišnje efikasnosti kolektora u ovisnosti o volumenu spremnika i površini kolektora, a na slici 19 grafički prikaz podataka.

Tablica 4. Godišnja efikasnost sustava za različite površine kolektora i zapremnine spremnika

	Površina kolektora			
	4	6	8	10
η (500)	0,41	0,35	0,29	0,24
η (600)	0,41	0,36	0,3	0,25
η (700)	0,42	0,36	0,3	0,25
η (800)	0,42	0,37	0,31	0,26

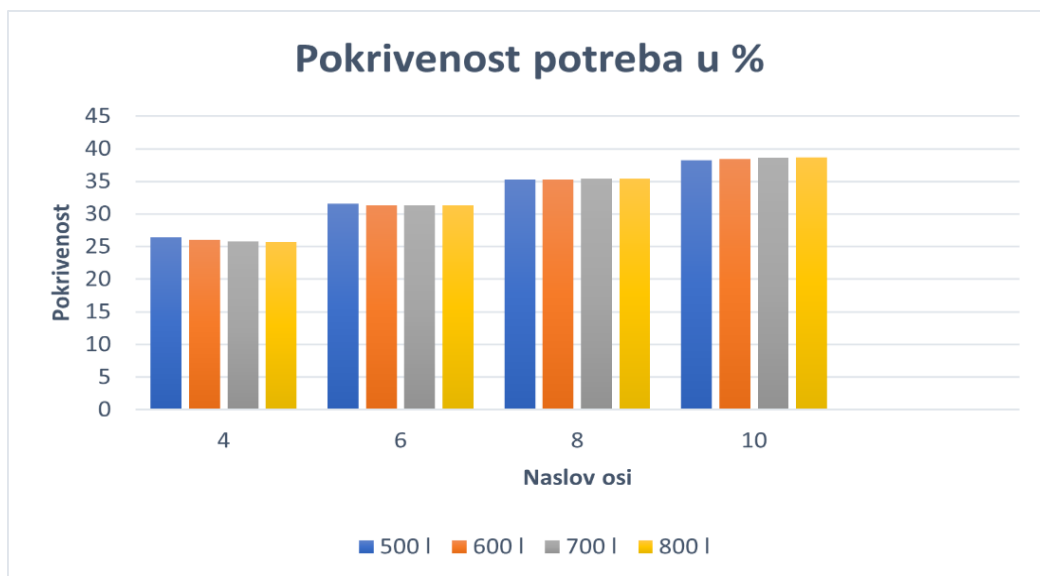


Slika 19 Godišnja efikasnost sustava za različite površine kolektora i zapremnine spremnika

Prema prikazanim podacima, tehnološki najbolje zadovoljava sustav sa površinom kolektora od 4 m² i spremnikom zapremnine 800 l jer je efikasnost najveća tako da su u temperature u spremniku u idealnim rasponima od 30 do 55°C. No ovaj slučaj nije odabran jer ne pokrije 30 % godišnjih energetske potrebe što se može vidjeti u tablici 5. i na dijagramu 20.

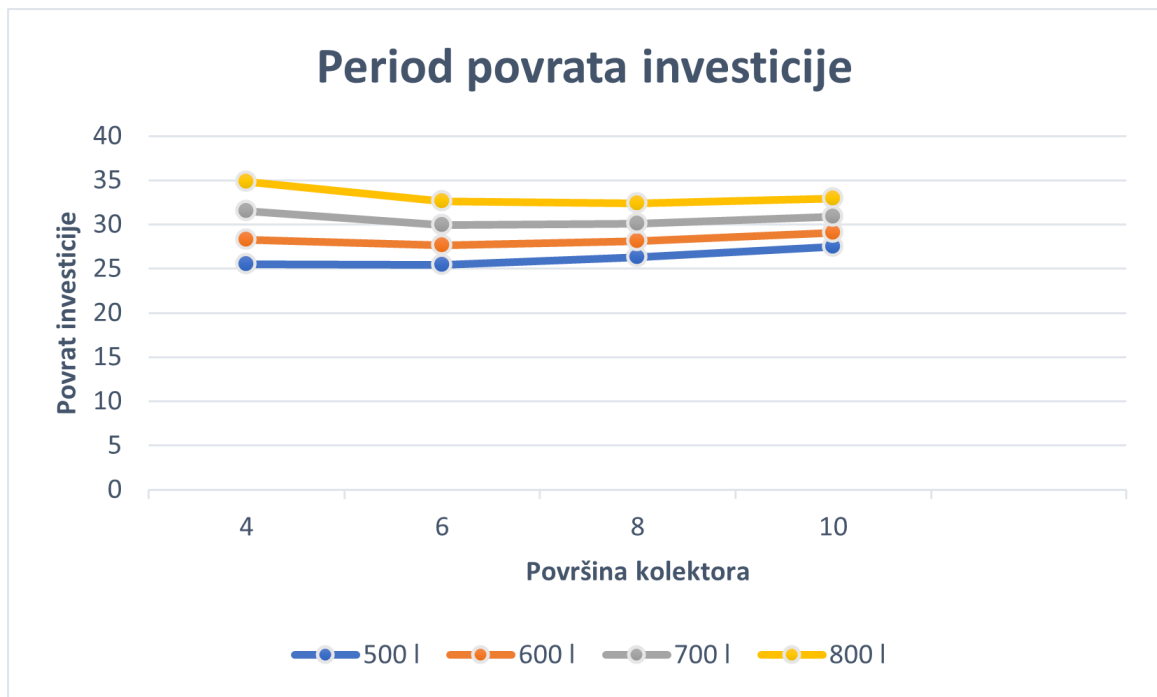
Tablica 5. Postotak pokrivenosti potreba za grijanje i PTV

		Vs			
		500	600	700	800
	%				
Ak	4	26,42	26,04	25,76	25,7
	6	31,58	31,31	31,32	31,31
	8	35,32	35,33	35,39	35,42
	10	38,27	38,42	38,57	38,67



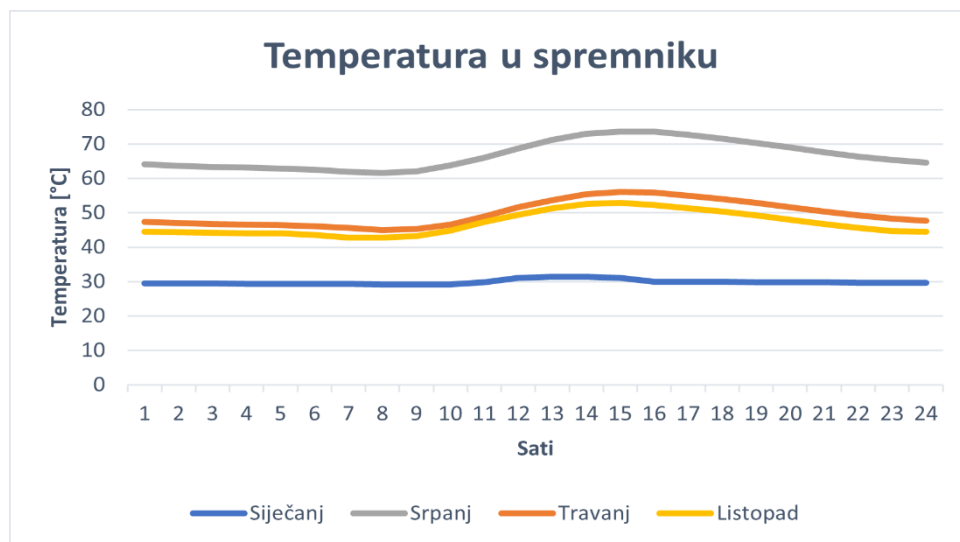
Slika 20 Postotak pokrivenosti potreba za grijanje i PTV

Iduća konfiguracija koja bi se mogla uzeti u obzir je sustav s površinom kolektora 6 m² i spremnikom zapremnine 800 l jer je to drugi po redu slučaj koji pokrije tražene energetske potrebe, a ima najveću efikasnost, ali kada se pogleda dijagram na slici može se vidjeti kako ta opcija nije ekonomski najisplativija.



Slika 21 Period povrata investicije

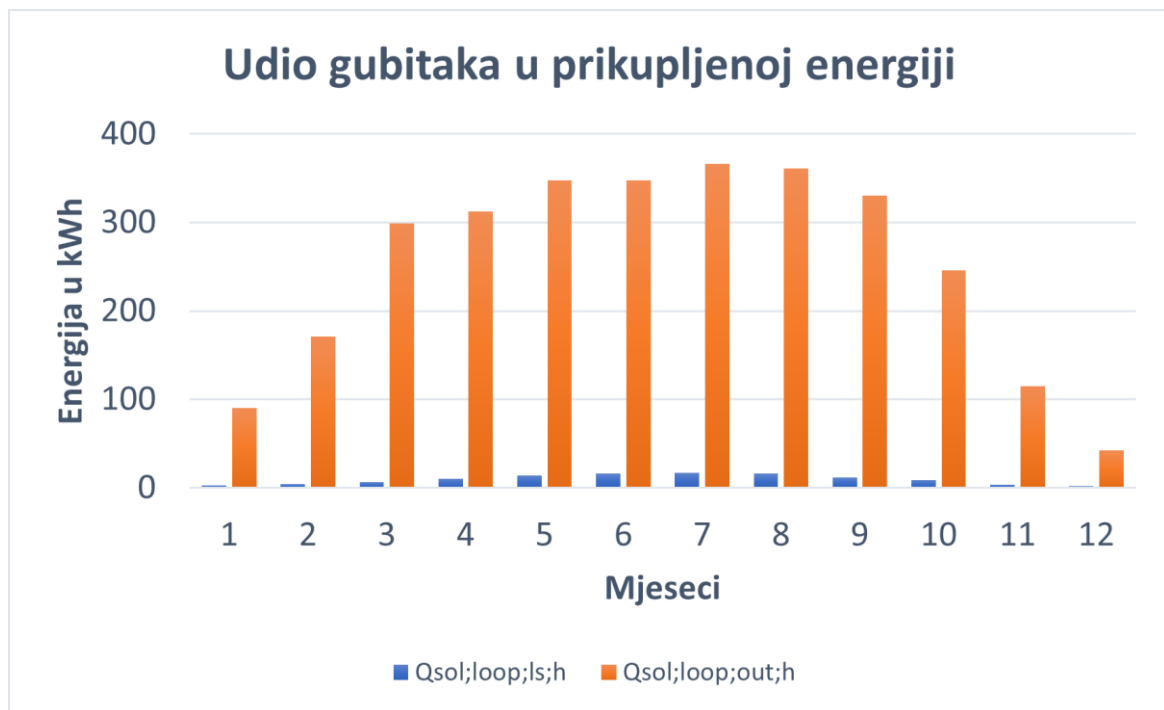
Opcija sa najmanjim povratom investicije bila bi sustav koji ima površinu kolektora 6 m² i spremnik zapremnine 500 l i on bi iznosio 25,4 godine. Pri odabiru ovakve kombinacije pojavio se problem previsoke temperature u spremniku čiji je maksimum 75°C što nije idealno rješenje.

Slika 22 Temperatura u spremniku pri volumenu od 500 l i površini kolektora 6 m²

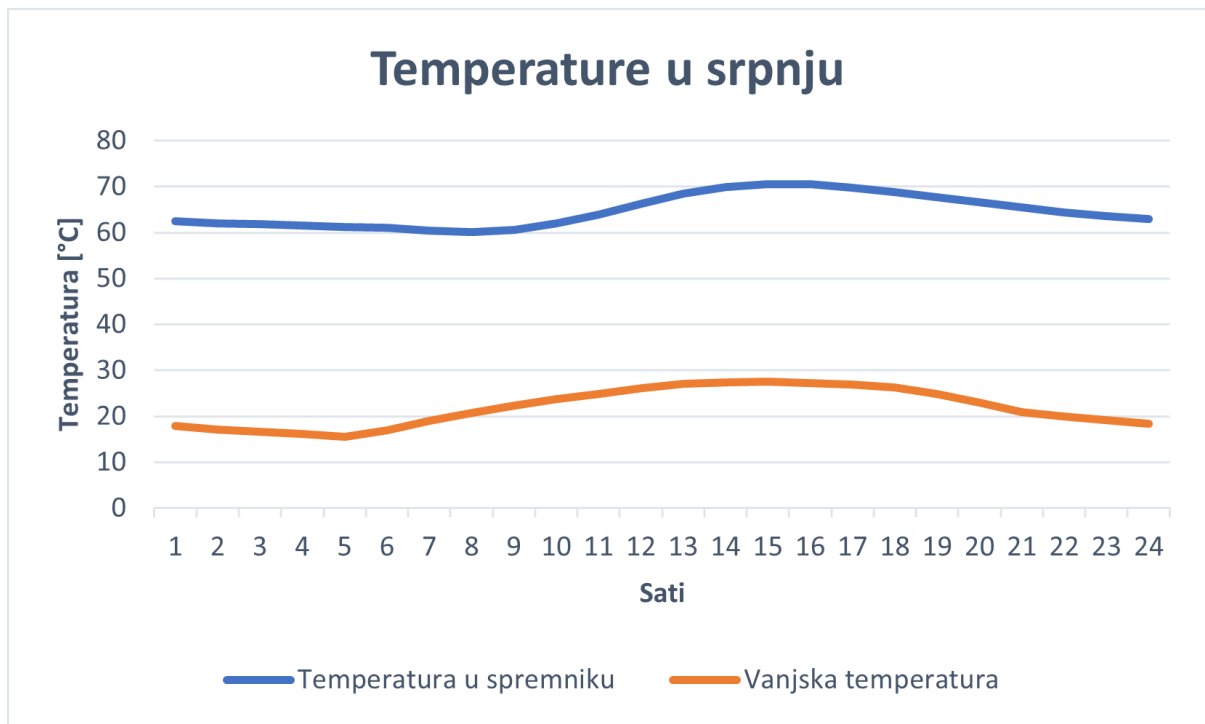
Na temelju svih ovih zaključaka odabran je sustav sa površinom kolektora 6 m² i spremnik zapremnine 600 l čija efikasnost iznosi 36 %, a period povrata investicije 27,6 godina.

6.3. Energija prikupljena solarnim sustavom

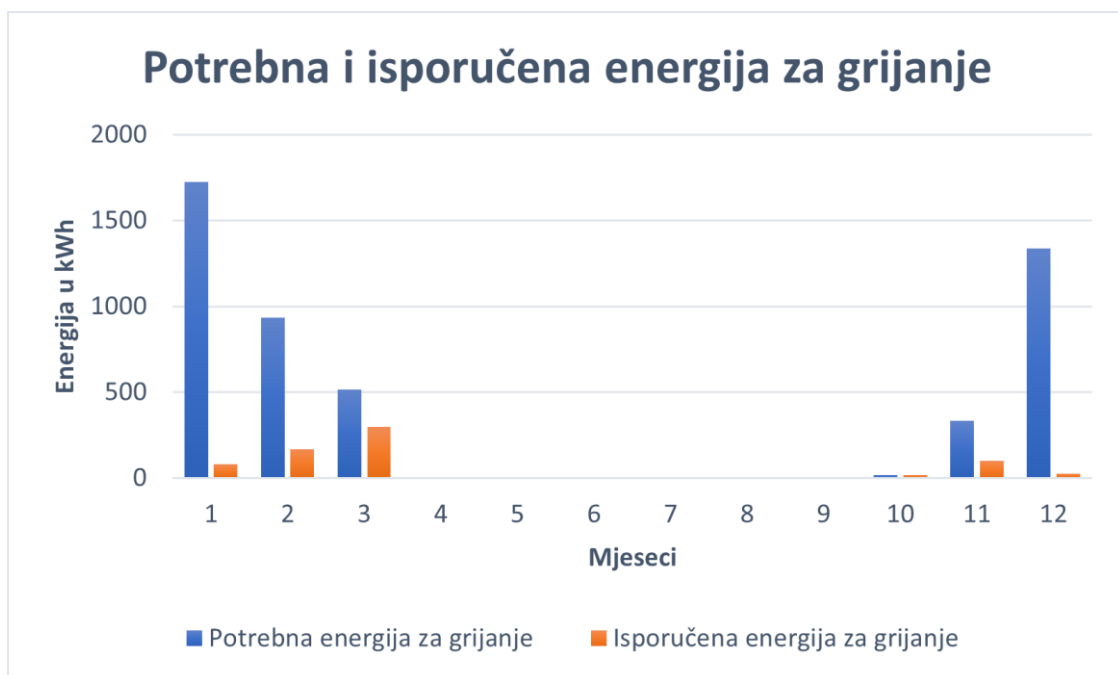
Podaci prikazani na sljedećim dijagramima dobivenim su korištenjem metoda opisanim u 3. poglavlju. Energija na izlazu iz kolektorskog kruga koja se dobije izrazom (11) je u stvari energija koja se uspjela prikupiti solarnim kolektorima i njome se uspjelo pokriti 30 % ukupnih godišnjih potreba za grijanjem i PTV-om. Najviše energije prikupilo se u ljetnim mjesecima jer je zračenje tada najintenzivnije. Narančasto su označeni iznosi energije koja se isporuči solarnim sustavom, a plavom gubici kolektorskog kruga koji nastaju na cijevima razvoda na slici 23. Godišnji iznos prikupljene energije solarnim sustavom iznosi $480,65 \text{ kWh/m}^2$. Udio gubitaka u godišnjoj prikupljenoj energiji kreće se od 3 do 5 % te se iz dijagrama može primijetiti da su gubici najveći u ljetnim mjesecima. Razlog tome je što tada raste prosječna temperatura u kolektorima jer je porasla reducirana razlika temperatura u kolektorima stoga su veći gubici prema okolišu i smanjuje se efikasnost kolektora. Prosječne temperature u mjesecu srpnju su u rasponu od 60 do 70°C , dok su vanjske temperature u prosjeku 25°C te se jasno može vidjeti da je ta razlika dosta velika i utječe na porast gubitaka topline što je prikazano na slici 24 .



Slika 23 Energija prikupljena solarnim sustavom

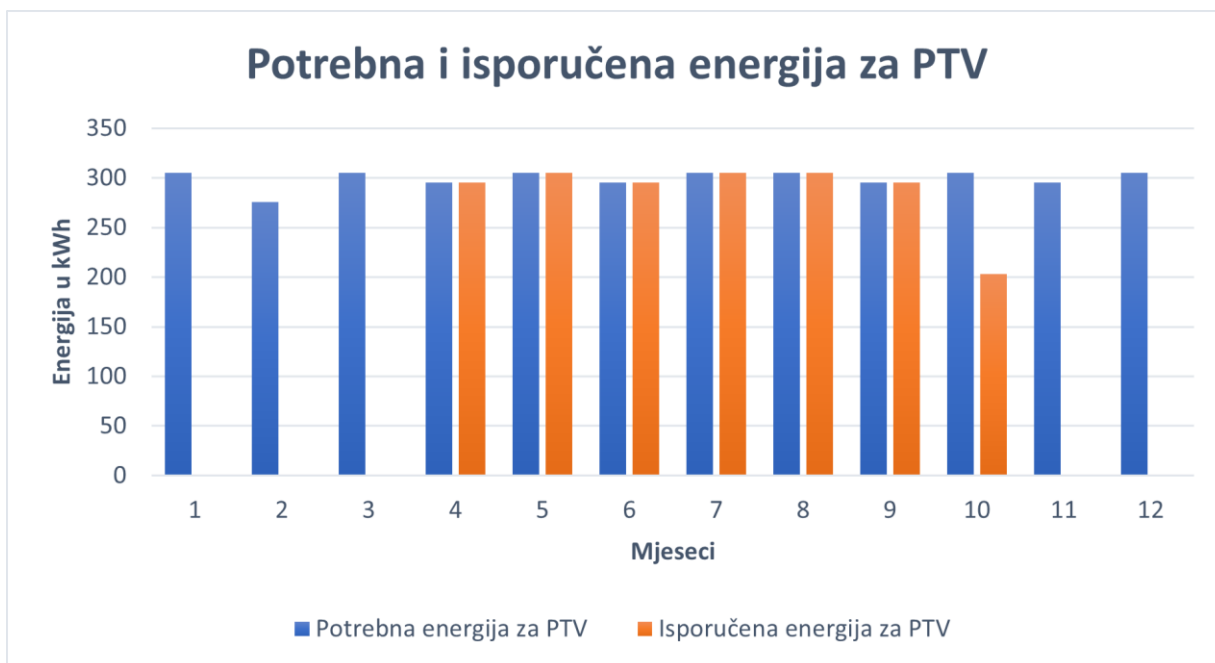


Slika 24 Prikaz temperature u spremniku i vanjske temperature



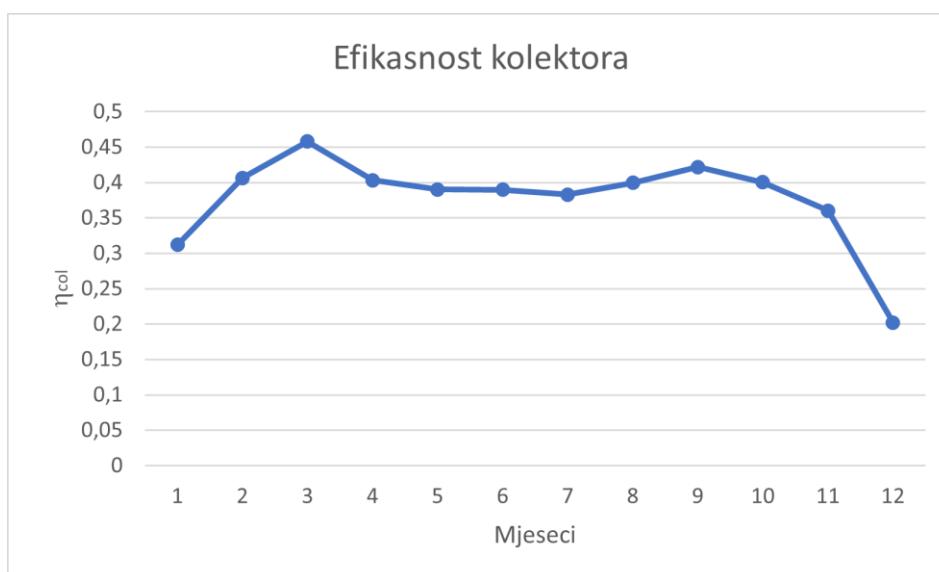
Slika 25 Prikaz udjela isporučene energije solarnim sustavom i potrebne za grijanje

Na slici 25 je plavom bojom označena potrebna energija za grijanje u svakom mjesecu. Najveće potrebe su u siječnju i prosincu kada je zračenje najmanje. Iz priloženog se vidi da prikupljena energija ni približno ne zadovoljava potrebe za grijanjem, ali takav rezultat je očekivan te će dodatni grijač nadoknaditi tu razliku. Od travnja do rujna grijanje je isključeno te se sva prikupljena energija može preusmjeriti na PTV.



Slika 26 Prikaz udjela isporučene energije solarnim sustavom i potrebne energije za PTV

Energija potrebna za grijanje PTV je konstantnog iznosa kroz sve mjesece u godini jer je dnevna potrošnja PTV-a svaki dan ista stoga je iznos potrebni iznos energije 9,86 kWh. Od travnja do rujna zahtjev energije za PTV-om je u potpunosti zadovoljen odabranom površinom i brojem kolektora jer više ne postoji zahtjev za grijanjem prostora te se sva prikupljena energija koristi za zagrijavanje PTV-a. Također, radi se o mjesecima kada je sunčevo zračenje sve intenzivnije što daje mogućnost kolektorima da prikupe i više energije. U ostalim, zimskim mjesecima, potrebno je koristiti dodatni grijač kako bi dogrijavao PTV na zadanu izlaznu temperaturu vode od 45°C.

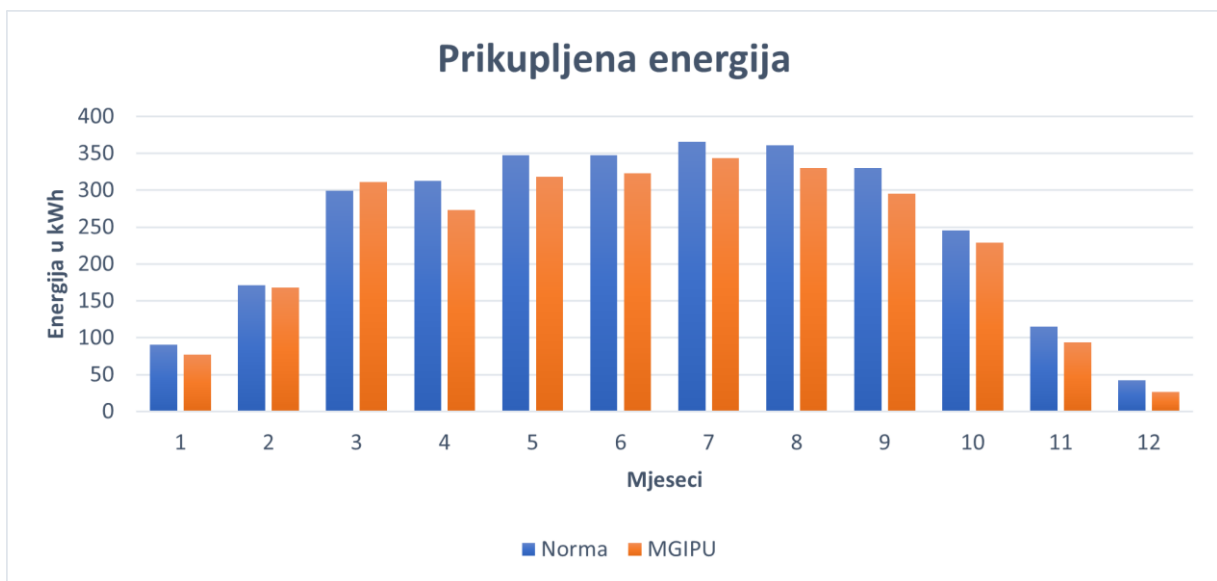


Slika 27 Prikaz iskoristivosti kolektora u svim mjesecima

Na slici 27 prikazane su prosječne mjesečne efikasnosti kolektora. Godišnja uprosječena vrijednost efikasnosti kolektora iznosi 41 %. U trećem mjesecu efikasnost je maksimalnog iznosa 45,7 %. Ova pojava, na prvi pogled nelogična, može se objasniti primjenom dosadašnjih zaključaka. Naime, potrebe za grijanjem u ožujku, iako nisu velike, i dalje postoje kao i potreba za grijanjem PTV-a. No za razliku od ostalih mjeseci u sezoni grijanja, u ožujku je sunčevo zračenje znatno veće te se može prikupiti više energije. Prosječna temperatura u kolektorima je niža kao i temperatura u spremniku stoga se smanjuju toplinski gubici, a iskoristivost doseže svoj maksimum.

6.4. Usporedba rezultata sa MGIPU Energetskim certifikatorom

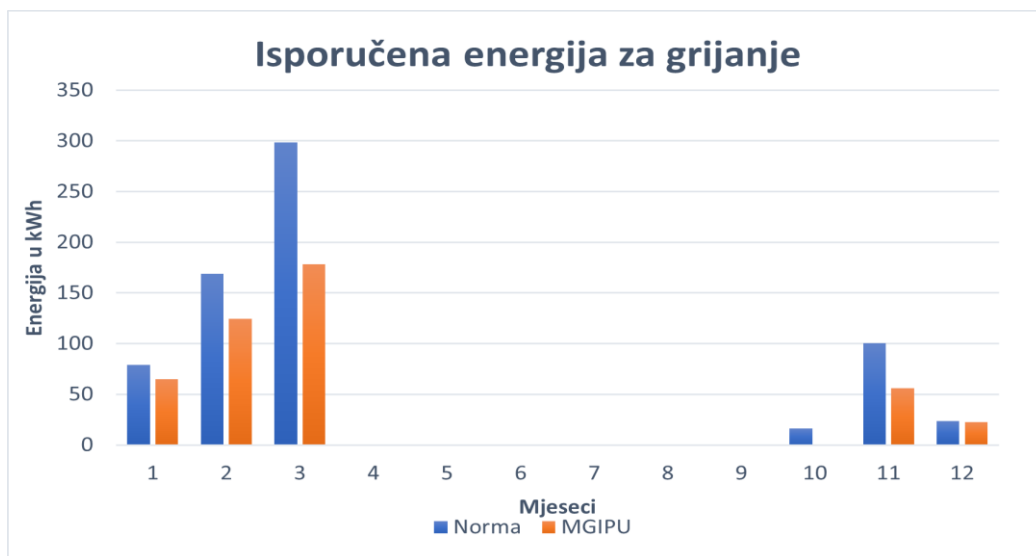
U podpoglavlju 6.2. prikazani su rezultati proračuna koji je proveden u Excel-u. Kako je taj proračun proveden prema novijim normama iz 2020. godine, bilo je potrebno usporediti rezultate sa MGIPU Energetskim certifikatorom koji proračunava prema starijim normama iz 2007. godine.



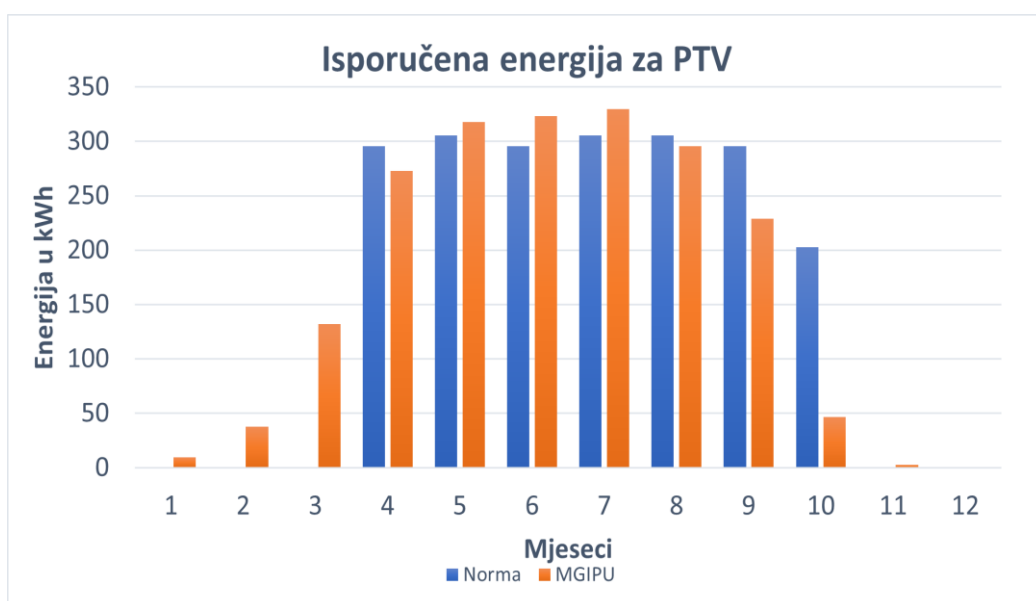
Slika 28 Usporedba prikupljene energije solarnim sustavom s dvjema metodama

Na slici 28 je prikazan dijagram gdje je uspoređeno koliko se energije prikupilo korištenjem novijih normi (plavo), a koliko energije je izračunao program (narančasto). U zimskim mjesecima, sezoni grijanja, prikupilo se podjednako zračenja, a u ljetnim mjesecima prikupljeno je 7 % više energije solarnim sustavom prema normama iz 2020. godine. Na slici 29 gdje je prikazana usporedba isporučene energije za grijanje, uočava se da se puno više energije isporučilo za grijanje primjenom novijih normi. Razlog tome jest što se u novijim normama sva prikupljena energija

koristi za pokrivanje potreba za grijanjem i stoga onda ne preostane energije i za PTV jer je nedovoljno sunčevog zračenja, dok se proračunom u Energetskom certifikatoru dio prikupljene energije isporučuje za grijanje, a dio za PTV. U tablici 6. je prikazana sumirana isporučena energija za grijanje i za PTV dobivena opisanim normama i MGIPU-om. Zadnji redak prikazuje odstupanje MGIPU-a od rezultata novijih normi izraženo postotkom. Može se primijetiti MGIPU-om isporučiti 0,43 % manje energije za PTV od novije norme te za grijanje se prema normi isporučiti 34,91 % energije više nego kod MGIPU-a. Stoga je zaključak kako je u novijim normama prioritet isporučiti energiju za grijanje nego za PTV.



Slika 29 Usporedba isporučene energije za grijanje



Slika 30 Usporedba isporučene energije za PTV

Tablica 6. Usporedba godišnje isporučene energije

	GODIŠNJA ISPORUČENA ENERGIJA	
	PTV	GRIJANJE
Norma	2004,653384	685,5231879
MGIPU	1996,03	446,18
Odstupanje	0,43%	34,91%

6.5. Pomoćna energija

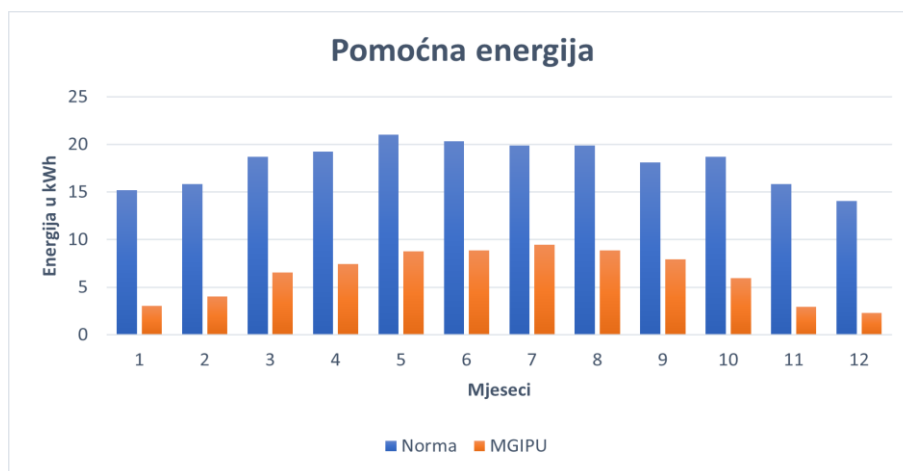
Radi se o energiji potrebnoj za pogon pumpe i njene regulacije što zajedno osiguravaju protok fluida u kolektorskoj petlji. Snaga pumpe izračunata je prema zadanim koeficijentima navedenim u normi prikazanim u tablici 7., no ako je poznato koja će se pumpa koristiti u sustavu, potrebno je proračunati snagu prema karakteristikama iz kataloga.

$$P_{\text{sol;pmp}} = c_1 + c_2 A_{\text{sol;mod}} N_{\text{sol;mod}} \text{ [W]} \quad (28)$$

Tablica 7. Koeficijenti za izračun snage pumpe [5]

Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
c_1	25	[W]
c_2	2	[W/m ²]

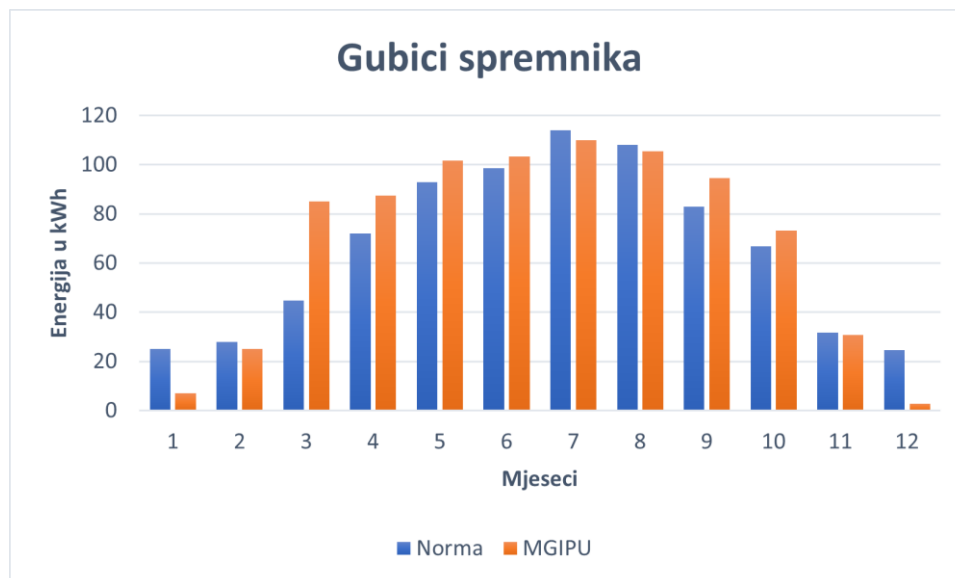
U usporedbi sa vrijednostima iz MGIPU Energetskog certifikatora pokazalo se da snaga pumpe izračunata prema zadanim koeficijentima troši puno više energije. Potrošnja pumpe u siječnju iznosila je 15,2 kWh, a u srpnju 19,8 kWh.



Slika 31 Pomoćna energija iz dvije metode

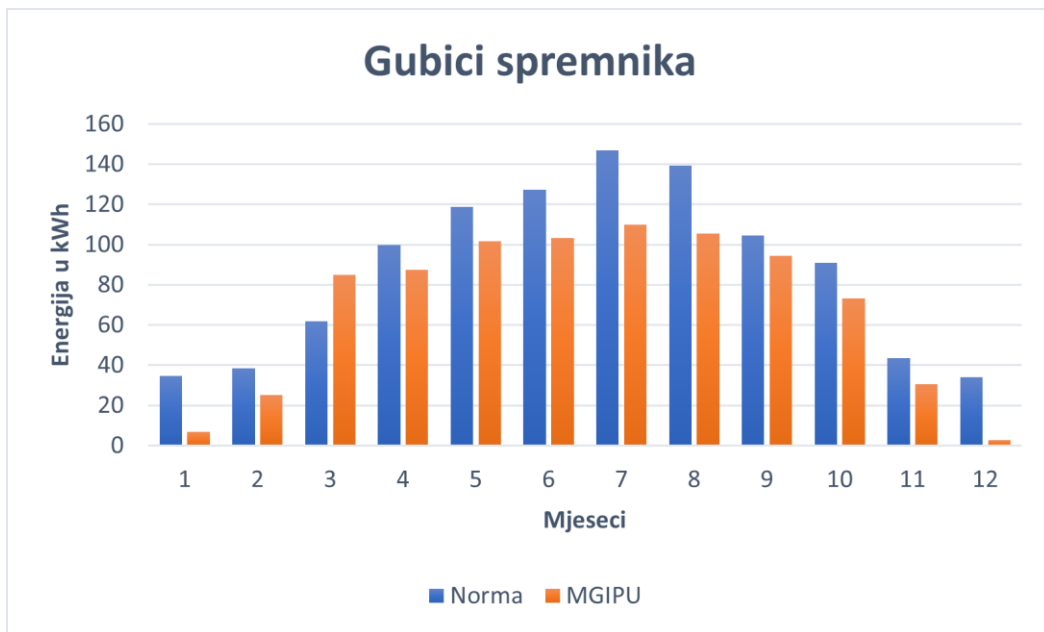
6.6. Akumulacijski spremnik

Namjena spremnika je pohrana zagrijane vode koja se distribuira dalje u sustav za grijanje i PTV. Spremnik je smješten u grijanom prostoru sa ciljem da se gubici prema okolini smanje što je više moguće. Odabran je spremnik zapremnine 600 l s jednim izmjenjivačem topline. Maksimalna radna temperatura u spremniku ne bi smjela biti veća od 95°C te ako taj uvjet nije zadovoljen potrebno je odabrati spremnik veće zapremine. Pri usporedbi gubitaka spremnika dobivenih iz norme i MGIPU-a uočavaju se neznatna odstupanja u rezultatima. Gubici u spremniku su daleko veći u ljetnim mjesecima nego u zimskim. U ljetnim mjesecima veće su temperature u spremniku jer se prikupi više sunčevog zračenja. Spremnik se nalazi u grijanom prostoru u kojemu je konstantna temperatura od 20°C i u toplijim mjesecima stvara se veća temperaturna razlika između temperature u spremniku i temperature u prostoru i zato su veći gubici.



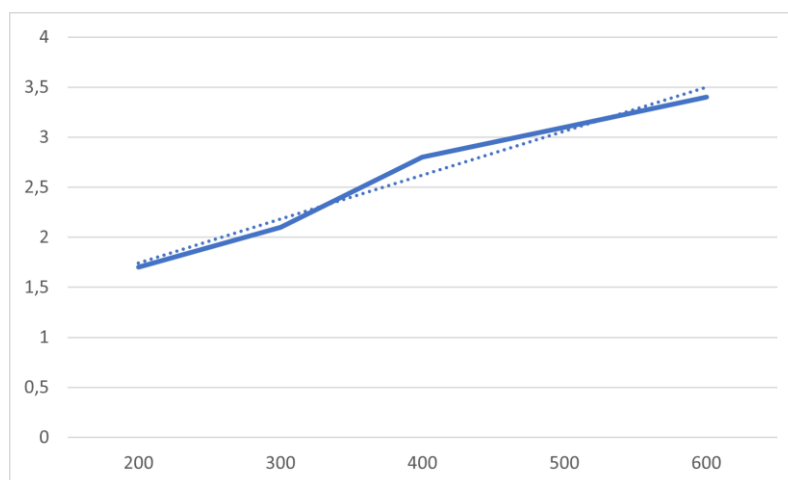
Slika 32 Usporedba gubitaka topline spremnika iz dvije metoda

Problem se pojavio kod izračuna koeficijenta izmjene topline. Kada se koeficijent računa pomoću zadanih parametara iz norme prema jednadžbi (14), dobiju se puno veći gubici topline što je prikazano na slici 33. U tom slučaju vrijednost koeficijenta iznosi 4 W/K za spremnik volumena 600 l. Uočava se da u ljetnim mjesecima gubici spremnika porastu za 30% korištenjem veće vrijednosti koeficijenta izmjene topline. Što znači da se pogrešnim odabirom spomenutog koeficijenta dobiju znatno veći gubici topline i to će na kraju utjecati na pogrešnu procjenu iskoristivosti cijeloga sustava.



Slika 33 Utjecaj koeficijenta izmjene topline na gubitke spremnika

Iz toga razloga koeficijent izmjene topline je očitao iz kataloga s tehničkim podacima za odabrani spremnik. Na slici 32 prikazan je katalog specifikacija dan za volumene spremnika od 200 do 500 l, da bi se došlo do podataka za spremnik od 600 l napravljena je linearna aproksimacija (slika 34) te je iz nje dobiven $H_{sto,ls}$ koji je podijeljen sa referentnom temperaturom od 45°C . Na taj način dobiven je novi koeficijent izmjene topline koji se koristio u proračunu čija iznosi $3,1 \text{ W/K}$ za spremnik volumena 600 l. Na slici 33 prikazani su gubici u spremniku kada se koeficijent izmjene topline računao prema normi, a na slici 32 su gubici topline kada se koeficijent topline očitao iz kataloga. Na obje slike gubici u spremniku su uspoređeni sa MGIPU-om.

Slika 34 Linearna aproksimacija koeficijenta $H_{sto,ls}$

II.a. Tehnički podaci za neizravno zagrijavane spremnike vode od 200 - 500 l

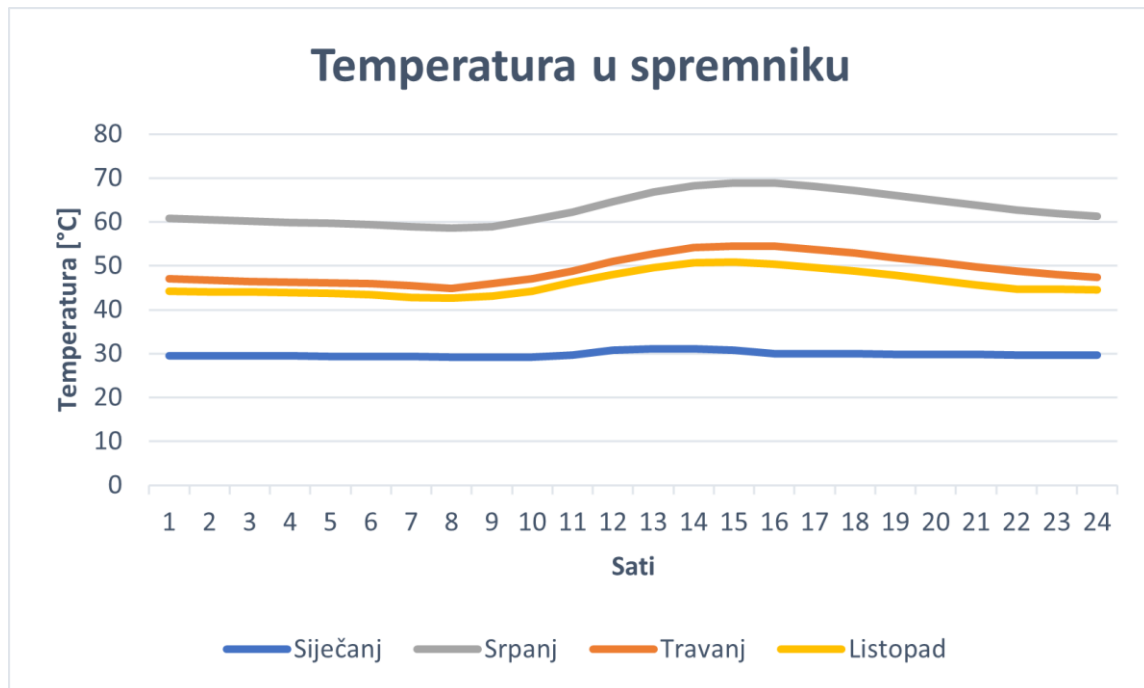
Tip izmjenjivača topline		AS 500 DUO / 8 bar	AH 500 UNO / 8 bar	AS 400 DUO / 8 bar	AH 400 UNO / 8 bar	AS 300 DUO / 8 bar	AH 300 UNO / 8 bar	AS 200 DUO / 8 bar	AH 200 UNO / 8 bar
Nazivna zapremina	l	500	500	400	400	300	300	200	200
Stvarna zapremina	l	482	489	386	392	286	291	196	198
Težina	kg	158	145	146	137	100	92	70	65
Izolacija - težak PU	mm	50	50	50	50	50	50	50	50
Veličina izmjenjivača topline (S1 - donja)	m ²	2.25	2.25	1.65	1.65	1.21	1.45	0.75	0.96
Veličina izmjenjivača topline (S2 - gornja)	m ²	1.04	-	0.76	-	0.85	-	0.54	-
Zapremina izmjenjivača topline (S1)	l	13.7	13.7	10	10	7.4	8.8	4.6	5.8
Zapremina izmjenjivača topline (S2)	l	6.4	-	4.6	-	5.2	-	3.3	-
Snaga izmjenjivača topline S1 u protočnom režimu	kW								
70-90°C		86	86	61	61	45	52	29	39
60-80°C		64	64	47	47	33	39	22	31
50-70°C		41	41	33	33	25	29	14	17
50-60°C		20	20	17	17	20	24	7	9
Snaga izmjenjivača topline S2 u protočnom režimu	kW								
70-90°C		39	-	30	-	32	-	19	-
60-80°C		27		21		24		13	
50-70°C		17		12		15		9	
50-60°C		6		4		9		5	
Količina tople vode s $\Delta T_{35^\circ C}$ (S1)	l/min								
70-90°C		62	62	44	44	33	37	21	28
60-80°C		46	46	34	34	24	28	16	22
50-70°C		28	28	24	25	18	21	10	12
50-60°C		27	27	25		28	34	11	13
Količina tople vode s $\Delta T_{35^\circ C}$ (S2)	l/min								
70-90°C		29	-	21	-	21	-	14	-
60-80°C		19		15		17		9	
50-70°C		12		9		11		7	
50-60°C		10		6		13		8	
Max. količina vode - MIX45°C (S1)	l	510	553	405	412	302	330	225	240
Max. količina vode - MIX45°C (S2)	l	250	-	200		151	-	111	-
Gubitak topline (ΔT_{45K})	kW/24h	3.1	3.1	2.8	2.8	2.1	2.1	1.7	1.7
Max. radna temperatura	°C	95	95	95	95	95	95	95	95
Max. radna temperatura izmjenjivača topline	°C	110	110	110	110	110	110	110	110
Radni tlak spremnika vode	bar	8	8	8	8	8	8	8	8
Radni tlak izmjenjivača topline	bar	6	6	6	6	6	6	6	6

Slika 35 Tehnički podaci Bosch spremnika [8]

6.7. Temperatura vode u spremniku

Zbog provođenja satne metode, bilo je moguće dobiti uvid o kretanju temperature unutar spremnika za svaki karakterističan dan u godini. Na taj način mogla se kontrolirati maksimalno postignuta temperatura u spremniku i da ona ne pređe zadanu vrijednost. Kao što je bilo i očekivano temperature u spremniku su bile najveće u mjesecu srpnju, a najmanje u siječnju. Kod visokih temperatura, kao što je u srpnju, se kemijske reakcije odvijaju većim brzinama te stoga takvi uvjeti pogoduju korozivskim oštećenjima. Kod nižih temperatura postoji opasnost od razvoja bakterije legionele. Radi se o bakteriji koja stanuje u vodi ili vlažnom tlu te je kao takva često prisutna u sustavima s višim temperaturama vode. Posebno joj pogoduju temperature oko 30°C, ali na već 50°C dolazi do njenog potpunog uklanjanja. Kao mjeru prevencije spremnik bi svakako

jednom godišnje trebalo isprazniti i dezinficirati, a u zimskim mjesecima kada je temperatura u spremniku znatno niža bilo bi potrebno dodatno obraditi vodu dodatnim metodama.

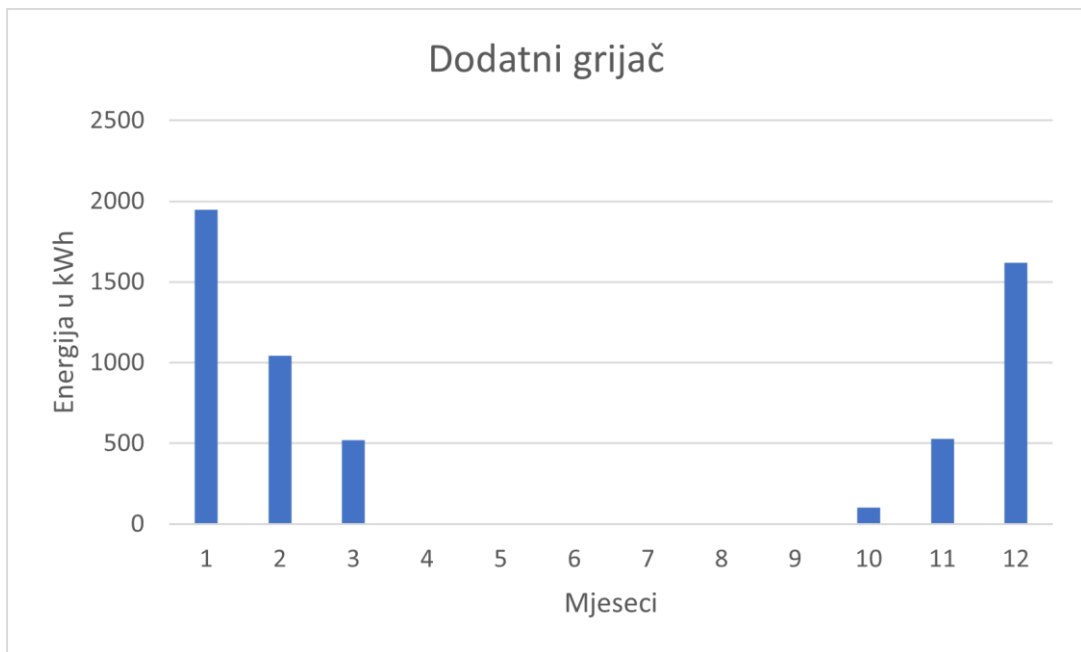


Slika 36 Kretanje temperature u spremniku kroz više mjeseci

Najveći temperaturni pad događa se navečer kada je pretpostavljena najveća potrošnja PTV-a, a temperaturni dnevni maksimum se događa oko 13 h kada je sunčevo zračenje najintenzivnije. U siječnju nema znatnijih oscilacija temperature u spremniku jer je sunčevo zračenje slabo i ne uspije se prikupiti dovoljno energije da bi se voda zagrijala.

6.8. Dodatni grijač

Uloga dodatnog grijača je da nadomjesti razliku potrebne energije i prikupljene energije solarnim sustavom. Na slici 37 se vidi da je dodatni grijač bilo potrebno paliti samo tokom sezone grijanja, a da u ljetnim mjesecima solarni sustav pokrije sve potrebe za PTV-om. Za dogrijavanje korišten je kotao koji koristi prirodni plin kao izvor topline. Kao dodatni izvor topline mogao se izabrati električni grijač, no budući da je struja skuplji izvor topline nego plin, nije uzeta u obzir.



Slika 37 Energija dodatnog grijača

Tarifni model (godišnja potrošnja plina)	Trošak nabave plina	Trošak distribucije plina	Opskrbna marža	Ukupna krajnja cijena (bez PDV-a)	Fiksna mjeseč. naknada (kn/mjeseč)
TM1 – do 5.000 kWh	0,1825	0,0402	0,0130	0,2357	14,00
TM2 – preko 5.000 do 25.000 kWh	0,1825	0,0402	0,0130	0,2357	14,00
TM3 – preko 25.000 do 50.000 kWh	0,1825	0,0402	0,0130	0,2357	25,00
TM4 – preko 50.000 do 100.000 kWh	0,1825	0,0362	0,0130	0,2317	36,00

Slika 38 Cijene plina [10]

Kategorija	Tarifni model	Tarifni element						
		Radna energija			Radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za obračunsko mjesto	
		JT	VT	NT				
		[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/mj]	
Tarifne stavke								
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,31	-	-	-	-	10,00
		Bijeli	-	0,35	0,17	-	-	10,00
		Crveni	-	0,21	0,10	38,50	-	41,30
		Crni	0,18	-	-	-	-	5,80

Slika 39 Cijene struje [11]

7. ZAKLJUČAK

U ovome radu analizirani su solarni toplovodni sustavi čija je namjena bila priprema PTV-a i niskotemperaturno grijanje odabrane zgrade gotovo nulte energije. Bilo je potrebno odrediti koliko se sunčevog zračenja može prikupiti solarnim kolektorima te na temelju toga dimenzionirati dvije najbitnije komponente solarnog sustava, solarne kolektore i akumulacijski spremnik. Solarni sustav je morao ispuniti zahtjev da pokrije 30 % ukupnih godišnjih potreba za energijom odnosno za PTV i grijanje uz dodatni uvjet da period povrata investicije bude minimalan. Budući da solarni sustav treba pokriti samo 30 % zahtjeva za ukupnom potrebnom energijom, neophodno je korištenje dodatnog grijača kao sekundarnog izvora topline. Odabrani energent za dodatni grijač je zemni plin poglavito iz ekonomskih razloga jer iako je ekološki neprihvatljiv, jedan je od najjeftinijih izvora energije.

Referentna niskoenergetska kuća ukupne korisne površine 155 m² nalazi se na području Zagreba i prema njenim zahtjevima za potrebnom energijom odabrana su 3 kolektora svaki površine 2,1 m² i akumulacijski spremnik zapremnine 600 l i time je pokriveno 31,3 % ukupnih godišnjih potreba za energijom. Od travnja do studenog solarni sustav je uspio zadovoljiti sve energetske potrebe zgrade i jedino se u sezoni grijanja morao uključiti dodatni grijač. Energija koju je potrošio dodatni grijač iznosila je 37,41 kWh/m².

Proračun je napravljen prema normama EN 15316-4-3 i EN 15316-5 te je proveden prema satnoj metodi. Takav način rada omogućio je uvid u kretanje svih parametara kroz sve sate za karakterističan dan. Te dvije norme opisale su na koji način se računa prikupljena energija, gubici u sustavu i iskoristivost kolektorskog kruga. Rješenja koja dobiveni dvjema normama su uspoređena sa rješenjima koje je izračunao MGIPU Energetski certifikator. Usporedbom rezultata pokazale su se znatne razlike kod isporučene energije za grijanje i PTV. Sustav proračunat prema normama isporučivao je više energije za grijanje dok je kod MGIPU Energetskog certifikatora predviđeno više energije za PTV, a manje za grijanje u zimskim mjesecima. Pomoćna energija koju troši pumpa za cirkulaciju fluida u kolektorskoj petlji pokazala se da zahtjeva previše energije nego što je to proračunao program. Budući da se snaga računa po formuli (28), može se zaključiti da koeficijenti c_1 i c_2 su previsoki.

U odabrani solarni sustav potrebno je investirati 19 135 kn. U cijenu investicije su uračunate cijene kolektora, cijena spremnika i troškovi radova i instaliranja sustava. Godišnja ušteda predstavlja razliku cijene plina koji bi se potrošio bez solarnog sustava i cijene plina potrebnog za dogrijavanje. Ta ušteda na godišnjoj razini iznosi 695,2 kn. Vrijeme za koje će se investicija isplatiti iznosi 27,61 godina. Period povrata investicije je toliko visok zbog toga što je prosječna

efikasnost sustava niska. Primjerice u odabranoj konfiguraciji sustava prosječna godišnja efikasnost sustava iznosi 36 % , dok je efikasnost kolektora malo veća te iznosi 42 %. Ta razlika se objašnjava gubitkom topline u kolektorskom krugu stoga energija prikupljena na apsorberu nije jednaka isporučenoj energiji u sustav. Veliki utjecaj na efikasnost sustava je imala temperatura u spremniku. Povećanjem površine kolektora efikasnost je trebala rasti, ali je opadala jer su rasle temperature u spremniku iznad dozvoljene granice i na taj način postigao se suprotan efekt.

LITERATURA

- [1] <http://www.sunceipartneri.hr/grijanje-vode/>
- [2] Dović, D.: Obnovljivi izvori energije, Zagreb, 2012.
- [3] Twidell J., Weir T.: Renewable energy resources, Taylor & Francis, New York; 2006.
- [4] http://www.eko-puls.hr/Solarne_instalacije.aspx
- [5] FprEN15316-4-3:2017: Energy performance of buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-3: Heat generation systems, thermal solar and photovoltaic systems, Module M3-8-3, M8-8-3, M11-8-3, CEN/TC 228, 2017.
- [6] FprEN 15316-5:2014 Heating systems and water based cooling systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 5: Space heating and DHW storage systems, CEN/TC 228, 2017.
- [7] <https://mgipu.gov.hr/o-ministarstvu-15/djelokrug/energetsko-certificiranje-zgrada-8304/racunalni-program-za-odredjivanje-energetskog-svojstva-zgrade-8359/8359>
- [8] Katalog Termometal: Bosch akumulacijski spremnici
- [9] D. Dović, I. Horvat, A. Rodić, V. Soldo, S. Švaić: Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama, Zagreb, 2015.
- [10] HEPplin: Tarifni modeli
- [11] HEPelektra: Tarifni modeli