

POVEĆANJE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI SUSTAVA GRIJANJA ZGRADE INTEGRIRANJEM SUNČEVE ENERGIJE

Šegota, Eugen

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:550523>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

ZAVRŠNI RAD
POVEĆANJE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI SUSTAVA
GRIJANJA ZGRADE INTEGRIRANJEM SUNČEVE ENERGIJE

Rijeka, rujan 2024.

Eugen Šegota
0069092389

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

ZAVRŠNI RAD
**POVEĆANJE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI SUSTAVA
GRIJANJA ZGRADE INTEGRIRANJEM SUNČEVE ENERGIJE**
Mentor: prof. dr. sc. Igor Wolf

Rijeka, rujan 2024.

Eugen Šegota
0069092389

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku
Predmet: Tehnika grijanja

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Eugen Šegota (0069092389)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)
Zadatak: **Povećanje energetske učinkovitosti sustava grijanja zgrade integriranjem sunčeve energije / Improving the energy efficiency of a building heating system by incorporating solar energy**

Opis zadatka:

Na temelju termodinamičke analize postojećega sustava grijanja i pripreme potrošne tople vode temeljenoga na primjeni kompresorske dizalice topline zrak-voda, u radu je potrebno provesti tehno-ekonomsku analizu te istražiti mogućnosti povećanja energetske učinkovitosti stambene zgrade, čije su arhitektonske podloge sastavni dio ovoga zadatka. Ispitati potencijal smanjenja energetske potrošnje navedenoga sustava iskorištavanjem lokalno raspoložive sunčeve energije. U tu je svrhu u obzir potrebno uzeti uporabu sunčevih toplinskih kolektora, odgovarajućih toplinskih spremnika, fotonaponskih modula i baterija u različitim kombinacijama i izvedbama sustava, s krajnjim ciljem postizanja što veće energetske samodostatnosti zgrade. Razmotriti ekonomičnost promatranih rješenja s i bez dobivanja državnih subvencija za povećanje energetske učinkovitosti stambenih objekata.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Igor Wolf

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

IZJAVA

Poštujući Pravilnik o završnom radu, završnom ispitu i završetku studija preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad naslova „Povećanje energetske učinkovitosti sustava grijanja zgrade integriranjem sunčeve energije“ tijekom ljetnoga semestra akademske godine 2023./24.

Rad sam izradio prema zadatku Povjerenstva za završne ispite sveučilišnoga studija strojarstva pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Igora Wolfa.,

Rijeka, rujan 2024.

Eugen Šegota

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Igoru Wolfu na usmjeravanju, strpljenju i susretljivosti koji su mi bili od iznimne pomoći tijekom izrade završnog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SUSTAVI GRIJANJA	2
2.1 Lokalno grijanje.....	2
2.2 Centralno grijanje	2
2.2.1 Generatori topline.....	3
2.2.2 Ogrjevna tijela	3
3. SUSTAV PRIPREME POTROŠNE TOPLE VODE.....	4
4. OSNOVNI TEHNIČKI PRORAČUNI.....	5
4.1 Lokacija zgrade.....	5
4.2 Arhitektonski opis zgrade.....	7
4.2.1 Geometrijske karakteristike zgrade	8
4.2.2 Građevni dijelovi zgrade	9
4.3 Toplinska bilanca zgrade	12
4.3.1 Projektne temperature	12
4.3.2 Izračun koeficijenata prolaza topline	13
4.3.3 Utjecaj toplinskih mostova.....	15
4.3.4 Proračun toplinskih gubitaka zgrade	15
4.4 Proračun potrebnog učina za pripremu potrošne tople vode	21
4.5 Proračun sustava podnog grijanja.....	23
5. DEFINIRANJE SUSTAVA GRIJANJA I ODABIR OPREME	28
5.1 Varijanta 1: Dizalica topline i spremnik PTV-a	29
5.2 Varijanta 2: Dizalica topline i spremnik PTV-a + solarni kolektori.....	32
5.3 Varijanta 3: Sustav s fotonaponskim panelima	36
5.4 Dimenzioniranje razvoda podnog grijanja	38
5.5 Proračun cirkulacijske pumpe za podno grijanje.....	39
5.6 Odabir ekspanzijske posude	41
6. TECHNO-EKONOMSKA ANALIZA SUSTAVA	45
6.1 Investicijski troškovi.....	45
6.2 Troškovi energije.....	47
6.3 Troškovi održavanja	50
6.4 Isplativost sustava.....	51

6.5 Isplativost sustava s dizalicom topline i fotonaponskom elektranom	53
7. ZAKLJUČAK	57
LITERATURA.....	59
SAŽETAK.....	61
SUMMARY	62

1. UVOD

Osnovni zadatak ovog završnog rada jest analiza opcija povećanja energetske učinkovitosti sustava grijanja zgrade i pripreme potrošne tople vode integriranjem sunčeve energije. Prema uzoru na postojeći sustav grijanja provedeni su potrebni proračuni na temelju arhitektonske podloge i lokacije zgrade, kako bi se u konačnici izračunali potrošnja energije i ukupni troškovi unaprjeđenja sustava. U cilju povećanja energetske učinkovitosti, odnosno smanjenja troškova i negativnog utjecaja na okoliš, isti postupak je proveden za razmatrane izvedbe sustava koje koriste sunčevu energiju kako bi se na kraju izvršila tehno-ekonomska analiza primjenjivosti i isplativosti tih sustava.

Riječ je o stambenoj zgradi u gradu Rijeci, sa prizemljem, grijanim podrumom i katom. Osnovna izvedba sustava grijanja je podno grijanje s kompresorskom dizalicom topline zrak-voda kao generatorom topline za grijanje prostora i potrošne tople vode u spremniku. Predložene su i varijante sustava koje koriste toplinsku pretvorbu sunčeve energije putem sustava pločastih solarnih kolektora te fotonaponsku pretvorbu sunčeve energije ugradnjom fotonaponske elektrane.

Polazište rada je proračun toplinskih gubitaka zgrade i pojedinih prostorija. Na temelju dobivenih vrijednosti, uz definirane vanjske i unutarnje projektne temperature, koristeći program „Europlan“ proizvođača Harreither, dimenzioniran je sustav podnog grijanja. Prema proračunima je odabrana sva potrebna oprema. Nakon što su sve varijante sustava proračunate i definirane, unosom potrebnih vrijednosti u program „KI Expert Plus“ izračunati su potrebni podaci o energetskim zahtjevima sustava. Konačno, na temelju dobivenih podataka o svim troškovima, provedena je tehno-ekonomska analiza utvrđenih varijanti sustava.

2. SUSTAVI GRIJANJA

Osnovna funkcija sustava grijanja je stvaranje i održavanje pogodnih mikroklimatskih uvjeta za boravak u zatvorenim prostorima. Sustave grijanja možemo podijeliti na više načina. Prema smještaju generatora topline dijelimo ih na pojedinačna (lokalna) i centralna grijanja.

2.1 Lokalno grijanje

Kod lokalnih grijanja generator topline se nalazi u prostoriji koju treba grijati. Zbog svoje konstrukcijske jednostavnosti, uređaji za lokalna grijanja prvi su korišteni u ljudskoj povijesti. S vremenom su se koristile različite izvedbe kao kamini, kaljeve peći, željezne peći, uređaji na plinovita goriva, uređaji na električnu energiju i drugi. Karakterizira ih relativno visoka temperatura ogrjevnice površine i mala površina izmjene topline. Toplinu najvećim djelom predaju zračenjem. Glavna mana lokalnog grijanja jest nejednolika raspodijela temperature u grijanoj prostoriji što može uzrokovati nisku razinu ugodnosti boravka i nisku učinkovitost. Danas se uređaji za lokalno grijanje uglavnom koriste iz estetskih svrha ili kao dodatak postojećem sustavu grijanja.

2.2 Centralno grijanje

Centralno grijanje radi na principu distribucije topline putem ogrjevnice medija koji struji mrežom cijevi do ogrjevnice tijela u grijanim prostorijama, a generator topline se nalazi na jednom mjestu u zgradi/ kući. Pritom ogrjevnice medij može biti voda, para ili zrak. U odnosu na lokalna grijanja zahtijevaju veće investicijske i pogonske troškove, no danas se najviše koriste zbog prednosti u pogledu manjeg zagađenja okoliša i veće razine ugodnosti boravka u prostoru zbog ravnomjernije raspodjele temperature po prostoriji. Osnovni dijelovi centralnog sustava grijanja su: generator topline, dimovodni sustav, cijevni razvod, ogrjevnice medij, ogrjevnice tijela, cirkulacijske pumpe, sustav upravljanja te zaporna, sigurnosna i regulacijska armatura.

2.2.1 Generatori topline

U sustavu grijanja generator topline je onaj element koji ulazni oblik energije pretvara u toplinsku koju onda predaje ogrjevnom mediju. Sukladno tome jedna od bitnijih podjela generatora topline jest prema vrsti energenata koje koristi. Tu razlikujemo energente obnovljive prirode kojih na Zemlji ima u neograničenim količinama poput energije Sunca i vjetra, te neobnovljive kao što su: drvo, ugljen, plin i loživo ulje. U našem konkretnom slučaju glavni generator topline je kompresijska dizalica topline

Dizalica topline

Dizalice topline su uređaji koji na temelju lijevokretnog kružnog procesa omogućavaju prijenos energije iz toplinskog spremnika niže temperaturne razine u toplinski spremnik više temperaturne razine. Pritom spremnik niže temperaturne razine kojemu odvodimo toplinu nazivamo toplinskim izvorom i to može biti tlo, voda ili zrak kao u našem slučaju. Prema principu rada, odnosno izvoru dodatne energije potrebne za ostvarivanje lijevokretna kružna procesa, dijelimo ih na kompresorske, sorpcijske i Vuillemierove. U ovome radu razmatramo sustav s kompresijskom dizalicom topline zrak – voda. To znači da odvedenu toplinu vanjskoga zraka predaje vodi kao ogrjevnom mediju.

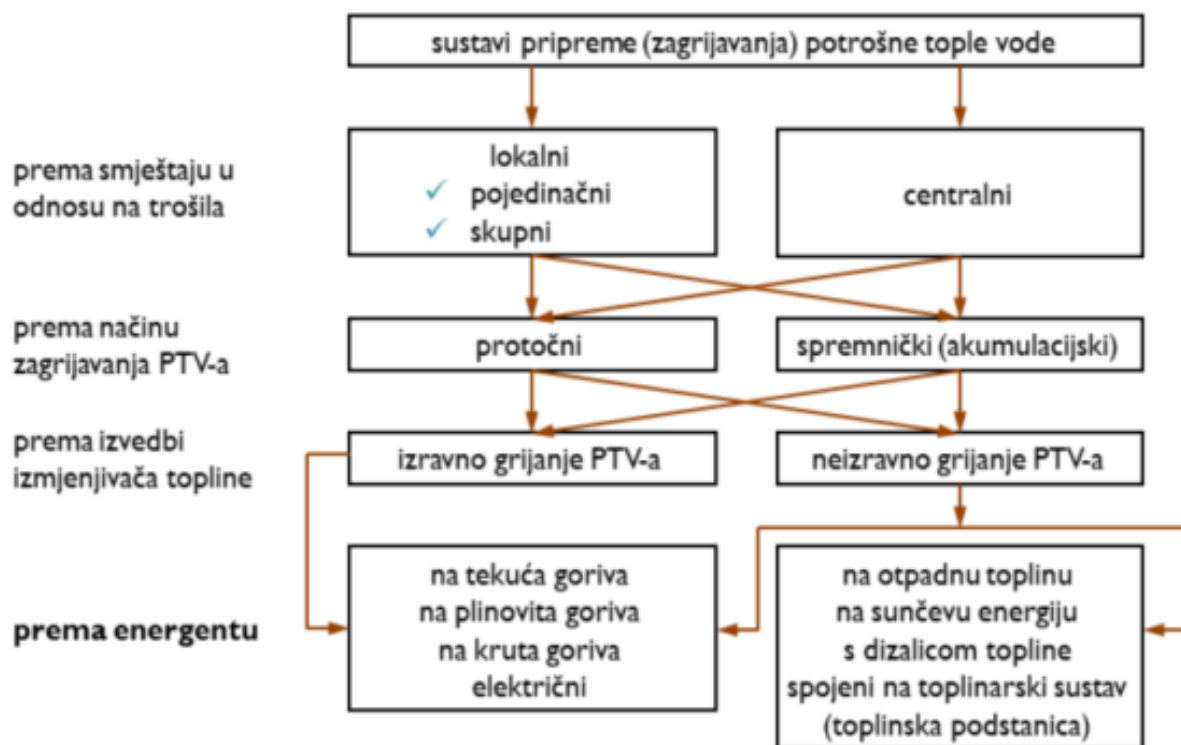
2.2.2 Ogrjevna tijela

Ogrjevna tijela su izmjenjivači topline kroz koje protječe ogrjevni medij. Zračenjem i konvekcijom predaju toplinu grijanom prostoru. Prema izvedbi možemo ih podijeliti na radijatore, cijevna ogrjevna tijela, konvektore i plošno grijanje. Osnovni zahtjev je da ogrjevna tijela moraju dovoljno i ravnomjerno zagrijati prostor u kojem se nalaze. Tu ulogu igraju njihov razmještaj u prostoru, temperaturni režim ogrjevnog medija, srednja nadtemperatura, odnos izmjene topline konvekcijom i zračenjem i drugo. Pored toga izvedbu ogrjevnih tijela možemo birati i na temelju estetskih i investicijskih zahtjeva. U našem slučaju korišteno je podno grijanje kao oblik plošnog grijanja. Karakterizira ga velika ogrjevna ploha što zahtjeva nižu radnu temperaturu, čime se štedi energija i toplina ravnomjernije raspoređuje po prostoru, no i veća početna ulaganja.

3. SUSTAV PRIPREME POTROŠNE TOPLE VODE

Sustavi za pripremu potrošne tople vode (PTV) služe za grijanje pitke vode. Tu govorimo o svim trošilima u kući gdje je bitno da voda bude pitka, kao primjerice u kupaonici za tuš i umivaonik, u kuhinji za slavinu i perilicu posuđa i slično. Procjena je da na pripremu potrošne tople vode u prosječnom kućanstvu u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske otpada otprilike 20% ukupne godišnje potrošnje topline stoga učinkovita priprema i korištenje PTV može znatno utjecati na smanjenje ukupnih troškova za energiju u kućanstvu.

Postoji više podjela sustava za pripremu potrošne tople vode što je prikazano na slici 3.1.

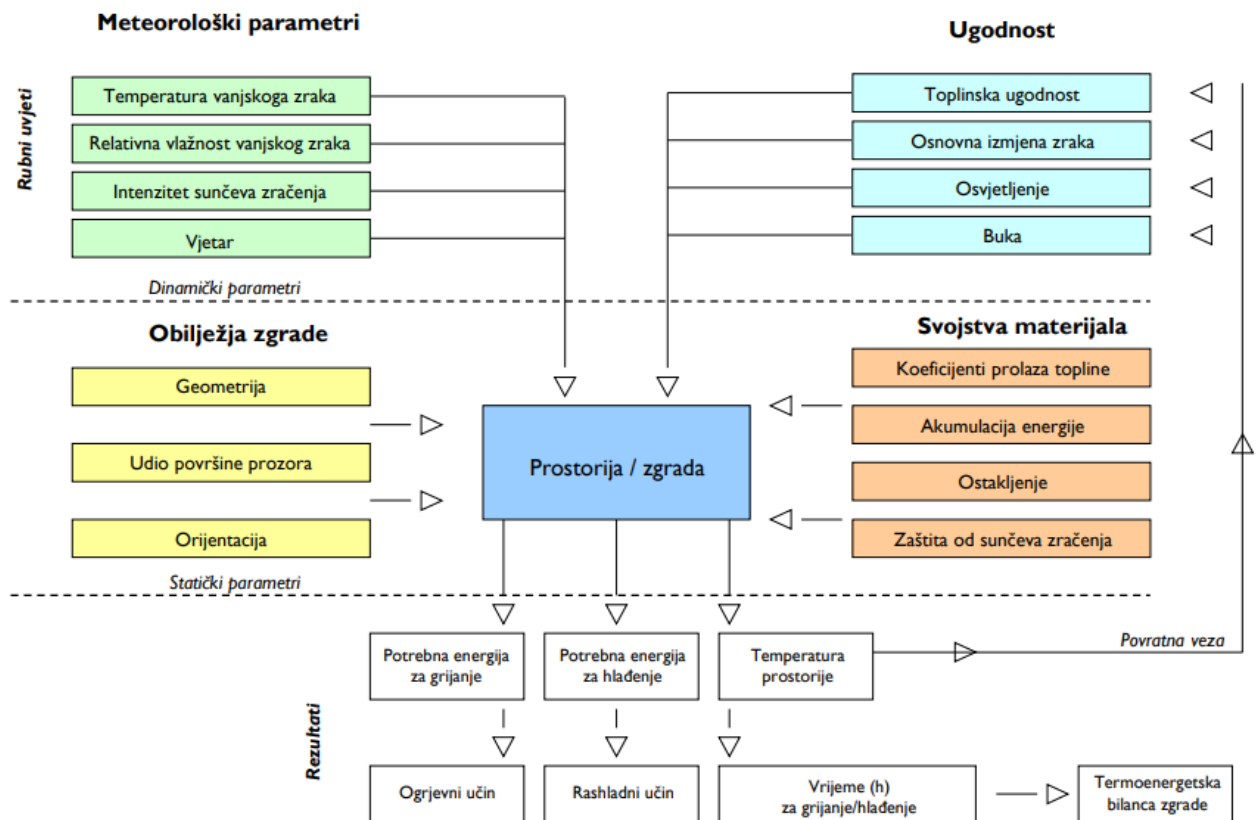


Slika 3.1. Podjela sustava za pripremu PTV-a [1]

Osnovni dijelovi sustava za pripremu PTV-a su generator topline, cjevovodi do trošila, recirkulacijski cjevovodi te zaporni, regulacijski i sigurnosni elementi. Generatori topline su nerijetko izvedeni kao zajednički sa sustavom grijanja. Takvu izvedbu imamo i u našem slučaju gdje se spremnik potrošne tople vode ujedno nalazi u unutarnjoj jedinici dizalice topline.

4. OSNOVNI TEHNIČKI PRORAČUNI

Postupak definiranja termotehničkog rješenja temelji se na sagledavanju svih statičkih i dinamičkih parametara koji određuju fiziku zgrade, zahtjeve njezinih korisnika i meteorološka obilježja lokacije. Svaki od parametara moguće je proračunom analizirati kako bi u konačnici odredili ukupno toplinsko opterećenje. Na slici 4.1 prikazana je podjela parametara pomoću kojih dolazimo do termoenergetske bilance zgrade.



Slika 4.1. Parametri prostorije/zgrade [1]

4.1 Lokacija zgrade

Lokacija zgrade bitan je čimbenik na temelju kojega određujemo meteorološke podatke kojima onda ulazimo u proračun godišnje potrošnje energije. Temperatura zraka ($^{\circ}\text{C}$), relativna vlažnost zraka (%), tlak vodene pare (kPa), brzina vjetra (m/s) i sunčevo zračenje (MJ/m^2) su podaci koje moramo poznavati kako bi točno odredili godišnju potrošnju.

Kuća se nalazi na području Rijeke, gdje vanjska projektna temperatura ϑ_e iznosi -8°C . Meteorološki podaci lokacije objekta dani su u tablici 4.1.

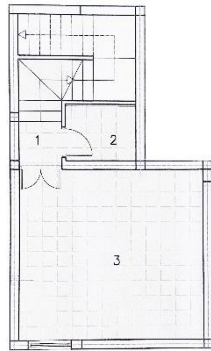
Tablica 4.1. Meteorološki podaci

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
	Temperature zraka (°C)												
m	5,9	6,3	9,2	12,9	17,9	21,6	24,3	24,1	18,9	14,7	10,4	6,8	14,5
min	-4,9	-6,8	-3,8	2,6	9	13,1	15,8	13,2	11	3,8	-1,2	-7,7	-7,7
max	13,4	15	17,2	21,7	27	30,4	31,8	31	26,3	21,7	19,4	14,4	31,8
	Tlak vodene pare (Pa)												
m	620	630	710	890	1220	1510	1600	1590	1410	1120	870	670	1070
	Relativna vlažnost zraka (%)												
m	66	61	61	62	62	59	54	55	63	70	71	66	63
	Brzina vjetra (m/s)												
m	1,9	2,1	2	1,9	1,5	1,4	1,6	1,6	1,7	2	2,1	2	1,8
	Broj dana grijanja												
	Temperatura vanjskog zraka											≤ 10 °C	125,5
												≤ 12 °C	157,7
												≤ 15	190,8

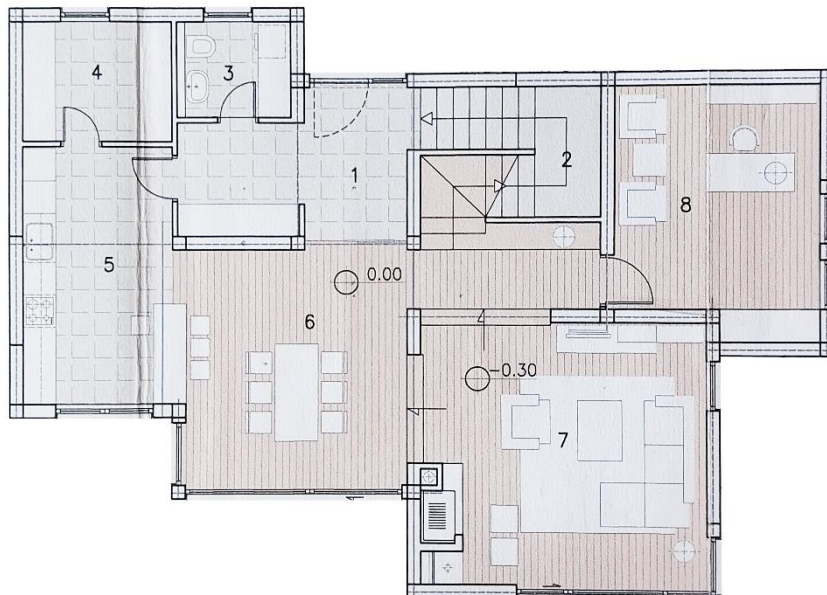
Orij	o	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
		Globalno Sunčevo zračenje (MJ/m²)												
S	0	144	225	361	491	626	661	705	584	432	303	155	122	4807
	15	186	280	406	518	631	653	704	605	480	368	196	161	5190
	30	220	322	433	522	611	622	675	600	505	416	229	192	5347
	45	242	347	439	502	566	566	619	569	505	441	250	214	5260
	60	252	354	423	460	499	491	539	513	480	444	258	224	4937
	75	249	341	388	398	415	401	441	436	431	423	252	223	4398
	90	232	311	334	322	321	304	333	344	363	379	234	210	3686
SE, SW	0	144	225	361	491	626	661	705	584	432	303	155	122	4807
	15	173	264	393	511	630	656	705	600	467	349	183	149	5079
	30	195	291	411	515	616	633	685	598	485	380	204	169	5182
	45	208	305	412	499	582	590	644	574	483	394	216	182	5088
	60	210	304	395	465	529	530	581	530	461	390	217	185	4798
	75	202	289	363	415	461	456	502	468	419	367	208	179	4329
	90	185	259	317	352	383	374	413	394	363	327	189	165	3720
E, W	0	144	225	361	491	626	661	705	584	432	303	155	122	4807
	15	144	225	359	488	619	653	697	578	430	303	155	122	4773
	30	144	225	353	475	600	631	675	563	423	301	155	123	4666
	45	142	220	341	454	568	596	639	536	408	295	152	121	4470
	60	136	211	321	423	525	548	590	498	383	281	145	116	4176
	75	126	195	292	382	471	490	529	450	350	259	134	107	3784
	90	112	174	257	334	408	424	459	392	308	230	119	95	3312
NE, NW	0	144	225	361	491	626	661	705	584	432	303	155	122	4807
	15	115	183	319	457	601	644	682	549	386	251	125	95	4407
	30	95	151	278	410	555	601	630	497	336	209	104	79	3945
	45	77	127	244	364	497	540	564	441	293	179	85	66	3479
	60	71	96	210	323	441	479	499	391	257	136	75	61	39
	75	64	8	17	270	386	422	439	335	194	109	68	55	2583
	90	57	76	127	190	298	336	341	243	138	99	60	49	2015
E, N	0	144	225	361	491	626	661	705	584	432	303	155	122	4807
	15	96	19	299	441	588	632	666	533	363	223	106	78	4184
	30	81	105	226	370	518	563	586	454	279	143	86	70	3480
	45	77	99	170	285	423	467	476	357	193	126	126	66	2819
	60	71	92	155	206	315	354	349	249	161	118	75	61	2206
	75	64	85	142	182	229	236	232	205	149	109	68	55	1756
	90	57	76	127	165	208	214	213	187	136	99	60	49	1592

4.2 Arhitektonski opis zgrade

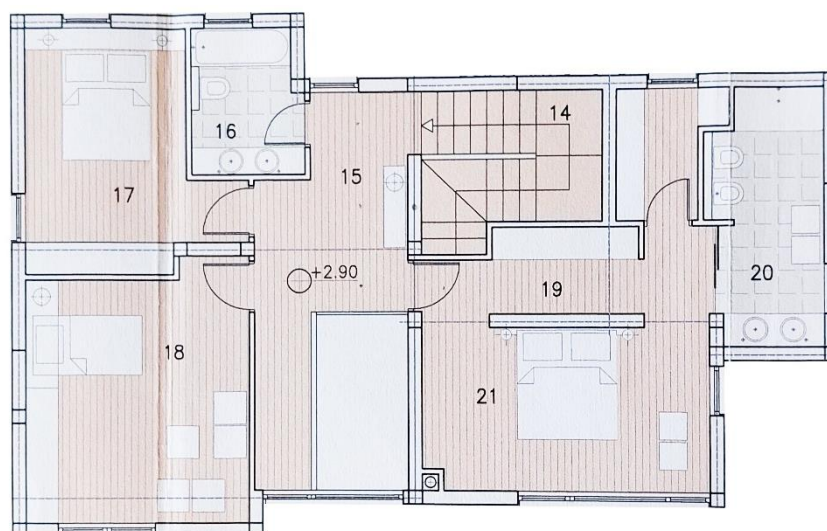
Zgrada je stambene namjene i sastoji se od podruma, prizemlja i kata. Tlocrti etaža prikazani su na slikama 4.2, 4.3 i 4.4.



Slika 4.2. Tlocrt podruma



Slika 4.3. Tlocrt prizemlja



Slika 4.4. Tlocrt kata

Nosivi zidovi izvedeni su iz šuplje opeke debljine 25 cm. Iznutra su ožbukani vapneno-cementnom žbukom, a izvana silikatnom žbukom. S vanjske strane nalazi se toplinsko-izolacijski sloj od ekspaniranog polistirena. Svi podovi su izvedeni iz armiranog betona i sadrže toplinsko-izolacijski sloj od kamene vune. Podovi podruma i prizemlja prekriveni su završnom oblogom u obliku keramičkih pločica. Na katu su podovi prekriveni troslojnim parketom za podno grijanje, osim na balkonu i u kupaonicama gdje su također keramičke pločice.

Krov je izrađen od armiranog betona. Sadrži slojeve parne brane, toplinsko-izolacijski sloj od ekstrudirane polistirenske pjene, geotekstila, cementnog estriha i polimerne hidroizolacijske trake. Glavna ulazna vrata su drvena, bočna ulazna vrata izrađena su od PVC-a i ostakljena s dvoslojnim staklom. Jugozapadno pročelje prizemlja ostakljeno je dvoslojnim staklenim stijenama. Spavaća soba i hodnik na katu također su ostakljeni staklenim stijenama. Svi ostali prozori su napravljeni od PVC okvira sa dvoslojnim staklom.

4.2.1 Geometrijske karakteristike zgrade

Geometrijske karakteristike zgrade određuju se na temelju nacрта i osnova su kasnijeg proračuna energetskega zahtjeva zgrade. Prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Geometrijske karakteristike

Potrebni podaci	Zona 1
Oplošje grijanog dijela zgrade — A [m ²]	588,34
Obujam grijanog dijela zgrade — V_e [m ³]	748,48
Obujam grijanog zraka — V [m ³]	568,85
Faktor oblika zgrade - f_o [m ⁻¹]	0,79
Ploština korisne površine — A_K [m ²]	233,39
Ukupna ploština pročelja — A_{uk} [m ²]	416,37
Ukupna ploština prozora — A_{wuk} [m ²]	64,12

4.2.2 Građevni dijelovi zgrade

U sljedećim tablicama navedeni su podaci o građevnim dijelovima zgrade. Na temelju tlocrta etaža dobiveni su podaci o površinama i debljinama pojedinih slojeva. Ovi podaci biti će potrebni kasnije kod proračuna toplinskih gubitaka za izračun koeficijenta prolaza topline.

Tablica 4.3. Vanjski zidovi

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
2	Šuplji blokovi od gline	25,000	0,390	5,00	800,00
3	Polimerno-cementno ljepilo	1,000	0,900	14,00	1650,00
4	Ekspandirani polistiren (EPS)	8,000	0,040	60,00	20,00
5	Polimerno-cementno ljepilo	0,600	0,900	14,00	1650,00
6	Silikatna žbuka	0,400	0,900	60,00	1800,00
Definirane ploštine [m ²]				Sjeveroistok	80,74
				Jugoistok	46,06
				Jugozapad	71,52
				Sjeverozapad	44,21

Tablica 4.4. Zid prema tlu – zid podruma

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
2	Armirani beton	25,000	2,600	110,00	2500,00
3	Bitum. traka s uloškom stakl. tkanine	0,800	0,230	50000,00	1100,00
4	Ekspandirani polistiren (EPS)	8,000	0,040	60,00	20,00
5	PVC folija	0,100	0,200	42000,00	1200,00
6	Puna opeka	7,000	0,680	7,00	1600,00
Definirana ploština [m ²]					60,90

Tablica 4.5. Pod na tlu – pod prizemlja (prema tlu)

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Keramika	1,500	1,300	200,00	2300,00
2	Cementni estrih	5,500	1,600	50,00	2000,00
3	PVC folija	0,100	0,200	42000,00	1200,00
4	Kamena vuna	8,000	0,036	1,10	130,00
5	Bitum. traka s uloškom stakl. tkanine	0,800	0,230	50000,00	1100,00
6	Armirani beton	10,000	2,600	110,00	2500,00
7	Pijesak, šljunak, tucanik	25,000	0,810	3,00	1700,00
Definirana ploština [m ²]					75,30

Tablica 4.6. Pod na tlu – pod podruma

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Keramika	1,500	1,300	200,00	2300,00
2	Cementni estrih	5,500	1,600	50,00	2000,00
3	PVC folija	0,100	0,200	42000,00	1200,00
4	Kamena vuna	8,000	0,036	1,10	130,00
5	Bitum. traka s uloškom stakl. tkanine	0,800	0,230	50000,00	1100,00
6	Armirani beton	10,000	2,600	110,00	2500,00
7	Pijesak, šljunak, tucanik	25,000	0,810	3,00	1700,00
Definirana ploština [m ²]					35,77

Tablica 4.7. Pod prizemlja (iznad podruma) i pod kupaonica na katu (keramičke pločice)

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Keramika	1,500	1,300	200,00	2300,00
2	Cementni estrih	5,500	1,600	50,00	2000,00
3	PVC folija	0,100	0,200	42000,00	1200,00
4	Kamena vuna	8,000	0,036	1,10	130,00
5	Bitum. traka s uloškom stakl. tkanine	0,800	0,230	50000,00	1100,00
6	Armirani beton	10,000	2,600	110,00	2500,00
7	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
Definirana ploština [m ²]					45,28

Tablica 4.8. Pod kata (parket)

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Troslojni parket	2,000	0,170	200,00	700,00
2	Cementni estrih	5,500	1,600	50,00	2000,00
3	PVC folija	0,100	0,200	42000,00	1200,00
4	Kamena vuna	8,000	0,036	1,10	130,00
5	Bitum. traka s uloškom stakl. tkanine	0,800	0,230	50000,00	1100,00
6	Armirani beton	10,000	2,600	110,00	2500,00
7	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
Definirana ploština [m ²]					84

Tablica 4.9. Unutarnji zidovi (pregradni)

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
2	Šuplji blokovi od gline	10,000	0,390	5,00	800,00
3	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
Definirana ploština [m ²]					92,25

Tablica 4.10. Unutarnji zidovi (nosivi)

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
2	Šuplji blokovi od gline	25,000	0,390	5,00	800,00
3	Vapneno-cementna žbuka	2,000	1,000	20,00	1800,00
Definirana ploština [m ²]					123,86

Tablica 4.11. Ravni krov iznad grijanog prostora – Ravni krov

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/(mK)]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Armirani beton	18,000	2,600	110,00	2500,00
2	Parna brana	0,100	0,500	500000,00	980,00
3	Ekstrudirana polistirenska pjena (XPS)	12,000	0,037	150,00	35,00
4	Geotekstil	0,100	0,200	1000,00	900,00
5	Cementni estrih	6,000	1,600	50,00	2000,00
6	Polim. hidro. traka na bazi PVC-P	1,500	0,140	100000,00	1200,00
Definirana ploština [m ²]					109,72

Tablica 4.12. Otvori (prozirni i neprozirni elementi) zgrade

Naziv otvora	U_w [W/(m ² K)]	Orijentacija	A_w [m ²]	n
Staklena stijena 180/225	1,5	Jugozapad	4,05	2
Staklena stijena 400/225	1,5	Jugozapad	9,00	1
Staklena stijena 362/255	1,5	Jugozapad	9,23	1
Staklena stijena 345/225	1,5	Jugozapad	7,76	1
Staklena stijena 260/225	1,5	Jugozapad	5,85	1
Staklena stijena 180/225	1,5	Jugozapad	4,05	1
Balkonska vrata 90/225	1,5	Sjeveroistok	2,02	2
Prozor 90/125	1,5	Sjeveroistok	1,12	2
Prozor 90/90	1,5	Sjeveroistok	0,81	2
Stakleni dio ulaznih vrata 72/225	1,5	Sjeveroistok	1,62	1
Staklena stijena 115/225	1,5	Sjeverozapad	2,58	1
Balkonska vrata 90/255	1,5	Jugoistok	2,29	1
Staklena stijena 107/255	1,5	Jugoistok	272	1
Ulazna vrata 108/225	2	Sjeveroistok	2,43	1

4.3 Toplinska bilanca zgrade

Za ispravan proračun toplinske balance zgrade, osim meteoroloških podataka koji opisuju lokaciju, potrebno je definirati još i unutarnje projektne temperature i koeficijente prolaza topline pojedinih građevnih dijelova. Zatim sa definiranim vrijednostima računamo toplinske gubitke pojedinih prostorija te ukupne gubitke kako bismo kasnije mogli odabrati odgovarajući sustav grijanja.

4.3.1 Projektne temperature

Kao što je ranije navedeno, vanjska projektna temperatura za grad Rijeku iznosi $\vartheta_v = -8^\circ\text{C}$. Vrijednosti unutarnjih projektnih temperatura uzimamo prema normi HRN EN 12831;2004. Unutarnje projektne temperature prostorija za zadanu zgradu prikazane su u tablici 4.13.

Tablica 4.13. Unutarnje projektne temperature prostorija

Prostorija	$t_{int}, ^\circ\text{C}$
1. PODRUM I HODNICI	15
2. KUPAONICE	24
3. SPAVAĆE SOBE	20
4. DNEVNI BORAVAK, BLAGOVAONA, KUHINJA	20
5. RADNA SOBA	20

4.3.2 Izračun koeficijenta prolaza topline

Za prethodno definirane građevne dijelove zgrade koji su izvedeni od više slojeva materijala različitih toplinskih svojstava, potrebno je izračunati koeficijente prolaza topline. Za izračun koristimo izraz:

$$U = \frac{1}{R_u + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_v}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.1)$$

gdje je:

- U – koeficijent prolaza topline, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
- R_u – otpor prijelazu topline konvekcijom između zraka u prostoriji i unutrašnje površine građevnog elementa, $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
- R_v – otpor prijelazu topline konvekcijom između vanjske površine građevnog elementa i zraka s vanjske strane prostorije, $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
- λ_i – koeficijent toplinske vodljivosti pojedinih slojeva vanjskoga zida, $\text{W}/(\text{mK})$
- δ_i – debljina pojedinih slojeva vanjskoga zida, m.

Vrijednosti otpora prijelazu topline konvekcijom R_u i R_v prikazane su u tablici 4.14, a rezultati izračuna koeficijenta prolaza topline za građevne elemente zgrade u tablici 4.15.

Tablica 4.14. Otpori prijelazu topline konvekcijom na unutrašnjoj i vanjskoj stijenci

Smjer toplinskog toka	Građevni dijelovi:	R_u , m^2K/W	R_v , m^2K/W
- prema gore	Ravni i kosi krovovi iznad grijanog prostora, stropovi prema tavanu	0,10	0,04
- vodoravan	Vanjski zidovi, zidovi prema garaži, tavanu	0,13	0,04
	Zidovi prema negrijanim prostorijama i negrijanom stubištu temperature više od 0 °C	0,13	0,13
	Zidovi prema tlu	0,13	0,00
	Zidovi između grijanih radnih prostorija različitih korisnika	0,13	0,13
-prema dolje	Stropovi iznad vanjskog zraka, stropovi iznad garaže	0,17	0,04
	Stropovi prema negrijanim prostorijama i negrijanom stubištu temperature više od 0 °C	0,17	0,10
	Podovi na tlu	0,17	0,00
	Stropovi između stanova, stropovi između grijanih radnih prostorija različitih korisnika	0,17	0,10

Tablica 4.15. Rezultati izračuna koeficijenta prolaza topline za građevne elemente zgrade

Građevni element	Koeficijent prolaza topline U , $W/(m^2K)$	Dopušteni koef. prolaza topline U_{max} , $W/(m^2K)$
Vanjski zidovi	0,33	0,45
Zid prema tlu – zid podruma	0,39	0,50
Pod na tlu – pod prizemlja	0,36	0,50
Pod na tlu – pod podruma	0,36	0,50
Pod prizemlja (iznad podruma) i pod kupaonica na katu	0,38	0,40
Pod kata (parket)	0,36	0,40
Unutarnji zidovi (pregradni)	1,80	-
Unutarnji zidovi (nosivi)	1,06	-
Ravni krov	0,25	0,30

Iz tablice 4.15. vidljivo je da su svi izračunati koeficijenti prolaza topline manji od pripadajućih najvećih dopuštenih vrijednosti čime su zadovoljeni zahtjevi Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [2].

4.3.3 Utjecaj toplinskih mostova

Toplinskim mostovima nazivamo područja smanjenog otpora prolazu topline u odnosu na konstrukciju u kojoj se nalazi. Razlikujemo konstruktivne toplinske mostove koji nastaju kao kombinacija različitih vrsta materijala građevnih dijelova, i geometrijske koji nastaju uslijed promjene oblika konstrukcije. Prema normi HRN EN 12831 za proračun toplinskih gubitaka moraju se uzeti u obzir i toplinski mostovi, no kod pojednostavljena proračuna se koeficijent prolaza topline korigira za utjecaj toplinskih mostova korištenjem dodatka $\Delta U_{TM} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za loša rješenja toplinskih mostova, dok se za toplinske mostove koji su projektirani u skladu s katalogom dobrih rješenja uzima dodatak na koeficijent prolaza topline $\Delta U_{TM} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. U proračunu je usvojen dodatak $\Delta U_{TM} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

4.3.4 Proračun toplinskih gubitaka zgrade

Proračun toplinskih gubitaka zgrade provodi se prema normi HRN EN 12831. Ukupni toplinski gubici sastoje se od transmisijskih i ventilacijskih gubitaka i dodatnog toplinskog učina kojim se kompenzira nekontinuirano grijanje prostora ako se takvo grijanje primjenjuje. Gubici se proračunavaju za svaku prostoriju zasebno i onda zbrajaju. Proračun se izvodi prema sljedećem izrazu:

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} + \Phi_{RH,i}, \text{ W} \quad (4.2)$$

gdje su:

$\Phi_{T,i}$ transmisijski toplinski gubici *i*-tog prostora, W

$\Phi_{V,i}$ ventilacijski toplinski gubici *i*-tog prostora, W

$\Phi_{RH,i}$ dodatni toplinski učin kojim se kompenziraju učinci nekontinuiranog grijanja prostora, W.

Transmisijski toplinski gubici

Transmisijski toplinski gubici *i*-tog grijanog prostora izračunavaju se prema izrazu:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\vartheta_{\text{int},i} - \vartheta_e), \text{ W} \quad (4.3)$$

gdje je:

$H_{T,ie}$ koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu kroz ovojnicu zgrade, W/K

$H_{T,iue}$ koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu kroz negrijani prostor, W/K

$H_{T,ig}$ koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema tlu, W/K

$H_{T,ij}$ koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema susjednom prostoru grijanom na nižu temperaturu, W/K

$\vartheta_{int,i}$ unutarnja projektna temperatura grijanog prostora, °C

ϑ_e vanjska projektna temperatura, °C.

Koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu kroz vanjsku ovojnicu zgrade

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k \cdot U_k \cdot e_k \quad (4.4)$$

A_k površina k -tog građevnog elementa, m²

U_k koeficijent prolaza topline k -tog građevnog elementa, W/m²K

e_k korekcijski faktor izloženosti; u nedostatku nacionalnih vrijednosti koriste se vrijednosti definirane u dodatku D.4.1. norme HRN EN 12831 ($e_k = 1$).

Kao što je prije opisano, proračun se izvodi sa pojednostavljenim korigiranim koeficijentima prolaza topline koji se opisuju izrazom:

$$U_{kc} = U_k + \Delta U_{tm}, \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (4.5)$$

gdje je:

U_{kc} korigirani koeficijent prolaza topline građevnih elemenata, uzimajući u obzir toplinske mostove, W/m^2K

U_k koeficijent prolaza topline građevnog elementa, $W/(m^2K)$

ΔU_{tm} korekcijski faktor ovisan o tipu građevnog elementa, $W/(m^2K)$

Za toplinski most projektiran u skladu s katalogom dobrih rješenja toplinskih mostova $\Delta U_{tm} = 0,05 W/(m^2K)$.

Koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema tlu

$$H_{T,ig} = f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot \left(\sum_k A_k \cdot U_{ekv,k} \right) \cdot G_w, W/K \quad (4.6)$$

gdje je:

f_{g1} korekcijski faktor utjecaja godišnjih promjena vanjske temperature. Njegova vrijednost bi trebala biti određena u nacionalnom dodatku norme HRN EN 12831. Ako nije, koriste se vrijednosti dane u dodatku D.4.3 norme, a predložena vrijednost je 1,45.

f_{g2} korekcijski faktor koji uzima u obzir razliku između srednje godišnje i projektne vanjske temperature zraka; određuje se prema izrazu: $f_{g2} = (\vartheta_{int,i} - \vartheta_{m,e}) / (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e)$

A_k površina građevna elementa koji je u dodiru s tlom, m^2

$U_{ekv,k}$ ekvivalentni koeficijent prolaza topline određen u ovisnosti o tipu poda prema HRN EN ISO 13370, $W/(m^2K)$

G_w korekcijski faktor utjecaja podzemnih voda. Ako je udaljenost od podzemnih voda do poda podruma manja od 1 m, $G_w = 1,15$; ako je udaljenost veća od 1 m, $G_w = 1,00$.

Koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema susjednom prostoru koji se grije na nižu temperaturu

$$H_{T,ij} = \sum_k f_{ij} \cdot A_k \cdot U_k, \text{ W/K} \quad (4.7)$$

gdje su:

f_{ij} korekcijski faktor koji uzima u obzir razliku između temperature susjedna prostora i vanjske

temperature, $f_{ij} = (\vartheta_{\text{int},i} - \vartheta_{\text{adj}}) / (\vartheta_{\text{int},i} - \vartheta_e)$

A_k površina građevna elementa, m^2

U_k koeficijent prolaza topline građevna elementa, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Koeficijent transmisijskog gubitka topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu kroz negrijani prostor nije pobliže opisan jer zadana zgrada nema negrijanih prostorija.

Ventilacijski toplinski gubici

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\vartheta_{\text{int},i} - \vartheta_e), \text{ W} \quad (4.8)$$

$H_{V,i}$ projektni koeficijent ventilacijskih gubitaka topline, W/K

$\vartheta_{\text{int},i}$ unutarnja projektna temperatura grijanog prostora, $^{\circ}\text{C}$

ϑ_e vanjska projektna temperatura, $^{\circ}\text{C}$.

Projektni koeficijent ventilacijskih gubitaka topline $H_{V,i}$ izračunava se prema izrazu:

$$H_{V,i} = \dot{V}_1 \cdot \rho \cdot c_p, \text{ W/K} \quad (4.9)$$

gdje je:

\dot{V}_1 protok zraka kroz grijani prostor, m^3/s

ρ gustoća zraka temperature $\vartheta_{\text{int},i}$, kg/m^3

c_p specifični toplinski kapacitet zraka temperature $\vartheta_{\text{int},i}$, $\text{J}/(\text{kgK})$

Protok zraka kroz grijani prostor određuje se na osnovu postojanja ventilacijskog sustava, odnosno prisilne ventilacije

Bez sustava prisilne (mehaničke) ventilacije

$$\dot{V}_1 = \max(\dot{V}_{\text{inf},i}, \dot{V}_{\text{min},1}), \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.10)$$

gdje je:

$\dot{V}_{\text{inf},i}$ infiltracija zraka kroz fuge u ovojnici zgrade, m^3/h

$\dot{V}_{\text{min},1}$ higijenski minimalni protok zraka, m^3/h .

Infiltracija zraka kroz zazoru u ovojnici zgrade može se izračunati prema izrazu:

$$V_{\text{inf},i} = 2 \cdot V_p \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i, \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.11)$$

gdje je:

n_{50} broj izmjena zraka prostora u jednom satu pri razlici tlaka od 50 Pa između prostora i vanjskog okoliša, h^{-1}

e_i koeficijent zaklonjenosti

ε_i korekcijski faktor za visinu prostorije od tla (do 10 m $\varepsilon_i = 1$).

Higijenski minimalni protok zraka iznosi:

$$V_{\text{min},i} = n_{\text{min}} \cdot V_p, \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.12)$$

gdje je:

n_{min} minimalni broj izmjena zraka svježim zrakom, h^{-1} (ovisan o vrsti prostorije, od 0,5 do 2,0 h^{-1})

V_p volumen grijanog prostora, m^3 .

Dodatni toplinski učin

Dodatni toplinski učin kojim se kompenziraju učinci nekontinuiranog grijanja određuju se prema izrazu:

$$\Phi_{RH,i} = A_i \cdot f_{RH}, W \quad (4.13)$$

gdje je:

A_i površina poda prostorije s polovicom debljine zidova, m^2

f_{RH} korekcijski faktor koji ovisi o trajanju prekida grijanja.

Proračun toplinskih gubitaka prostorija napravljen je u softveru Microsoft Excel. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4.16.

Tablica 4.16. Rekapitulacija toplinskih gubitaka prostorija

Kat	Prostorija	A, m^2	Φ_T , W	Φ_V , W	Φ_{RH} , W	Φ , W	Φ/A , W/m^2
Podrum	Hol+2xOstava	32,64	210,89	274,85	359,04	845	26
Prizemlje	Zahod	4,28	140,93	84,40	47,03	272	64
	Ostava	6,96	202,11	74,75	76,56	353	51
	Radna soba	18,41	514,60	202,97	202,51	920	50
	Hodnik	11,74	357,88	130,44	129,14	617	53
	Kuhinja	4,05	412,47	501,97	163,35	1078	73
	Blagovaona	19,78	615,08	227,72	217,58	1060	54
	Dnevni boravak	28,33	836,67	408,60	311,58	1557	55
Kat	Hodnik	31,06	879,15	245,04	341,66	1466	47
	Kupaonica 1	5,80	364,76	227,86	63,80	656	113
	Spavaća soba 1	15,97	134,15	183,41	175,67	493	31
	Spavaća soba 2	20,65	656,31	283,09	227,15	1167	56
	Spavaća soba 3	17,88	692,58	210,39	196,63	1100	62
	Garderoba	12,83	173,65	175,88	141,13	491	38
	Kupaonica 2	10,57	579,24	366,61	116,27	1062	100
	Ukupno	233,29	6770,45	3597,99	2769,09	13138	58,14

4.4 Proračun potrebnog učina za pripremu potrošne tople vode

Potrebnu toplinu za grijanje potrošne tople vode računamo prema izrazu:

$$Q_{PTV} = m_v \cdot c_{pV} \cdot (\vartheta_{PTV} - \vartheta_{HV}), \text{ kWh} \quad (4.14)$$

gdje je:

m_v - količina vode koju je potrebno zagrijati, kg

c_{pV} - specifični toplinski kapacitet vode, J/(kgK)

ϑ_{PTV} - temperatura potrošne tople vode, °C

ϑ_{HV} - temperatura hladne vode na ulazu u spremnik, °C.

Toplinski učin grijača potrošne tople vode ovisi o vremenu Z_A u kojem se potrošna topla voda mora zagrijati na potrebnu temperaturu, a računamo ga prema izrazu:

$$\Phi_{PTV} = \frac{Q_{PTV}}{Z_A} \quad (4.15)$$

Kako bismo odredili količinu vode koju je potrebno zagrijati, koristit ćemo procjenu da je dnevna potrošnja potrošne tople vode po članu kućanstva 40 l. Kako je zadana stambena zgrada projektirana za smještaj petero ljudi, računamo da je potreban volumen vode 200 l, odnosno 0,2 m³. Nadalje, računamo s temperaturom PTV-a od 45 °C i temperaturom hladne vode od 10 °C. S potrebnim podacima ulazimo u proračun topline i učina potrebnog za grijanje PTV-a. Rezultati su prikazani u tablici 4.17.

Tablica 4.17. Rezultati proračuna toplinskog učina za pripremu PTV-a

Toplinski učin za pripremu potrošne tople vode		
Količina PTV-a	$V, \text{ m}^3$	0,2
Temperatura PTV-a	$\vartheta_{\text{PTV}}, \text{ }^\circ\text{C}$	45
Temperatura hladne vode	$\vartheta_{\text{HV}}, \text{ }^\circ\text{C}$	10
Vrijeme zagrijavanja	$Z_A, \text{ s}$	7200
Specifični toplinski kapacitet vode	$C_{\text{pV}}, \text{ kJ}/(\text{kgK})$	4,187
Gustoća vode	$\rho_v, \text{ kg}/\text{m}^3$	1000
Toplina potrebna za grijanje PTV-a	$Q_{\text{PTV}}, \text{ kWh}$	8,1414
Toplinski učin za pripremu PTV-a	$\Phi_{\text{PTV}}, \text{ kW}$	4,071

Vidimo da je potreban toplinski učin za pripremu PTV-a jednak 4,07 kW. Nadalje, računamo potreban volumen spremnika potrošne tople vode prema izrazu:

$$V_{\text{PTV}} = \frac{C \cdot b}{\rho_v \cdot c_{\text{pV}} \cdot (\vartheta_{\text{SPR}} - \vartheta_{\text{HV}})} \quad (4.16)$$

gdje je:

C kapacitet spremnika ($C = \Phi_{\text{PTV}} \cdot Z_A$), kWh

b faktor dodatka zbog mrtva prostora ispod grijača u spremniku

ρ_v gustoća vode, kg/m^3

c_{pV} specifični toplinski kapacitet vode, $1,163 \cdot 10^3 \text{ kWh}/(\text{kgK})$

ϑ_{SPR} temperatura vode u spremniku, $^\circ\text{C}$

ϑ_{HV} temperatura hladne vode, $^\circ\text{C}$.

Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4.18.

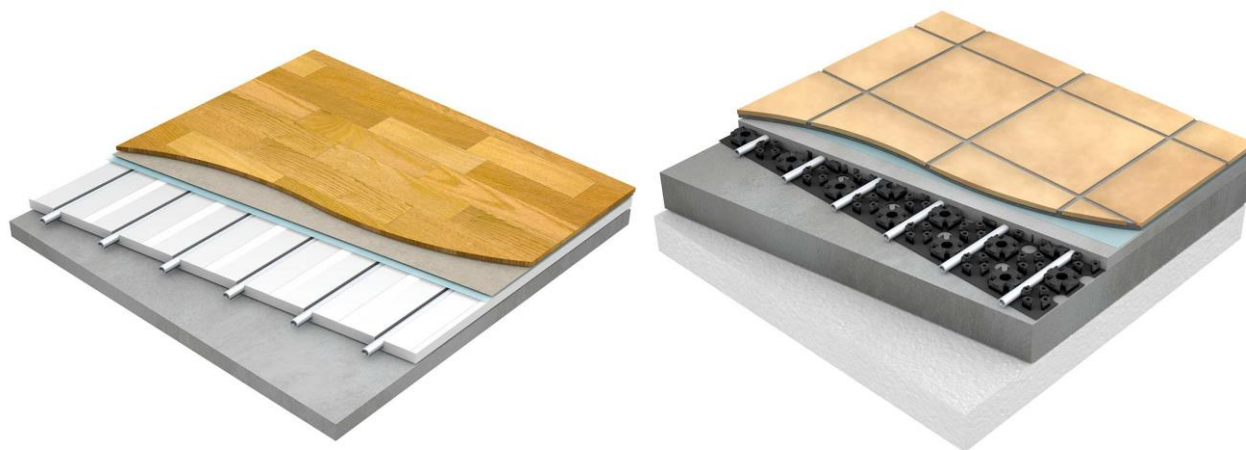
Tablica 4.18. Rezultati proračuna volumena spremnika PTV-a

Volumen spremnika potrošne tople vode		
Kapacitet spremnika	C , kWh	8,1414
Faktor dodatka	b	1,1
Gustoća vode	ρ_v , kg/m ³	1000
Specifični toplinski kapacitet vode	C_{pV} , kJ/(kgK)	4,187
Temperatura vode u spremniku	ϑ_{SPR} , °C	55
Temperatura hladne vode	ϑ_{HV} , °C	10
Potreban volumen spremnika PTV-a	V_{PTV} , m ³	0,179

Iz proračuna vidimo da je minimalan potreban volumen spremnika PTV-a jednak 0,179 m³, odnosno 179 l.

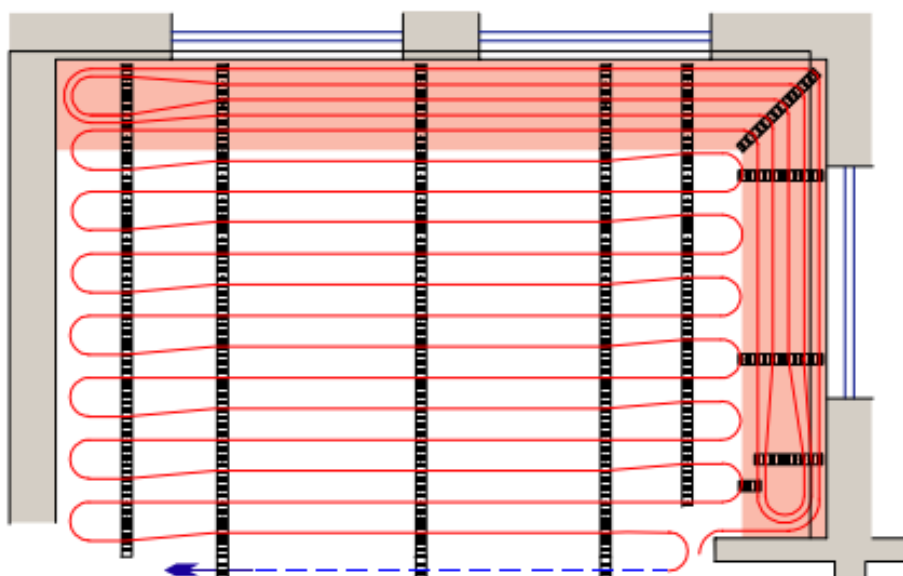
4.5 Proračun sustava podnog grijanja

Podno grijanje je sustav površinskog grijanja koji kao ogrjevne plohe koristi građevne elemente, u ovom slučaju pod. Izmjena topline vrši se zračenjem i konvekcijom otprilike u omjeru 2:1 [1]. Kako je površina izmjene topline znatno veća od primjerice radijatora, moguće je grijanje prostora u nižem temperaturnom režimu. Na temelju toga proizlaze osnovne prednosti sustava podnog grijanja, a to su ušteda energije potrebne za grijanje ogrjevnog medija te ravnomjernija raspodjela topline po prostoru. Zbog rada u području niske temperature (30 °C-50 °C), ovi sustavi pogodni su za korištenje dizalica topline kao generatora toplinske energije. Prema principu ugradnje sustavi podnog grijanja dijele se na suhe i mokre. Suhi sustavi koriste pjenaste ploče u koje se postavljaju cijevi i pokrivaju suhim pločama. Najčešće se koriste za naknadnu ugradnju sustava podnog grijanja u postojećim zgradama. U ovom slučaju koristi se mokri sustav. Kod mokrog sustava ogrjevne cijevi (od sintetskih materijala) leže iznad izolacijskog sloja u cementnom estrihu koji se nanosi u tekućem stanju. Za to vrijeme cijevi moraju biti pod tlakom kako bi zadržale svoj oblik. Na kraju se postavlja završna podna obloga (parketi, keramičke pločice...). Način postavljanja prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Suhi sustav (lijevo) i mokri sustav (desno) [3]

Cijevi se na podlogu postavljaju na više načina. Osnovni cilj je postići ravnomjernu raspodjelu temperatura po cijelom podu. Udaljenost dviju susjednih cijevi može biti od 5 do 35 cm, gdje naravno manji razmak, odnosno veća gustoća postavljanja rezultira većom temperaturom na tom dijelu. Rubne zone su oni dijelovi prostorije gdje su toplinski gubici izraženiji pa se na tom dijelu cijevi postavljaju gušće. Tu spadaju spojevi s vanjskim zidovima, posebno ako imaju veće prozore ili staklene stijene. U ovom slučaju cijevi su položene u zmijolikom obliku sa adekvatnim rubnim zonama kako je i prikazano na slici 4.6.



Slika 4.6. Zmijoliko polaganje cijevi s rubnom zonom [4]

Dimenzioniranje potrebnih krugova podnog grijanja odrađeno je u programu „Europlan“ proizvođača Harreither [4], čiji je sustav „Euroval“ i korišten. Kod dimenzioniranja krugova

podnog grijanja potrebno je odrediti položaje razdjelnika do kojih se dovodi ogrjevna voda iz generatora topline, a iz kojih se dalje granaju krugovi grijanja po prostorijama. U ovom slučaju imamo tri razdjelnika, svaki za odgovarajuću etažu. Razdjelnici se nalaze u razdjelnim ormarićima smještenima unutar zida kako bi zauzimali manje prostora i bili estetski prihvatljiviji. Razdjelni ormarić i odabrani razdjelnik „Vario S“ od proizvođača Uponor prikazani su na slici 4.7.



Slika 4.7. Razdjelni ormarić i razdjelnik od nehrđajućeg čelika [3]

Razdjelnik u podrumu ima 2 kruga grijanja, a razdjelnici u prizemlju i na katu imaju po 8 krugova. Ukupna normirana potreba za toplinom je prema proračunu toplinskih gubitaka jednaka 13137 W. Ukupna pročišćena potreba za toplinom iznosi 12742 W. Odabrani temperaturni režim je 42/35 °C. U tablici 4.19 prikazana je bilanca projekta podnog grijanja iz programa Europlan.

Tablica 4.19. Bilanca podnog grijanja

Bilanca Euroval® podno grijanje	Pogon grijanja	
Željena potreba za toplinom	12742 W	0 W
Pročišćena potreba za toplinom	12742 W	0 W
Kolicina vode	1993,33 l/h	0 l/h
Maksimalni gubitak tlaka (uklj. razdjelnik)	192,32 mbar	0 mbar
Sadržaj vode (od razdjelnika)	173,14 l	
Ukupna površina prostorija (prostorije s Euroval® podnim grijanjem)	213,7 m ²	
Ukupna površina estriha	213,7 m ²	
Ukupna grijana površina	213,7 m ²	

Željena potreba za toplinom iznosi 12742 W. Ukupna primljena snaga na sve tri etaže iznosi 17013 W, a ukupni transmisijski gubici kroz pod iznose 3263 W, što onda rezultira ukupnim toplinskim učinkom prema unutra od 13751 W. Toplinski učini po etažama navedeni su u tablici 4.20.

Tablica 4.20. Primljena snaga i učin prema unutra

Pregled katova (Pogon grijanja)						
Oznaka	Površina PG	Primljena snaga	Učin prema unutra	Transmisije pod	Transmisije zid	Transmisije strop
Podrum	29,7 m ²	2662 W	2406 W	256 W	0 W	0 W
Prizemlje	97,8 m ²	8337 W	6417 W	1921 W	0 W	0 W
Kat	86,2 m ²	6014 W	4928 W	1086 W	0 W	0 W

U tablici 4.21 za svaku prostoriju prikazane su vrijednosti proračunatih toplinskih gubitaka [Q_{pr}], toplinskog učina grijanja [Q_{gr}] i toplinskih ostataka [Q_{ost}].

Tablica 4.21. Toplinski gubici, učin podnoga grijanja i preostala potrebna toplina

	Br.	Prostorija	ϑ_i , °C	Q_{pr} , W	Q_{gr} , W	Q_{ost} , W	A, m ²
Podrum		Hol + 2xOstava	15	784	2406	+1622	29,70
Prizemlje	3.	Zahod	20	263	287	+24	3,40
	4.	Ostava	20	338	381	+43	6,00
	8.	Radna soba	20	875	1217	+342	16,40
	1.	Hodnik	20	584	1142	+558	10,50
	5.	Kuhinja	20	902	988	+86	13,50
	6.	Blagovaona	20	1004	1431	+427	18,40
	7.	Dnevni boravak	20	1557	1981	+424	29,60
Kat	15.	Hodnik	20	1466	1131	-335	13,50
	16.	Kupaonica 1	24	656	403	-253	5,40
	17.	Spavaća soba 1	20	493	747	+254	14,80
	18.	Spavaća soba 2	20	1167	1177	+10	19,30
	21.	Spavaća soba 3	20	1100	1194	+94	17,30
	19.	Garderoba	20	491	495	+4	10,50
	20.	Kupaonica 2	20	1062	344	-718	5,40

Učin podnog grijanja nije dovoljan da pokrije sve toplinske gubitke dviju kupaonica na katu pa će se one dogrijavati električnim grijalicama. Gubici hodnika na katu također nisu u potpunosti pokriveni učinkom grijanja što ne predstavlja veliki problem s obzirom da taj prostor nije namijenjen za dugo boravljenje u njemu. Ostale prostorije sve imaju pozitivan iznos toplinskih ostataka što znači da učin podnog grijanja zadovoljava potrebu za toplinom.

U tablici 4.22 prikazani su podaci o dimenzijama cijevi, padovima tlaka i protoku vode, a u tablici 4.23 podaci o načinu polaganja dobiveni proračunom u programu Europlan.

Tablica 4.22. Podaci o dimenzijama i padu tlaka krugova podnog grijanja

Dimenzioniranje Euroval® podnog grijanja - Podrum (grijanje)										
Prost. br.	Djelom. sustav	Krug(ovi) grijanja	Dužina cijevi				Kolicina vode l/h	Gubitak tlaka		v m/s
			RZ + ZB m	Spojni vod m	Krug gr. (PG) m	Krug grij. (ukup.) m		Cijev mbar	Razdjelnik mbar	
	FBH1	1-2	44,6	0,0	44,6	44,6	155,9	42,0	89,1	0,24

Dimenzioniranje Euroval® podnog grijanja - Prizemlje (grijanje)										
Prost. br.	Djelom. sustav	Krug(ovi) grijanja	Dužina cijevi				Kolicina vode l/h	Gubitak tlaka		v m/s
			RZ + ZB m	Spojni vod m	Krug gr. (PG) m	Krug grij. (ukup.) m		Cijev mbar	Razdjelnik mbar	
3	FBH1	1	13,6	4,6	18,2	18,2	46,0	2,9	78,1	0,07
4	FBH1	1	18,0	8,2	26,2	26,2	65,8	5,1	78,1	0,10
8	FBH1	1	62,3	19,0	81,3	81,3	195,7	103,6	78,1	0,30
1	FBH1	1	11,5	0,0	11,5	11,5	32,9	2,0	78,1	0,05
5	FBH1	1	43,8	4,8	48,6	48,6	126,2	31,1	78,1	0,19
6	FBH1	1	74,7	8,2	82,9	82,9	204,8	114,2	78,1	0,31
7	FBH1	1-2	50,2	15,0	65,2	65,2	152,7	55,5	78,1	0,23

Dimenzioniranje Euroval® podnog grijanja - Kat (grijanje)										
Prost. br.	Djelom. sustav	Krug(ovi) grijanja	Dužina cijevi				Kolicina vode l/h	Gubitak tlaka		v m/s
			RZ + ZB m	Spojni vod m	Krug gr. (PG) m	Krug grij. (ukup.) m		Cijev mbar	Razdjelnik mbar	
15	FBH1	1	68,2	0,0	68,2	68,2	73,0	12,2	56,4	0,11
16	FBH1	1	31,6	7,0	38,6	38,6	58,6	5,9	56,4	0,09
17	FBH1	1	49,7	6,2	55,9	55,9	102,8	24,4	56,4	0,16
18	FBH1	1	82,9	9,2	92,1	92,1	161,3	82,5	56,4	0,24
21	FBH1	1-2	48,0	9,2	57,2	57,2	86,7	13,0	56,4	0,13
19	FBH1	1	32,4	8,0	40,4	40,4	72,4	7,9	56,4	0,11
20	FBH1	1	26,1	18,0	44,1	44,1	63,3	7,2	56,4	0,10

Tablica 4.23. Podaci o načinu polaganja podnog grijanja

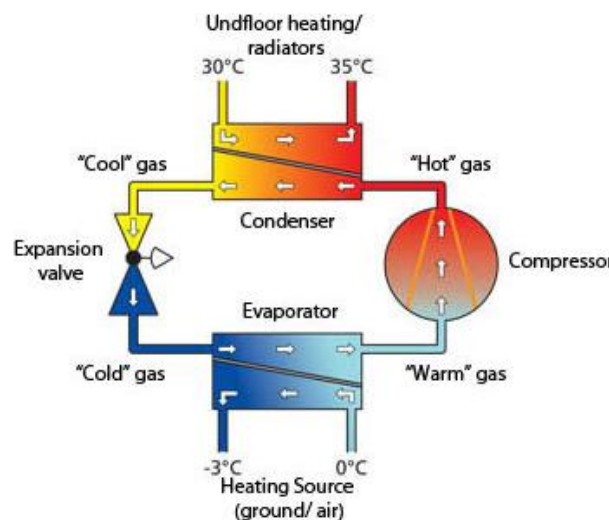
	Br. prostorije	Krug(ovi) grijanja	Rubna zona			Zona boravka	
			Način pol.	Š, cm	A, m ²	Način pol.	A, m ²
Podrum		1-2	-	-	-	EV35	29,7
Prizemlje	3.	1	-	-	-	EV25	3,4
	4.	1	-	-	-	EV35	6,0
	8.	1	EV15	60	3,5	EV35	12,9
	1.	1	-	-	-	EV35	3,8
	5.	1	EV15	60	1,6	EV25	8,2
	6.	1	EV15	120	5,3	EV35	13,1
	7.	1-2	EV10	55	3,9	EV35	23,7
Kat	15.	1	-	-	-	EV5	6,8
	16.	1	-	-	-	EV10	4,2
	17.	1	EV15	60	1,4	EV35	13,4
	18.	1	EV15	60	2,1	EV25	17,2
	21.	1-2	EV10	55	3,8	EV20	13,5
	19.	1	-	-	-	EV30	9,3
	20.	1	-	-	-	EV15	3,9

5. DEFINIRANJE SUSTAVA GRIJANJA I ODABIR OPREME

Nakon što smo proračunali toplinske gubitke, potrebno je odrediti elemente sustava poput dizalice topline, spremnika i shemu spajanja. U tom smislu navesti ćemo nekoliko varijanti, jednu koja koristi isključivo energiju koju proizvodi dizalica topline i druge koje još koriste i sunčevu energiju. Radi jednostavnosti i bolje usporedbe sva oprema biti će od proizvođača Daikin.

Dizalica topline

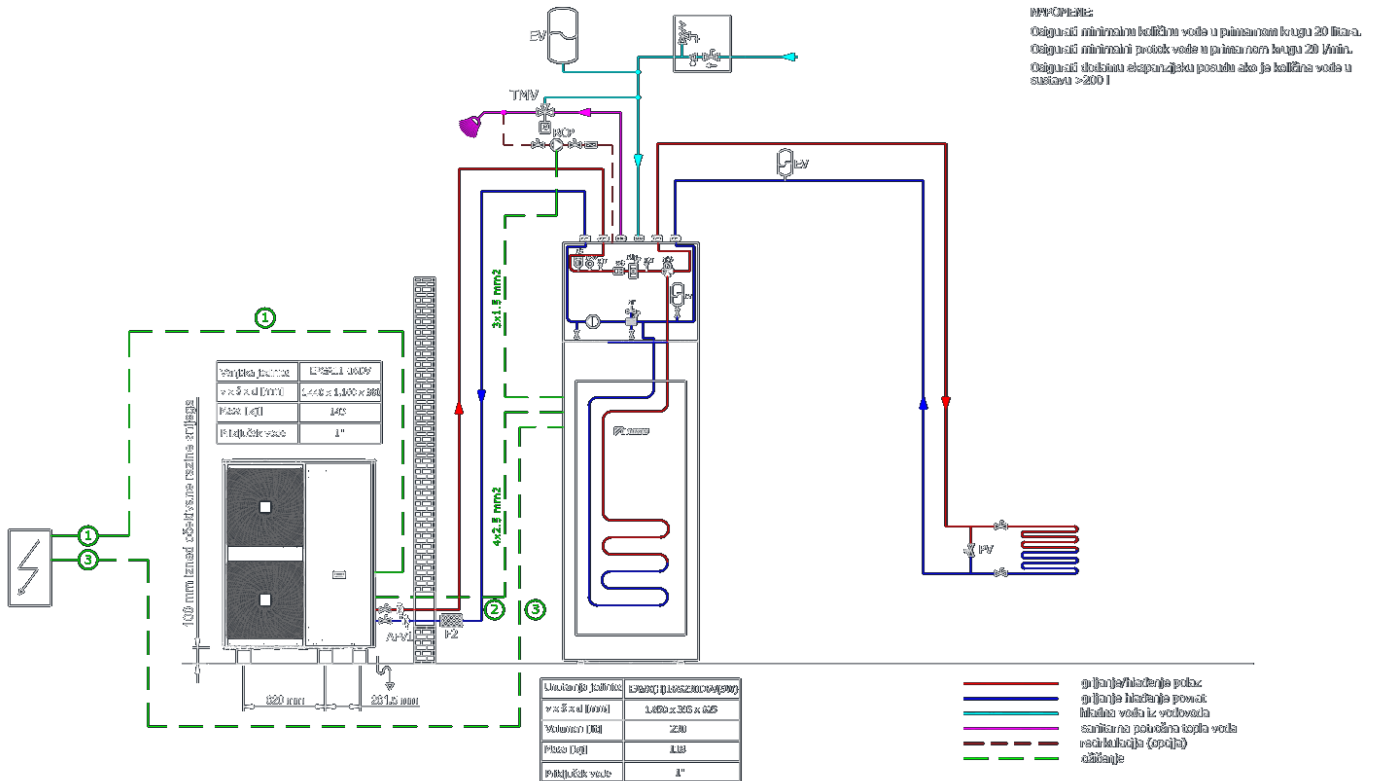
Dizalice topline su uređaji koji omogućavaju prijenos energije iz toplinskog spremnika niže temperature razine u toplinski spremnik više temperature razine uporabom dodatne energije pomoću lijevokretna kružna procesa radne tvari. Taj princip omogućava grijanje prostora i kada je temperatura okoline niža od unutarnje temperature. U ovom slučaju kada grijemo prostor stambene zgrade, toplinski izvor kojem se toplina odvodi je okolni zrak, a toplinski ponor kojem se toplina dovodi jest voda kao ogrjevni medij. Zato ovaj tip dizalica topline nazivamo zrak-voda. Ukratko, prema principu rada, toplina oduzeta okolnom zraku predaje se radnoj tvari kako bi u isparivaču prešla iz kapljevitog u suhozasićeno ili blago pregrijano stanje. Kompresor zatim tlači radnu tvar s tlaka isparivanja na tlak kondenzacije. Radna tvar onda u pregrijanom stanju prolazi kroz kondenzator gdje se ukapljuje predajući tako toplinu koju je preuzela u isparivaču uvećanu za rad kompresora. Nakon toga radna tvar prolazi kroz prigušni ventil koji joj snižava tlak na tlak isparivanja, pri čemu pada i temperatura radne tvari. U tom stanju radna tvar opet ulazi u isparivač čime je kružni proces zatvoren. Shematski prikaz kružnog procesa unutar dizalica topline prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1. Shema kompresijske dizalica topline [5]

5.1 Varijanta 1: Dizalica topline i spremnik PTV-a

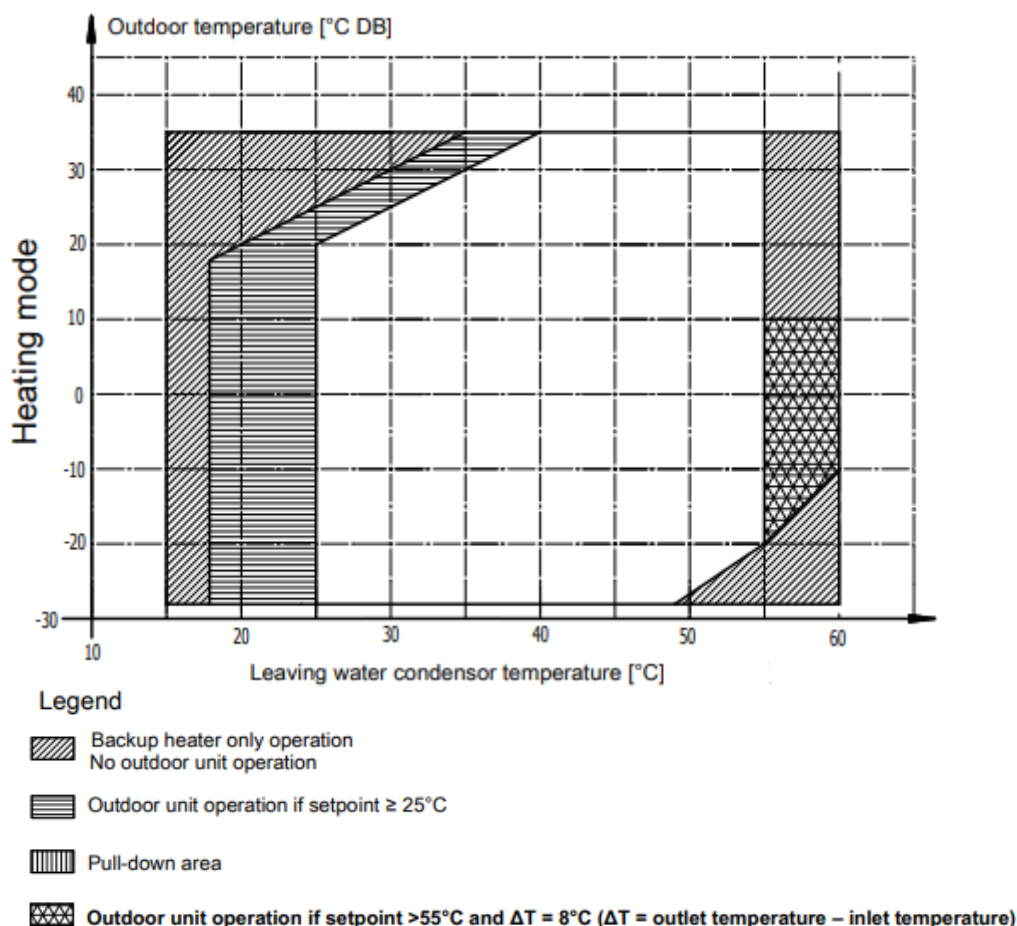
U ovom rješenju odabran je sustav Daikinove Altherma serije koji se sastoji od vanjske jedinice EPGA11DV i podne unutarnje jedinice s integriranim spremnikom PTV-a EAVH16S230D6V. Shema sustava prikazana je na slici 5.2.



Slika 5.2. Shema sustava – varijanta 1 [8]

Riječ je o tzv. hydro-split sustavu, ili sustavu u razdvojenoj izvedbi s vodenim cirkulacijskim krugom između vanjske i unutarnje jedinice, gdje vanjska jedinica sadrži zatvoreni krug R-32 radne tvari te priključke polazne i povratne vode koji izvana ulaze u unutrašnji prostor zgrade. Na taj način nema kruga radne tvari unutar kuće što smanjuje opasnost zbog propuštanja radne tvari. Topla polazna voda dolazi iz izmjenjivača topline vanjske jedinice, ulazi kroz priključke unutarnje jedinice gdje troputni ventil vodu usmjerava za grijanje PTV-a u integriranom spremniku od nehrđajućeg čelika kapaciteta 230 litara ili prema krugovima podnog grijanja. Računamo da bi dizalica topline trebala proizvoditi učin dovoljan da pokrije izračunate toplinske gubitke od 13,1 kW uvećane za određene dodatne gubitke sustava (toplinski gubici kroz pod prema tlu i sl.). Nominalni učin grijanja dizalice topline pri temperaturi vanjskog zraka od -8°C i temperaturi vode na izlazu iz kondenzatora 45°C jest 10,6 kW, što samo po sebi ne pokriva potrebnu toplinsku energiju za grijanje zgrade pri vanjskoj projektnoj temperaturi. Zato unutarnja jedinica ima integrirani dodatni električni grijač snage 6 kW koji onda u paralelnom radu sa dizalicom topline

proizvodi dovoljnu snagu da zadovolji ukupne toplinske potrebe zgrade. Razlog zašto smo dizalicu topline „poddimensionirali” jest zato što je potreban učin podnog grijanja proračunat prema vanjskoj projektnoj temperaturi od $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. U stvarnosti se u gradu Rijeci temperatura zraka spusti ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ svega nekoliko dana u godini. Ako korigiramo potreban učin grijanja prema vanjskoj projektnoj temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ umjesto $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, dobivamo malo više od 10 kW . Iz tablice s radnim podacima dizalice topline možemo očitati da je za potrebnu temperaturu polazne vode pri vanjskoj temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ snaga grijanja dizalice oko 11 kW što onda pokriva naše potrebe. Da smo dizalicu topline „predimensionirali”, radila bi manje kontinuirano i manje učinkovito. Na ovaj način ona samostalno proizvodi dovoljan učin većinu vremena, a dodatni grijač se uključuje kada je to potrebno. Naravno prednost je i novčana ušteda zbog odabira slabijeg modela. Na slici 5.3 vidimo da ova dizalica topline može postići temperaturu polazne vode iz kondenzatora od $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ za raspon vanjskih temperatura od $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa čak i do $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 5.3. Radno područje dizalice topline [8]

To znači da pokriva temperaturne potrebe našeg sustava s obzirom da je potrebna temperatura vode u spremniku PTV-a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, a polazna temperatura podnog grijanja $42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Slike unutarnje i vanjske jedinice (slika 5.4) kao i tablica s općim podacima (tablica 5.1) prikazani su u nastavku.



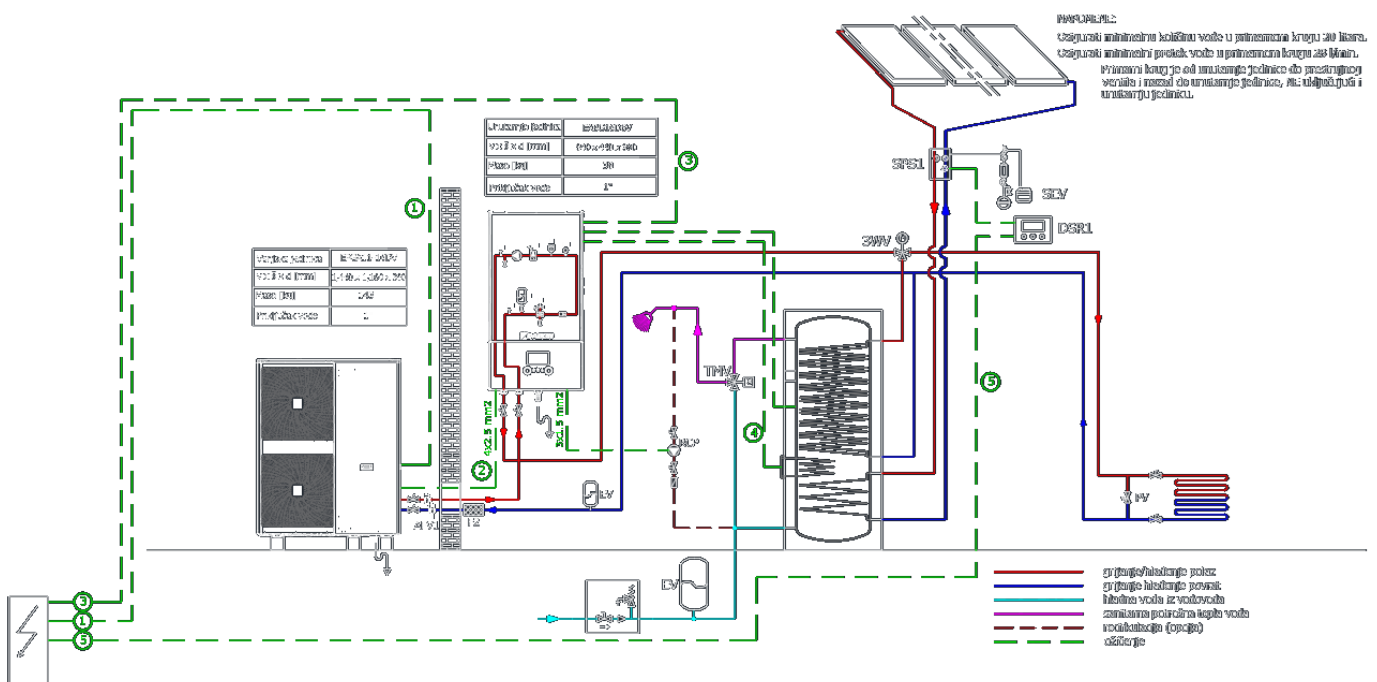
Slika 5.4. Daikin vanjska jedinica EPGA11DV i unutarnja jedinica EAVH16S230D6V [8]

Tablica 5.1. Opći tehnički podaci dizalice topline [8]

Podaci o energetske učinkovitosti				EAVH + EPGA	16S18D6V(G)/ D9W(G) + 11DV	16S23D6V(G)/ D9W(G) + 11DV	16S18D6V(G)/ D9W(G) + 14DV	16S23D6V(G)/ D9W(G) + 14DV	16S18D6V(G)/ D9W(G) + 16DV	16S23D6V(G)/ D9W(G) + 16DV
Učin grijanja	Nom.			kW	11,1 (1) / 11,3 (2)		14,5 (1) / 14,5 (2)		16,5 (1) / 15,6 (2)	
Priključna snaga	Grijanje	Nom.		kW	2,16 (1) / 2,91 (2)		2,91 (1) / 3,96 (2)		3,45 (1) / 4,21 (2)	
COP					5,15 (1) / 3,88 (2)		4,99 (1) / 3,65 (2)		4,78 (1) / 3,71 (2)	
Grijanje prostora	Izlaz za vodu u prosječnoj klimi 55°C	Općenito	SCOP	%	3,29		3,34		3,41	
			η _s (sezonska učinkovitost pri grijanju prostora)	%	129		130		133	
	Izlaz za vodu u prosječnoj klimi 35°C	Općenito	SCOP	%	4,38		4,45		4,56	
			η _s (sezonska učinkovitost pri grijanju prostora)	%	172		175		179	
					A++		A+++ (3)			
Grijanje potrošne tople vode	Općenito	Deklarirani profil opterećenja			L	XL	L	XL	L	XL
		Prosjekna klima	η _{wh} (učinkovitost pri grijanju vode)	%	104	112	104	112	104	112
					A					
					A					
Unutarnja jedinica				EAVH	16S18D6V(G)/ D9W(G)	16S23D6V(G)/ D9W(G)	16S18D6V(G)/ D9W(G)	16S23D6V(G)/ D9W(G)	16S18D6V(G)/ D9W(G)	16S23D6V(G)/ D9W(G)
Kucište	Boja	Bijelo + crno								
	Materijal	Smola / metalni lim								
Dimenzije	Uređaj	Visinaxširinaxdubina	mm	1.650x595x625	1.850x595x625	1.650x595x625	1.850x595x625	1.650x595x625	1.850x595x625	1.850x595x625
Težina	Uređaj		kg	109	118	109	118	109	118	118
Spremnik	Volumen vode		l	180	230	180	230	180	230	230
	Maksimalna temperatura vode		°C	70						
	Maksimalni tlak vode		bara	10						
	Antikorozivna zaštita			Dekapiranje						
Radno područje	Grijanje	Okolina	Min.–Maks.	°C						
		Vodena strana	Min.–Maks.	°C						
	Potrošna topla voda	Okolina	Min.–Maks.	°CDB						
		Vodena strana	Maks.	°C						
Razina zvučne snage	Nom.		dB(A)	44						
Razina zvučnog tlaka	Nom.		dB(A)	30						
Vanjska jedinica				EPGA	11DV	14DV	16DV			
Dimenzije	Uređaj	Visinaxširinaxdubina	mm	1.440x1.160x380						
Težina	Uređaj		kg	143						
Kompresor	Količina			1						
	Tip			Hermetički scroll kompresor						
Radno područje	Hlađenje	Min.–Maks.	°CDB	10–43						
	Potrošna topla voda	Min.–Maks.	°CDB	-28–35						
Radna tvar	Tip			R-32						
	GWP			675,0						
	Punjenje		kg	3,50						
	Punjenje		TCO2Eq	2,36						
Razina zvučne snage	Upravljanje			Ekspanzijski ventil						
	Grijanje	Nom.	dB(A)	64						
	Hlađenje	Nom.	dB(A)	68						
	Grijanje	Nom.	dB(A)	48					49	52
Razina zvučnog tlaka	Hlađenje	Nom.	dB(A)	55						
Napajanje	Naziv / faza / frekvencija / napon		Hz/V	V3/1N~/50/230						
Struja	Preporučeni osigurači		A	32						

5.2 Varijanta 2: Dizalica topline i spremnik PTV-a + solarni kolektori

U ovom rješenju koristimo solarne kolektore s ciljem iskorištenja energije sunčeva zračenja kako bismo dugoročno smanjili troškove rada sustava. I dalje koristimo komponente iz Daikin Altherma serije sa hydro-split sustavom. Vanjska jedinica ostaje EPGA11DV. Od nje polazni i povratni cjevovodi ulaze u zgradu do unutarnje jedinice koja u ovom slučaju nije podna sa integriranim spremnikom, već zidna sa hidrauličkim komponentama i upravljačkom pločom. Kao i u prvoj varijanti, sustav sadrži troputni regulacijski ventil koji ovdje usmjerava protok vode prema krugovima podnog grijanja ili prema izmjenjivaču topline u akumulacijskom spremniku PTV-a. Model unutarnje jedinice je EABH16D6V. Za akumulaciju PTV-a koristi se spremnik SGWB proizvođača Galmet kapaciteta 300 l. Spremnik je bivalentnog tipa što znači da ima donji izmjenjivač topline preko kojeg se prenosi toplina absorbirana u solarnim kolektorima i gornji izmjenjivač preko kojeg se prenosi toplina generirana dizalicom topline. Odabrani model solarnih kolektora je Daikinov EKSJ26P. Shema sustava prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5. Shema sustava – varijanta 2 [8]

U nastavku prikazane su slike unutarnje jedinice i spremnika (slika 5.6) te tablice s tehničkim podacima (tablica 5.2 i tablica 5.3).




Slika 5.6. Unutarnja jedinica i spremnik PTV-a [9]

Tablica 5.2. Opći tehnički podaci dizalice topline [9]

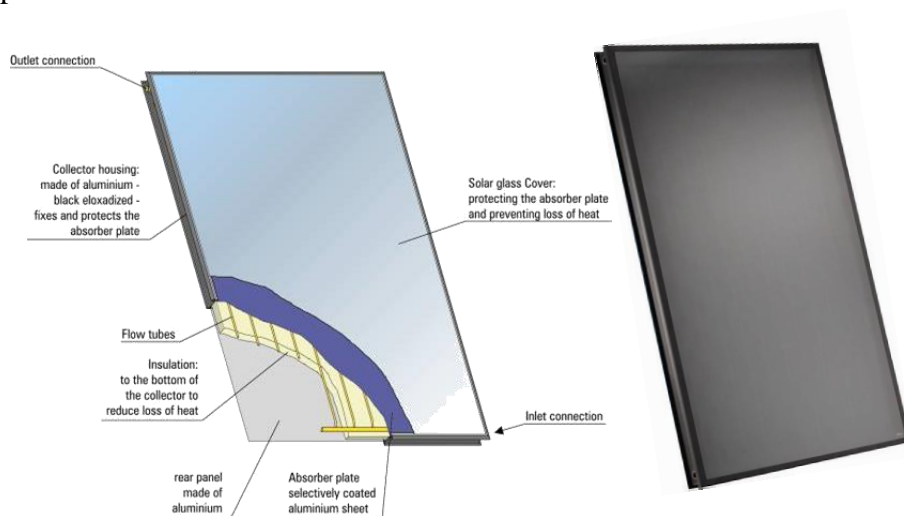
Efficiency data				EABH + EPGA	16D6V/D9W + 11DV	16D6V/D9W + 14DV	16D6V/D9W + 16DV			
Heating capacity	Nom.			kW						
				11.1 (1) / 11.3 (2)						
Power input	Heating		Nom.	kW						
				2.16 (1) / 2.91 (2)						
COP				5.15 (1) / 3.88 (2)						
Space heating	Average climate water outlet 55°C	General	SCOP	3.29						
			ηs (Seasonal space heating efficiency)	129						
	Seasonal space heating eff. class			A++						
	Average climate water outlet 35°C	General	SCOP	4.38						
		ηs (Seasonal space heating efficiency)	172							
Seasonal space heating eff. class			A++							
				A+++ (3)						
Indoor Unit				EABH	16D6V	16D9W	16D6V	16D9W	16D6V	16D9W
Casing	Colour			White + Black						
	Material			Resin, sheet metal						
Dimensions	Unit	HeightxWidthxDepth		mm						
				840x440x390						
Weight	Unit			kg						
				38						
Operation range	Heating	Water side	Min.–Max.	°C						
					15–60					
	Domestic hot water	Water side	Min.–Max.	°C						
					25–75					
Sound power level	Nom.			dBA						
				44						
Sound pressure level	Nom.			dBA						
				30						
Outdoor Unit				EPGA	11DV	14DV	16DV			
Dimensions	Unit	HeightxWidthxDepth		mm						
				1440x1160x380						
Weight	Unit			kg						
				143						
Compressor	Quantity			1						
	Type			Hermetically sealed scroll compressor						
Operation range	Cooling	Min.–Max.	°CDB							
		10–43								
Refrigerant	Domestic hot water	Min.–Max.	°CDB							
		-28–35								
Type	Type			R-32						
	GWP			675.0						
	Charge			kg						
				3.50						
	Charge			TCO2Eq						
			2.36							
Control			Expansion valve							
Sound power level	Heating	Nom.	dBA	64			66			
Sound pressure level	Cooling	Nom.	dBA	68			52			
Power supply	Name/Phase/Frequency/Voltage	Hz/V		V3/1N~/50/230						
Current	Recommended fuses		A							
			32							

Tablica 5.3. Opći tehnički podaci spremnika [11]

specification	unit	SGW(S)B Tower Biwal							
		200	250	300	400	500	700	1000	1500
storage capacity ¹	l	197	244	299	395	496	683	992	1420
ErP  polyurethane foam Neodul®	-	B	B	B	C	B	C	C	-
tank's maximum working temperature	°C	95	95	95	95	95	95	95	95
coil's maximum working temperature	°C	110	110	110	110	110	110	110	110
tank's maximum working pressure	MPa	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
coil's maximum working pressure	MPa	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
solar collector coil's surface	m ²	1,0	1,2	1,4	1,8	2,0	2,4	2,7	2,7
solar collector coil's capacity	l	7,0	8,4	9,8	12,6	14,0	16,8	18,9	18,9
solar collector coil's power (70/10/45°C)	kW	24	29	33,6	43	48	57,6	64,8	64,8
efficiency	l/h	570	635	800	1030	1150	1380	1580	1580
CH coil's surface	m ²	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1	1,2	1,5	1,5
CH coil's capacity	l	4,9	4,9	7,7	7,7	7,7	8,4	10,5	10,5
CH coil's power (70/10/45°C)	kW	17	17	26,4	26,4	26,4	28,8	36	36
efficiency	l/h	410	410	630	630	630	690	880	880
magnesium top cover (5/4" plug) ⁴	mm	38x400	38x400	38x400	38x400	38x600	38x600	38x600	38x600
anode insp. hole (M8 screw)	mm	38x200	38x200	38x200	38x400	38x200	38x400	38x400	38x400
h1 - cold water inflow (int. thread)	" / mm	1 / 130	1 / 210	1 / 130	1 / 240	1 / 180	6/4 / 215	6/4 / 250	6/4 / 250
h2 - water outflow to solar coil (int. thread)	" / mm	1 / 210	1 / 290	1 / 280	1 / 320	1 / 320	1 / 375	1 / 450	1 / 450
h3 - sensor cover I (Ø)	" / mm	3/8 / 355	3/8 / 400	3/8 / 435	3/8 / 570	3/8 / 530	3/8 / 525	3/8 / 600	3/8 / 600
crk - circulation (int. thread)	" / mm	3/4 / 450	3/4 / 595	3/4 / 650	3/4 / 770	3/4 / 1320	5/4 / 925	5/4 / 880	5/4 / 1630
h4 - hot water inflow from solar collector (int. thread)	" / mm	1 / 550	1 / 695	1 / 750	1 / 870	1 / 970	1 / 1045	1 / 1000	3/4 / 1000
h5 - CH water outflow (int. thread)	" / mm	1 / 635	1 / 795	1 / 860	1 / 980	1 / 1090	1 / 1175	1 / 1100	1 / 1100
h6 - sensor cover II (Ø)	" / mm	3/8 / 765	3/8 / 900	3/8 / 1030	3/8 / 1150	3/8 / 1200	3/8 / 1365	3/8 / 1270	3/8 / 1270
h7 - CH hot water inflow (int. thread)	" / mm	1 / 895	1 / 1005	1 / 1200	1 / 1330	1 / 1440	1 / 1555	1 / 1440	1 / 1440
h8 - DHW outflow (int. thread)	" / mm	1 / 975	1 / 1085	1 / 1355	1 / 1470	1 / 1650	6/4 / 1715	6/4 / 1570	6/4 / 2250
sleeve for mounting an electrical set (int. thread)	"	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4
insp. hole (external Ø / internal Ø)	mm	180/120	180/120	180/120	180/120	180/120	280/205	280/205	280/205
d - internal diameter	mm	550	550	550	600	630	700	900	900
D - external diameter	mm	670	670	670	700/800 ³	755/830 ³	855/860 ³	1055/1060 ³	1100 ³
L - height	mm	1140	1300	1615	1750	1950	2050/2080 ³	1960/1990 ³	2680 ³
net weight	kg	98	115	140	151	177	296	475	580

Sunčani kolektori

Sunčani toplinski kolektori spadaju pod aktivne sustave za pretvorbu sunčeve energije u toplinu. U zadanom slučaju koristimo ih za pripremu PTV-a, no primjenjuju se još i za grijanje prostora, bazena i druge primjene. Odabrani tip kolektora je pločasti kolektor koji se koriste za nisko i srednjetermperaturnu primjenu. Sastoji se od metalna kućišta koje je toplinski izolirano, cijevnog registra, apsorpcijske ploče i staklenog pokrova. Pločasti kolektor Daikin EKSV26P i njegovi dijelovi prikazani su na slici 5.7.





Slika 5.7. Dijelovi pločastog sunčanog kolektora [10]

Apsorpcijska ploča apsorbira sunčevo zračenje i zagrijava se te dalje provodi toplinu prema cijevima kroz koje struji radni fluid. U ovom slučaju koristi se aktivni sunčani toplinski sustav što znači da strujanje radnoga medija između kolektora i akumulacijskog spremnika osigurava cirkulacijska pumpa. Kako je sustav zatvoren, kolektori su cijelo vrijeme ispunjeni radnim medijem pa je u tom slučaju radni medij mješavina vode i propilen-glikol antifrizu u određenom omjeru kako bi se sprječilo zamrzavanje pri niskim temperaturama. U tablici 5.4. prikazani su tehnički podaci o odabranom kolektoru.

Tablica 5.4. Tehnički podaci Daikin EKS_{V26P} [10]

Solar panels EKS			V21P	V26P	H26P
Dimensions	Height	mm	2000	2000	1300
	Width	mm	1006	1300	2000
	Depth	mm	85	85	85
Weight	kg	35	42	42	
Volume	l	1.3	1.7	2.1	
Surface	Outer	m ²	2.01	2.6	2.6
Coating	Micro-therm (absorption max. 96 %, Emission ca. 5% +/- -2%)				
Absorber	Harp-shaped copper pipe register with laser-welded highly selective coated aluminium plate				
Glazing	Single pane safety glass, transmission +/- 92 %				
Allowed roof angle	Min.	°	15	15	15
	Max.	°	80	80	80

DAIKIN Solar panels

		EKS _{V26P}	EKS _{H26P}
			
Dimensions LxWxH	[mm]	2000x1300x85	1300x2000x85
Area			
Gross	[m ²]	2,601	2,601
Aperture	[m ²]	2,364	2,364
Absorber	[m ²]	2,364	2,364
Thermal performance ⁽¹⁾		Absorber / Gross	
Zero loss collector efficiency η_0	%	78,7	71,2
Heat loss coefficient a1	W/m ² K	4,27	3,86
Temperature dependence of the heat loss coefficient a2	W/m ² K ²	0,0072	0,0065
Thermal capacity	kJ/K	6,5	6,5
Incident angle modifier IAM at 50°		0,94	0,94

U kombinaciji sa spremnikom od 300 l odabran je sustav s dva navedena solarna kolektora. Kolektori su postavljeni na krov, orijentirani južno pod kutom nagiba od 30 °.

5.3 Varijanta 3: Sustav s fotonaponskim panelima

S ciljem dodatne uštede na troškovima pogona sustava, razmatramo i treću izvedbu sustava koja je u smislu termotehničkih komponenti ista kao i druga, ali je na krov zgrade dodan još i fotonaponski sustav.

Fotonaponski sustavi


Sustav solarnih kolektora korišten je kao sustav koji aktivno koristi energiju sunčeva zračenja za proizvodnju toplinske energije za grijanje PTV-a u cilju smanjenja toplinskog učina dizalice topline za grijanje PTV-a i samim time uštedi energije. Fotonaponski sustav, s druge strane, koristi energiju sunčeva zračenja za proizvodnju električne energije. Sastoji se od jednog ili više fotonaponskih modula, nosača modula, uređaja za pretvorbu istosmjernje struje u izmjeničnu, regulatora punjenja, baterijskog sustava i ostalih dijelova.

Fotonaponski moduli sastoje se od solarnih ćelija koje su međusobno spojene u paralelno-serijskoj kombinaciji kako bi se dobila određena snaga modula. Pretvorba sunčeve energije u električnu temelji se na principu fotonaponskog efekta. Same ćelije izgrađene su od dva sloja – pozitivnog i negativnog, a razlika potencijala između ta dva sloja ovisi o intenzitetu solarnog zračenja. Solarna energija stiže na Zemlju u obliku fotona koji kako padaju na površinu solarne ćelije predaju svoju energiju panelu i na taj način izbijaju negativno nabijene elektrone iz atoma. Izbijeni elektroni kreću se prema negativnoj strani panela i na taj način dolazi do razlike potencijala, drugim riječima generira se električna energija. Fotonaponske ćelije su poluvodički elementi izrađeni najčešće iz silicijske legure. Ćelije od monokristalnog silicija u pravilu su skuplje, no zato imaju veći stupanj djelovanja od ćelija od polikristalnog silicija.

Također valja napomenuti da fotonaponski sustavi mogu biti autonomni ili mrežni. Autonomni (off-grid) sustavi nisu priključeni na javnu električnu mrežu i zato su baterije važna komponenta takvih sustava jer akumulacijom električne energije omogućavaju njeno korištenje danju i noću. Mrežni (on-grid) sustavi povezani su s javnom mrežom koju mogu koristiti kao spremnik. Viškove električne energije danju mogu predati mreži, a noću i u uvjetima manje insolacije iz mreže se mogu pokrivati manjkovi.

U zadanom slučaju na drugu varijantu rješenja sustava grijanja dodan je mrežni fotonaponski sustav u svrhu smanjenja godišnjih troškova električne energije. Odabrani su paneli hrvatskog

proizvođača Solvis, model SV72-350 iz serije polikristalnih modula. U nastavku su prikazani slika panela i tablica sa tehničkim specifikacijama (Slika 5.8.).



Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)					
MODEL		SV72-335	SV72-340	SV72-345	SV72-350
Peak power P_{MPP}	[W]	335	340	345	350
Peak power tolerance	[W]	-0/+4,9			
Short circuit current I_{sc}	[A]	9,01	9,05	9,10	9,14
Open circuit voltage V_{oc}	[V]	47,23	47,52	47,81	48,10
Rated current I_{MPP}	[A]	8,56	8,61	8,65	8,70
Rated voltage V_{MPP}	[V]	39,20	39,58	40,00	40,38
Current and voltage tolerance	[%]	± 3			
Module efficiency	[%]	17,26	17,52	17,78	18,04

Slika 5.8. Fotonaponski modul Solvis SV72-350 [13]

Sustav se sastoji od četiri navedena panela, s ukupnom efektivnom površinom 7,76 m², južno orijentiranih pod kutom nagiba od 30°. Dimenzioniran je na način da generira dovoljno električne energije potrebne za rad termotehničkog sustava bez stvaranja viškova, zato nema veći broj panela. Konfiguracija sustava provedena je kroz softver za dizajniranje fotonaponskih sustava „Sunny Design“ [14] koji je preporučio odabir DC/AC pretvarača SMA Sunny Boy 1.5 (Slika 5.9).



Slika 5.9. Solarni pretvarač SMA SB 1.5-IVL-40 [15]

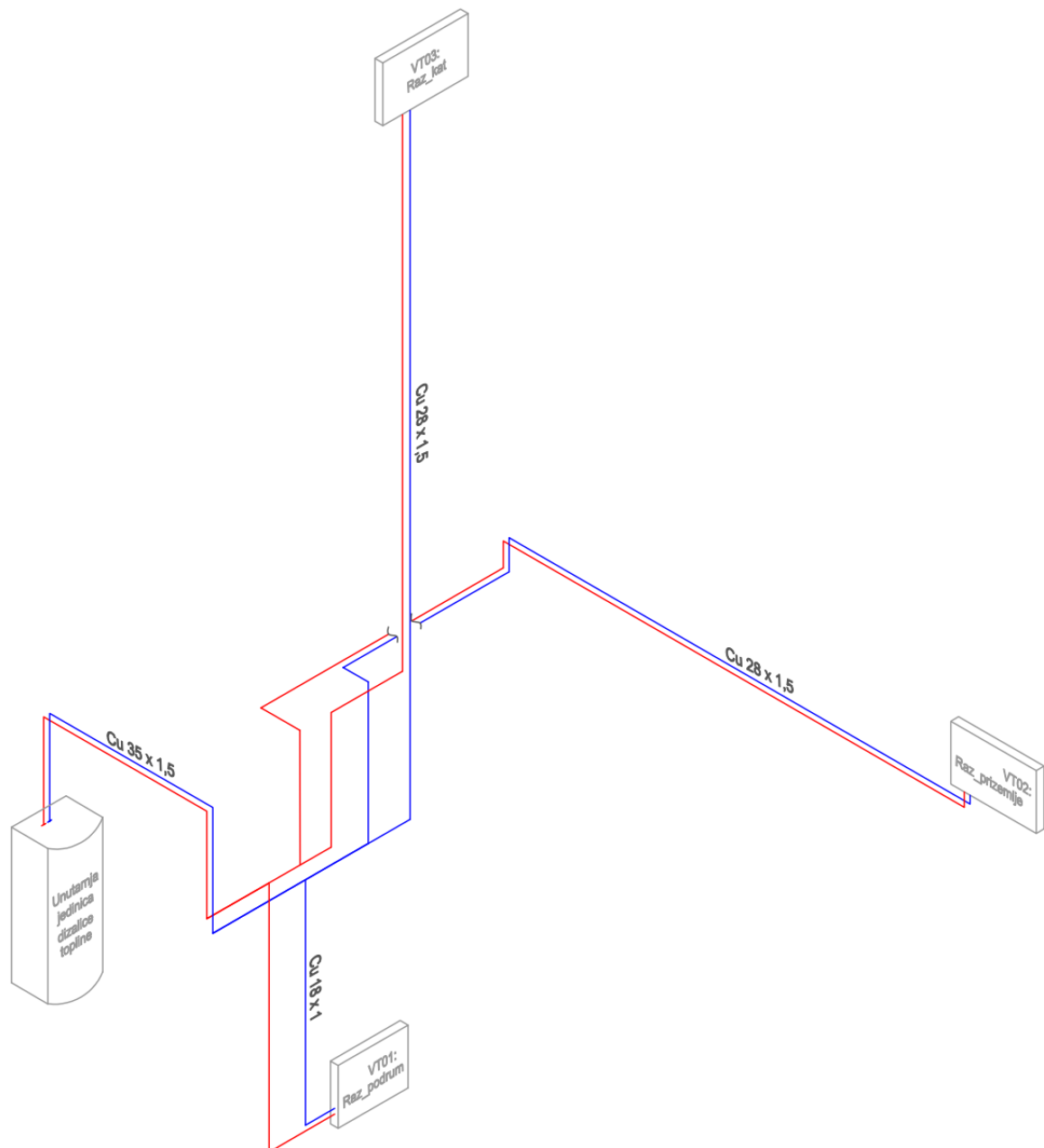
5.4 Dimenzioniranje razvoda podnog grijanja

Potrebno je odrediti dimenzije cijevi koje čine polazne i povratne vodove od spremnika do svakog od tri razdjelna ormarića. Cijevi su izrađene od bakra i toplinski izolirane. Provedene su podžbukno do razdjelnih ormarića od kojih se dalje granaju krugovi podnog grijanja po prostorijama. Za izračun potrebnih dimenzija korišten je softver „MultiCalc“ proizvođača „ConSoft“. Na temelju podataka o temperaturnom režimu i toplinskom učinku dobivaju se vrijednosti brzine strujanja i jediničnog pada tlaka za odabranu dimenziju cijevi. Dimenzija cijevi se onda odabire na način da jedinični pad tlaka zbog otpora trenja ne prelazi 200 Pa/m, a brzina strujanja da ne bude veća od 1 m/s kako bi se izbjegao šum vode u cijevima. Kako se cijevi iz zajedničke grane dalje granaju u tri grane prema razdjelnicima, proračun je podjeljen na dionice cjevovoda ovisno o toplinskom učinku koji ta dionica mora prenijeti. U nastavku je prikazana tablica sa odabranim dimenzijama cijevi.

Tablica 5.5. Rezultati dimenzioniranja cjevovoda

		Protok, l/h	Učin, W	Dimenzije cijevi, mm	Brzina strujanja w m/s	Pad tlaka r , Pa/m
Zajednička grana	1.Dionica	1994	15323	Cu 35 x 1,5	0,66	165
	2.Dionica	1682	12917	Cu 35 x 1,5	0,55	123
	Raz_podrum	312	2406	Cu 18 x 1	0,41	174
	Raz_prizemlje	977	7426	Cu 28 x 1,5	0,52	150
	Raz_kat	705	5491	Cu 28 x 1,5	0,39	89

Prostorna shema spajanja cijevnog razvoda sa upisanim dimenzijama cijevi prikazana je na slici 5.10.



Slika 5.10. Prostorna shema cijevog razvoda

5.5 Proračun cirkulacijske pumpe za podno grijanje

Da bi sustav podnog grijanja mogao ostvariti projektni toplinski učin, potrebno je odabrati pumpu koja osigurava odgovarajući protok vode. U ovom slučaju unutarnje jedinice sadrže integriranu cirkulacijsku pumpu, pa je potrebno dokazati da ona zadovoljava potrebe sustava. Pritom treba

obratiti pozornost na krug grijanja s najvećim padom tlaka. To obuhvaća pad tlaka u krugu podnog grijanja prostorije, pad tlaka na odgovarajućem razdjelniku i pad tlaka u cjevovodu od generatora topline do tog razdjelnika.

Potrebno je izračunati pad tlaka za navedeni krug grijanja. Cjevovod do odgovarajućeg razdjelnika dijeli se na dionice na temelju promjene protoka i za svaku od njih se računaju dužinski gubici R i lokalni gubici Z . Vrijednosti svih dionica se zbrajaju i pridodaje se još i maksimalni pad tlaka u krugu podnog grijanja. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 5.6.

Tablica 5.6. Rezultati proračuna pada tlaka

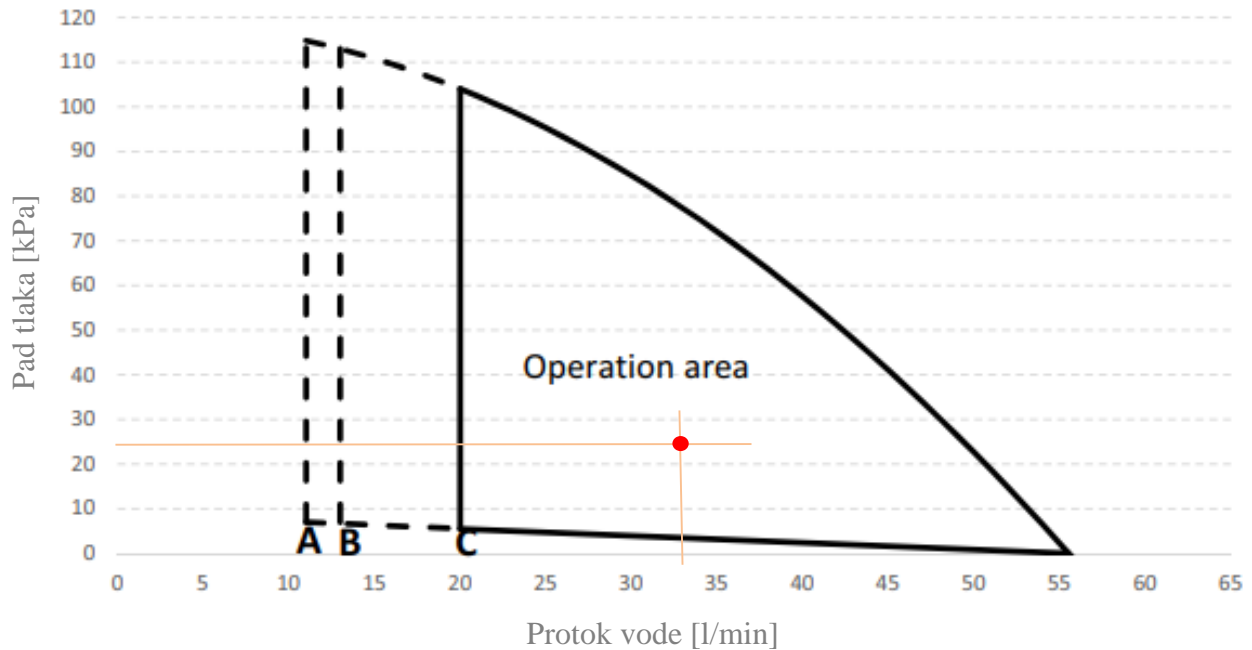
#	Q	\dot{m}	\varnothing cijevi	l	r	R	w	$\sum \zeta$	Z	Δp
	W	kg/h	mm	m	Pa/m	Pa	m/s		Pa	Pa
1	15323	1994	$\varnothing 35 \times 1,5$	5,6	165	924	0,66	12	2614	3538
2	12917	1682	$\varnothing 35 \times 1,5$	0,6	123	73,8	0,55	4	605	678,8
3	7426	977	$\varnothing 28 \times 1,5$	11,1	150	1665	0,52	8,5	1149	2814
Raz_priz										19232
ukupno										26263

Na osnovu dobivenih vrijednosti vidimo da pumpa mora zadovoljiti kriterije:

$$\dot{V} = 1,994 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Delta p = 26,263 \text{ kPa}$$

Unutarnja jedinica ima integriranu pumpu Grundfos UPMXL GEO 25-125 130 PWM. Integrirane pumpe su obično velike snage kako bi zadovoljile potrebe većih sustava. Svejedno, ucrtat ćemo radnu točku u dijagram pumpe da utvrdimo kako zadovoljava naš sustav. Naša radna točka definirana je padom tlaka $\Delta p = 26,263 \text{ kPa}$ pri protoku vode $\dot{V} = 1,994 \text{ m}^3/\text{h}$. Radna točka ucrtana na dijagramu pumpe prikazana je na slici 5.11.



Slika 5.11. Radna točka integrirane pumpe

5.6 Odabir ekspanzijske posude

Osnovna funkcija ekspanzijske posude jest kompenzacija zbog promjene volumena vode u sustavu. Zagrijavanjem se volumen povećava, a hlađenjem smanjuje. Ekspanzijske posude služe i za održavanje tlaka vode u sustavu unutar propisanih granica. U ovom slučaju kada imamo zatvoreni sustav grijanja koriste se zatvorene membranske ekspanzijske posude punjene dušikom. Za proračun minimalnog potrebnog volumena prvo se određuje ukupna količina vode u sustavu. To ovdje uključuje količinu vode u cijevima podnog grijanja, cjevovodu do razdjelnika, cjevovodu od vanjske do unutarnje jedinice i ostalim elementima sustava. Izračun je prikazan u tablici 5.7.

Tablica 5.7. Ukupna količina vode

	Volumen vode, l	
	Varijanta 1	Varijante 2 i 3
Unutarnja jedinica	2,5	2,2
Vanjska jedinica	0,75	0,75
Spremnik PTV-a	5,9	7,7
Podno grijanje	173,14	173,14
Cjevovod do un. jedinice	7,6	7,6
Cjevovod do razdjelnika	15	16,5
Ukupno, V_A	204,89	207,89

Nominalni volumen ekspanzijske posude računa se prema izrazu:

$$V_n = (V_e + V_v) \cdot \frac{p_e + 1}{p_e - p_0} \quad (5.1)$$

gdje je:

V_e porast volumena vode u intalaciji uslijed povišenja temperature vode od 10 °C do maksimalne temperature polaznog cjevovoda, l

V_v rezervni volumen vode, l

p_e krajnji tlak vode, bar

p_0 minimalni radni tlak, bar.

Porast volumena vode uslijed povišenja temperature računamo prema izrazu:

$$V_e = V_A \cdot \frac{n}{100} \quad (5.2)$$

gdje je:

n koeficijent porasta volumena u odnosu na volumen vode pri 10°C, %.

Koeficijent n za temperaturu od 55 °C iznosi 1,405 pa iz izraza (5.2) dobijemo:

$$V_e = 204,89 \cdot \frac{1,405}{100} = 2,88 \text{ l}$$

Volumen predpunjenja mora iznositi minimalno 3 l, a računa se prema izrazu:

$$V_v = 0,005 \cdot V_A \quad (5.3)$$
$$V_v = 0,005 \cdot 188,14 = 1,02 \text{ l} < 3 \text{ l}$$

Prema tome, usvajamo volumen predpunjenja od 3 l.

Minimalni radni tlak računamo kao:

$$p_0 = p_{st} + 0,2, \text{ bar} \quad (5.4)$$

gdje je:

p_{st} statički tlak, bar

Statički tlak računa se kao:

$$p_{st} = \frac{H_{inst}}{10}, \text{ bar} \quad (5.5)$$

$$p_{st} = 0,53 \text{ bar}$$

Onda je:

$$p_0 = 0,53 + 0,2 = 0,73 \text{ bar}$$

Uz uvijet $p_0 \geq 1$, usvajamo $p_0 = 1$ bar.

Za sustave do 5 bar krajnji tlak vode računa se kao $p_e = p_{sv} - 0,5$, gdje je p_{sv} tlak otvaranja sigurnosnog ventila, $p_{sv} \geq p_0 + 1,5$ bar.

U ovom slučaju, za odabranu dizalicu topline, tlak otvaranja sigurnosnog ventila iznosi 3 bar.

$$p_{sv} = 3 \text{ bar}$$

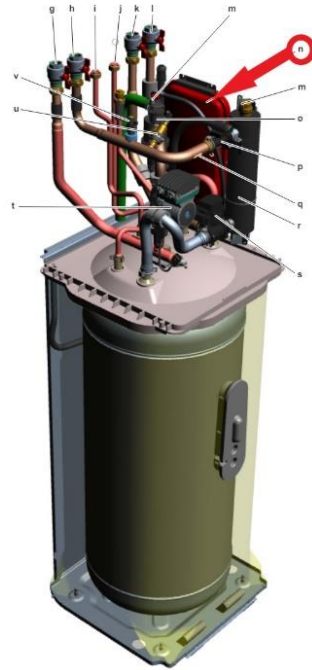
$$p_e = 3 - 0,5 = 2,5 \text{ bar}$$

Konačno, računamo nominalni volumen ekspanzijske posude:

$$V_n = (2,88 + 3) \cdot \frac{2,5 + 1}{2,5 - 1} = 13,72 \text{ l}$$

Navedeni proračun odnosi se na 1. varijantu sustava. Za 2. i 3. varijantu sustava nema velike razlike te kada se isti proračun provede dobiva se nominalni volumen ekspanzijske posude $V_n = 13,81$ l.

Slično kao i za pumpu, u sustavu je integrirana ekspanzijska posuda određenog volumena za koju je potrebno provjeriti je li adekvatna i odabrati dodatnu ekspanzijsku posudu ako je potrebno. Unutarnja jedinica ima integriranu ekspanzijsku posudu koja je naznačena na presjeku unutarnje jedinice na slici 5.12.



Slika 5.12. Integrirana ekspanzijska posuda

Volumen integrirane ekspanzijske posude iznosi 10 l, a prethodno smo proračunali da je minimalni potrebni volumen 13,72 l, odnosno 13,81 l, pa je potrebno nadoknaditi preostali volumen od približnih 4 l. Stoga odabiremo dodatnu ekspanzijsku posudu proizvođača Gitral, model MB 4 prikazan na slici 5.13.



Volumen	4 l
Visina	208 mm
Promjer	217 mm
Priključak	3/4"
Maksimalni radni tlak	3 bar

Slika 5.13. Odabrana ekspanzijska posuda [12]

6. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA SUSTAVA

U ovom poglavlju provodimo tehno-ekonomsku analizu navedenih varijanti sustava. Usporedit ćemo ukupne troškove i na temelju njih doći do zaključka o isplativosti pojedinog sustava. Kada gledamo ukupne troškove sustava u nekom vremenskom razdoblju možemo ih opisati prema izrazu (6.1).

$$T = T_{\text{IN}} + T_{\text{EN}} + T_{\text{OD}} \quad (6.1)$$

Drugim riječima, ukupni troškovi sastoje se od investicijskih troškova T_{IN} koji uključuju troškove sve potrebne opreme, dijelova i ugradnje sustava, troškova energije T_{EN} koji u ovom slučaju predstavljaju cijenu godišnje iskorištene električne energije za rad sustava i troškove održavanja T_{OD} koje procjenjujemo prema određenim postotcima investicijskih troškova i uključuju bilo kakve dodatne troškove održavanja poput upravljanja sustavom, popravke i sl.

6.1 Investicijski troškovi

Investicijski troškovi obuhvaćaju troškove nabave potrebne opreme i materijala, kao i troškove rada, montaže i puštanja u pogon. Troškovi opreme i materijala iskazani su prema aktualnim cijenama u trgovinama termotehničkom opremom i navedeni kao pojedini elementi u tablicama. Za dobivanje ukupnih iznosa investicija, troškove rada, montaže, ugradnje i svih ostalih manjih stavki koje su uključene u konačno puštanje sustava u pogon, procijenili smo kao 75 % ukupne cijene opreme.

Tablica 6.1. Investicijski troškovi za varijantu 1

Element	Trošak
Dizalica topline	11.012 €
Podno grijanje	4.266,36 €
Cijevni razvod	731,49 €
Ukupno	16.009,85 €
+ 75%	28.017,24 €

Troškovi podnog grijanja obuhvaćaju troškove cijevi, razdjelnika, razdjelnih ormarića i ostalog potrebnog materijala. Pod troškove cijevnog razvoda uključeni su troškovi bakrenih cijevi i spojeva, izolacije, ventila, ekspanzijske posude i ostalih regulacijsko-nadzornih elemenata.

Tablica 6.2. Investicijski troškovi za varijantu 2

Element	Trošak
Dizalica topline	9.637 €
Podno grijanje	4.266,36 €
Cijevni razvod	731,49 €
Solarni sustav	3.042,15 €
Ukupno	17.677 €
+ 75%	30.934,75 €

Troškovi solarnog sustava uključuju troškove dva odabrana ravna pločasta kolektora, solarne pumpne stanice s integriranom solarnom pumpom i solarnom regulacijom, potrebnih izoliranih cijevi, solarne ekspanzijske posude, bivalentnog akumulacijskog spremnika PTV-a, koncentrata antifrizna i ostalih manjih dijelova potrebnih za montažu i rad sustava.

Tablica 6.3. Investicijski troškovi za varijantu 3

Element	Trošak
Dizalica topline	9.637 €
Podno grijanje	4.266,36 €
Cijevni razvod	731,49 €
Solarni sustav	3.042,15 €
Fotonaponski sustav	2.827 €
Ukupno	20.504 €
+ 75%	35.822 €

Troškovi fotonaponskog sustava obuhvaćaju troškove četiri odabrana fotonaponska modula, DC/AC pretvarača, baterije, kabela, konektora i ostalih montažnih dijelova.

6.2 Troškovi energije

Kako bi na temelju cijena električne energije mogli odrediti troškove energije prvo je potrebno odrediti godišnju potrošnju konačne energije za sve varijante sustava. Naime, konačnom energijom nazivamo onaj oblik energije koji dolazi do trošila, sustava ili uređaja koji tu energiju onda koriste za svoj rad. U ovom slučaju govorimo o električnoj energiji iz javne električne mreže koju sustav koristi za grijanje prostora i za grijanje PTV-a. Konačna energija dobiva se pretvorbom iz oblika primarne energije. Primarna je energija u onom prvobitnom obliku kako se nalazi u prirodi. Izvori primarne energije mogu biti obnovljivi i neobnovljivi. U ovom slučaju možemo govoriti o kemijskoj energiji goriva kao neobnovljivom izvoru energije koja se u termoelektrani pretvara u električnu energiju i primjerice energiji vjetra kao obnovljivom izvoru energije koja se u vjetroelektranama pretvara u električnu energiju.

Proračun je proveden u softveru KI Expert Plus od firme Knauf Insulation. Potrebno je bilo unijeti sve već navedene podatke o projektu poput lokacije, fizike zgrade i definirati tri opisana termotehnička sustava. U programu se proračun vrši prema Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama temeljen na normi HRN EN 15316 [6]. Također, program je u skladu sa zahtjevima Tehničkoga propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [2].

Proračun se temelji na raščlambi termotehničkih sustava na podsustave. Podsustav predaje odnosi se na dio sustava koji izravno predaje toplinu grijanom prostoru. U ovom slučaju to je mokri sustav podnoga grijanja. Podsustav razvoda je onaj dio odgovoran za distribuciju ogrjevnog medija do ogrjevnih tijela. Za razvod grijanja i razvod PTV-a potrebno je u programu definirati dimenzije cjevovoda, koeficijente toplinskih gubitaka za izolirane cijevi, temperaturni režim i druge parametre važne za proračun. Za sustav pripreme PTV-a imamo i podsustav spremnika gdje je potrebno definirati njegov volumen. Podsustav proizvodnje obuhvaća one dijelove koji stvaraju potrebnu toplinsku energiju za rad sustava. Kod prve varijante to uključuje samo dizalicu topline. Među ostalim, za dizalicu topline potrebno je definirati da je riječ o dizalici topline zrak-voda, s dodatnim električnim grijačem, paralelnim režimom rada te kako bi definirali njen učin potrebno je upisati vrijednosti učina i COP-a za karakteristične radne uvjete (temperature vanjskog zraka i polazne ogrjevne vode). Kod druge varijante dizalici topline dodan je sustav solarnih kolektora za grijanje PTV-a kojega definiramo unosom ukupne efektivne površine i odgovarajućih koeficijenata koji su navedeni u specifikacijama.

U nastavku su prikazani rezultati proračuna za sve tri varijante sustava. U rezultatima ćemo obratiti pozornost na vrijednosti koje bi trebale biti zadovoljene prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. S aspekta građevinske izvedbe zgrade tu spadaju:

$Q''_{H,nd}$ [kWh/m²a] - Najveća godišnja toplina za grijanje po jedinici proračunske korisne površine
 $H'_{tr,adj}$ [W/m²K] - Najveći dopušteni koeficijent transmisijskog toplinskog gubitka po jedinici oplošja grijanog dijela zgrade.

Naravno, te vrijednosti će ostati jednake za sve varijante kako je riječ o istoj zgradi. Ono što će varirati među sustavima, a također je bitno za zadovoljavanje Tehničkog propisa je:

E''_{prim} [kWh/m²a] - Najveća dopuštena godišnja primarna energija po jedinici ploštine korisne površine zgrade.

Valja napomenuti kako će vrijednost $Q''_{C,nd}$, koja označava godišnju potrebnu toplinu za hlađenje po jedinici obujma grijanog dijela zgrade, biti veća od maksimalne dozvoljene vrijednosti, no u ovom slučaju se nećemo obazirati na to s obzirom da radimo sustav grijanja.

Tablica 6.4. Energetska iskaznica zgrade za varijantu 1

A [m ²]	588,34	fo [m ⁻¹]	0,79	
Ak [m ²]	233,29	Ak' [m ²]	233,29	
Ve [m ³]	748,48			
Q _{H,nd} [kWh/a]	1496,05			
Q'' _{H,nd} [kWh/m ² a]	6,41	Q'' _{H,nd} (max) [kWh/m ² a]	47,36	ZADOVOLJAVA
Q _{C,nd} [kWh/a]	23004,74			
Q'' _{C,nd} [kWh/m ² a]	98,61	Q'' _{C,nd} (max) [kWh/m ² a]	50,00	NE ZADOVOLJAVA
E _{del} [kWh/a]	4062,13			
E'' _{del} [kWh/(m ² a)]	17,41			
E _{prim} [kWh/a]	6556,28			
E'' _{prim} [kWh/m ² a]	28,10	E'' _{prim} (max) [kWh/m ² a]	35,00	ZADOVOLJAVA
H' _{tr,adj} [W/m ² K]	0,46	H' _{tr,adj} (max) [W/m ² K]	0,64	ZADOVOLJAVA
H _{tr,adj} [W/K]	267,84			
H _{ve,adj} [W/K]	72,85			
Ql [kWh]	18539,99	Qs [kWh]	37733,29	
Qi [kWh]	10218,10	Qg [kWh]	47951,39	

Tablica 6.5. Energetska iskaznica zgrade za varijantu 2

A [m ²]	588,34	f _o [m ⁻¹]	0,79	
A _k [m ²]	233,29	A _k ' [m ²]	233,29	
V _e [m ³]	748,48			
Q _{H,nd} [kWh/a]	1496,05			
Q'' _{H,nd} [kWh/m ² a]	6,41	Q'' _{H,nd} (max) [kWh/m ² a]	47,36	ZADOVOLJAVA
Q _{C,nd} [kWh/a]	23004,74			
Q'' _{C,nd} [kWh/m ² a]	98,61	Q'' _{C,nd} (max) [kWh/m ² a]	50,00	NE ZADOVOLJAVA
E _{del} [kWh/a]	2848,89			
E'' _{del} [kWh/(m ² a)]	12,21			
E _{prim} [kWh/a]	4598,11			
E'' _{prim} [kWh/(m ² a)]	19,71	E'' _{prim} (max) [kWh/(m ² a)]	35,00	ZADOVOLJAVA
H' _{tr,adj} [W/m ² K]	0,46	H' _{tr,adj} (max) [W/m ² K]	0,64	ZADOVOLJAVA
H _{tr,adj} [W/K]	267,84			
H _{ve,adj} [W/K]	72,85			
Q _l [kWh]	18539,99	Q _s [kWh]	37733,29	
Q _i [kWh]	10218,10	Q _g [kWh]	47951,39	

Tablica 6.6. Energetska iskaznica zgrade za varijantu 3

A [m ²]	588,34	f _o [m ⁻¹]	0,79	
A _k [m ²]	233,29	A _k ' [m ²]	233,29	
V _e [m ³]	748,48			
Q _{H,nd} [kWh/a]	1496,05			
Q'' _{H,nd} [kWh/m ² a]	6,41	Q'' _{H,nd} (max) [kWh/m ² a]	47,36	ZADOVOLJAVA
Q _{C,nd} [kWh/a]	23004,74			
Q'' _{C,nd} [kWh/m ² a]	98,61	Q'' _{C,nd} (max) [kWh/m ² a]	50,00	NE ZADOVOLJAVA
E _{del} [kWh/a]	454,61			
E'' _{del} [kWh/(m ² a)]	1,95			
E _{prim} [kWh/a]	733,74			
E'' _{prim} [kWh/(m ² a)]	3,15	E'' _{prim} (max) [kWh/(m ² a)]	35,00	ZADOVOLJAVA
H' _{tr,adj} [W/m ² K]	0,46	H' _{tr,adj} (max) [W/m ² K]	0,64	ZADOVOLJAVA
H _{tr,adj} [W/K]	267,84			
H _{ve,adj} [W/K]	72,85			
Q _l [kWh]	18539,99	Q _s [kWh]	37733,29	
Q _i [kWh]	10218,10	Q _g [kWh]	47951,39	

Iz tablica možemo vidjeti da vrijednosti $Q''_{H,nd}$ i $H'_{tr,adj}$ zadovoljavaju zahtjeve Tehničkog propisa. Također, vidimo da izvedbe sustava za sve tri varijante zadovoljavaju zahtjev o dopuštenoj godišnjoj primarnoj energiji.

U tablici 6.7, za sve varijante sustava navedeni su isporučena i primarna energija, emisija ugljičnog dioksida i izračunata godišnja cijena električne energije.

Tablica 6.7. Troškovi energije

	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3
E_{del} [kWh]	4062,13	2848,89	454,61
E_{prim} [kWh]	6556,28	4598,11	733,74
CO ₂ [kg]	953,83	668,95	106,75
Trošak energije [€]	570,75 €	410,55 €	94,29 €

Cijena električne energije preuzeta je s informativnog izračuna na stranicama HEP-a [7] gdje je usvojen bijeli tarifni model pri čemu je 2/3 potrošene energije u višoj tarifi i 1/3 u nižoj tarifi.

Kao što smo mogli i očekivati, varijanta koja utilizira više sunčeve energije kao obnovljivog izvora energije koristi manje električne energije iz javne mreže i samim time doprinosi manjoj emisiji CO₂ i u konačnici rezultira manjim godišnjim troškovima energije.

6.3 Troškovi održavanja

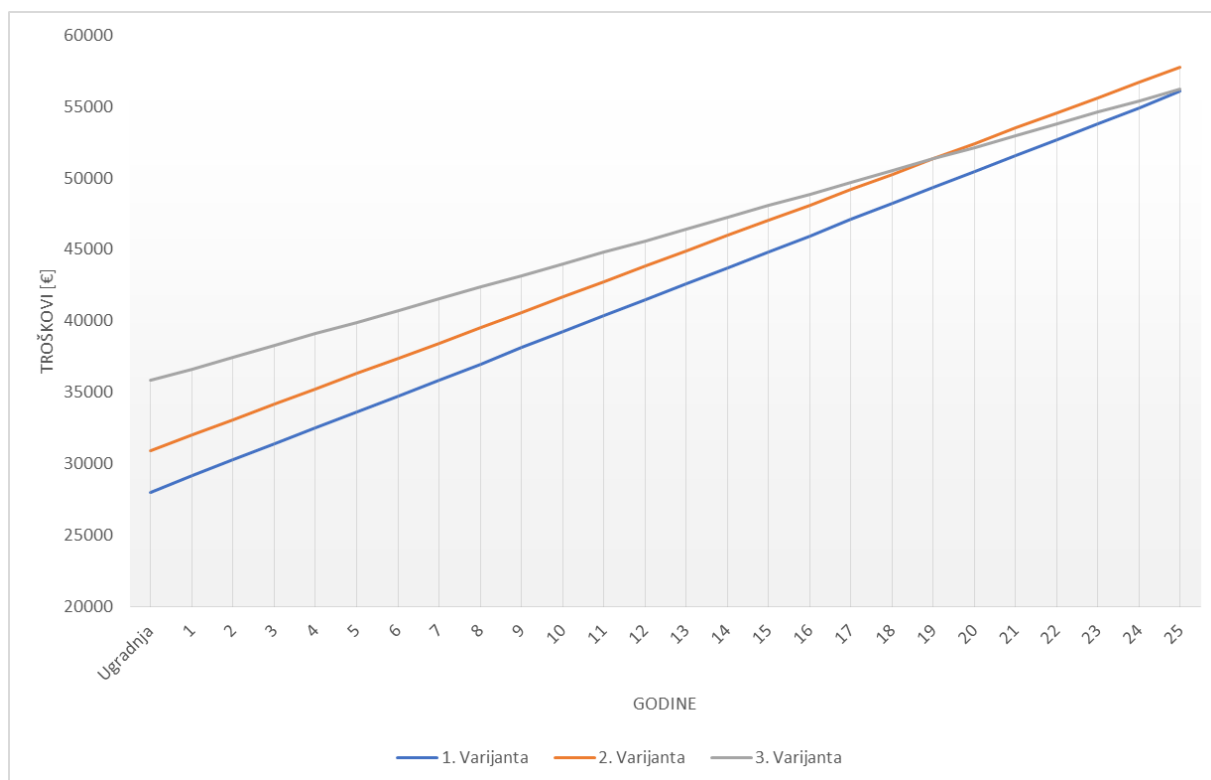
Godišnje troškove održavanja sustava procjeniti ćemo prema određenim udjelima investicijskih troškova, ovisno o tipu opreme koju sustav sadrži. U ovom slučaju za sustav dizalica topline troškovi održavanja procjenjuju se na 5 % investicijskih troškova, sustav sunčevih kolektora na 2 % i fotonaponski sustav na 2 %. Tablica s izračunatim vrijednostima troškova održavanja prikazana je u nastavku.

Tablica 6.8. Troškovi održavanja

	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3
Trošak održavanja [€]	550,60 €	663,19 €	721,73€

6.4 Isplativost sustava

Sa definiranim ukupnim troškovima za sve tri varijante sustava, provodimo analizu isplativosti. Uspoređuju se ukupni troškovi od ugradnje sustava, pa za narednih 25 godina. Pod troškove ugradnje podrazumjevaju se investicijski troškovi na čiji se iznos onda svake godine dodaju troškovi energije i održavanja. Rezultati su grafički prikazani na slici 6.7.

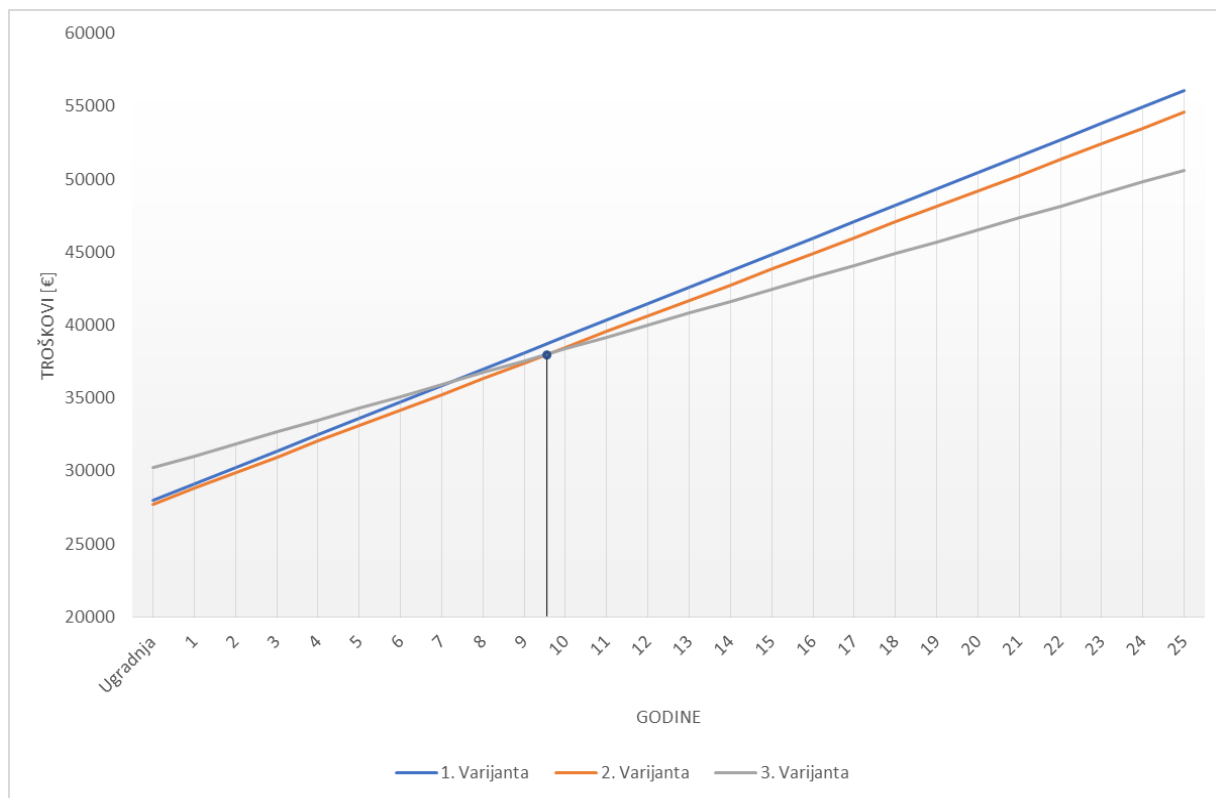


Slika 6.7. Isplativost sustava

Iz slike se može uočiti da ušteda na troškovima energije kod druge varijante sa solarnim kolektorima u ovom slučaju nije dovoljna da se investicija u takav sustav isplati kroz 25 godina. Ušteda je nešto veća kod treće varijante sa fotonaponskim sustavom, ali zbog veće početne investicije sustav postaje isplativ tek nakon 25. godine.

Valja razmotriti i isplativost druge i treće varijante sustava uključujući i poticaje za ugradnju fotonaponske elektrane i sunčanih kolektora. Naime, u sklopu svojih programa kojima nastoji dekarbonizirati sektor stanovanja, Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost potiče i ugradnju sustava za korištenje obnovljivih izvora energije. Prema programu za energetska obnovu obiteljskih kuća, postotak sufinanciranja za ugradnju fotonaponskih elektrana iznosi do 50%, a za

ugradnju solarnih toplinskih sustava do 60% uz maksimalni iznos opravdanog troška od 4.900 €. U tom slučaju investicijski troškovi za drugu varijantu bi se nešto smanjili i iznosili bi 27.740,49 €, a investicijski troškovi za treću varijantu iznosili bi 30.214,12 €. Rezultat analize isplativosti uključujući sufinanciranje prikazan je grafički na slici 6.8.



Slika 6.8. Isplativost sustava sa sufinanciranjem

Vidljivo je da je iznos investicijskih troškova za drugu varijantu, zahvaljujući sufinanciranju, u ovom slučaju čak i manji od investicijskih troškova prve varijante. Ta činjenica zajedno sa nižim godišnjim troškovima čini drugu varijantu nedvojbeno isplativijom od prve. S druge strane, treća varijanta sa fotonaponskim sustavom zahvaljujući uštedi na godišnjim troškovima energije, opravdava veću investiciju te postaje najisplativija opcija nakon nešto više od 9 godina.

6.5 Isplativost sustava s dizalicom topline i fotonaponskom elektranom

Inspirirani ovim saznanjima, točnije da sustav solarnih kolektora znatno manje doprinosi dugoročnoj isplativosti sustava u odnosu na fotonaponski sustav, nameće se pitanje isplativosti prvobitnog sustava samo sa dodanim fotonaponskim sustavom. Logika nalaže da bi kod takve izvedbe vrijeme povrata investicije trebalo biti još kraće.

Kako u ovakvom sustavu nemamo uštedu na električnoj energiji za grijanje PTV-a zbog korištenja solarnog toplinskog sustava, to ostavlja prostora za korištenje fotonaponske elektrane veće snage kako bi se zadovoljile energetske potrebe termotehničkog sustava bez stvaranja viškova električne energije. Na taj način je odabran fotonaponski sustav od 8 panela Solvis SV72-350, s ukupnom efektivnom površinom 15,52 m², južno orijentiranih pod kutom nagiba od 30°.

U tablici 6.9 prikazana je energetska iskaznica ove izvedbe sustava.

Tablica 6.9. Energetska iskaznica zgrade za varijantu 4

A [m ²]	588,34	fo [m ⁻¹]	0,79	
Ak [m ²]	233,29	Ak' [m ²]	233,29	
Ve [m ³]	748,48			
Q _{H,nd} [kWh/a]	1496,05			
Q ["] _{H,nd} [kWh/m ² a]	6,41	Q ["] _{H,nd} (max) [kWh/m ² a]	47,36	ZADOVOLJAVA
Q _{C,nd} [kWh/a]	23004,74			
Q ["] _{C,nd} [kWh/m ² a]	98,61	Q ["] _{C,nd} (max) [kWh/m ² a]	50,00	NE ZADOVOLJAVA
E _{del} [kWh/a]	346,72			
E ["] _{del} [kWh/(m ² a)]	1,49			
E _{prim} [kWh/a]	559,60			
E ["] _{prim} [kWh/(m ² a)]	2,40	E ["] _{prim} (max) [kWh/(m ² a)]	35,00	ZADOVOLJAVA
H _{tr,adj} [W/m ² K]	0,46	H _{tr,adj} (max) [W/m ² K]	0,64	ZADOVOLJAVA
H _{tr,adj} [W/K]	267,84			
H _{ve,adj} [W/K]	72,85			
Qi [kWh]	18539,99	Qs [kWh]	37733,29	
Qi [kWh]	10218,10	Qg [kWh]	47951,39	

U tablici 6.10, za četvrtu varijantu sustava prikazani su isporučena i primarna energija, emisija ugljičnog dioksida i izračunata godišnja cijena električne energije.

Tablica 6.10. Troškovi energije varijante 4

	4. Varijanta
E_{del} [kWh]	346,72
E_{prim} [kWh]	559,60
CO ₂ [kg]	81,41
Trošak energije [€]	80,03 €

Možemo uočiti da ova varijanta ima manje troškove energije od treće varijante sa solarnim kolektorima i fotonaponskim sustavom. Također, vidljivo je da izvedba sustava za četvrtu varijantu troši manje primarne i konačne energije te rezultira manjom emisijom ugljičnog dioksida od svih navedenih varijanti.

Investicijski troškovi uključivati će prvu varijantu sustava zajedno sa troškovima fotonaponskog sustava. Prikazani su u tablici 6.11.

Tablica 6.11. Investicijski troškovi za varijantu 4

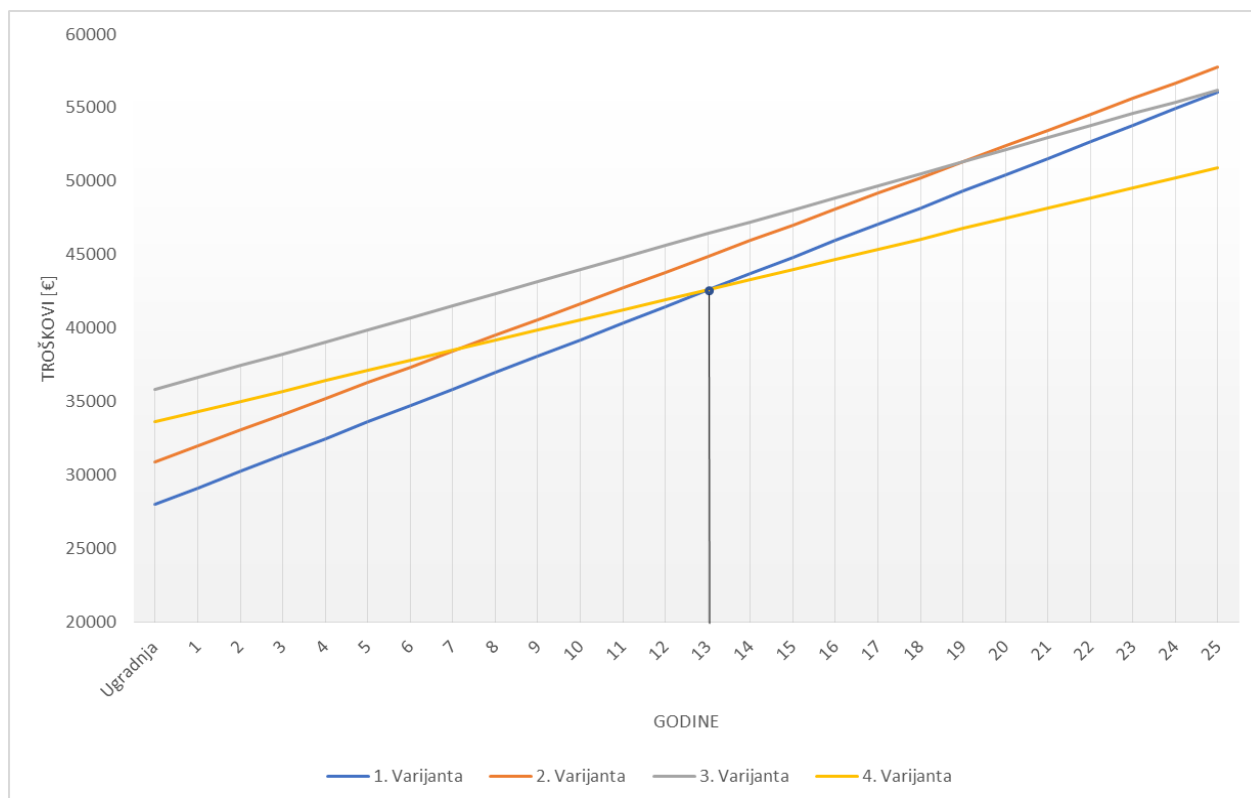
Element	Trošak
Dizalica topline	11.012 €
Podno grijanje	4.266,36 €
Cijevni razvod	731,49 €
Fotonaponski sustav	3227 €
Ukupno	19.236,85 €
+ 75%	33.664,49 €

Troškovi održavanja prikazani su u tablici 6.12.

Tablica 6.12. Troškovi održavanja za varijantu 4

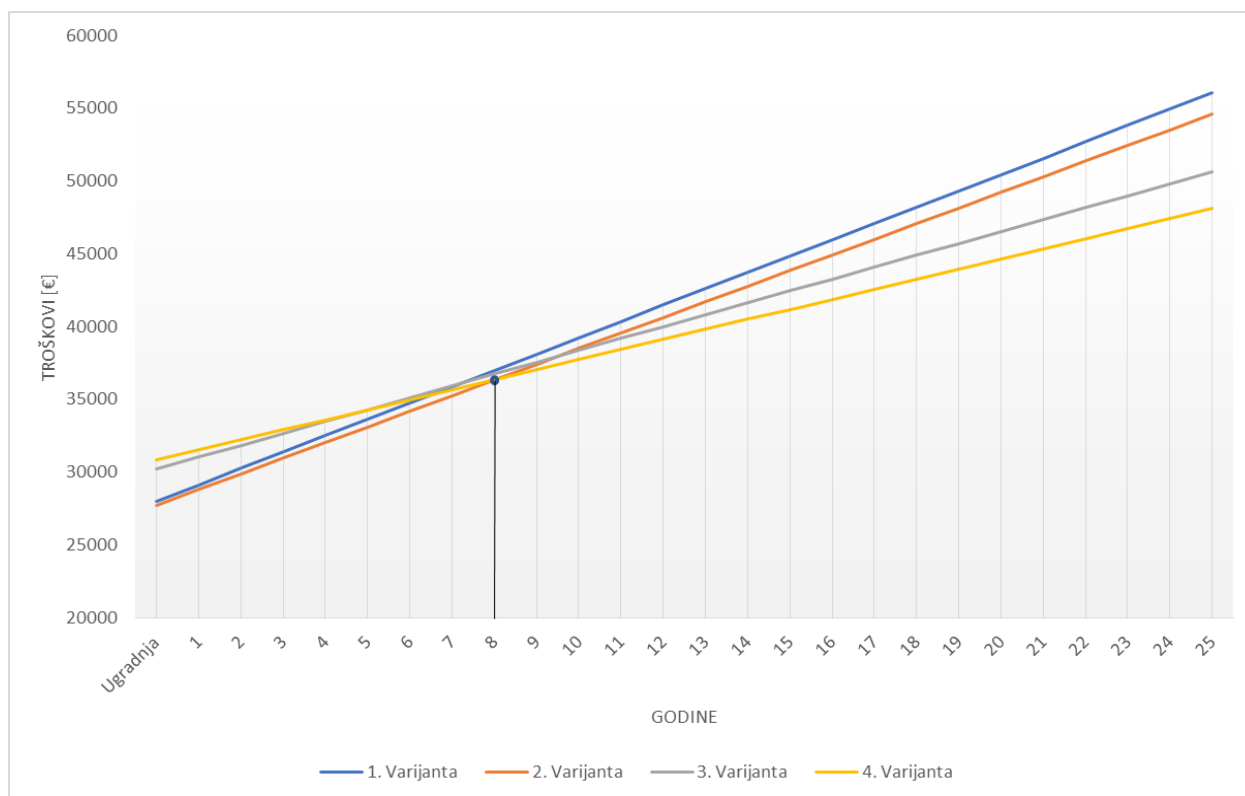
	4. Varijanta
Trošak održavanja [€]	610,04 €

Provedena je analiza isplativosti četvrte varijante sustava u odnosu na prethodno opisane varijante da provjerimo je li doista to najisplativija opcija. Rezultati su grafički prikazani na slici 6.9.



Slika 6.9. Isplativost sustava za varijantu 4

Možemo vidjeti da je sustav sa dizalicom topline i fotonaponskom elektranom nedvojbeno isplativiji od treće varijante sustava. Manji je investicijski trošak kao i godišnji troškovi energije i održavanja. Ako ga usporedimo sa prvom varijantom sustava koja se u prethodnoj analizi pokazala najisplativijom opcijom unutar 25 godina, vidimo da se 13 godina nakon ugradnje može očekivati povrat investicije. Ako bi se investicijski troškovi računali sa sufinanciranjem od 50 % njihov ukupan iznos bi se smanjio na 30.840,86 €. Rezultati analize isplativosti u tom slučaju grafički su prikazani na slici 6.10.



Slika 6.10. Isplativost sustava za varijantu 4 sa sufinanciranjem

Investicijski troškovi su sada nešto veći u odnosu na treću varijantu, prvenstveno zbog veće cijene dizalice topline. Ušteda na troškovima održavanja i energije je dovoljna da ovakva izvedba sustava nadmaši isplativost treće varijante sa sunčanim kolektorima i fotonaponskim sustavom, odnosno rezultira povratom investicije nakon 8 godina, nakon čega postaje najisplativija od svih navedenih opcija. U usporedbi s prvom varijantom, vrijeme povrata investicije za ugradnju fotonaponskog sustava jest nešto više od 6 godina te bi očekivana ušteda ukupnih troškova na kraju razdoblja od 25 godina nakon ugradnje iznosila oko 8.000 €.

7. ZAKLJUČAK

Ovim radom analizirane su opcije povećanja energetske učinkovitosti sustava grijanja zgrade i pripreme potrošne tople vode. Prema uzoru na postojeći sustav grijanja stambene zgrade u Rijeci, provedeni su potrebni proračuni za dimenzioniranje i odabir dijelova sustava grijanja i pripreme potrošne tople vode. Temeljem arhitektonskih podataka o dimenzijama i građevnim slojevima zgrade te meteoroloških podataka lokacije zgrade, izvršen je proračun toplinskih gubitaka. Navedene vrijednosti poslužile su kao polazište za dimenzioniranje sustava podnog grijanja. Dimenzioniran je sustav s temperaturnim režimom 42/35 °C i tri razdjelnika, po jedan za svaku etažu grijanog prostora zgrade.

Sa poznatim informacijama o toplinskoj bilanci zgrade i potrebnom učinku podnog grijanja, odabrana je adekvatna oprema. Kao generator topline odabrani su hydro-split sustavi kompresorskih dizalica topline proizvođača Daikin serije Altherma. Kao rješenja za povećanje energetske učinkovitosti i potencijalne dugoročne financijske uštede, ponuđene su varijante sustava koje predstavljaju „nadogradnju“ na postojeći sustav. Osnovne ideje bile su smanjenje potrebnog učina dizalice topline za grijanje potrošne tople vode ugradnjom sustava solarnih kolektora i smanjenje troškova električne energije ugradnjom fotonaponske elektrane.

Sa definiranim izvedbama sustava, u programu KI Expert plus napravljen je izračun kojim su za svaku izvedbu dobiveni podaci o konačnoj energiji, primarnoj energiji, emisiji ugljikovog dioksida i dr. Temeljem tih podataka lako su izračunati godišnji troškovi energije. Investicijski troškovi određeni su prema aktualnim cijenama potrebne opreme i materijala, a troškovi održavanja prema određenim udjelima. Provedena je tehno-ekonomska analiza isplativosti pojedinih izvedbi sustava za razdoblje od 25 godina od ugradnje. Rezultati su pokazali da je bez sufinanciranja isplativost sustava sa solarnim kolektorima vrlo mala jer bi trebalo proći mnogo više od 25 godina da se investicija isplati. S druge strane, sustav sa solarnim kolektorima i fotonaponskom elektranom rezultira povratom investicije nakon 25 godina, a u slučaju sufinanciranja nakon nešto više od 9 godina. Temeljem tih saznanja predložena je i izvedba sustava bazirana na postojećem sustavu s ugrađenom fotonaponskom elektranom. Daljnja analiza pokazala je da je vrijeme isplativosti takvog sustava u odnosu na postojeći otprilike 13 godina, odnosno 6 godina sa sufinanciranjem te da 8 godina nakon ugradnje rezultira manjim ukupnim troškovima od sustava sa solarnim kolektorima i fotonaponskom elektranom, čineći ga najisplativijom opcijom .

Važno je naglasiti da se svi rezultati odnose samo na potrošnju energije za grijanje i pripremu PTV-a, odnosno na rad termotehničkog sustava. Periodi povrata investicije svih izvedbi s fotonaponskom elektranom bili bi kraći da se promatrala ukupna potrošnja električne energije u zgradi. U praksi bi vrlo vjerojatno fotonaponska elektrana bitno veće snage od one promatrane u ovom radu bila isplativ(ij)a kada bi se računalo s potrošnjom električne energije svih trošila u kućanstvu.

U ovom slučaju periodi povrata investicije su relativno dugački ali to je posljedica promatranja samo termotehničkog sustava kao potrošača električne energije.

LITERATURA

- [1] Predavanja i materijali iz kolegija Tehnika grijanja, prof. dr. sc. Igor Wolf, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
- [2] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine, 2015.g.
- [3] Uponsor, S interneta, <https://www.uponor.com/hr-hr>, 1. travnja 2024.
- [4] Harreither, S interneta, <https://www.harreither.com/en>, 1. travnja 2024.
- [5] <https://www.pmcarchitects.com/sustainability-information-blog-content/heat-pumps-how-do-they-work>, 5. travnja 2024.
- [6] Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama, <https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Propisi/2017/Algoritam-SustaviGrijanjaProstora.pdf>
- [7] HEP, S interneta, <https://mojracun.hep.hr/kalkulator/>, 20. travnja 2024.
- [8] Daikin, S interneta, https://www.daikin.hr/hr_hr/products/product.html/EABH-D6V---EPGA011-016DV.html, 1. travnja 2024.
- [9] Daikin, S interneta, https://www.daikin.nl/content/dam/document-library/catalogues/heat/air-to-water-heat-pump-low-temperature/eav-b-h-x-d/Daikin%20Altherma%203%2011-14-16kW_Product%20catalogue_ECPEN19-712_English.pdf, 1. travnja 2024.
- [10] Daikin, S interneta, https://www.daikin.hr/hr_hr/products/product.table.html/eksv-p.html, 4. travnja 2024.
- [11] Galmet, S interneta, <https://galmet.com.pl/pl/produkt/tower-biwal>, 5. travnja 2024.
- [12] Gitral, S interneta, http://gitral.fr/tec/mb_ingl.pdf, 4. travnja 2024.
- [13] Solvis, S interneta, <https://solvis.hr/en/products/polycrystalline-modules/sv72/>, 5. travnja 2024.
- [14] Sunny Design, S interneta, <https://www.sunnydesignweb.com/>, 5. travnja 2024.

- [15] <https://www.solar-pur.com/hr>
- [16] <https://www.fero-term.hr/>
- [17] <https://termometal.hr/webshop/>

SAŽETAK

U ovom radu analizirane su mogućnosti povećanja energetske učinkovitosti sustava grijanja zgrade i pripreme potrošne tople vode integriranjem elemenata za iskorištavanje sunčeve energije. Na temelju sustava grijanja stambene zgrade u Rijeci, izvedeni su proračuni za dimenzioniranje i odabir dijelova sustava. Izračunati su toplinski gubici koristeći arhitektonske i meteorološke podatke, što je poslužilo za dimenzioniranje podnog grijanja s temperaturnim režimom 42/35 °C i tri razdjelnika, po jedan za svaku etažu.

Odabrani su Daikin Altherma hydro-split sustavi dizalica topline. Predložene su nadogradnje za povećanje energetske učinkovitosti, uključujući sustave solarnih kolektora za smanjenje potrebnog učina dizalice topline i fotonaponske elektrane za smanjenje troškova električne energije.

Analize su pokazale da je isplativost sustava sa solarnim kolektorima niska jer bi povrat investicije trajao više od 25 godina. Sustav s kombinacijom solarnih kolektora i fotonaponske elektrane isplativ je nakon 25 godine, a sa sufinanciranjem nakon 9 godina. Preporučena je izvedba sustava s fotonaponskom elektranom, s povratom investicije nakon 13 godina, odnosno 6 godina sa sufinanciranjem, čineći ga najisplativijom opcijom.

Ključne riječi: sustav grijanja, podno grijanje, dizalica topline, energetska učinkovitost, obnovljivi izvori energije

SUMMARY

In this paper, the possibilities for increasing the energy efficiency of a building's heating system and domestic hot water preparation by integrating elements for harnessing solar energy were analyzed. Based on the heating system of a residential building in Rijeka, calculations were performed for the dimensioning and selection of system components. Heat losses were calculated using architectural and meteorological data, which served as a basis for dimensioning the underfloor heating system with a temperature regime of 42/35 °C and three distributors, one for each floor.

Daikin Altherma hydro-split heat pump systems were selected. Upgrades to increase energy efficiency were proposed, including solar collector systems to reduce the required output of the heat pump and photovoltaic power plants to reduce electricity costs.

Analyses showed that the cost-effectiveness of systems with solar collectors is low, as the return on investment would take more than 25 years. A system combining solar collectors and photovoltaic power plants is cost-effective after 25 years, and with co-financing, after 9 years. The recommended system design includes a photovoltaic power plant, with a return on investment after 13 years, or 6 years with co-financing, making it the most cost-effective option.

Keywords: heating system, underfloor heating, heat pump, energy efficiency, renewable energy sources