

Troškovno optimalna analiza stambene zgrade nulte emisije

Kuzle, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:898800>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Juraj Kuzle

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Dr. sc. Ivan Horvat, dipl. ing.

Student:

Juraj Kuzle

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentorima prof.dr.sc. Damiru Doviću i dr.sc. Ivanu Horvatu na ukazanoj prilici, stručnoj pomoći i velikoj podršci tijekom pisanja rada.

Hvala mojoj obitelji za beskrajno strpljenje i podršku tijekom moga studiranja. Posebno hvala mojoj djevojci Barbari i sinu Jakovu što ste tu za mene u svakom trenutku. Volim vas. Na kraju, hvala svim mojim prijateljima što ste mi uljepšali studentske godine.

Juraj Kuzle



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Juraj Kuzle**

JMBAG: 003535211474

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Troškovno optimalna analiza stambene zgrade nulte emisije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cost optimal analysis of residential zero energy building**

Opis zadatka:

U sklopu diplomskog rada potrebno je provesti troškovno optimalnu analizu odabrane stambene zgrade nulte emisije CO₂. Analizom je potrebno obuhvatiti najmanje tri razine toplinske zaštite ovojnice i slijedeće tehničke sustave:

- solarni toplovodni sustav;
- fotonaponski sustav;
- sustav s dizalicom topline;
- sustav s toplinskim uređajem na biomasu;
- sustav s kompresijskim rashladnim uređajem;
- sustav s varijabilnim protokom radne tvari (VRF);
- sustav mehaničke ventilacije s povratom topline.

Dijelove, dimenzije, toplinski i rashladni učin tehničkog sustava prilagoditi veličini i energetske potrebama zgrade te minimalnim zahtjevima na energetske svojstvo zgrade iz odgovarajuće tehničke regulative. Troškovno optimalnu analizu provesti sukladno Delegiranoj uredbi Komisije (EU) br. 244/2012 i Smjernicama 2012/C 115/01.

Za navedene proračune koristiti Algoritme za izračun energetske svojstva zgrada objavljene na web stanicama nadležnog Ministarstva, uz primjenu satne metode za 8760 h u godini. Meteorološki podaci su dostupni u bazi Joint Research Centre (JRC).

Koristeći odgovarajući dostupni računalni program potrebno je:

- izračunati ukupno isporučenu i primarnu energiju zgrade;
- izračunati globalni trošak ugradnje, pogona, održavanja i zamjene dijelova tehničkih sustava;
- odrediti troškovno optimalnu razinu minimalnih zahtjeva za pojedinačne tehničke sustave;
- usporediti rezultate s troškovno optimalnim razinama minimalnih zahtjeva iz važeće tehničke regulative.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

26. rujna 2024.

28. studeni 2024.

5., 6. i 9.12.2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Dr. sc. Ivan Horvat

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE PREMA HRN EN ISO 13790..	2
2.1. Geometrija zgrade	2
2.2. Toplinska ovojnica zgrade	4
2.3. Proračun potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje	5
2.3.1. Jednostavna satna metoda - općenito	6
2.3.2. Izmijenjena toplinska energija transmisijom.....	7
2.3.3. Izmijenjena toplinska energija ventilacijom	9
2.3.4. Unutarnji i solarni toplinski dobici.....	9
2.3.5. Rezultati	10
3. KOMBINACIJE TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA.....	12
3.1. Analizirani termotehnički sustavi.....	12
3.1.1. Sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom	13
3.1.1.1. Podsustav proizvodnje.....	13
3.1.1.2. Podsustav spremnika i razvoda	13
3.1.1.3. Podsustav predaje.....	14
3.1.2. Sustav s kombiniranim plinskim bojlerima.....	15
3.1.2.1. Podsustav proizvodnje, razvoda i predaje	15
3.1.3. Sustav s kotlom na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom.....	15
3.1.3.1. Podsustav proizvodnje, spremnika, razvoda i predaje	15
3.1.4. Dizalica topline zrak – voda.....	16
3.1.4.1. Centralni sustav dizalice topline - Podsustav proizvodnje, spremnika, razvoda i predaje	16
3.1.4.2. Lokalni sustav dizalice topline - Podsustav proizvodnje, spremnika, razvoda i predaje.....	17
3.1.5. Solarni toplovodni sustav	17
3.1.6. Fotonaponski sustav	18
3.1.7. Split klima uređaji	18
3.1.8. Posredni sustav hlađenja („Chiller“)	19
3.1.9. Sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline	20
3.2. Proračun E_{prim} i E_{del}	20
3.2.1. Proračun termotehničkih sustava grijanja i pripreme PTV-a.....	20
3.2.2. Isporučena energija	24
3.2.3. Primarna energija	24
3.3. Kombinacije i rezultati	26
3.3.1. Sustavi s centraliziranim kondenzacijskim kotlom	28
3.3.2. Sustavi s kombiniranim plinskim bojlerima.....	32
3.3.3. Sustavi s kotlom na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom.....	35
3.3.4. Sustavi s dizalicama topline zrak – voda	38
3.4. Analiza rezultata.....	42

3.5. Usporedba rezultata.....	46
4. EKONOMSKA ANALIZA.....	53
4.1. Proračun globalnog troška.....	53
4.2. Procijenjeni investicijski troškovi, troškovi održavanja i pogona.....	54
4.3. Rezultati kombinacija termotehničkih sustava za određenu debljinu izolacije vanjskog zida.....	56
5. ZAKLJUČAK	66
LITERATURA.....	68

POPIS SLIKA

Slika 1 Tehnička dokumentacija [6].....	4
Slika 2 RC model	6
Slika 3 Energetski tokovi u zgradi [10].....	21
Slika 4 Podjela toplinskih gubitaka termotehničkih sustava [10]	22
Slika 5 Podjela termotehničkih sustava na podsustave s ulazno/izlaznim veličinama [10].....	23

POPIS TABLICA

Tablica 1 Geometrijske karakteristike objekta	2
Tablica 2 Geometrijske karakteristike vanjske ovojnice i otvora grijanog prostora	3
Tablica 3 Toplinska ovojnica grijanog prostora	5
Tablica 4 Rezultati proračuna prema HRN EN ISO 13790	10
Tablica 5 Karakteristike odabranog solarnog toplovodnog sustava	17
Tablica 6 Karakteristike odabranog fotonaponskog sustava	18
Tablica 7 Karakteristike odabranog split klima uređaja	19
Tablica 8 Karakteristike odabranog zrakom hlađenog „chillera“	19
Tablica 9 Karakteristike odabranog sustava mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline	20
Tablica 10 Neobnovljivi faktori primarne energije	25
Tablica 11 Kombinacije termotehničkih sustava	26
Tablica 12 Rezultati sustava bez mehaničke ventilacije – debljina izolacije 16 cm	27
Tablica 13 Rezultati sustava s mehaničkom ventilacijom – debljina izolacije 16 cm	28
Tablica 14 Godišnja potrošnja energenata – sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom	29
Tablica 15 Godišnja potrošnja energenata – sustav s kombi bojlerima	33
Tablica 16 Godišnja potrošnja energenata – sustav s kotlom na biomasu	36
Tablica 17 Godišnja potrošnja energenata – sustav s dizalicama topline zrak - voda	39
Tablica 18 Rezultati sustava bez mehaničke ventilacije – debljina izolacije 12 cm	46
Tablica 19 Rezultati sustava sa mehaničkom ventilacijom – debljina izolacije 12 cm	47
Tablica 20 Rezultati sustava bez mehaničke ventilacije – debljina izolacije 20 cm	48
Tablica 21 Rezultati sustava sa mehaničkom ventilacijom – debljina izolacije 20 cm	49
Tablica 22 Procijenjeni investicijski troškovi i godišnji troškovi održavanja ugrađenih termotehničkih i izolacijskih sustava	54
Tablica 23 Početni investicijski troškovi kombinacija termotehničkih sustava te debljina izolacija vanjskih zidova	56

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1 Primarna energija sustava s kondenzacijskim kotlom	30
Dijagram 2 Isporučena energija sustava s kondenzacijskim kotlom	30
Dijagram 3 Emisije CO ₂ sustava s kondenzacijskim kotlom	31
Dijagram 4 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s kondenzacijskim kotlom	32
Dijagram 5 Primarna energija sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom	33
Dijagram 6 Isporučena energija sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom	34
Dijagram 7 Emisije CO ₂ sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom	34
Dijagram 8 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom	35
Dijagram 9 Primarna energija sustava s kotlom na biomasu	36
Dijagram 10 Isporučena energija sustava s kotlom na biomasu	37
Dijagram 11 Emisije CO ₂ sustava s kotlom na biomasu	37
Dijagram 12 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s kotlom na biomasu	38
Dijagram 13 Primarna energija sustava s dizalicom topline	39
Dijagram 14 Isporučena energija sustava s dizalicom topline	40
Dijagram 15 Emisije CO ₂ sustava s dizalicom topline	41
Dijagram 16 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s dizalicom topline	41
Dijagram 17 Primarna energija	42
Dijagram 18 Isporučena energija	43
Dijagram 19 Emisije CO ₂	44
Dijagram 20 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj	45
Dijagram 21 Usporedba E''_{prim}	50
Dijagram 22 Usporedba E''_{del}	51
Dijagram 23 Usporedba emisija CO ₂	51
Dijagram 24 Usporedba RER_d	52
Dijagram 25 Grafički prikaz početnog investicijskog troška sustava bez mehaničke ventilacije	57
Dijagram 26 Troškovi investicije, pogona i održavanja kroz 30 godina - sustavi bez mehaničke ventilacije (16 cm izolacija vanjskih zidova)	59
Dijagram 27 Troškovi investicije, pogona i održavanja kroz 30 godina - sustavi sa mehaničkom ventilacijom (16 cm izolacija vanjskih zidova)	60
Dijagram 28 Troškovi investicije, pogona i održavanja kroz 30 godina - kombinacija 6 za sve debljine izolacije vanjskih zidova (sustavi bez mehaničke ventilacije)	61
Dijagram 29 Globalni trošak sustava bez mehaničke ventilacije	62
Dijagram 30 Globalni trošak sustava sa mehaničkom ventilacijom	63
Dijagram 31 Ovisnost globalnog troška i specifične primarne energije	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ_a	kg/m ³	Gustoća zraka
$\Phi_{HC,nd,i}$	W	Potrebna snaga za grijanje/hlađenje u periodima kada sustav radi
ΔU_{TM}	W/(m ² K)	Koeficijent izmjene topline toplinskih mostva
A	m ²	Oplošje grijanog dijela zgrade
$A_{bruto,zgrada}$	m ²	Bruto površina zgrade
A_f	m ²	Bruto površina grijane zone
A_K	m ²	Ploština korisne površine grijanog dijela zgrade
A_K'	m ²	Proračunska korisna površina grijanog dijela zgrade
A_{krov}	m ²	Ukupna površina krova
$A_{pročelje}$	m ²	Ukupna površina pročelja
$b_{tr,l}$	-	Faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom
b_u	-	Faktor smanjenja temperature razlike
C_m	J/K	Toplinski kapacitet
CO ₂	kg	Emisije ugljikovog dioksida
$c_{p,a}$	J/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet zraka
d	cm	Debljina i-tog sloja građevnog dijela
d_i	dan	Ukupan broj dana u mjesecu
$d_{use,tj}$	dan/tj	Broj dana rada sustava u tjednu
E_{del}	kWh	Isporučena energija
E_{prim}	kWh	Primarna energija
f	%	Udio ploštine prozora u ukupnoj ploštini pročelja
f_0	-	Faktor oblika zgrade
H_A	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi
H_D	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu
$h_{etaža}$	m	Visina etaže
$H_{g,m}$	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec
H_{iu}	W/K	Koeficijent transmisijske i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora
H_{tr}	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline
$H_{tr,is}$	W/K	Koeficijent izmjene topline
$H_{tr,op}$	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline neprozirnih površina ovojnice
$H_{tr,w}$	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prozirnih površina ovojnice
H_U	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu

H_{ve}	W/K	Koeficijent ventilacijske izmjene topline
$H_{ve,inf}$	W/K	Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije vanjskog zraka
$H_{ve,mech}$	W/K	Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije
$H_{ve,win}$	W/K	Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora
h_{is}	W/(m ² K)	Koeficijent izmjene topline između čvorova air i s
$L_{HC,m,i}$	dan/mj	Broj dana kad ima potrebe za grijanjem/hlađenjem u pojedinom mjesecu
n_{inf}	h ⁻¹	Broj izmjena zraka uslijed infiltracije
n_{win}	h ⁻¹	Broj izmjena zraka uslijed otvaranja prozora
$Q_{c,nd}$	kWh	Potrebna energija za hlađenje
Q_{gn}	kWh	Ukupni toplinski dobici
$Q_{H,ht}$	kWh	Toplinski gubici u periodu grijanja
$Q_{C,ht}$	kWh	Toplinski gubici u periodu hlađenja
$Q''_{h,nd}$	kWh	Specifična potrebna energija za grijanje
$Q''_{c,nd}$	kWh	Specifična potrebna energija za hlađenje
$\eta_{gnr,Pn;30}$	%	Učinkovitost kotla na 100% opterećenja pri temperaturi polaznog voda od 30°C
$\eta_{gnr,Pn;60}$	%	Učinkovitost kotla na 100% opterećenja pri temperaturi polaznog voda od 60°C
Φ_{Pint}	W	Djelomično opterećenje kotla
$\eta_{gnr,Pint}$	%	Učinkovitost pri djelomičnom opterećenju kotla
$\vartheta_{s,des}$	°C	Temperatura polaza ogrjevnog medija u sustav
$\vartheta_{r,des}$	°C	Temperatura povrata ogrjevnog medija u sustav
L_v	m	Duljina cjevovoda između generatora i vertikalala
L_s	m	Duljina cjevovoda vertikalala
L_a	m	Duljina spojnih cjevovoda između vertikalala i ogrjevnih tijela
ψ_{Lv}	W/(mK)	Koeficijent toplinskih gubitaka na cjevovodu između generatora i vertikalala
ψ_{Ls}	W/(mK)	Koeficijent toplinskih gubitaka na cjevovodu vertikalala
ψ_{La}	W/(mK)	Koeficijent toplinskih gubitaka na spojnim cjevovodima s ogrjevnim tijelima
L_{sl}	M	Duljina individualnih spojnih cjevovoda izvan cirkulacijske petlje

$U_{k,Lv}$	W/(mK)	Koeficijent toplinskih gubitaka na cjevovodu između generatora i vertikala
$U_{k,Ls}$	W/(mK)	Koeficijent toplinskih gubitaka na cjevovodu vertikala
$\vartheta_{hp,opr}$	°C	Najveća temperatura na izlazu iz kondenzatora dizalice topline
ϑ_{bal}	°C	Balansna temperatura
Φ_{em}	W	Nazivna snaga
$\vartheta_{w,out}$	°C	Željena temperatura PTV-a
V_{nom}	l	Nazivni volumen spremnika na koji je spojen sustav solarnih kolektora
V_{bu}	l	Volumen dijela spremnika između vrha spremnika i donjeg dijela dodatnog grijača
$\Phi_{C,gen}$	W	Nazivna snaga rashladnog uređaja
$n_{req,H}$	h^{-1}	Minimalno potreban broj izmjena vanjskog zraka u režimu grijanja
$n_{req,C}$	h^{-1}	Minimalno potreban broj izmjena vanjskog zraka u režimu hlađenja
A_{AHU}	m^2	Površina stijenki klimakomore
A_{duct}	m^2	Oplošje kanalnog razvoda
$Q_{em,ls,nrvd}$	kWh	Neiskorišteni toplinski gubici podsustava predaje toplinske energije u prostor
$Q_{dis,ls,nrvd}$	kWh	Neiskorišteni toplinski gubici podsustava razvoda
$Q_{st,ls,nrvd}$	kWh	Neiskorišteni toplinski gubici spremnika
$Q_{gnr,ls,nrvd}$	kWh	Neiskorišteni toplinski gubici generatora topline
W_{aux}	kWh	Pomoćna energija za pogon pomoćnih uređaja
Q_{rbl}	kWh	Iskoristivi gubici
Q_{nrbl}	kWh	Neiskoristivi gubici
$Q_{ls,rvd}$	kWh	Iskorišteni gubici
$Q_{ls,nrvd}$	kWh	Neiskorišteni gubici
$Q_{em,out}$	kWh	Toplinska energija koja se predaje u grijani prostor ogrjevnim tijelima
η_{rvd}	%	Stupanj iskorištenja iskoristivih gubitaka
		Stupanj iskorištenja toplinskih dobitaka

$\eta_{H,gn}$	%	Toplinska energija na ulazu u podsustav
Q_{in}	kWh	Toplinska energija na izlazu iz podsustava
Q_{out}	kWh	Vraćena pomoćna energija u podsustav
$Q_{aux,rvd,i}$	kWh	Toplinska energija koju je potrebno gorivom isporučiti u sustav grijanja
$Q_{H,gen,in}$	kWh	Toplinska energija koju je potrebno gorivom isporučiti u sustav pripreme PTV-a
$Q_{W,gen,in}$	kWh	Pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava predaje
$W_{em,aux}$	kWh	Pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava razvoda
$W_{H,dis,aux}$	kWh	Pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava proizvodnje
$W_{H,gen,aux}$	kWh	Pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava razvoda
$W_{W,dis,aux}$	kWh	Pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava proizvodnje
$W_{H,gen,aux}$	kWh	Neobnovljivi faktor primarne energije Faktor primarne energije
$f_{prim,nren}$	-	Specifična primarna energija
$f_{p,i}$	-	Specifična isporučena energija
E''_{prim}	kWh	Udio obnovljive energije u ukupnoj primarnoj energiji
E''_{del}	kWh	Energija proizvedena iz obnovljivih izvora
RER_p	%	Razdoblje izračuna
Q_{renew}	kWh	Globalni trošak
τ	god	Troškovi početnog ulaganja
C_g	€	Godišnji trošak tijekom razdoblja izračuna
C_l	€	Preostala vrijednost mjere na kraju razdoblja izračuna
$C_{a,I}$	€	Diskontni faktor
$V_{f,\tau}$	€	Broj godina od početnog razdoblja
R_d	-	Realna diskontna stopa
p	God	
r	%	

$Q_{h,nd}$	kWh	Potrebna energija za grijanje
$Q_{HC,nd,day}$	kWh	Dnevna potrebna toplinska energija za grijanje/hlađenje
Q_{int}	kWh	Unutarnji toplinski dobici
$Q_{sol,k}$	kWh	Srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz k-ti građevni dio u grijani prostor
$Q_{sol,u,l}$	kWh	Srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor
q_{spec}	W/m ²	Specifični unutarnji dobitak
$Q_{Ve,mech}$	kWh	Potrebna toplinska energija uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije
RER_d	%	Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj
t	h	Vrijeme
U	W/(m ² K)	Koeficijent prolaska topline
U_k	W/(m ² K)	Koeficijent prolaska topline građevinskih elemenata
$U_{vanjski\ zid}$	W/(m ² K)	Koeficijent prolaska topline vanjskog zida
$U_{w,prozor}$	W/(m ² K)	Koeficijent prolaska topline otvora
V	m ³	Neto obujam grijanog zraka
V_e	m ³	Obujam grijanog dijela zgrade
ϑ_{air}	°C	Temperatura proračunske zone
ϑ_e	°C	Temperatura vanjskog okoliša
$\vartheta_{m,ac,t}$	°C	Temperatura u zadnjem satu godine
$\vartheta_{m,ac,t-1}$	°C	Temperatura u prvom satu godine
λ	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti materijala
ρ	kg/m ³	Gustoća materijala
$\Phi_{HC,nd}$	W	Toplinska snaga za grijanje i hlađenje
Φ_{int}	W	Unutarnji toplinski dobici
Φ_{sol}	W	Solarni toplinski dobici
A_{tot}	m ²	Površina svih ploština koje okružuju proračunsku zonu

SAŽETAK

U radu je analizirana troškovno optimalna kombinacija termotehničkih sustava ZEB zgrade s različitim debljinama izolacije vanjskih zidova na području kontinentalne Hrvatske. Promatrana je višestambena zgrada sa 6 nadzemnih etaža, odnosno 5 grijanih sa neto korisnom površinom grijanog prostora $A_k = 954,2 \text{ m}^2$. Proračuni specifične godišnje potrebne energije za grijanje $Q''_{h,nd}$ i hlađenje $Q''_{c,nd}$ su provedeni prema jednostavnoj satnoj metodi algoritma HRN EN ISO 13790. Analizirane termotehničke sustave čine sustavi s kondenzacijskim kotlovima, protočnim kombinirani bojlerima, kotlovima na biomasu (peleti) te centralnim i lokalnim dizalicama topline zrak – voda za grijanje, odnosno sustav hlađenja čine split klima uređaji, dizalica topline zrak - voda i posredni sustav hlađenja – „chiller“. Osim navedenih, u analizu su se uključili i sustavi mehaničke ventilacije s povratom topline te obnovljivi izvori energije u vidu fotonaponskog i solarnog toplovodnog sustava. Proračun termotehničkih sustava je, uz prethodno navedene, proveden u softverskom paketu KI Expert Pro – program u koji su implementirani svi relevantni algoritmi objavljeni na internet stranicama Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine. Rezultati proračuna su prikazani grafički i numerički, a promatrani su sa stajališta primarne E_{prim} i isporučene energije E_{del} , emisija CO_2 te udjela obnovljive energije u ukupno isporučenoj RER_d . Troškovno optimalna analiza je provedena proračunom globalnog troška sukladno uredbama 244/2012 i 2012/C 115/01. Na kraju, predložena je optimalna kombinacija termotehničkih sustava i debljina izolacije vanjskih zidova.

Ključne riječi: ZEB, $Q''_{h,nd}$, $Q''_{c,nd}$, KI Expert Pro, termotehnički sustavi, E_{prim} , E_{del} , CO_2 , RER_d , globalni trošak

SUMMARY

The paper analyzes the cost-optimal combination of HVAC systems for a ZEB building with different external wall insulation thicknesses in the continental region of Croatia. The study focuses on a multi-residential building with six above-ground floors, five of which are heated, with a net usable heated area of $A_k = 954.2 \text{ m}^2$. Calculations of the specific annual energy demand for heating ($Q''_{h,nd}$) and cooling ($Q''_{c,nd}$) were made using the simple hourly method based on the HRN EN ISO 13790 algorithm. The analyzed HVAC systems include systems with condensing boilers, instantaneous combi boilers, biomass (pellet) boilers, central and local air-to-water heat pumps for heating, while the cooling systems include split air conditioners, air-to-water heat pumps, and indirect cooling systems ("chillers"). Additionally, mechanical ventilation systems with heat recovery and renewable energy sources, such as photovoltaic and solar thermal systems, were included in the analysis. The calculations of HVAC systems were conducted using the KI Expert Pro software package, which incorporates all relevant algorithms published on the Ministry of Physical Planning, Construction and State Assets website. The results are presented both graphically and numerically, considering primary energy (E_{prim}), delivered energy (E_{del}), CO_2 emissions and the share of renewable energy in total delivered energy (RER_d). The cost-optimal analysis was performed by calculating the global cost in accordance with regulations 244/2012 and 2012/C 115/01. Finally, the optimal combination of HVAC systems and external wall insulation thicknesses was proposed.

Key words: ZEB, $Q''_{h,nd}$, $Q''_{c,nd}$, KI Expert Pro, HVAC systems, E_{prim} , E_{del} , CO_2 , RER_d , global cost

1. UVOD

Zgradarstvo u Europskoj uniji u velikoj mjeri ovisi o fosilnom gorivu (plinu) koji dolazi iz Rusije, što je čini ranjivom na energetske krize i geopolitičke nestabilnosti, a sve ove okolnosti, uz klimatske promjene kao najznačajniju, potiču države članice na smanjenje potrošnje energije, emisija i okretanje prema obnovljivim izvorima. Iako se potrošnja finalne energije od njene maksimalne vrijednosti u 2006. godini do 2022. godine smanjila za 8,9% [1], a emitirane emisije CO₂ od 1990. godine do 2022. godine za 31% [2] prvenstveno zahvaljujući energetskej učinkovitosti i ETS-u (engl. Emission trading system), Europska unija ima za cilj nastavak i ubrzanje smanjenja istih s obzirom na zadane ciljeve o postizanju klimatske neutralnosti do 2050. godine. Najveći udio u potrošnji finalne energije ima sektor zgradarstva s udjelom od 40 %. Također, osim toga što je veliki potrošač energije, sektor zgradarstva je i veliki zagađivač Europske unije s 36 % svih emisija CO₂ [3]. Iz tog je razloga Europska komisija postavila nove standarde europske gradnje u vidu nZEB zgrada (engl. *nearly zero-energy building*) u sklopu EPBD (engl. *Energy Performance of Building Directive*) Direktive 2010/31/EU [4] koja prikazuje kako sve nove zgrade koje koriste javna tijela moraju ispunjavati nZEB kriterije nakon 31. Prosinca 2018. godine, a sve nove stambene zgrade nakon 31. Prosinca 2020. godine. nZEB zgrada ima visoka energetska svojstva i razinu energetske učinkovitosti čime se ostvaruje mala potrošnja energije. Svaka država članica određuje postotak ukupne potrošnje energije koji mora biti zadovoljen pomoću obnovljivih izvora na samoj zgradi ili u njenoj blizini. Regulativa Republike Hrvatske govori kako svaka nZEB zgrada mora minimalno 30 % godišnje isporučene energije proizvesti iz obnovljivih izvora energije. Revidirana EPBD (EU/2024/1275) [5] nameće strože ciljeve i uvodi novi pojam ZEB zgrada (engl. *zero-emission building*) kod kojih je naglasak na CO₂ emisijama. ZEB zgrada ima visoka energetska svojstva, zahtijeva nula ili jako malu količinu energije te mora biti bez ugljičnih emisija iz fosilnih goriva ili s vrlo malo stakleničkih plinova. Sve nove zgrade javne namjene moraju zadovoljavati navedene kriterije od 1. Siječnja 2028. godine, sve stambene od 2030. godine, a sve postojeće do 2050. godine.

Stoga, ovim je radom napravljena troškovno optimalna analiza ZEB zgrade s ciljem postizanja optimalne ravnoteže sa troškovne i tehničke strane. Svi proračuni su napravljeni korištenjem softverskih alata KI Expert Pro te Excel.

2. POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE PREMA HRN EN ISO 13790

2.1. Geometrija zgrade

Promatrana je referentna višestambena zgrada na području kontinentalne Hrvatske izgrađena nakon 2006. godine za koju su korišteni prikladni meteorološki podaci dostupni u bazi Joint Research Centre (JRC). Objekt je preuzet iz studije „Izješće prema članku 5(2) Direktive 2010/31/EU i članku 6 Uredbe (EU) 244/2012 od 16.1.2012.: Minimalni zahtjevi na energetske svojstvo višestambenih zgrada za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku, za razdoblje do 1970., 1971. - 2005., iza 2006., i gotovo nula energetske zgrade,, [6]. Zgrada se sastoji od 6 nadzemnih etaža. U prizemlju su smještene negrijane garaže, a preostalih 5 etaža čine stambene jedinice. Svaka je etaža visine $h_{\text{etaža}} = 2,74$ m te sadrži 3 stambene jedinice koje su grijane/hlađene i negrijano stubište. Tablica 1 prikazuje geometrijske karakteristike objekta.

Tablica 1 Geometrijske karakteristike objekta

Veličina	Napomena	Vrijednost
Oplošje grijanog dijela zgrade – A [m^2]	-	1521,56
Ukupna površina pročelja – $A_{\text{pročelje}}$ [m^2]	-	1161,01
Udio ploštine prozora u ukupnoj ploštini pročelja f [%]	-	14,27
Obujam grijanog dijela zgrade – V_e [m^3]	-	2862,54
Neto obujam grijanog zraka – V [m^3]	$V = 0,8 \cdot V_e$	2290,03
Faktor oblika zgrade - f_0 [m^{-1}]	$f_0 = A / V_e$	0,53
Ploština korisne površine grijanog dijela zgrade – A_K [m^2]	-	954,20
Proračunska korisna površina grijanog dijela zgrade – A_K' [m^2]	-	954,20
Bruto površina grijane zone – A_f [m^2]	-	1065,06
Bruto površina zgrade – $A_{\text{bruto,zgrada}}$ [m^2]	Uračunat je koeficijent 0,5 za „parking mjesto u zajedničkoj garaži u zgradi – ograđeno čeličnom mrežom ili metalnom pregradom“ prema – Pravilnik o metodama procjene vrijednosti nekretnina, NN 105/2015 [7]	1171,57
Ukupna površina krova A_{krov} [m^2]	-	236,68

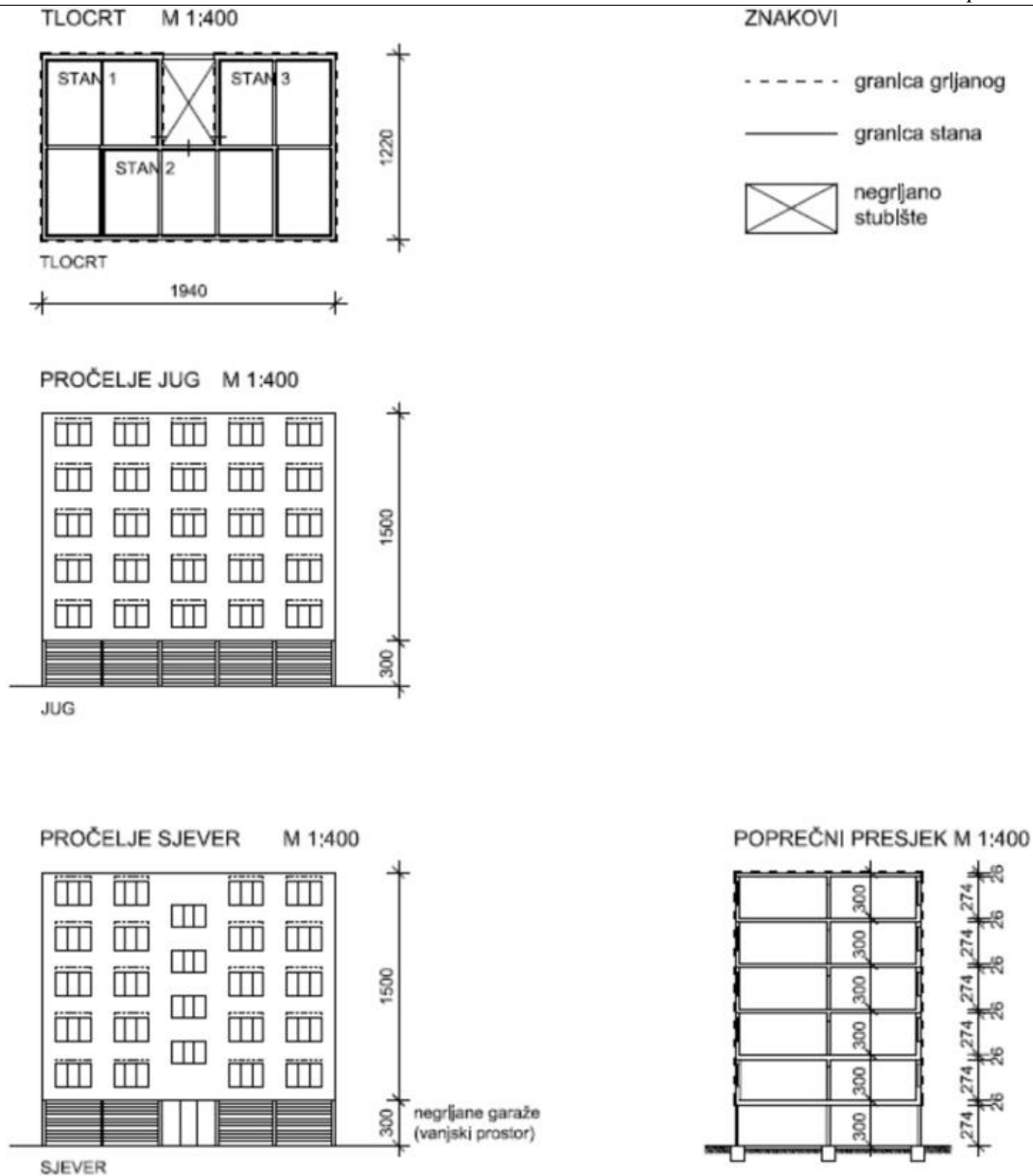
Otvori grijanog/hlađenog dijela zgrade su obuhvaćeni prozorima i vanjskim vratima. Prozori, pojedinačne površine od 3,38 m², su smješteni na pročelju zgrade i ima ih 45 – 20 na sjevernom i 25 na južnom pročelju. Također, zgrada sadrži i 4 (ista kao i prethodno navedena) prozora na sjevernom pročelju koja odvajaju stubište od vanjskog prostora. Vanjska vrata stambenih jedinica smještena su na granici grijanog/hlađenog prostora i negrijanog prostora, odnosno stubišta. Ima ih 15, a njihova pojedinačna površina iznosi 2,8 m².

Tablica 2 daje uvid u geometrijske karakteristike otvora i vanjske ovojnice grijanog prostora objekta.

Tablica 2 Geometrijske karakteristike vanjske ovojnice i otvora grijanog prostora

Orijentacija	Ploština vanjskih zidova prema okolišu [m ²]	Ploština otvora, [m ²]	Ukupna ploština zidova i otvora, [m ²]
Sjever	165,20	67,60	232,80
Zapad	183,00	0	183,00
Jug	206,50	84,50	291,00
Istok	183,00	0	183,00

Tablica 2 prikazuje kako je sjeverna strana grijanog dijela zgrade manje izložena vanjskom zraku s obzirom da se na toj strani nalazi negrijano stubište. Slika 1 prikazuje tlocrt, pročelja i presjek navedene višestambene zgrade.



Slika 1 Tehnička dokumentacija [6]

2.2. Toplinska ovojnica zgrade

Toplinsku ovojnicu zgrade čine vanjski zidovi grijanog prostora prema okolišu i svi pripadni otvori, unutrašnji zidovi prema stubištu i pripadni otvori, pod prema negrijanim garažama (u analizi tretirano kao vanjski prostor) te ravni krov. U ovom radu obuhvaćene su tri razine toplinske zaštite vanjske ovojnice (vanjski zidovi). Debljine izolacije vanjskih zidova su 12 cm, 16 cm i 20 cm. Ostali dijelovi ovojnice grijanog dijela zgrade ostaju isti u svakom od prethodno navedenih slučajeva. Tablica 3 daje detaljan prikaz ukupne površine građevnih dijelova te koeficijentata prolaska topline u slučaju sa debljinom izolacije od 16 cm.

Tablica 3 Toplinska ovojnica grijanog prostora

Građevni dio	Sloj	d [cm]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	Ukupna površina [m ²]	U [W/m ² K]
Vanjski zidovi	Vapneno-cementna žbuka	2,00	1,00	1800,00	737,70	0,22
	Armirani beton	20,00	2,60	2500,00		
	Vapneno-cementna žbuka	2,00	1,00	1800,00		
	Ekspandirani polistiren (EPS)	16,00	0,037	21,00		
Ravni krov	Ekspandirani polistiren (EPS)	16,00	0,037	21,00	193,93	0,18
	Armirani beton	20,00	2,60	2500,00		
	Vapneno-cementna žbuka	2,00	1,00	1800,00		
Pod prema garaži	Drvo	2,00	0,13	500,00	193,93	0,19
	Cementni estrih	8,00	1,60	2000,00		
	Ekstrudirana polistirenska pjena (XPS)	2,00	0,035	35,00		
	Armirani beton	25,00	2,60	2500,00		
	Ekspandirani polistiren (EPS)	15,00	0,037	21,00		
	Vapneno-cementna žbuka	2,00	1,00	1800,00		
Zidovi prema stubištu	Vapneno-cementna žbuka	4,00	1,00	1800,00	201,90	0,32
	Armirani beton	20,00	2,60	2500,00		
	Ekspandirani polistiren (EPS)	10,00	0,037	21,00		

Izolacija vanjskih zidova s 12 cm debelim slojem ekspandiranog polistirena rezultira s vrijednošću koeficijenta prolaska topline $U_{\text{vanjski zid}} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, a izolacija debljine 20 cm smanjuje navedenu vrijednost na $U_{\text{vanjski zid}} = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Sve vrijednosti dobivenih koeficijenata prolaska topline zadovoljavaju prema „Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama“ [8]. Svi prozori na vanjskoj ovojnici zgrade su izgrađeni od PVC okvira s trostrukim izolirajućim staklom i opremljeni su roletama. Njihov koeficijent toplinske provodljivosti otvora iznosi $U_{\text{w,prozor}} = 1,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

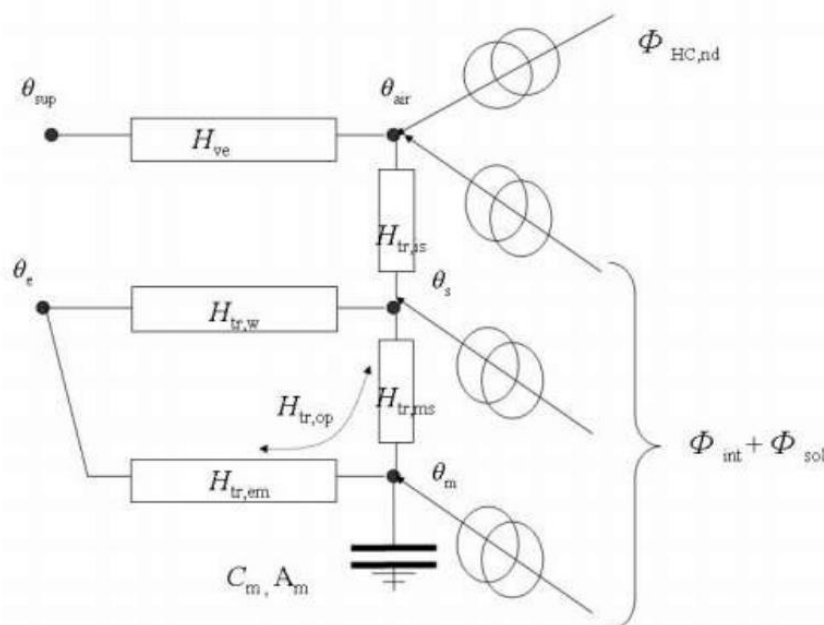
2.3. Proračun potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje

Proračun potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje je napravljen u skladu s Tehničkim propisom prema normi HRN EN ISO 13790 [9] u računalnoj aplikaciji Knauf Insulation Expert Plus Pro. Ovaj rad primjenjuje jednostavnu satnu metodu koja se oslanja na vremenske korake

od jednog sata što za posljedicu ima veliku točnost proračuna. To se očitava ponajprije pri proračunu potrebne energije za hlađenje $Q_{C,nd}$ (slučaj kada je $Q_{C,nd} < 0$ u mjesecima u kojoj postoje potrebe za grijanjem i hlađenjem) jer se zbog uprosječenja vanjske temperature ϑ_e smanjuje stvarno potrebna vrijednost $Q_{C,nd}$. U proračunu su korišteni satni klimatski podaci iz baze Joint Research Centre (JRC).

2.3.1. Jednostavna satna metoda - općenito

Jednostavna satna metoda proračunava satne vrijednosti potrebne toplinske snage za grijanje i hlađenje $\Phi_{HC,nd}$ koja omogućuje održavanje temperature proračunske zone ϑ_{air} u željenim granicama. Metoda je iterativna, a opisana je RC modelom koji je analogan sa modelom strujnih krugova u elektrotehnici prema slici 2. Karakteristični parametri modela su toplinski kapacitet C_m , toplinski otpori opisani koeficijentima izmjene topline H , toplinski tokovi Φ te temperature ϑ . Proračun započinje pretpostavljanjem temperature u prvom satu godine $\vartheta_{m,ac,t-1}$ i ponavlja se sve dok se ne izračuna stvarna vrijednost pretpostavljene temperature. Određivanje se vrši na način da se pretpostavljena vrijednost temperature $\vartheta_{m,ac,t-1}$ zamjeni sa vrijednošću temperature zadnjeg sata u godini $\vartheta_{m,ac,t}$.



Slika 2 RC model [9]

Transmisijska izmjena topline kroz ovojnicu zgrade sastavljena je od 2 toplinska otpora - otpori prozirnih i neprozirnih dijelova ovojnice (uključen i pod zone) od kojih se potonji dijeli na još 2. Ovi su otpori opisani koeficijentima transmisijske izmjene topline $H_{tr,w}$ i $H_{tr,op}$, a njihov proračun je isti kao i kod mjesečne metode. Masa zgrade se zanemaruje kod $H_{tr,w}$. $H_{tr,is}$ određuje

toplinski otpor prijelaza topline između unutarnjih površina prostora te unutarnjeg zraka, a određen je formulom:

$$H_{tr,is} = h_{is} \cdot A_{tot} \quad [\text{W/K}]$$

Pri čemu:

h_{is} – koeficijent izmjene topline između čvorova air i s, fiksna vrijednost $h_{is} = 3,45 \text{ W/m}^2\text{K}$

A_{tot} – površina svih ploština koje okružuju proračunsku zonu (m^2)

Koeficijent ventilacijske izmjene topline H_{ve} , toplinski kapacitet C_m te solarni Φ_{sol} i unutarnji Φ_{int} toplinski dobici proračunati su na isti način kao i u mjesečnoj metodi. Dnevna potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje je dana formulom:

$$Q_{HC,nd,day} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{24} (\Phi_{HC,nd,i} \cdot t) \quad [\text{kWh}]$$

Pri čemu:

$\Phi_{HC,nd,i}$ - potrebna snaga za grijanje/hlađenje u periodima kada sustav radi (W)

$Q_{HC,nd,day}$ - dnevna potrebna toplinska energija za grijanje/hlađenje (kWh)

t - korak proračuna, t = 1 h

Mjesečna potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje je dana formulom:

$$Q_{HC,nd,m} = \sum_i Q_{HC,nd,day,i} \cdot \frac{d_{use,tj}}{7} \cdot \frac{L_{HC,m,i}}{d_i} \quad [\text{kWh}]$$

Pri čemu:

$d_{use,tj}$ – broj dana rada sustava u tjednu (d/tj)

d_i – ukupan broj dana u mjesecu (d)

$L_{HC,m,i}$ – broj dana kad ima potrebe za grijanjem/hlađenjem u pojedinom mjesecu (d/mj)

Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje je dana formulom:

$$Q_{HC,nd,a} = \sum_i Q_{HC,nd,m,i} \quad [\text{kWh/a}]$$

2.3.2. Izmijenjena toplinska energija transmisijom

Transmisijske gubitke topline prema mjesečnoj metodi možemo prikazati formulom:

$$H_{Tr} = H_D + H_U + H_A + H_{g,m} \quad [\text{W/K}]$$

Pri čemu:

H_D – koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu (W/K)

H_U – koeficijent transmisijske izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu (W/K)

H_A – koeficijent transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi (W/K)

$H_{g,m}$ – koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec (W/K)

U predmetnoj zgradi postoje gubici grijanog prostora (zone) prema vanjskom okolišu H_D te gubici kroz negrijane prostorije H_U . Građevni dijelovi koji se nalaze na granici grijanog prostora i vanjskog okoliša su:

- Vanjski zidovi
- Ravni krov
- Pod prema garaži

Također, na granici grijanog prostora i vanjskog okoliša pojavljuju se i prozirni elementi, odnosno prozori. Toplinski gubici kroz navedene građevne elemente su opisani kroz koeficijent transmisivne izmjene topline prema vanjskom okolišu H_D prema formuli:

$$H_D = \sum_k A_k (U_k + \Delta U_{TM}) \quad [\text{W/K}]$$

Pri čemu:

A_k – površina građevinskih elemenata (m^2)

U_k – koeficijent prolaska topline građevinskih elemenata ($\text{W/m}^2\text{K}$)

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

Građevni dijelovi koji se nalaze na granici grijanog i negrijanog prostora su:

- Zidovi prema stubištu
- Vanjska vrata

Građevni dijelovi koji se nalaze na granici negrijanog prostora i vanjskog okoliša su:

- Vanjski zid stubišta
- Krov iznad stubišta
- Pod stubišta prema garaži
- Prozori stubišta

Toplinski gubici kroz negrijano stubište su opisani kroz koeficijent transmisivne izmjene topline H_U prema formuli:

$$H_U = b_u \cdot H_{iu} \quad [\text{W/K}]$$

Pri čemu:

b_u - faktor smanjenja temperaturne razlike (-)

H_{iu} - koeficijent transmisivne i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)

Prethodno opisani proračun se provodi zasebno za prozirne ($H_{tr,w}$), odnosno neprozirne ($H_{tr,op}$) elemente građevine.

2.3.3. Izmijenjena toplinska energija ventilacijom

Koeficijent ventilacijske izmjene topline prikazan je formulom:

$$H_{ve} = H_{ve,inf} + H_{ve,win} + H_{ve,mech} \quad [\text{W/K}]$$

$H_{ve,inf}$ - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed infiltracije vanjskog zraka (W/K)

$H_{ve,win}$ - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora (W/K)

$H_{ve,mech}$ - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije (W/K)

Izmjena topline infiltracijom nastaje zbog postojanja pukotina i zazora na toplinskoj ovojnici objekta. Koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije:

$$H_{ve,inf} = n_{inf} V \rho_a c_{p,a} \quad [\text{W/K}]$$

n_{inf} - broj izmjena zraka uslijed infiltracije (h^{-1})

V - volumen zraka u zoni (m^3)

$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ - gustoća zraka

$c_{p,a} = 1005 \text{ J/(kg K)}$ – specifični toplinski kapacitet zraka

Koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja $H_{ve,win}$:

$$H_{ve,win} = n_{win} V \rho_a c_{p,a} \quad [\text{W/K}]$$

n_{win} - broj izmjena zraka uslijed otvaranja prozora (h^{-1})

Koeficijent izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije $H_{ve,mech}$:

$$H_{ve,mech} = \frac{1000 \cdot Q_{ve,mech}}{(\vartheta_{int} - \vartheta_e) \cdot t} \quad [\text{W/K}]$$

$Q_{ve,mech}$ - potrebna toplinska energija uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije (kWh) - potrebno iterativno odrediti

2.3.4. Unutarnji i solarni toplinski dobici

Unutarnji toplinski dobici se računaju prema formuli:

$$Q_{int} = q_{spec} A_K t \cdot 0,001 \quad [\text{kWh}]$$

$q_{spec} = 5 \text{ W/m}^2$ – specifični unutarnji dobitak po m^2 korisne površine

A_K – korisna površina (m^2)

t - proračunsko vrijeme (h)

Solarni toplinski dobici mogu se odrediti prema formuli:

$$Q_{sol} = \sum_k Q_{sol,k} + \sum_l (1 - b_{tr,l}) Q_{sol,u,l} \quad [\text{kWh}]$$

$Q_{sol,k}$ – srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz k-ti građevni dio u grijani prostor (kWh)

$Q_{sol,u,l}$ – srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor (kWh)

$b_{tr,l}$ – faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom (-)

Ukupni toplinski dobici Q_{gn} su suma unutarnjih i solarnih toplinskih dobitaka.

2.3.5. Rezultati

Tablica 4 Rezultati proračuna prema HRN EN ISO 13790

Debljina izolacije	Vrsta sustava	Ukupni toplinski dobici (kWh)	$Q_{H,ht}$ (kWh)	$Q_{C,ht}$ (kWh)	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)
16 cm	Sustav bez mehaničke ventilacije	61928,20	71187,76	85554,78	34,63	22,49
	Sustav sa mehaničkom ventilacijom	61928,20	65792,17	79070,27	19,68	21,41
12 cm	Sustav bez mehaničke ventilacije	62202,78	74582,77	89634,98	37,36	22,37
	Sustav sa mehaničkom ventilacijom	62202,78	69187,2	83150,47	22,87	21,30
20 cm	Sustav bez mehaničke ventilacije	61757,92	69082,30	83024,40	32,92	22,58
	Sustav sa mehaničkom ventilacijom	61757,92	63686,71	76539,88	18,08	21,54

Iz tablice 4 može se uvidjeti kako mehanička ventilacija s rekuperacijom utječe na smanjenje specifične godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje $Q''_{h,nd}$ i $Q''_{c,nd}$. Mehanička ventilacija ima veći utjecaj zimi nego ljeti ($Q''_{h,nd}$ se smanjuje više u usporedbi s $Q''_{c,nd}$) zbog nekoliko bitnih faktora poput veće temperaturne razlike između vanjskog i unutarnjeg prostora zimi te

velikog utjecaja solarnih dobitaka na ukupno toplinsko opterećenje objekta. Nadalje, može se primijetiti kako promjena debljine izolacije vanjskih zidova također utječe na navedene vrijednosti. S povećanjem debljine izolacije dolazi do smanjenja vrijednosti $Q''_{h,nd}$ i blagog povećanja vrijednosti $Q''_{c,nd}$. Razlog leži u tome što su manji toplinski gubici kako zimi kada je to poželjno, tako i ljeti kada bi bilo bolje da su gubici veći. Također, mogu se primijetiti male razlike u vrijednostima $Q''_{h,nd}$ i $Q''_{c,nd}$ pri promjeni debljine izolacije vanjskih zidova. Postoji više uzroka koji rezultiraju takvim ishodom:

- Faktor oblika zgrade $f_0 = 0,53 \text{ m}^{-1}$ – manja vrijednost faktora oblika zgrade je posljedica manjeg udjela oplošja ovojnice grijanog prostora zgrade što rezultira i manjim transmisijskim gubicima
- Udio ventilacijskih gubitaka u ukupnim – veći udio ventilacijskih gubitaka u ukupnim rezultira i manjim utjecajem različitih debljina izolacija na promjenu vrijednosti $Q''_{h,nd}$ i $Q''_{c,nd}$. Udjeli ventilacijskih gubitaka u ukupnim prelaze 40% za promatranu zgradu.
- Transmisijski gubici prema vanjskom okolišu čine oko 90% ukupnih transmisijskih gubitaka zgrade. Udio gubitaka kroz vanjske zidove u tim gubicima je oko 40%.

3. KOMBINACIJE TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA

3.1. Analizirani termotehnički sustavi

U ovom su radu analizirani različiti termotehnički sustavi koji osiguravaju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrade. Analizirani termotehnički sustavi su podijeljeni na termotehničke sustave za grijanje i pripremu potrošne tople vode (PTV) te hlađenje. Neki od promatranih sustava ne zadovoljavaju ZEB kriterije (pa čak niti nZEB). No, njihova analiza je provedena jer se radi o najčešće korištenim termotehničkim sustavima današnjice.

- a) Grijanje i PTV
 - Sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom
 - Sustav s kombiniranim plinskim bojlerima
 - Sustav s kotlom na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom
 - Sustav sa dizalicom topline zrak -voda
- b) Hlađenje
 - Sustav s split klima uređajima
 - Sustav hlađenja sa dizalicom topline zrak -voda
 - Posredni sustav hlađenja („Chiller“)

Uz navedene tehničke sustave grijanja i hlađenja analizirani su dodatno:

- Solarni toplovodni sustav
- Fotonaponski sustav
- Sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline

Sustavi grijanja, pripreme PTV-a i hlađenja u ovom radu su podijeljeni na centralne ili lokalne. Centralni sustavi imaju generator toplinskog učinka smješten u kotlovnici. S druge strane, generatori toplinskog učinka lokalnih sustava su smješteni u svakom stanu (grijani prostor).

Centralni sustavi grijanja i pripreme PTV-a:

- Sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom
- Sustav s kotlom na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom
- Sustav sa centralnom dizalicom topline zrak -voda

Promatrani lokalni sustavi grijanja i pripreme PTV-a su:

- -Sustav s kombiniranim plinskim bojlerima
- Sustav sa lokalnom dizalicom topline zrak -voda

Centralni sustavi hlađenja izvedeni su dizalicom topline zrak – voda i sustavom „chillera“, a lokalni split klima uređajima.

Poglavlja 3.1.1. – 3.1.9. daju općeniti opis sustava toplinskog/rashladnog učinka te njihove ulazne parametre korištene u proračunu.

3.1.1. Sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom

Sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom je centralni sustav grijanja i pripreme potrošne tople vode (PTV) kojeg čini nekoliko podsustava. Podsustav proizvodnje sastoji se od kondenzacijskog kotla kao generatora topline. Podsustav spremnika čini spremnik PTV-a, podsustav razvoda opisuje razvod grijanja i PTV-a, a podsustav predaje čine radijatori kao ogrjevna tijela. Kondenzacijski kotao je generator topline visoke učinkovitosti namijenjen grijanju ogrjevnog medija (voda). U komori izgaranja sagorijeva gorivo (plin) te nastaju vrući dimni plinovi. Vrući dimni plinovi prolaze kroz izmjenjivač topline gdje predaju veći dio svoje energije (topline) ogrjevnom mediju. Nadalje, u dimnim plinovima je sadržana i vodena para kao produkt izgaranja goriva. Kondenzacijski kotao iskorištava i dodatnu toplinu (latentna toplina) iz vodene pare zbog čega ona kondenzira. Upravo zbog te činjenice, ovakva vrsta kotla je učinkovitija i naprednija verzija klasičnog plinskog kotla u kojem se ne iskorištava latentna toplina vodene pare. U prosjeku učinkovitost kondenzacijskih kotlova, uz povoljni temperaturni režim sustava grijanja, je preko 100%. Posljedično je manja potrošnja goriva u usporedbi s klasičnim plinskim kotlovima, što rezultira pozitivnim utjecajem na ekološki i financijski aspekt.

3.1.1.1. Podsustav proizvodnje

U ovom radu je svaki podsustav proizvodnje s centraliziranim kondenzacijskim bojlerima definiran sa snagom kotla od 60 kW koji je smješten u kotlovnici zgrade. Kotao je definiran kao poboljšani kondenzacijski kotao, izgrađen nakon 1999. godine koji služi za kombinaciju grijanja i pripreme PTV-a. Njegova učinkovitost na 100% opterećenja pri temperaturi polaznog voda od 30°C iznosi $\eta_{\text{gnr,Pn},30} = 103,78\%$, a pri temperaturi polaznog voda od 60°C iznosi $\eta_{\text{gnr,Pn},60} = 95,78\%$. Učinkovitost na djelomičnom opterećenju pri snazi $\Phi_{\text{Pint}} = 18$ kW iznosi $\eta_{\text{gnr,Pint}} = 104,78\%$. U podsustavu proizvodnje postoji i primarna cirkulacija duljine 2 m od kotla do spremnika PTV-a također smještena u kotlovnici zgrade. Cjevovod primarne cirkulacije je izoliran, a pumpa regulirana.

3.1.1.2. Podsustav spremnika i razvoda

Spremnik PTV-a (koji je smješten u kotlovnici zgrade) kod ove vrste sustava iznosi 2000 L. Podsustav razvoda grijanja je dvocijevni. Dvocijevni sustav grijanja opskrbljuje svako ogrjevno

tijelo s približno jednakom temperaturom ogrjevnog medija - vode. U slučaju da su ogrjevna tijela radijatori, odabrane projektne temperature polaza ogrjevnog medija u sustav su

$\vartheta_{s,des} = 70^{\circ}\text{C}$, a povrata $\vartheta_{r,des} = 55^{\circ}\text{C}$. Kod ventilokonvektora te temperature iznose $\vartheta_{s,des} = 50^{\circ}\text{C}$ i $\vartheta_{r,des} = 45^{\circ}\text{C}$, a podnog grijanja $\vartheta_{s,des} = 45^{\circ}\text{C}$ i $\vartheta_{r,des} = 35^{\circ}\text{C}$. Karakteristične veličine razvoda grijanja i koeficijenata toplinskih gubitaka pri radijatorskom i ventilokonvektorskom razvodu:

- $L_v = 23,34$ m (cjevovodi između generatora i vertikalala)
- $L_s = 73,98$ m (cjevovodi vertikalala)
- $L_a = 654,2$ m (spojni cjevovodi s ogrjevnim tijelima)
- $\psi_{L_v} = 0,2$ W/(mK)
- $\psi_{L_s} = 0,3$ W/(mK)
- $\psi_{L_a} = 0,3$ W/(mK)

Pri podnom grijanju:

- $L_v = 23,34$ m (cjevovodi između generatora i vertikalala)
- $L_s = 73,98$ m (cjevovodi vertikalala)
- $L_a = 120$ m (spojni cjevovodi s ogrjevnim tijelima)
- $\psi_{L_v} = 0,2$ W/(mK)
- $\psi_{L_s} = 0,3$ W/(mK)
- $\psi_{L_a} = 0,3$ W/(mK)

Cirkulacijska pumpa je regulirana i smještena u negrijanom dijelu zgrade.

Dio razvoda PTV-a je u cirkulacijskoj petlji, a dio izvan cirkulacijske petlje. Karakteristične veličine razvoda PTV-a i koeficijenata toplinskih gubitaka su:

- $L_v = 23,3$ m (cjevovodi između generatora i vertikalala)
- $L_s = 73,9$ m (cjevovodi vertikalala)
- $L_{sl} = 135,8$ m (individualni spojni cjevovodi izvan cirkulacijske petlje)
- $U_{k,L_v} = 0,2$ W/(mK)
- $U_{k,L_s} = 0,3$ W/(mK)

Cirkulacijska pumpa je regulirana i smještena u negrijanom dijelu zgrade, a radi 17 h dnevno.

3.1.1.3. Podsustav predaje

Podsustav predaje se sastoji od radijatora, ventilokonvektora i podnog grijanja kao ogrjevnih tijela. Ukupna instalirana snaga ogrjevnih tijela pri definiranom temperaturnom režimu iznosi $\Phi_{em} = 60$ kW. Radijatori su smješteni uz vanjske zidove ispod prozora. Regulirani su s PI regulatorima koji osiguravaju preciznu regulaciju temperature prostora, uz optimizaciju potrošnje energije. Oni djeluju na protok vode kroz radijator u ovisnosti o razlici između željene

temperature prostora i trenutne izmjerene temperature. Podno grijanje je izvedeno kao suhi sustav s podnom oblogom i dvopoložajnim (on/off) regulatorom.

3.1.2. Sustav s kombiniranim plinskim bojlerima

Kombinirani kondenzacijski plinski bojler je uređaj koji služi za kombinirano grijanje prostora i protočnu pripremu potrošne tople vode. Velika prednost ovakvog uređaja proizlazi iz činjenice da nije potreban toplinski spremnik što rezultira značajnom uštedom prostora. Također, zbog toga je instalacija sustava s kombiniranim plinskim bojlerima jednostavnija i jeftinija od sustava sa standardnim plinskim bojlerom.

3.1.2.1. Podsustav proizvodnje, razvoda i predaje

Podsustav proizvodnje čini 15 kombiniranih kotlova pojedinačne snage 24 kW koji služe za kombinaciju grijanja i pripreme PTV-a. Kotlovi su definirani kao kondenzacijski kombinirani s godinom izgradnje nakon 1994. godine te su smješteni u grijanom prostoru. Njihova učinkovitost na 100% opterećenja iznosi $\eta_{\text{gnr,Pn}} = 94,56\%$. Učinkovitost na djelomičnom opterećenju pri snazi $\Phi_{\text{Pint}} = 7,2 \text{ kW}$ iznosi $\eta_{\text{gnr,Pint}} = 100,56\%$.

Podsustavi razvoda i predaje su isti kao i u točkama 3.1.1.2. i 3.1.1.3. s razlikom da kod protočnih kombiniranih bojlera nema razvoda između generatora i toplinskih podstanica u stanu.

3.1.3. Sustav s kotlom na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom

Centralni sustav kotla na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom je jedno od obnovljivih rješenja za pripremu tople vode i grijanje. Kao pogonsko gorivo koristi se biomasa u obliku drvene sječke ili peleta koja je pohranjena u prikladnim spremnicima. Učinkovitosti ovakvog tipa kotlova je najčešće iznad 85%.

3.1.3.1. Podsustav proizvodnje, spremnika, razvoda i predaje

Podsustav proizvodnje definiran je kao kotao na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom snage 60 kW izgrađen nakon 1994. godine, te je smješten u kotlovnici zgrade. Njegova učinkovitost na 100% opterećenja iznosi $\eta_{\text{gnr,Pn}} = 88,56\%$. Učinkovitost na djelomičnom opterećenju pri snazi $\Phi_{\text{Pint}} = 30 \text{ kW}$ iznosi $\eta_{\text{gnr,Pint}} = 86,83\%$. Primarna cirkulacija je izvedena na isti način kao kod centralnog sustava s poboljšanim kondenzacijskim kotlom. Svi ostali podsustavi su jednaki onima navedenim pod točkama 3.1.1.2. i 3.1.1.3.

3.1.4. Dizalica topline zrak – voda

Na tržištu se najčešće pojavljuju dizalice topline zrak – voda jer je okolišni zrak najpristupačniji i najveći ogrjevni spremnik, a ugradnja je troškovno najisplativija. Zbog varijabilnosti temperatura zraka najčešće je potreban i dodatni izvor topline. Osim grijanja i pripreme potrošne tople vode, ovakvi sustavi omogućuju i hlađenje prostora. Zbog nemogućnosti istodobnog grijanja (npr. potrošne tople vode) i hlađenja nerijetko se koriste zasebni sustavi dizalica toplina, odnosno pojedinačno za grijanje i hlađenje. Mogući problemi ovih sustava je buka pri radu sustava, kao i visok investicijski trošak. Njihova učinkovitost je prikazana u okviru faktora COP (engl. Coefficient of Performance) koji predstavlja omjer između količine topline koju dizalica topline isporučuje i količine energije koju troši za rad kompresora i pomoćnih uređaja. Prosječan COP dizalica topline zrak – voda se kreće između 2 i 5 ovisno o nizu faktora poput vremenskih uvjeta, željene temperaturne razine, kvaliteti regulacije...

3.1.4.1. Centralni sustav dizalice topline - Podsustav proizvodnje, spremnika, razvoda i predaje

Centralni sustav dizalice topline zrak – voda snage od 70 kW pri referentnim uvjetima (A7/W35) radi u paralelnom režimu rada što znači da se pomoćni grijač aktivira i radi istovremeno s dizalicom topline kako bi se po potrebi osigurao dodatni kapacitet grijanja. Balansna temperatura dizalice topline iznosi $\vartheta_{\text{bal}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i predstavlja temperaturu pri kojoj se projektno uključuje pomoćni grijač. Zbog tako definirane temperature, generacija topline se vrši jedino putem dizalice topline (nema potrebe za dodatnim grijačem).

Najveća temperatura na izlazu iz kondenzatora je $\vartheta_{\text{hp,opr}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, a željena temperatura PTV-a iznosi $\vartheta_{\text{w,out}} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spremnik PTV-a je zapremnine 2000 L i nalazi se u negrijanom prostoru zgrade – kotlovnici. Podsustav razvoda grijanja je dvocijevni s projektnom temperaturom polaza ogrjevnog medija u sustav $\vartheta_{\text{s,des}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ i povrata $\vartheta_{\text{r,des}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ u slučaju s podnim grijanjem te $\vartheta_{\text{s,des}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i povrata $\vartheta_{\text{r,des}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ u slučaju s ventilokonvektorima. Dimenzije razvoda PTV-a kod ovih sustava su:

- $L_v = 41,76\text{ m}$ (cjevovodi između generatora i vertikala)
- $L_s = 194,55\text{ m}$ (cjevovodi vertikala)
- $L_{\text{sl}} = 47,34\text{ m}$ (individualni spojni cjevovodi izvan cirkulacijske petlje)
- $U_{\text{k,Lv}} = 0,2\text{ W/(mK)}$
- $U_{\text{k,Ls}} = 0,3\text{ W/(mK)}$

Karakteristike razvoda grijanja se, kao i podsustavi predaje, poklapaju sa opisanima u poglavlju 3.1.1.2. i 3.1.1.3.

3.1.4.2. Lokalni sustav dizalice topline - Podsustav proizvodnje, spremnika, razvoda i predaje

Lokalni sustav dizalica toplina pojedinačnih snaga 6 kW pri referentnim uvjetima (A7/W35) također radi u paralelnom režimu rada. Najveća temperatura na izlazu iz kondenzatora je $\vartheta_{hp,opr} = 60^{\circ}\text{C}$, a željena temperatura PTV-a iznosi $\vartheta_{w,out} = 50^{\circ}\text{C}$. Balansna temperatura dizalice topline iznosi $\vartheta_{bal} = -5^{\circ}\text{C}$. Ukoliko vanjska temperatura padne ispod -5°C , uključuje se pomoćni električni grijač koji radi u paralelnom režimu rada s dizalicom topline. Svaka lokalna dizalica topline dolazi sa spremnikom pojedinačne zapremnine od 100 L. Primarna cirkulacija je izolirana i nalazi se u grijanom prostoru. Podsustav razvoda grijanja je dvocijevni s projektnom temperaturom polaza ogrjevnog medija u sustav $\vartheta_{s,des} = 35^{\circ}\text{C}$ i povrata $\vartheta_{r,des} = 30^{\circ}\text{C}$ u slučaju s podnim grijanjem te $\vartheta_{s,des} = 50^{\circ}\text{C}$ i povrata $\vartheta_{r,des} = 45^{\circ}\text{C}$ u slučaju s ventilokonvektorima. Karakteristike razvoda grijanja i PTV-a se, kao i podsustavi predaje, poklapaju sa opisanima u poglavlju 3.1.1.2., 3.1.1.3 i 3.1.2.1.

3.1.5. Solarni toplovodni sustav

Solarni toplovodni sustav koristi sunčevu energiju za grijanje ogrjevnog medija koji toplinu najčešće predaje toplinskom spremniku. Ovakvi sustavi su pogodni za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode. Glavni dio sustava su kolektori koji mogu biti pločasti ili vakuumski (cijevni). Pločasti kolektori su pogodni za umjerene i toplije krajeve jer na godišnjoj razini apsorbiraju više sunčeve energije. Cijevni kolektori imaju manje gubitke topline što ih čini efikasnijima u hladnijim podnebljima. Bitan faktor ovakvih sustava je pravilno dimenzioniranje sustava jer se s povećanjem temperature smanjuje efikasnost kolektora. Također, maksimalne temperature u kolektorima ne smiju prekoračiti 85°C kod pločastih, odnosno 100°C kod vakuumskih kolektora jer pri višim temperaturama dolazi do gašenja cirkulacijske pumpe – havarija. Solarni toplovodni sustavi su pogodni za kućanstva jer smanjuju godišnje troškove energije i emisije te povećavaju energetska neovisnost samog kućanstva.

Karakteristike solarnog toplovodnog sustava u ovom radu:

Tablica 5 Karakteristike odabranog solarnog toplovodnog sustava

Efektivna površina kolektora bez okvira A (m^2)	30
Tip solarnih kolektora	Ostakljeni pločasti kolektor
Nazivni volumen spremnika na koji je spojen sustav solarnih kolektora V_{nom} (L)	1500

Volumen dijela spremnika između vrha spremnika i donjeg dijela dodatnog grijača V_{bu} (L)	500
Smještaj solarnog sustava	Negrijani prostor unutar zgrade

3.1.6. Fotonaponski sustav

Fotonaponski sustav koristi sunčevu energiju za proizvodnju električne energije koja se temelji na fotoelektričnom efektu. Fotoelektrični efekt nastaje djelovanjem fotona odgovarajuće valne duljine koji obasjavaju fotonaponsku ćeliju pritom izbijajući elektrone. Fotonaponske ćelije se najčešće izrađuju od silicija koji je dopiran borom i fosforom. Bor omogućuje stvaranje „šupljina“ zbog manjeg broja elektrona u vanjskoj ljusci atoma (3) s obzirom na silicij (4). S druge strane, fosfor sadrži 5 valentnih elektrona u vanjskoj ljusci atoma čime se postiže lakše oslobađanje slobodnih elektrona – generiranje električne energije. Ovakvi sustavi proizvode istosmjernu struju, stoga se nerijetko mora ugraditi inverter. Prosječna učinkovitost fotonaponskih panela iznosi 15 % - 22 %. Iako su investicijski troškovi značajni, posljednjih je godina ugradnja ovakvih sustava značajna.

Karakteristike fotonaponskog sustava u ovom radu:

Tablica 6 Karakteristike odabranog fotonaponskog sustava

Ukupna efektivna površina PV modula bez okvira (m ²)	70
Vrsta PV modula	Mono-kristalni silicij
Učinkovitost PV modula	18%
Način ugradnje PV modula	Osrednje dobro ventilirani moduli
Kut nagiba (°)	30
Orijentacija	Jug

3.1.7. Split klima uređaji

Split klima uređaji predstavljaju najčešći oblik klimatizacije u kućanstvima. Sustav se sastoji od unutarnje i vanjske jedinice. Unutarnja jedinica sadrži ventilator i isparivač koji je zadužen za apsorpciju topline iz unutarnjeg zraka u režimu hlađenja. Vanjska jedinica sadrži sve glavne komponente sustava poput kondenzatora koji predaje toplinu okolišu, kompresora koji diže temperaturni nivo rashladnog medija i ventilatora.

Karakteristike split klima uređaja u ovom radu:

Tablica 7 Karakteristike odabranog split klima uređaja

Nazivna snaga rashladnog uređaja $\Phi_{C,gen}$ (kW)	3,5
Broj rashladnih uređaja	15
Faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja EER (kW/kW)	2,7
Vrsta regulacije djelomičnog opterećenja	Jednozonski sustav s kontinuiranom regulacijom
Vrsta kondenzatora	Suhi hladnjak

3.1.8. Posredni sustav hlađenja („Chiller“)

„Chiller“ je tipičan sustav hlađenja u velikim zgradama jer radna tvar nije u doticaju sa hlađenim prostorijama. Naime, posredni sustav hlađenja znači da radna tvar koja kruži u petlji od isparivača do kondenzatora, preuzima toplinu na isparivaču od posrednog prijenosnika energije koji se pumpa kroz sustav cjevovoda do rashladnih tijela (ventilokonvektori). Posredni prijenosnik energije je tekućina koja ne mijenja agregatno stanje (najčešće voda) uzimajući toplinu iz hlađenih prostorija zgrade. Postoje vodom hlađeni i zrakom hlađeni „chilleri“ ovisno o tome kojem mediju kondenzator predaje toplinu. Vodom hlađeni chilleri su pogodni za velike objekte, učinkovitost im je veća, no zahtijevaju više prostora od zračno hlađenih „chillera“ s obzirom da je nužan rashladni toranj. Karakteristike zrakom hlađenog „chillera“ u ovom radu:

Tablica 8 Karakteristike odabranog zrakom hlađenog „chillera“

Nazivna snaga rashladnog uređaja $\Phi_{C,gen}$ (kW)	75
Ekspanzija radne tvari	Indirektna
Radna tvar	R134a
Temperatura rashladne vode (°C)	6
Faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja EER	4,5
Vrsta regulacije djelomičnog opterećenja	Vijčani kompresori s kontrolom pomoću ventila
Vrsta kondenzatora	Suhi hladnjak
Vrsta rashladnog tijela	Ventilokonvektor

3.1.9. Sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline

Sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline osigurava opskrbu vanjskim zrakom u prostorijama dok se istodobno povećava energetska učinkovitost objekta. To se postiže zbog rekuperacije topline u rekuperatoru. Naime, kroz rekuperator prolaze 2 struje zraka u periodu grijanja (za period hlađenja je obrnuto):

- Svježi vanjski zrak
- Topli zrak iz prostorija

U izmjenjivaču topline koji se nalazi unutar rekuperatora dolazi do prijenosa topline sa toplije struje zraka na hladniju, nakon čega se istrošeni zrak, koji je predao toplinu hladnijoj struji, izbacuje u okoliš, a svježi zagrijani zrak distribuira po prostorijama. Osim smanjenja pogonskih troškova, rekuperacija topline omogućuje i ugradnju opreme manjih dimenzija te ima pozitivan utjecaj na okoliš.

Karakteristike sustava mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline u ovom radu:

Tablica 9 Karakteristike odabranog sustava mehaničke ventilacije s rekuperacijom topline

Minimalno potreban broj izmjena vanjskog zraka u režimu grijanja $n_{\text{req,H}} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	0,34
Minimalno potreban broj izmjena vanjskog zraka u režimu hlađenja $n_{\text{req,C}} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	0,34
Tip izmjenjivača	Pločasti izmjenjivač – protusmjerni, križni
Površina stijenki klimakomore $A_{\text{AHU}} \text{ (m}^2\text{)}$	10
Klasa kućišta klimakomore prema koeficijentu prolaska topline U	T5 ($U = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Oplošje kanalnog razvoda $A_{\text{duct}} \text{ (m}^2\text{)}$	120
Ventilator u tlačnom razvodu	Tlačni ventilator s grijanjem

3.2. Proračun E_{prim} i E_{del}

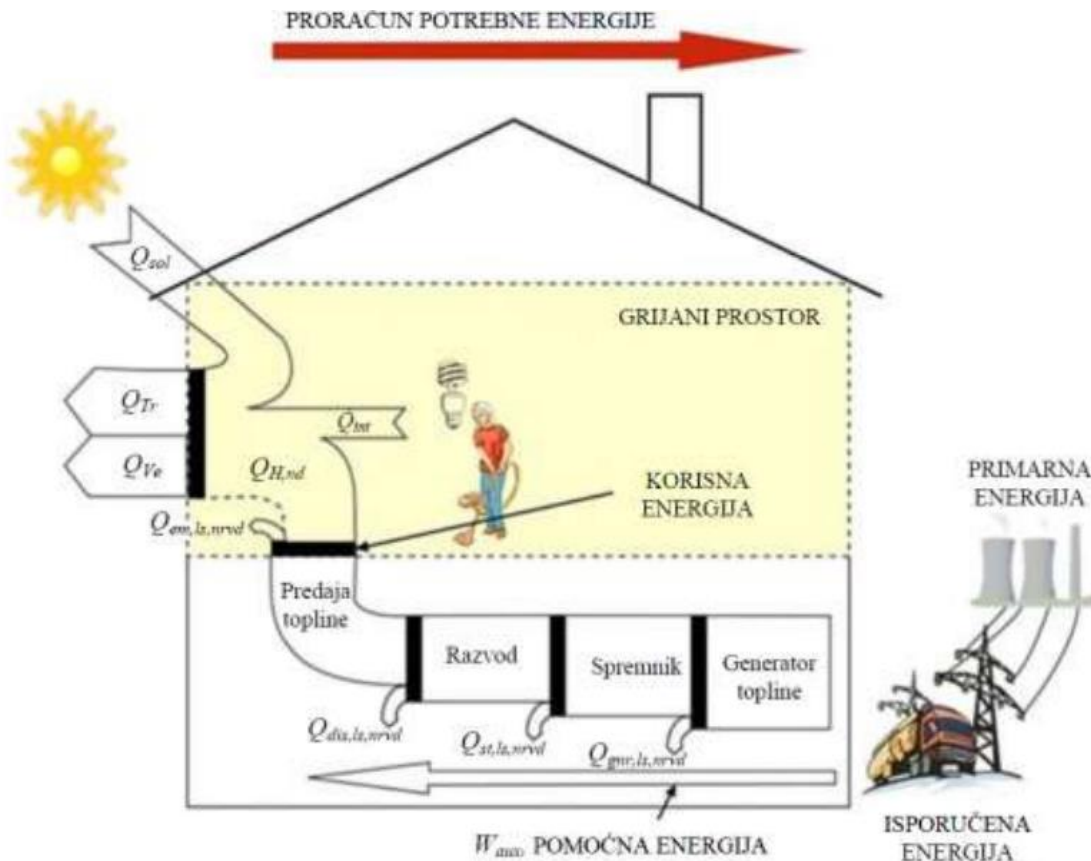
3.2.1. Proračun termotehničkih sustava grijanja i pripreme PTV-a

Ovaj proračun se temelji na: „Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama - Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode“ [10]. Proračunom se određuju toplinski gubici i energija za rad pomoćnih uređaja. Prema algoritmu, svaki je termotehnički sustav podijeljen u nekoliko podsustava:

- podsustav predaje toplinske energije u prostor (ogrjevna tijela), uključujući regulaciju

- podsustav razvoda ogrjevnog medija i potrošne tople vode, uključujući regulaciju
- podsustav proizvodnje toplinske energije, uključujući spremnik i cjevovode primarne cirkulacije do generatora topline (kotla) te regulaciju

Općenito, proračun je bitan u pogledu određivanja primarne i isporučene energije zgradi. Slika 3 prikazuje energetske tokove u zgradi.



Slika 3 Energetski tokovi u zgradi [10]

Pri čemu:

$Q_{H,nd}$ – potrebna toplinska energija za grijanje prostora (kWh)

Q_{Tr} – transmisijski toplinski gubici (kWh)

Q_{Ve} – ventilacijski toplinski gubici (kWh)

Q_{sol} – toplinski dobici od sunčevog zračenja (kWh)

Q_{int} – toplinski dobici od unutrašnjih izvora (ljudi, uređaja, rasvjete) (kWh)

$Q_{em,ls,nrvd}$ – neiskorišteni toplinski gubici podsustava predaje toplinske energije u prostor (kWh)

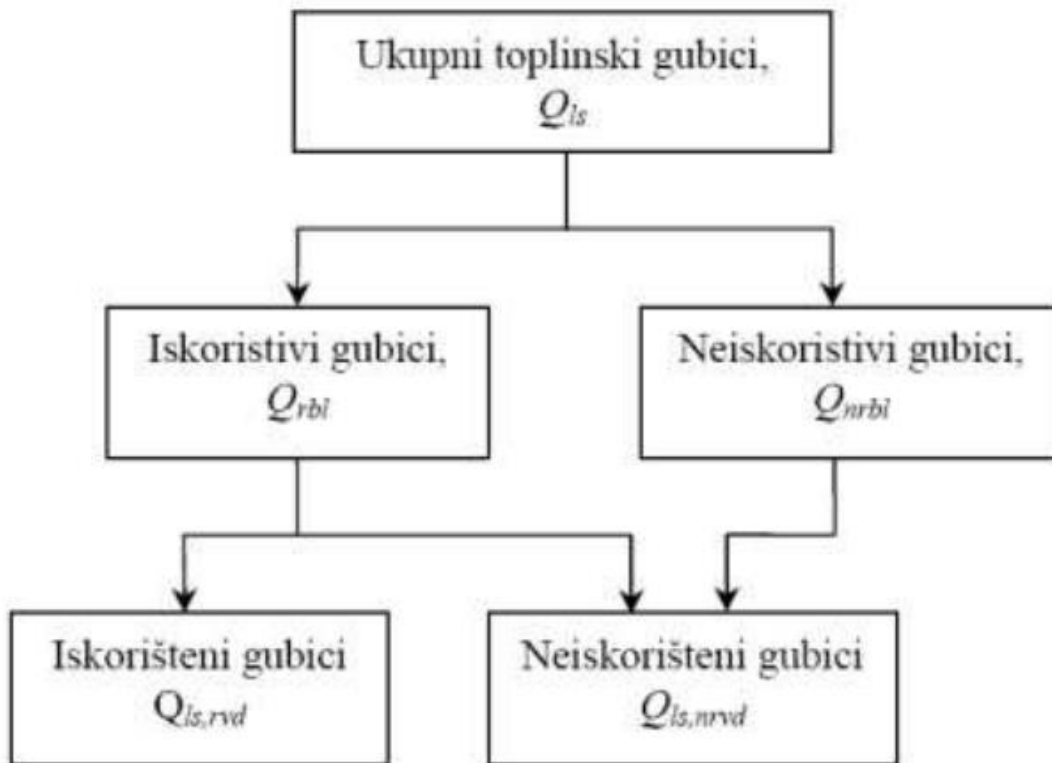
$Q_{dis,ls,nrvd}$ – neiskorišteni toplinski gubici podsustava razvoda (kWh)

$Q_{st,ls,nrvd}$ – neiskorišteni toplinski gubici spremnika (kWh)

$Q_{\text{gnr,ls,nrvd}}$ – neiskorišteni toplinski gubici generatora topline (kWh)

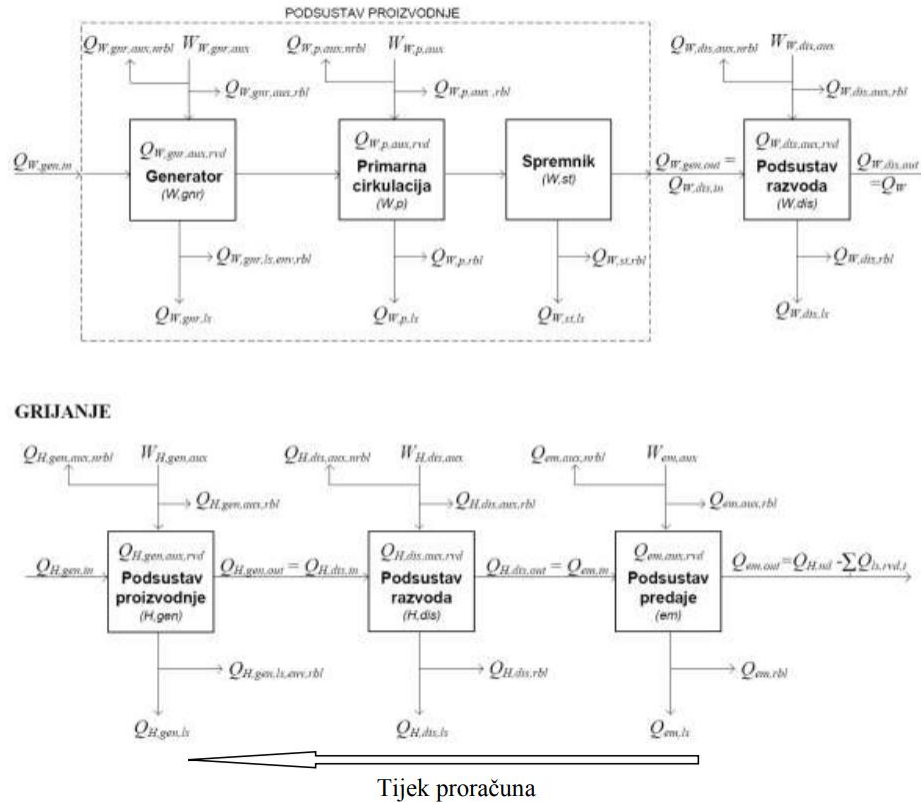
W_{aux} – pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja (kWh)

Ukupni su toplinski gubici prema algoritmu podijeljeni na iskoristive Q_{rbl} (mogu se koristiti u grijanju prostora i smanjiti $Q_{\text{em,out}}$) i neiskoristive gubitke Q_{nrbl} (ne mogu se iskoristiti za grijanje prostora). Iskoristivi gubici mogu biti iskorišteni $Q_{\text{ls,rvd}}$ i neiskorišteni $Q_{\text{ls,nrvd}}$, a neiskoristivi gubici samo neiskorišteni. Grafički prikaz navedenih gubitaka objašnjava slika 4.



Slika 4 Podjela toplinskih gubitaka termotehničkih sustava [10]

Podjela termotehničkih sustava na podsustave s ulazno/izlaznim veličinama prikazana je slikom 5.



Slika 5 Podjela termotehničkih sustava na podsustave s ulazno/izlaznim veličinama [10]

Ulazna veličina u proračun je energija $Q_{em,out}$ koja se predaje u grijani prostor ogrjevnim tijelima:

$$Q_{em,out} = Q_{H,nd} - \sum_i Q_{ls,rvd,i} \quad [\text{kWh}]$$

Pri čemu:

$\sum Q_{ls,rvd}$ - zbroj svih iskorištenih toplinskih gubitaka sustava grijanja i pripreme potrošne tople vode (kWh)

$Q_{ls,rvd}$ predstavlja stvarno iskorišteni dio pojedinog iskoristivog gubitka prema formuli:

$$Q_{ls,rvd,i} = \eta_{rvd} \cdot Q_{rbl,i} \quad [\text{kWh}]$$

$Q_{rbl,i}$ – iskoristivi gubitak (kWh)

η_{rvd} – stupanj iskorištenja iskoristivih gubitaka izračuna prema formuli:

$$\eta_{rvd} = 0,8 \cdot \eta_{H,gn} \quad [-]$$

$\eta_{H,gn}$ – stupanj iskorištenja toplinskih dobitaka

Proračun započinje s jednakosti $Q_{em,out} = Q_{H,nd}$ i on je iterativan sve dok $Q_{em,out}$ iz posljednja dva koraka ne bude $<1\%$. Općenita formula za računanje toplinske energije na ulazu u pojedini podsustav glasi:

$$Q_{in} = Q_{out} - \sum_i Q_{aux,rvd,i} + Q_{ls} \quad [\text{kWh}]$$

Q_{in} – toplinska energija na ulazu u podsustav (kWh)

Q_{out} – toplinska energija na izlazu iz podsustava (kWh)

$Q_{aux,rvd,i}$ – vraćena pomoćna energija u podsustav (kWh)

Q_{ls} – ukupni toplinski gubici podsustava (kWh)

Prethodna jednadžba se primjenjuje na svaki podsustav dok se ne dobije potrebna toplinska energija koju je gorivom potrebno isporučiti u sustav grijanja $Q_{H,gen,in}$ i u sustav pripreme PTV-a $Q_{W,gen,in}$. Na temelju tih vrijednosti i izračunate ukupne pomoćne energije, dobiju se isporučena i primarna energija.

3.2.2. Isporučena energija

- Sustav grijanja s jednim generatorom:

$$E_{H,del} = Q_{H,gen,in} + W_{em,aux} + W_{H,dis,aux} + W_{H,gen,aux} \quad [\text{kWh}]$$

Pri čemu:

$W_{em,aux}$ – pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava predaje (kWh)

$W_{H,dis,aux}$ – pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava razvoda (kWh)

$W_{H,gen,aux}$ – pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava proizvodnje (kWh)

- Sustav pripreme PTV-a s jednim generatorom:

$$E_{W,del} = Q_{W,gen,in} + W_{W,dis,aux} + W_{W,gen,aux} \quad [\text{kWh}]$$

Pri čemu:

$Q_{W,gen,in}$ – toplinska energija na ulazu u podsustav proizvodnje (kWh)

$W_{W,dis,aux}$ – pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava razvoda

$W_{W,gen,aux}$ – pomoćna električna energija za pogon pomoćnih uređaja podsustava proizvodnje

Ukupno isporučena energija u termotehnički sustav zgrade:

$$E_{del} = E_{H,del} + E_{W,del} \quad [\text{kWh}]$$

3.2.3. Primarna energija

Primarna energija je oblik energije koji je uzet iz prirode bez prethodnog procesa pretvorbe. Podjela primarne energije na obnovljivu i neobnovljivu primarnu energiju proizlazi iz njenog izvora. Naime, neobnovljivom primarnom energijom se smatra kemijska energija sadržana u fosilnim gorivima, a obnovljivu primarnu energiju obuhvaća svaka energija dobivena iz obnovljivih izvora (kinetička energija vjetrova, kemijska energija biomase...).

Opći izraz koji povezuje primarnu i isporučenu energiju [11]:

$$E_{prim} = \sum_i E_{del,i} \cdot f_{p,i} \quad [\text{kWh}]$$

Pri čemu:

$E_{del,i}$ – isporučena energija (kWh)

$f_{p,i}$ – faktor primarne energije (-)

Korišteni faktori primarne energije i emisije CO₂ prikazani su tablicom 10.

Tablica 10 Neobnovljivi faktori primarne energije

	Neobnovljivi faktor primarne energije $f_{prim,nren}$ (-)
Električna energija – uvoz iz mreže	1,583
Električna energija – izvoz u mrežu	2,5
Biomasa	0,2
Prirodni plin	1,149

3.3. Kombinacije i rezultati

Tablica 11 Kombinacije termotehničkih sustava

Kombinacija	Način grijanja	Vrsta grijanja	Ogrjevna tijela	Dodatni OIE	Mehanička ventilacija	Način hlađenja	Vrsta hlađenja
1	Centralno	Kondenzacijski kotao	Radijatori	Ne	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
2	Lokalno	Kombi bojler	Radijatori	Ne	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
3	Centralno	Kondenzacijski kotao	Radijatori	Solarni toplovodni sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
4	Centralno	Kondenzacijski kotao	Radijatori	Fotonaponski sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
5	Centralno	Kotao na biomasu	Radijatori	Ne	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
6	Centralno	Kotao na biomasu	Radijatori	Fotonaponski sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
7	Centralno	Kotao na biomasu	Radijatori	Solarni toplovodni sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
8	Lokalno	Dizalica topline	Podno grijanje	Ne	Ne	Lokalno	Split klima uređaji
9	Centralno	Dizalica topline	Podno grijanje	Ne	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
10	Centralno	Dizalica topline	Ventilokonvektori	Ne	Da/Ne	Centralno	Dizalica topline
11	Lokalno	Dizalica topline	Ventilokonvektori	Ne	Da/Ne	Centralno	Dizalica topline
12	Lokalno	Kombi bojler	Radijatori	Fotonaponski sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
13	Centralno	Kondenzacijski kotao	Podno grijanje	Solarni toplovodni sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji
14	Centralno	Kondenzacijski kotao	Ventilokonvektori	Ne	Da/Ne	Centralno	Chiller
15	Centralno	Dizalica topline	Ventilokonvektori	Fotonaponski sustav	Da/Ne	Centralno	Dizalica topline
16	Centralno	Dizalica topline	Podno grijanje	Fotonaponski sustav	Da/Ne	Lokalno	Split klima uređaji

U nastavku slijedi numerički i grafički prikaz rezultata svake kombinacije u slučaju debljine vanjske izolacije ovojnice od 16 cm. Rezultati kombinacija u slučaju debljina vanjske izolacije ovojnice od 12 cm i 20 cm bit će prikazani u poglavlju 3.4.

Tablica 12 Rezultati sustava bez mehaničke ventilacije – debljina izolacije 16 cm

Sustavi bez mehaničke ventilacije							
Kombinacija	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)	E''_{prim} (kWh/m ²)	E''_{del} (kWh/m ²)	CO ₂ (kg)	RER _d (%)	RER _p (%)
1	34,63	22,49	73,71	61,07	13942,67	0,00	0,00
2	34,63	22,49	67,53	56,07	12786,78	0,00	0,00
3	34,63	22,49	51,59	41,76	9656,58	31,09	24,91
4	34,63	22,49	48,59	48,03	10458,72	21,35	21,99
5	34,63	22,49	26,24	73,48	4716,48	88,64	67,47
6	34,63	22,49	1,30	60,44	1232,53	100,00	100,00
7	34,63	22,49	21,32	48,89	3776,61	87,68	69,17
8	34,63	22,49	38,12	24,08	6433,21	59,59	40,12
9	34,63	22,49	48,19	30,44	8132,93	56,48	37,09
10	34,63	22,49	47,88	30,24	8080,48	55,95	36,59
11	34,63	22,49	38,11	24,07	6431,76	58,72	39,26
12	34,63	22,49	41,50	43,03	9302,84	23,26	24,84
13	34,63	22,49	52,11	42,10	9746,34	30,92	24,69
14	34,63	22,49	71,08	59,30	13488,22	0,00	0,00
15	34,63	22,49	26,12	16,50	4409,10	75,71	61,34
16	34,63	22,49	27,54	17,40	4648,99	75,12	60,44

Tablica 13 Rezultati sustava s mehaničkom ventilacijom – debljina izolacije 16 cm

Sustavi s mehaničkom ventilacijom							
Kombinacija	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)	E''_{prim} (kWh/m ²)	E''_{del} (kWh/m ²)	CO ₂ (kg)	RER _d (%)	RER _p (%)
1	19,68	21,41	69,96	54,05	12828,20	0,00	0,00
2	19,68	21,41	62,73	48,11	11466,01	0,00	0,00
3	19,68	21,41	48,16	35,02	8603,69	34,23	23,46
4	19,68	21,41	49,66	41,31	9410,45	23,99	21,03
5	19,68	21,41	38,05	63,78	6623,40	71,32	47,96
6	19,68	21,41	17,41	50,74	3139,46	91,76	77,74
7	19,68	21,41	33,17	39,44	5692,30	68,28	46,95
8							
9	19,68	21,41	56,58	35,74	9549,56	42,73	25,32
10	19,68	21,41	54,62	34,50	9218,39	43,22	27,06
11	19,68	21,41	44,15	27,89	7450,77	43,46	25,88
12	19,68	21,41	42,08	35,07	7982,06	27,10	24,22
13	19,68	21,41	48,49	35,24	8661,29	34,10	23,33
14	19,68	21,41	66,88	52,07	12304,67	0,00	0,00
15	19,68	21,41	33,51	21,17	5655,17	65,00	47,94
16	19,68	21,41	35,94	22,70	6065,62	63,62	46,29

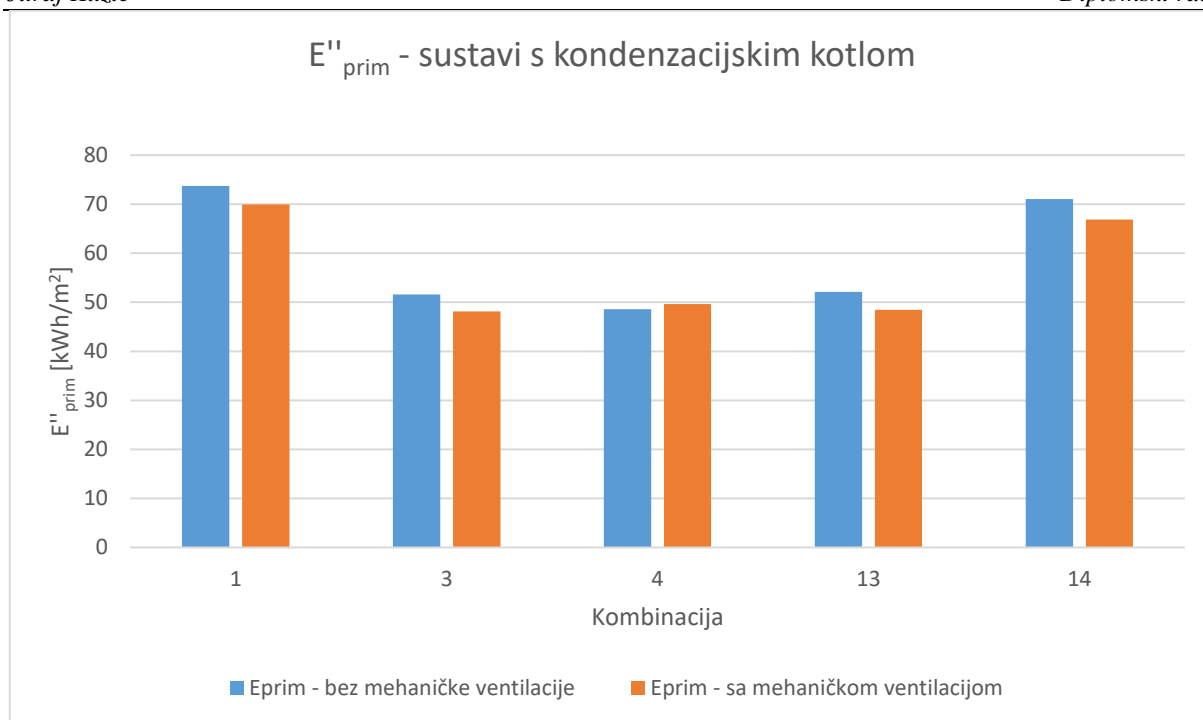
3.3.1. Sustavi s centraliziranim kondenzacijskim kotlom

Ovo poglavlje opisuje i uspoređuje kombinacije s kondenzacijskim kotlovima kao generatorima topline. U svim je kombinacijama hlađenje izvedeno lokalno putem split klima uređaja, osim u kombinaciji 14 gdje je izvedeno centralno putem „chillera“. Dijagram 1 prikazuje usporedbu vrijednosti specifične primarne energije pojedinih kombinacija. Vidi se kako mehanička ventilacija s rekuperatorom ima pozitivan utjecaj na smanjenje primarne energije osim u slučaju kombinacije 4. Naime, ta kombinacija prikazuje sustav s ugrađenom fotonaponskom elektranom na krovu zgrade koja osigurava izvoz električne energije u slučaju bez mehaničke ventilacije. S druge strane, fotonaponski sustav nije dovoljan za pokrivanje svih potreba za električnom energijom ukoliko je integrirana mehanička ventilacija, stoga je potreban uvoz. Iako sustav s mehaničkom ventilacijom u tom slučaju povećava primarnu energiju (zbog uvoza električne energije), taj porast nije velik s obzirom da rekuperator topline smanjuje potrebe za

uvozom plina. Uspoređujući sustave bez obnovljivih izvora (kombinacije 1 i 14), prikazani dijagram pokazuje kako je bolji izbor ugradnja ogrjevnih tijela u vidu ventilokonvektora s obzirom na radijatore. No, u tim slučajevima veći utjecaj na smanjenje primarne energije ima centralni sustav hlađenja sa zračnim „chillerom“. Kombinacije 3 i 13 imaju integrirani solarni toplovodni sustav u sustavima grijanja i pripreme PTV-a. Iako su ogrjevna tijela u kombinaciji 3 radijatori, primarna energija je malo manja zbog bolje regulacije radijatora u usporedbi s podnim grijanjem (PI regulator naspram on/off regulacije). Za kraj, važno je napomenuti kako bilo koji od promatranih obnovljivih izvora energije (fotonaponska elektrana i solarni toplovodni sustav) smanjuje vrijednosti primarne energije. Tablica 12 prikazuje godišnje potrošnje plina i električne energije.

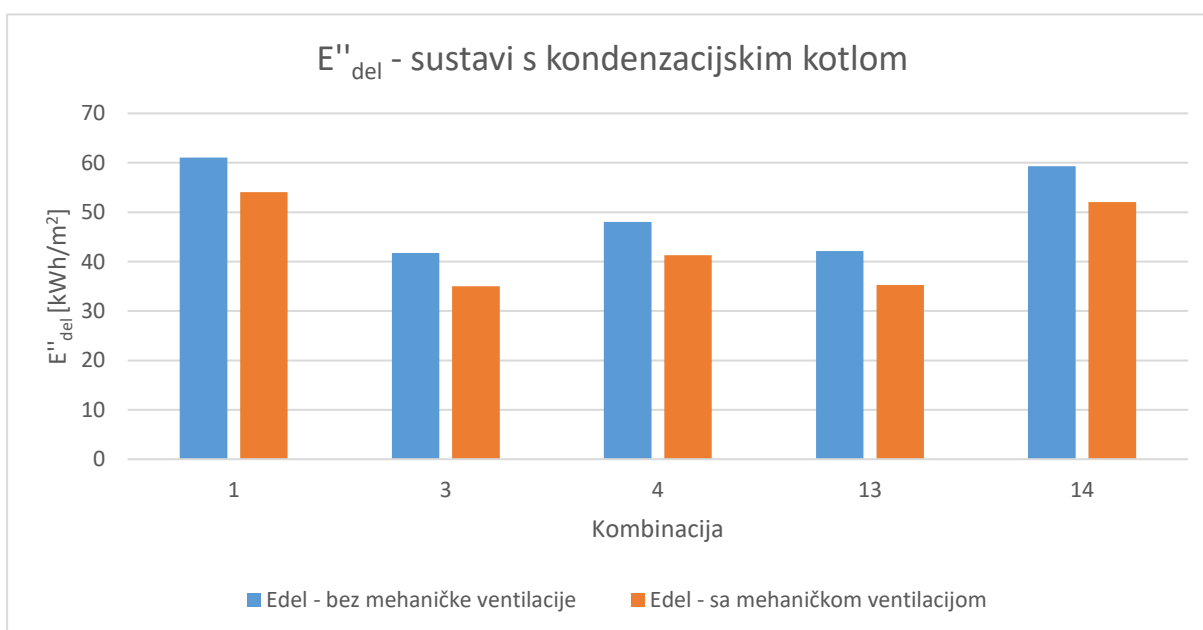
Tablica 14 Godišnja potrošnja energenata – sustav s centraliziranim kondenzacijskim kotlom

	Bez mehaničke ventilacije		Sa mehaničkom ventilacijom	
	Godišnja potrošnja plina (m ³)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)	Godišnja potrošnja plina (m ³)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)
Kombinacija 1	5262,48	7782,99	3575,25	17272,50
Kombinacija 3	3326,61	7930,26	1667,28	17417,01
Kombinacija 4	5262,48	-4659,66	3604,78	4830,51
Kombinacija 13	3330,79	8217,42	1672,58	17580,38
Kombinacija 14	5220,91	6491,81	3561,60	1551169



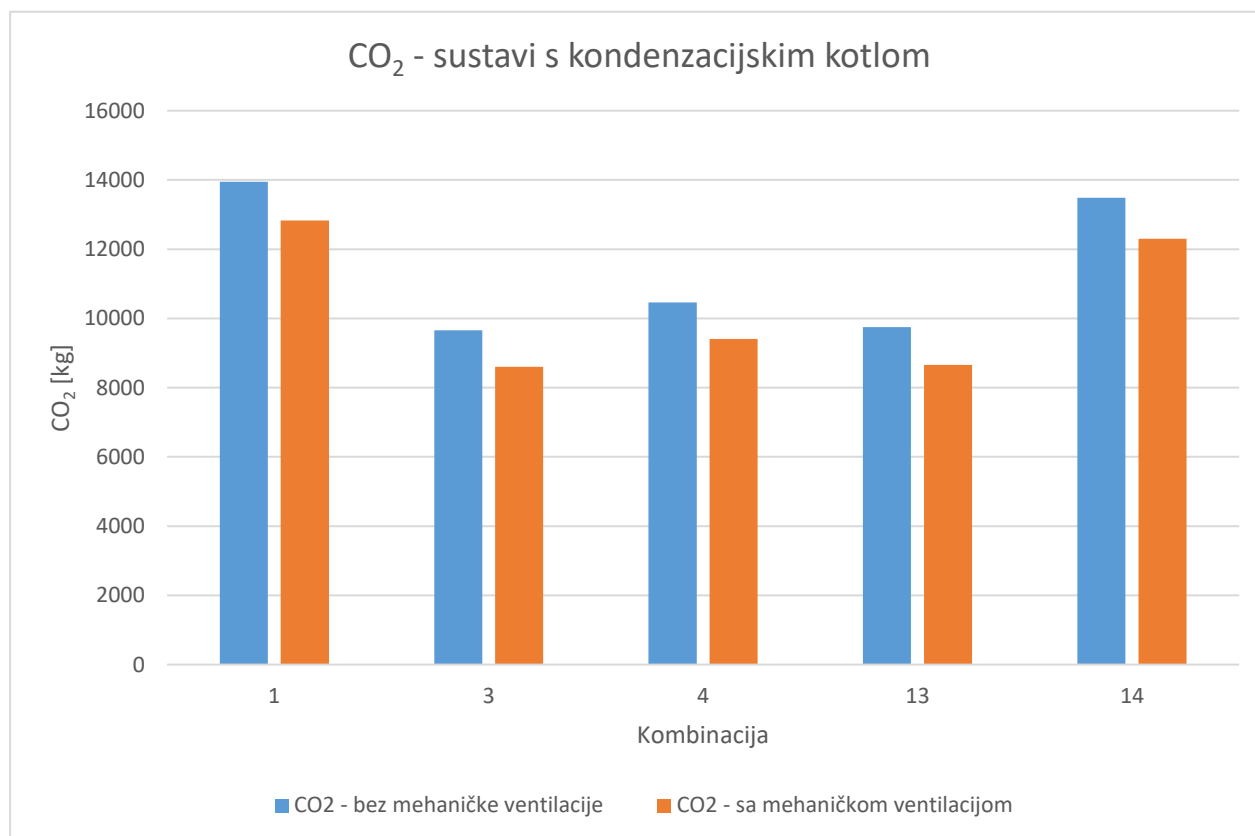
Dijagram 1 Primarna energija sustava s kondenzacijskim kotlom

Dijagram 2 prikazuje usporedbu isporučene energije E_{del} . Sustavi s mehaničkom ventilacijom s povratom topline rezultiraju manjom ukupnom isporučenom energijom u usporedbi sa sustavima koji ju nemaju. Iako se električna energija u (kWh) takvih sustava povećava, više se smanjuje potrošnja plina u kWh. Uspoređujući kombinacije 3 i 4 može se zaključiti kako solarni toplovodni sustav ima veći utjecaj na smanjenje E_{del} od fotonaponskog. Najviše isporučene energije zahtjeva kombinacija 1 a najmanje kombinacija 3.



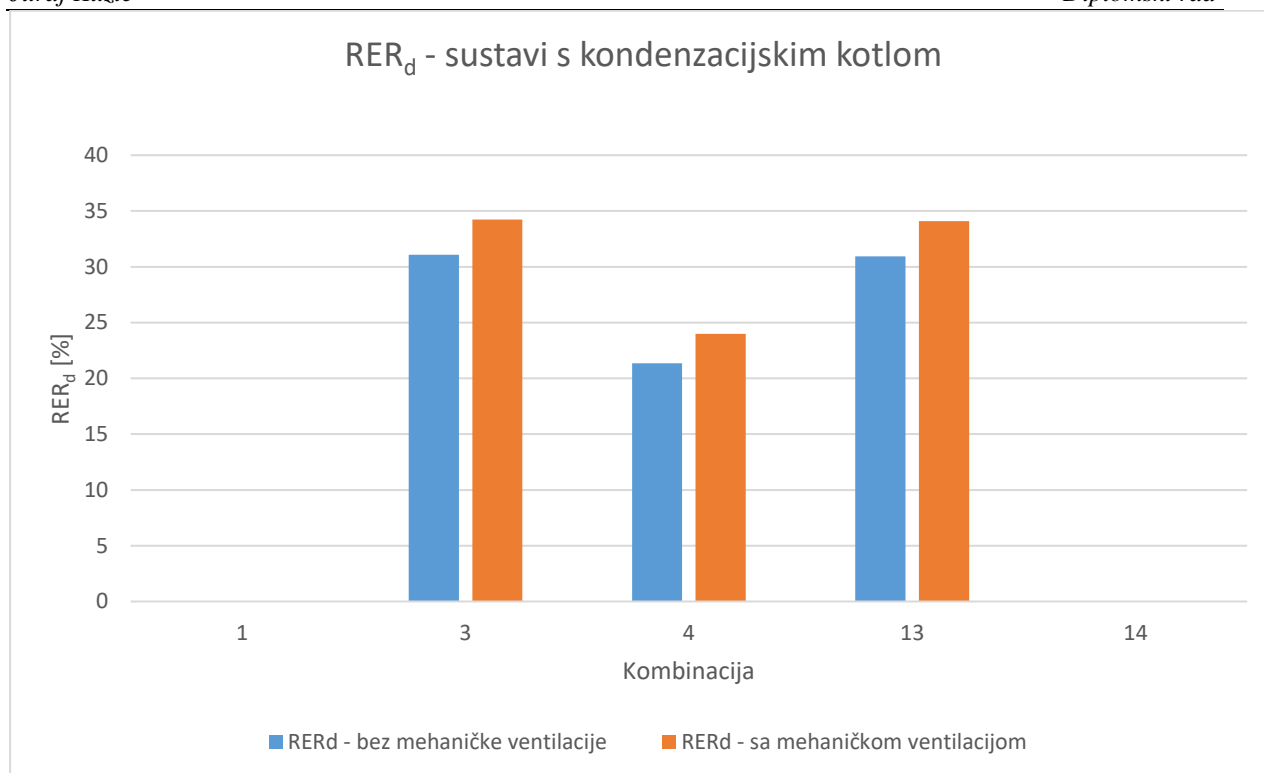
Dijagram 2 Isporučena energija sustava s kondenzacijskim kotlom

Dijagram 3 prikazuje usporedbu emisija CO₂ analiziranih sustava. Specifične emisije CO₂ kod prirodnog plina su 233 g/kWh, a električne energije 280 g/kWh. Sustavi s mehaničkom ventilacijom u prosjeku emitiraju manje od sustava bez nje. Kao i kod E_{del}, razlog tomu je veće smanjenje potrošnje plina takvih sustava u usporedbi s njihovim povećanjem električne energije. Najveće emisije imaju kombinacije bez obnovljivih izvora energije.



Dijagram 3 Emisije CO₂ sustava s kondenzacijskim kotlom

Dijagram 4 prikazuje udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji. Kombinacije 1 i 14 nemaju obnovljivih izvora energije, a električna energija iz uvoza se smatra kompletno neobnovljivom pa je i vrijednost RER_d 0. Iz dijagrama se može zaključiti kako kombinacije sa solarnim toplovodnim sustavima imaju veći Q_{renew} od kombinacije 4 sa fotonaponskom elektranom. Q_{renew} predstavlja ukupnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora. Također, kombinacija 13 ima nešto manje vrijednosti RER_d iako ima identičan solarni toplovodni sustav kao i kombinacija 3. Razlog leži u tome što je ukupna isporučena energija kroz granice sustava kombinacije 13 malo veća.



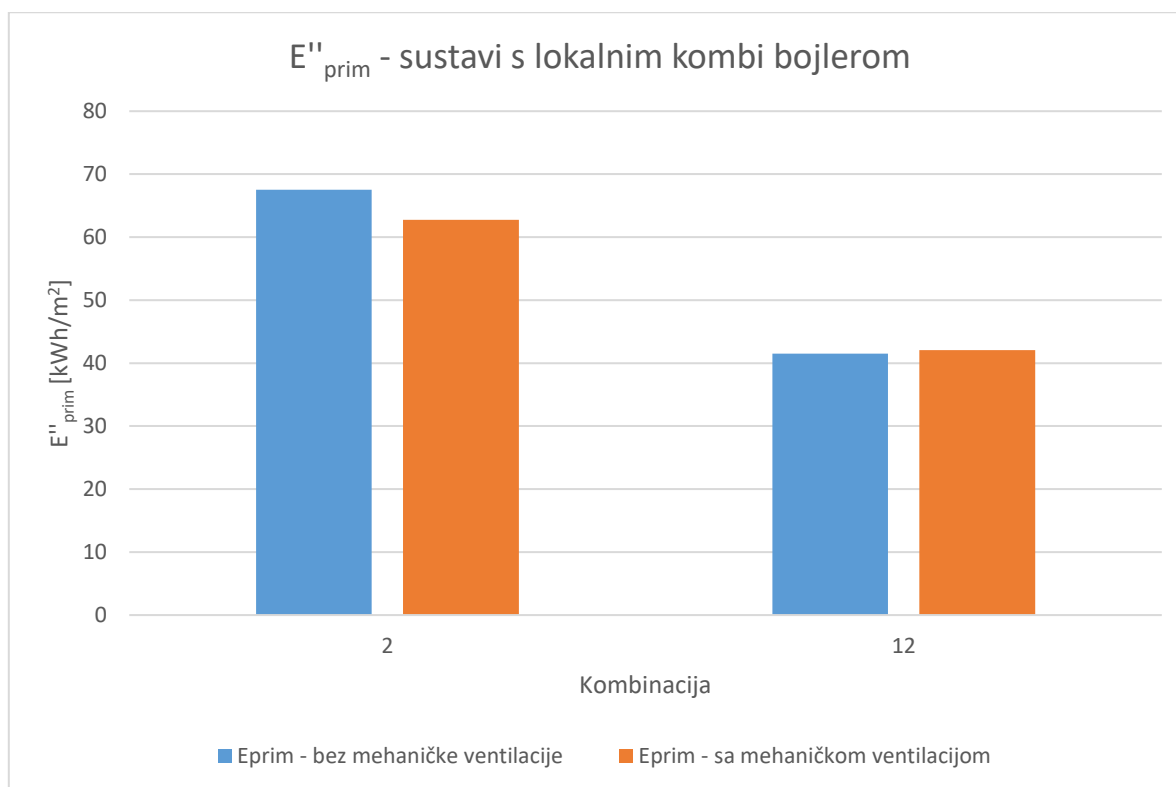
Dijagram 4 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s kondenzacijskim kotlom

3.3.2. Sustavi s kombiniranim plinskim bojlerima

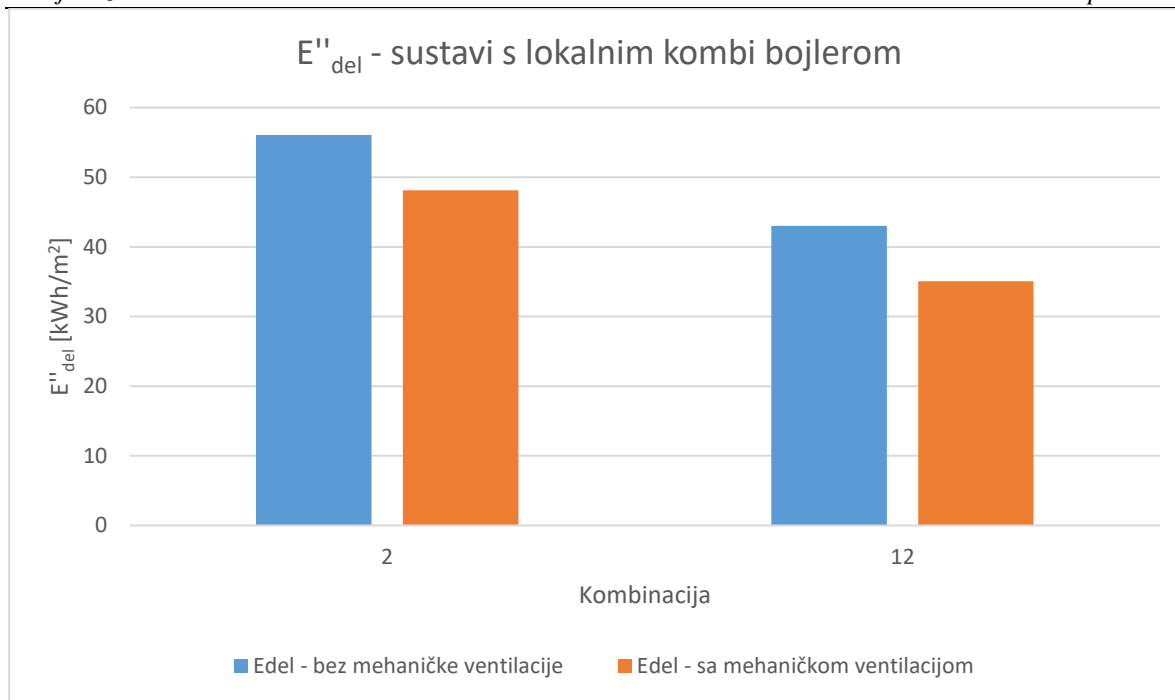
U ovom su poglavlju uspoređeni sustavi sa protočnim kombiniranim bojlerima. Hlađenje je u obje kombinacije izvedeno lokalno putem split klima uređaja. Dijagram 1 prikazuje usporedbu vrijednosti specifične primarne energije pojedinih kombinacija. Vidi se kako mehanička ventilacija s rekuperatorom ima pozitivan utjecaj na smanjenje primarne energije u slučaju kombinacije 2. Mehanička ventilacija kod kombinacije 12 povećava primarnu energiju. Razlog je isti kao što je objašnjeno u poglavlju 3.3.1. Osim toga, može se uočiti kako integracija fotonaponske elektrane ima pozitivan utjecaj na smanjenje primarne energije. Tablica 14 prikazuje godišnje potrošnje plina i električne energije.

Tablica 15 Godišnja potrošnja energenata – sustav s kombi bojlerima

	Bez mehaničke ventilacije		Sa mehaničkom ventilacijom	
	Godišnja potrošnja plina (m3)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)	Godišnja potrošnja plina (m3)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)
Kombinacija 2	4864,61	6831,12	3078,59	16372,52
Kombinacija 12	4864,61	-5611,54	3078,59	3929,87

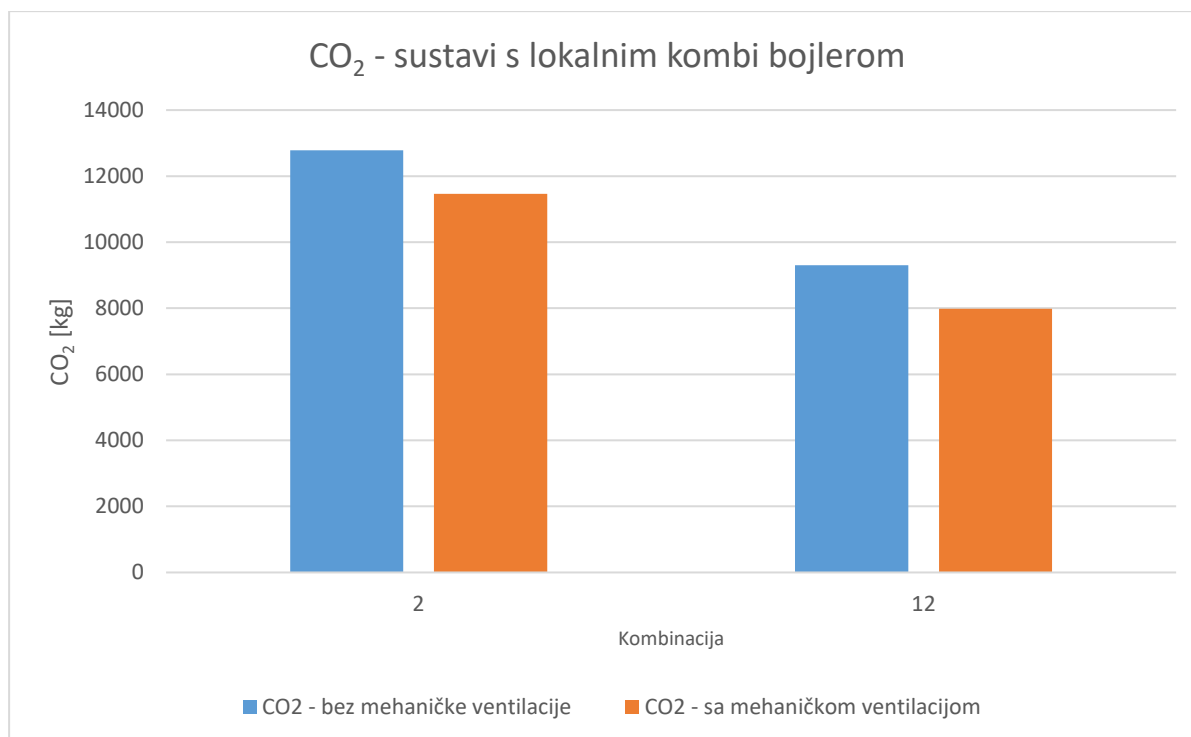
**Dijagram 5 Primarna energija sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom**

Kretanje isporučene energije prikazuje dijagram 6. Isporučena se energija smanjuje ukoliko postoji mehanička ventilacija jer se potrošnja plina smanjuje više nego što se potrošnja električne energije poveća. Kao i kod primarne energije, ugradnja fotonaponske elektrane doprinosi smanjenju E_{del} .



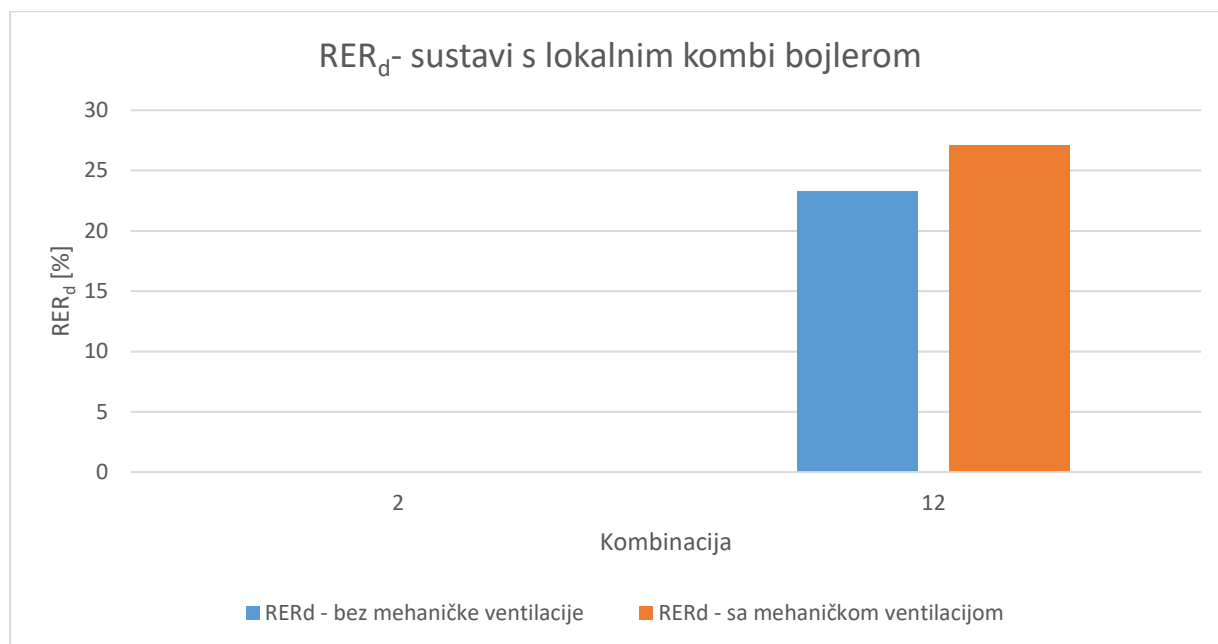
Dijagram 6 Isporučena energija sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom

Emisije CO₂ sustava s protočnim kombiniranim bojlerima opisuje dijagram 7. Na dijagramu se može očitati smanjenje emisija od preko 3000 kg godišnje u oba slučaja (sa i bez mehaničke ventilacije) ukoliko se ugradi fotonaponska elektrana.



Dijagram 7 Emisije CO₂ sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom

Dijagram 8 prikazuje udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji. Sustav s mehaničkom ventilacijom ima veći iznos RER_d -a jer ima manju potrebu za uvozom isporučene energije E_{del} .



Dijagram 8 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s lokalnim kombiniranim bojlerom

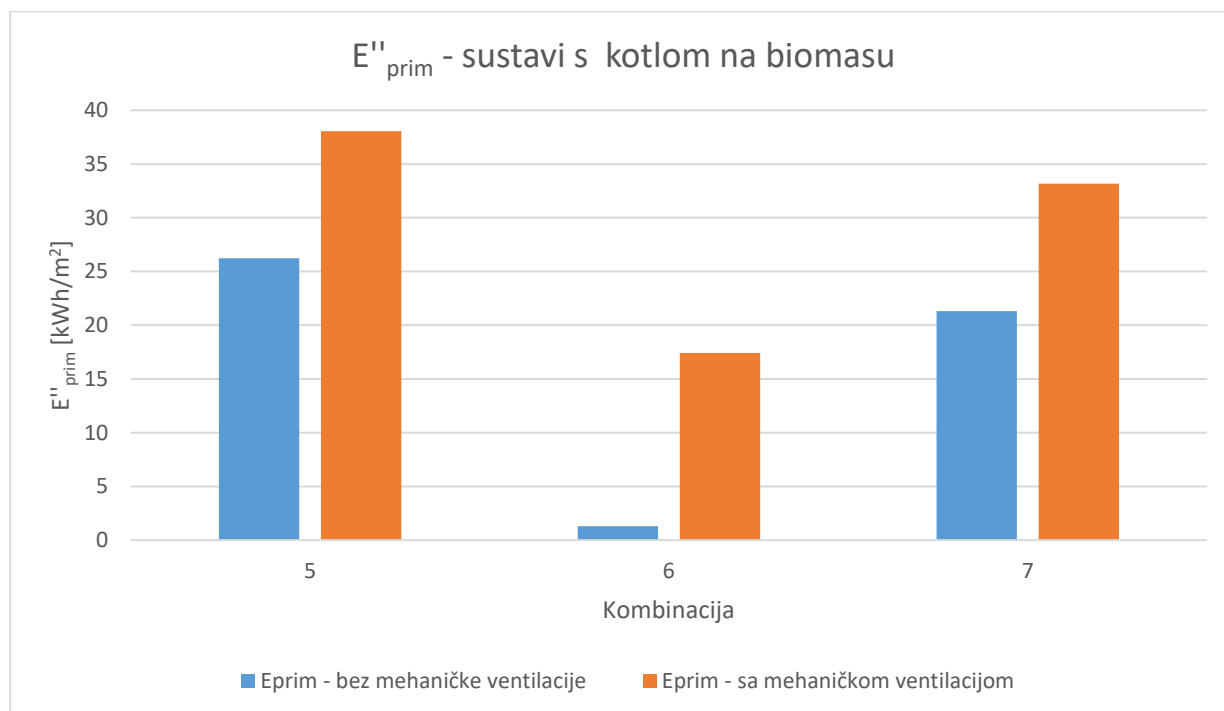
3.3.3. Sustavi s kotlom na biomasu s automatskim punjenjem i ventilatorskim plamenikom

Poglavlje 3.3.3. opisuje centralne sustave grijanja i pripreme PTV-a putem kotlova na biomasu i lokalnog sustava hlađenja putem split klima uređaja. Dijagram 1 prikazuje usporedbu vrijednosti specifične primarne energije pojedinih kombinacija. Za razliku od sustava sa kondenzacijskim i protočnim plinskim bojlerima, na dijagramu se može uvidjeti kako mehanička ventilacija ima negativan utjecaj na primarnu energiju. Iako se isporučena energija biomase u kWh značajno smanji (više nego se poveća uvoz električne energije), faktor primarne energije biomase ima presudan utjecaj. Naime, njegova vrijednost (0,2) je višestruko manja od faktora primarne energije uvezene iz mreže (1,583). Stoga, i manje povećanje isporučene električne energije u kWh ima veći utjecaj na primarnu energiju od većeg smanjenja isporučene energije biomase u kWh. Najnižu vrijednost primarne energije ima kombinacija sa kotlom na biomasu i fotonaponskom elektranom bez mehaničke ventilacije. Razlog leži u činjenici da je niska vrijednost primarne energije biomase (zbog faktora primarne energije) još dodatno smanjena zbog izvoza električne energije proizvedene od strane fotonaponske elektrane. Kombinacija 6 sa mehaničkom ventilacijom ima veću vrijednost primarne energije jer

fotonaponska elektrana ne može pokriti sve potrebe za električnom energijom. Iako je vrijednost veća, može se uočiti da je ona manja od kombinacije 7 bez mehaničke ventilacije. To znači da je važnije utjecati na smanjenje uvoza električne energije (fotonaponska elektrana) nego na smanjenje isporučene energije biomase koje solarni toplovodni sustavi osiguravaju. Tablica 15 prikazuje godišnje potrošnje biomase i električne energije.

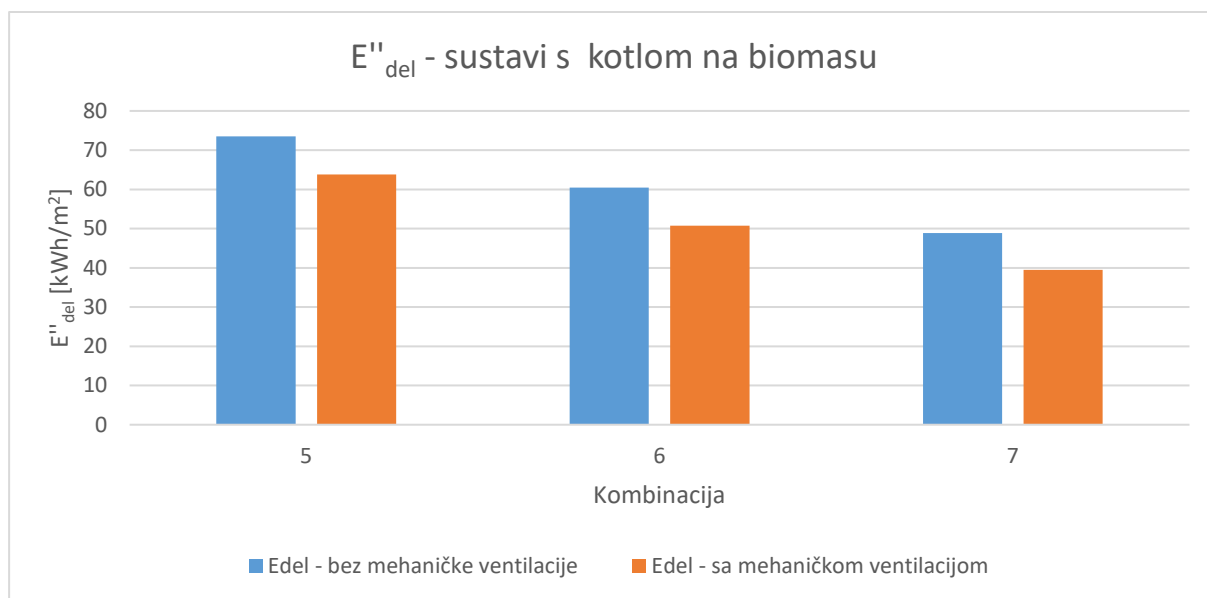
Tablica 16 Godišnja potrošnja energenata – sustav s kotlom na biomasu

	Bez mehaničke ventilacije		Sa mehaničkom ventilacijom	
	Godišnja potrošnja biomase (kg)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)	Godišnja potrošnja biomase (kg)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)
Kombinacija 5	12430,20	7965,86	8679,95	17455,04
Kombinacija 6	12430,20	-4476,80	8679,95	5012,38
Kombinacija 7	7738,19	7960,19	4036,61	17446,36



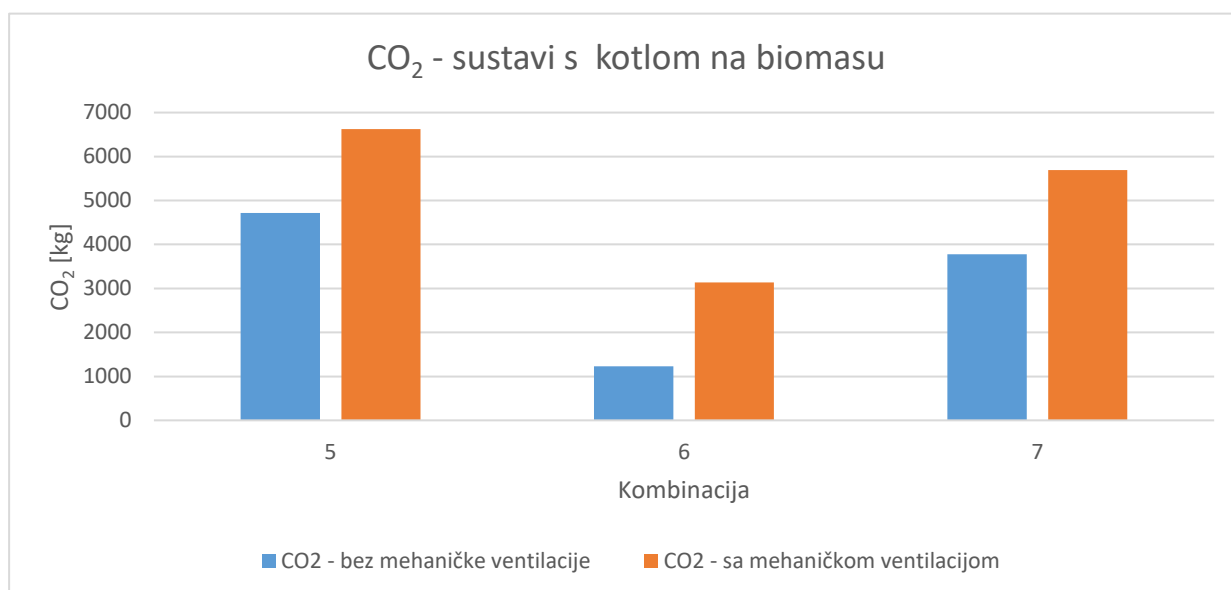
Dijagram 9 Primarna energija sustava s kotlom na biomasu

Isporučena energija pojedine kombinacije može se vidjeti na dijagramu 10. Isporučena energija je najniža u slučaju kombinacije 7 jer solarni toplovodni sustav značajno smanjuje potrebnu količinu biomase što ima veći utjecaj od izvezene električne energije u slučaju kombinacije 6. Također, zbog većeg smanjenja potrebe za isporučenom energijom biomase u kWh u odnosu na povećanje isporučene električne energije u kWh, E_{del} sustava s mehaničkom ventilacijom opada u usporedbi sa sustavima bez nje.



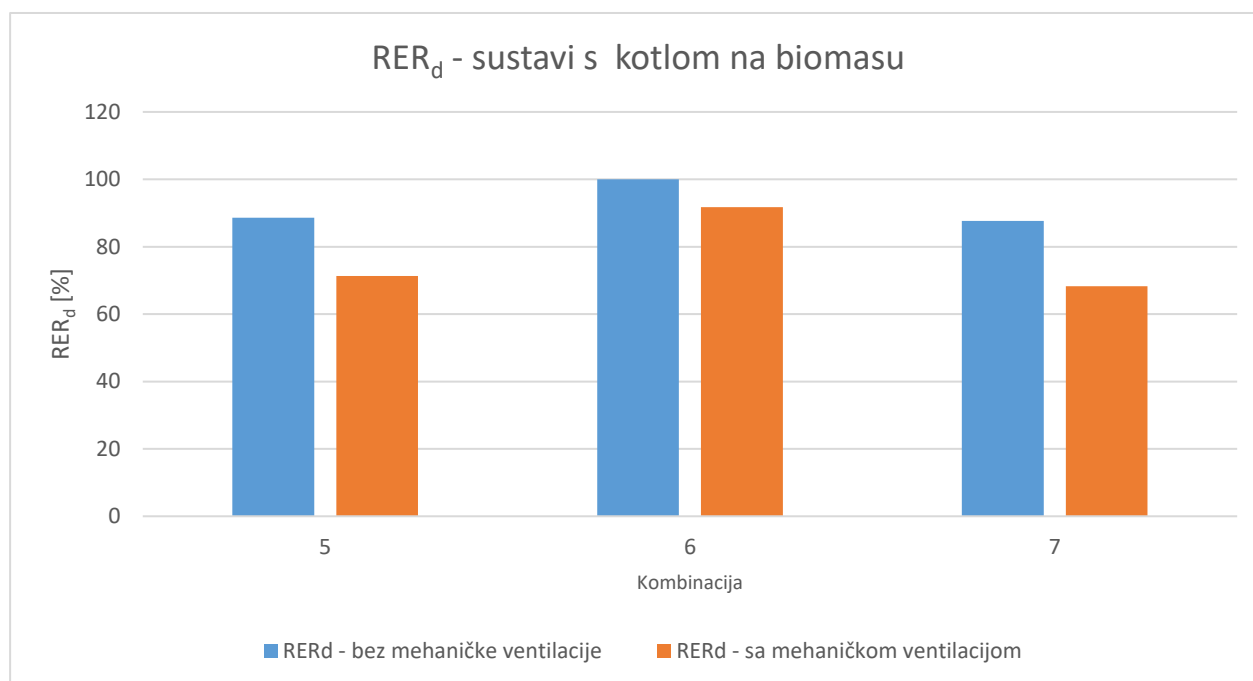
Dijagram 10 Isporučena energija sustava s kotlom na biomasu

Emisije CO₂ sustava s kotlom na biomasu opisuje dijagram 11. Specifične emisije CO₂ kod biomase su 40 g/kWh a električne energije 280 g/kWh. Sustavi s mehaničkom ventilacijom troše više električne energije, pa su i emisije više.



Dijagram 11 Emisije CO₂ sustava s kotlom na biomasu

Dijagram 12 prikazuje udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji. Može se uvidjeti kako sustavi bez mehaničke ventilacije imaju veće udjele obnovljive energije u ukupno isporučenoj jer uvoze manje električne energije koja se smatra neobnovljivom. Također, može se uvidjeti da kombinacija 6 (sustav sa fotonaponskom elektranom) postiže 100% udjela obnovljive energije jer fotonaponska elektrana zadovoljava sve potrebe električne energije za rad sustava, a biomasa se smatra obnovljivom energijom.



Dijagram 12 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s kotlom na biomasu

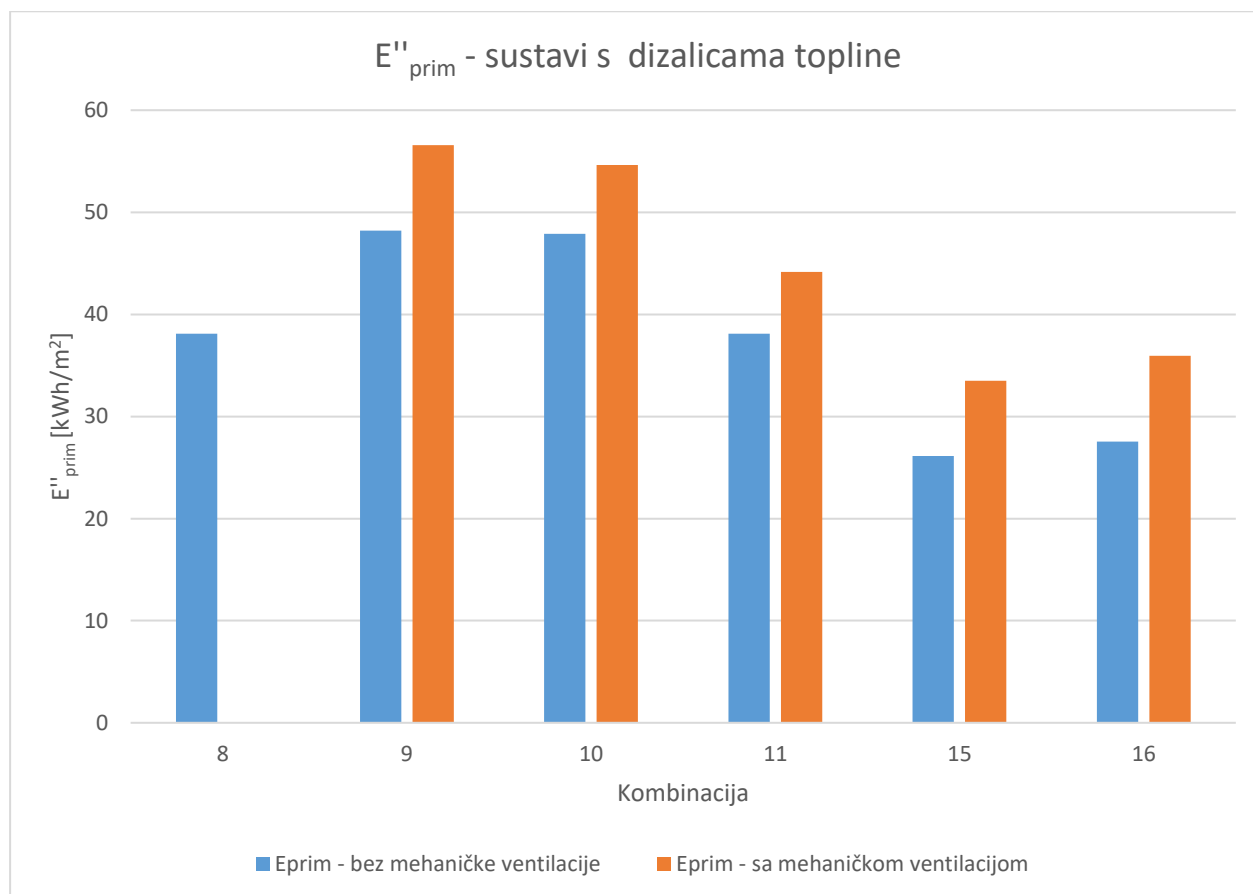
3.3.4. Sustavi s dizalicama topline zrak – voda

Poglavlje 3.3.4. opisuje centralne i lokalne sustave grijanja i pripreme PTV-a putem dizalica toplina zrak - voda te centralnog i lokalnog sustava hlađenja putem dizalica toplina zrak – voda i split klima uređaja. Kod kombinacije 8 nisu analizirani sustavi s mehaničkom ventilacijom. Dijagram 13 prikazuje usporedbu primarne energije pojedinih kombinacija. Može se primijetiti kako ugradnja mehaničke ventilacije u obrađenu zgradu nema smisla sa stajališta primarne energije. Iako ugradnja mehaničke ventilacije doprinosi smanjenju potrebne električne energije za pogon dizalica topline, povećanje električne energije za njen rad nadmašuje uštede koje je ostvarila. Nadalje, može se uočiti da kombinacije koje imaju fotonaponsku elektranu rezultiraju i najmanjom primarnom energijom. Uspoređujući centralne i lokalne sustave grijanja i pripreme PTV-a, dolazi se do zaključka da lokalne dizalice topline troše manje primarne energije. Razlog su niži temperaturni režim te gubici razvoda. Promatrajući kombinacije 9 i 10 te 15 i 16 može

se zaključiti kako je centralni sustav hlađenja putem dizalice topline učinkovitiji od lokalnih split klima uređaja. Tablica 16 daje uvid u godišnju potrošnju električne energije.

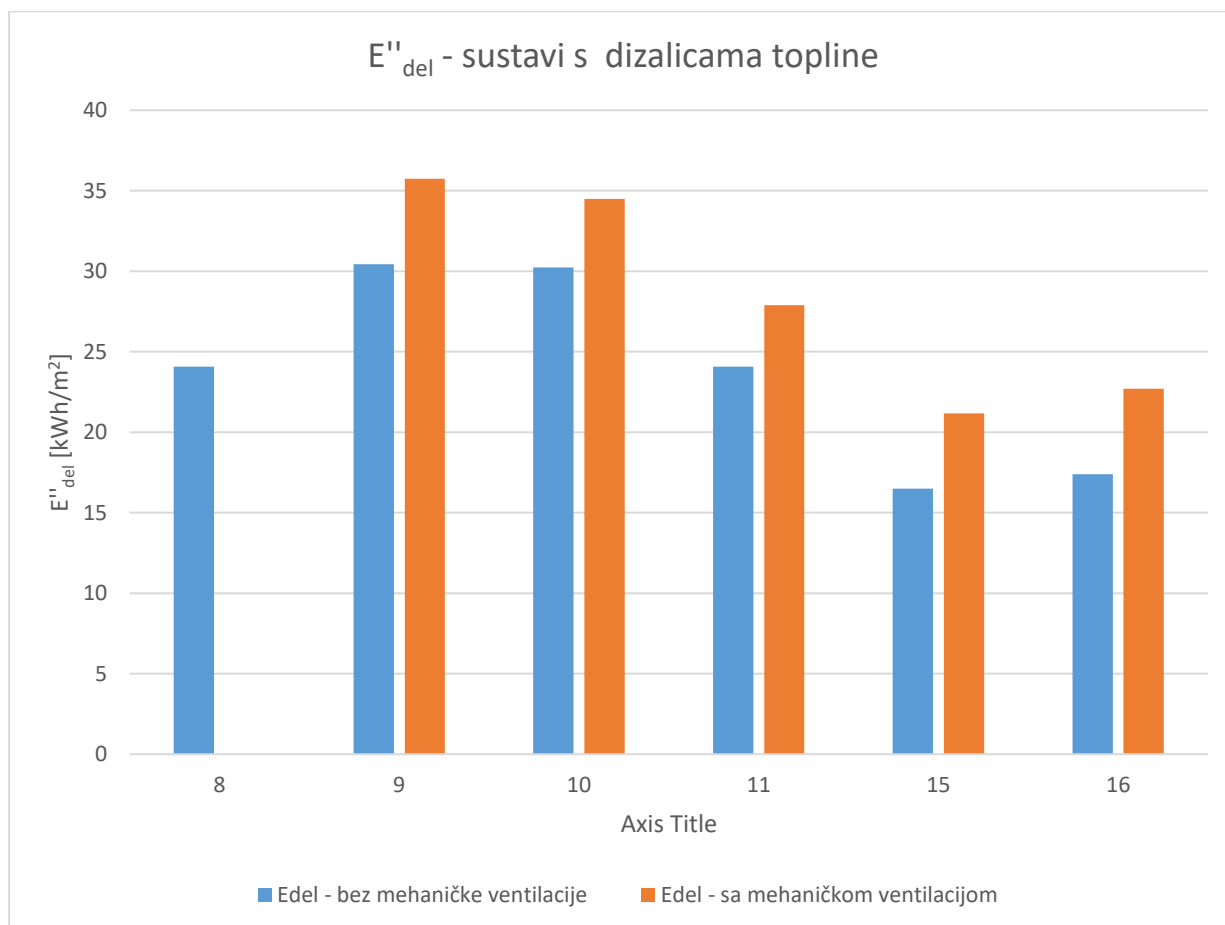
Tablica 17 Godišnja potrošnja energenata – sustav s dizalicama topline zrak - voda

	Bez mehaničke ventilacije	Sa mehaničkom ventilacijom
	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)	Godišnja potrošnja električne energije (kWh)
Kombinacija 8	22975,75	
Kombinacija 9	29046,19	34105,57
Kombinacija 10	28858,87	32922,81
Kombinacija 11	22970,59	26609,88
Kombinacija 15	15746,78	20197,03
Kombinacija 16	16603,53	21662,91



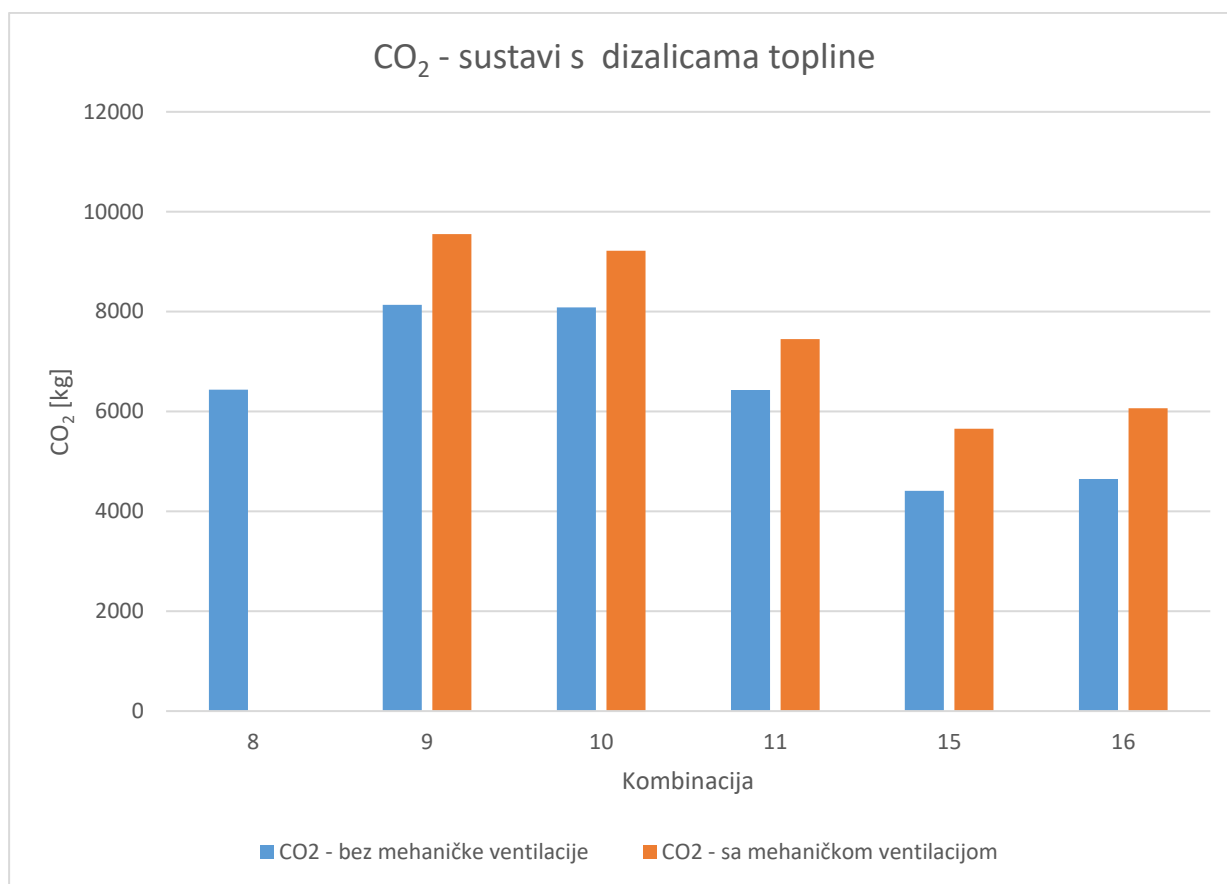
Dijagram 13 Primarna energija sustava s dizalicom topline

S obzirom da je isporučena energija jedino električna energija, rezultati će biti slični rezultatima primarne energije s tom razlikom da se umanjuju za faktor primarne energije (1,583). Rezultati su prikazani na dijagramu 14.



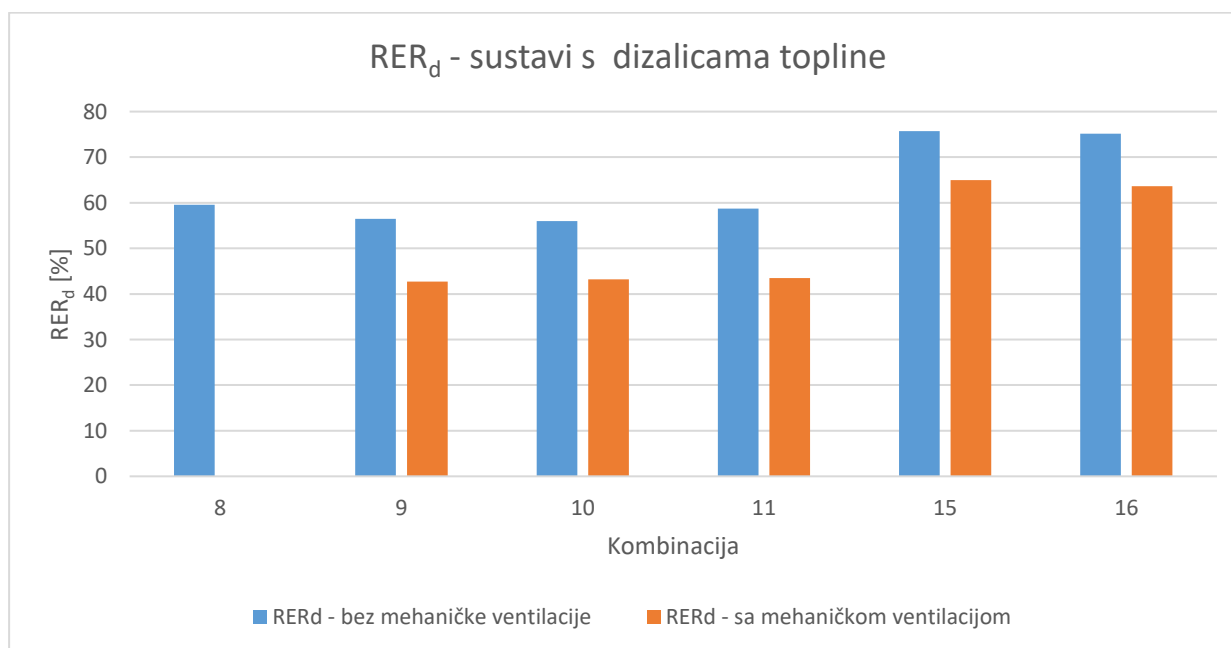
Dijagram 14 Isporučena energija sustava s dizalicom topline

Također, slična će biti raspodjela i emisija CO₂. Rezultati su prikazani na dijagramu 15.



Dijagram 15 Emisije CO₂ sustava s dizalicom topline

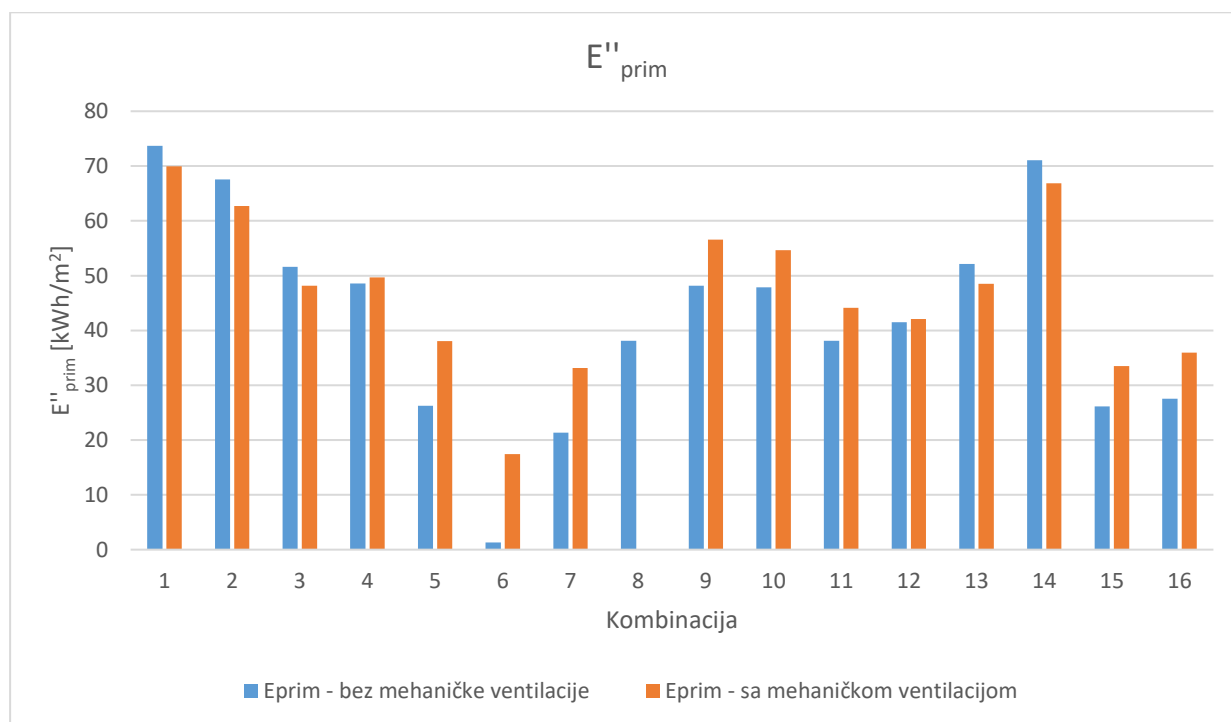
Dijagram 16 prikazuje udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji. Najveći udio obnovljive energije imaju dakako sustavi s fotonaponskom elektranom. Graf prikazuje kako se udio obnovljive energije povećava s manjim uvozom električne energije.



Dijagram 16 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj energiji sustava s dizalicom topline

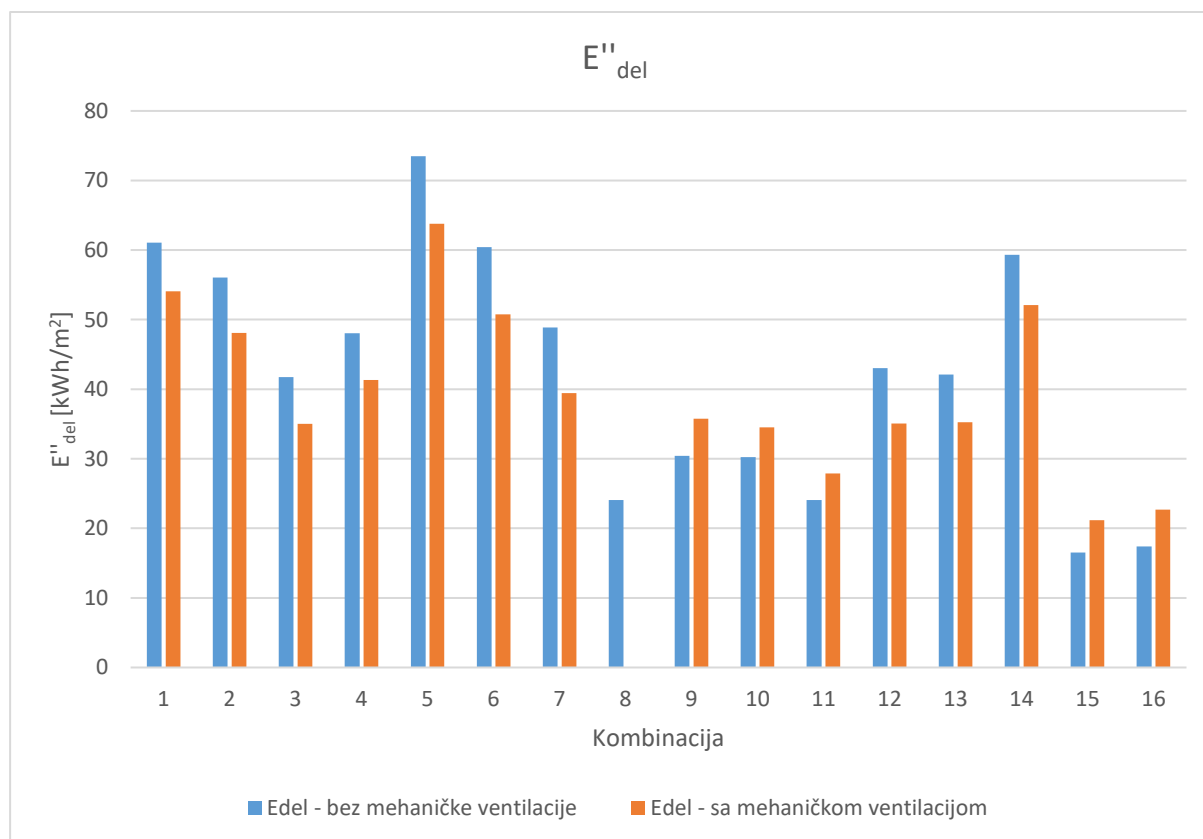
3.4. Analiza rezultata

U ovome su poglavlju uspoređene sve obrađene kombinacije te predložena najbolja kombinacija. Dijagram 17 prikazuje usporedbu specifičnih primarnih energija svih kombinacija. Najveću specifičnu primarnu energiju imaju kombinacije 1 i 14 što je bilo i očekivano jer je u tim kombinacijama korišten prirodni plin kao glavni energent uz nedostatak ugrađenih obnovljivih izvora. U slučajevima bez mehaničke ventilacije, njihova vrijednost E''_{prim} prelazi 70 kWh/m^2 . Uz korištenje solarnog toplovodnog ili fotonaponskog sustava s kondenzacijskim ili kombiniranim plinskim kotlovima, vrijednosti primarne energije padaju na vrijednosti oko i ispod 50 kWh/m^2 . Kombinacije 8-11 te 15 i 16 predstavljaju sustave sa centralnim i lokalnim dizalicama topline. Primjećuje se kako dizalice topline u prosjeku rezultiraju manjim vrijednostima E''_{prim} od sustava s plinskim kotlovima, a to je posebno izraženo ukoliko se uz dizalicu topline ugradi i fotonaponski sustav. Tada, vrijednosti E''_{prim} padaju ispod 30 kWh/m^2 u slučajevima bez mehaničke ventilacije, odnosno ispod 40 kWh/m^2 u slučajevima sa mehaničkom ventilacijom. Najniže vrijednosti E''_{prim} daju slučajevi s kotlom na biomasu zbog malog faktora primarne energije biomase (0,2). Ukoliko se uz kotao na biomasu ugradi i fotonaponska elektrana, tada vrijednosti primarne energije poprimaju vrlo male vrijednosti u slučaju bez mehaničke ventilacije.



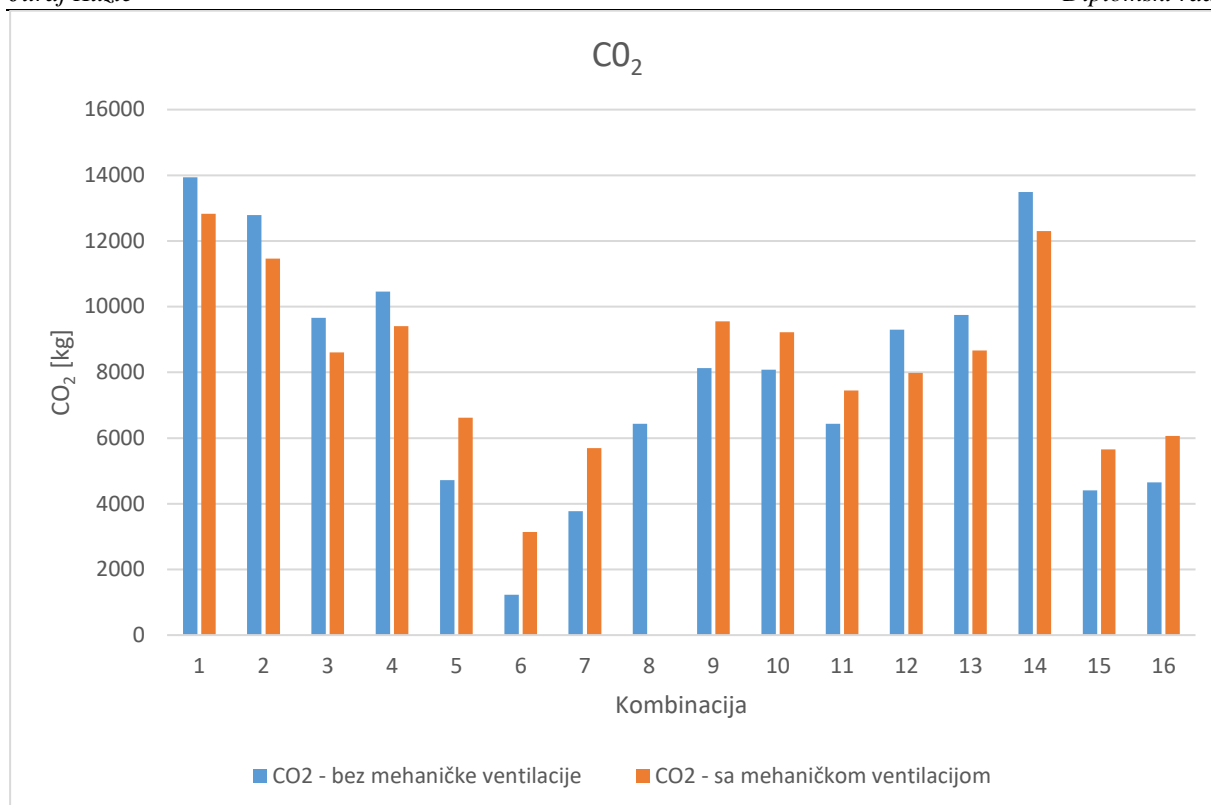
Dijagram 17 Primarna energija

Dijagram 18 omogućuje usporedbu specifične isporučene energije analiziranih sustava. Najveće vrijednosti isporučene energije poprimaju kombinacije koje koriste biomasu i prirodni plin kao ogrjevni energent. U kombinaciji 5 bez mehaničke ventilacije vrijednost specifične isporučene energije prelazi vrijednost 70 kWh/m^2 . S druge strane, najniže vrijednosti isporučene energije poprimaju sustavi s dizalicama topline. Dizalice topline koje imaju ugrađeni fotonaponski sustav poprimaju vrijednosti ispod oko i ispod 20 kWh/m^2 .



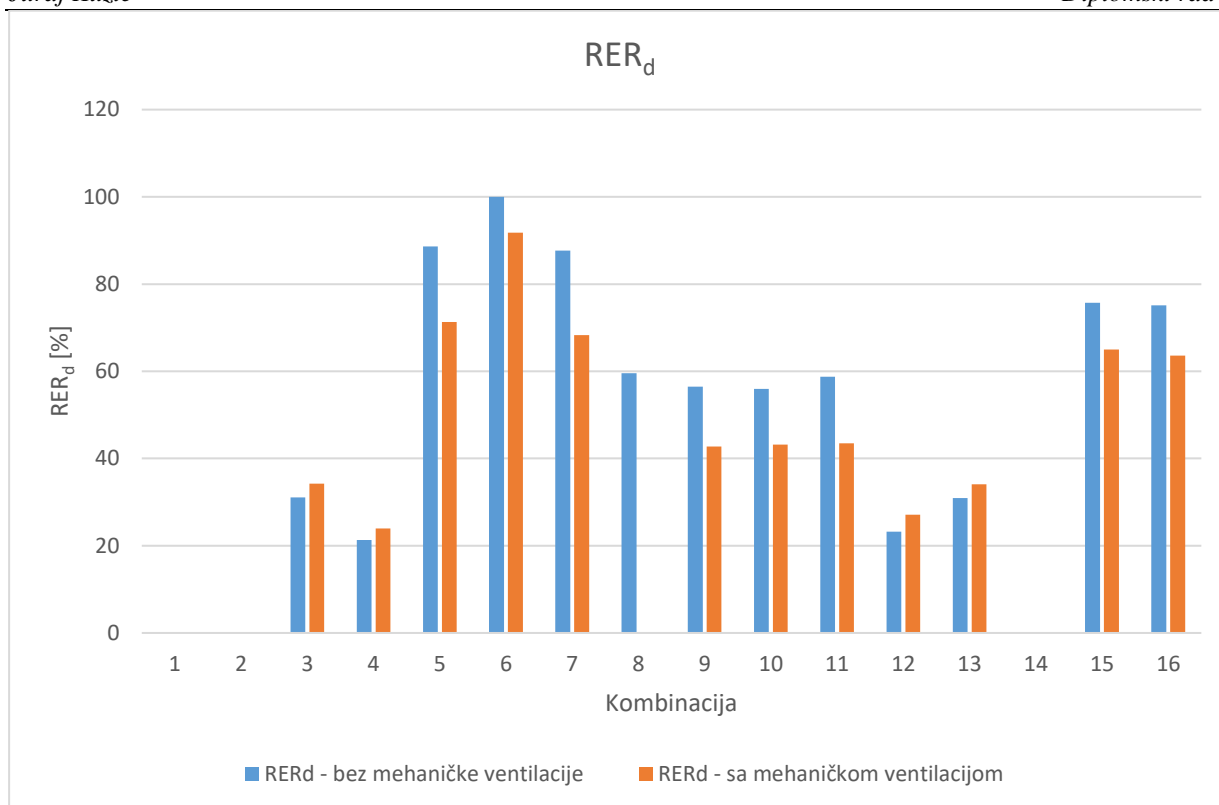
Dijagram 18 Isporučena energija

Dijagram 19 daje uvid u emisije CO_2 pojedine kombinacije termotehničkih sustava. Najveće emisije daju kombinacije 1 i 14 koje koriste centralne kondenzacijske kotlove bez dodatnih obnovljivih izvora. Njihove emisije se približavaju brojcima od 14 t godišnje. Sustavi s dizalicama topline također imaju velike vrijednosti emisija zbog uvezene električne energije koja služi za pogon istih. Najmanje vrijednosti emisija poprimaju sustavi s kotlom na biomasu zbog niskih specifičnih emisija biomase od 40 g/kWh . Najnižu vrijednost emisija poprima kombinacija 6 bez mehaničke ventilacije, a ta vrijednost iznosi manje od $1,5 \text{ t}$ godišnje.



Dijagram 19 Emisije CO₂

Dijagram 20 prikazuje udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj. Naime, kombinacije 1, 2 i 14 koriste prirodni plin kao energent za grijanje i pripremu PTV, električnu energiju kao energent za hlađenje te nemaju lokalnih obnovljivih izvora energije. S obzirom da se sva uvezena električna energija smatra neobnovljivom, vrijednost RER_d -a ovakvih sustava poprima vrijednost 0. Sustavi s kotlom na biomasu postižu najveće vrijednosti RER_d -a jer se sva uvezena biomasa smatra obnovljivom. Kombinacija 6 bez mehaničke ventilacije koja kombinira kotao na biomasu i fotonaponsku elektranu ima RER_d u iznosu od 100% što znači da je sva energija koju zgrada koristi u tom slučaju obnovljiva. Dizalice topline sa fotonaponskim sustavom poprimaju vrijednosti obnovljive energije iznad 60% (čak i sa mehaničkom ventilacijom), dok se one bez fotonaponskog sustava nalaze u intervalu 40% - 60% ovisno o tome imaju li mehaničku ventilaciju ili ne.



Dijagram 20 Udio obnovljive energije u ukupno isporučenoj

3.5. Usporedba rezultata

Ovo poglavlje daje prikaz usporedbe promatranih kombinacija za različite debljine vanjske izolacije zgrade. Numeričke vrijednosti za debljinu izolacije od 12 cm su prikazane tablicama 17, 18, a za debljinu od 20 cm tablice 19 i 20.

Tablica 18 Rezultati sustava bez mehaničke ventilacije – debljina izolacije 12 cm

Sustavi bez mehaničke ventilacije							
Kombinacija	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)	E''_{prim} (kWh/m ²)	E''_{del} (kWh/m ²)	CO ₂ (kg)	RER _d (%)	RER _p (%)
1	37,36	22,37	76,74	63,72	14531,10	0,00	0,00
2	37,36	22,37	70,68	58,82	13396,88	0,00	0,00
3	37,36	22,37	54,60	44,40	10241,50	29,84	24,01
4	37,36	22,37	51,58	50,68	11047,16	20,46	20,93
5	37,36	22,37	26,79	76,52	4822,98	89,14	68,12
6	37,36	22,37	1,81	63,48	1339,04	100,00	100,00
7	37,36	22,37	21,87	51,94	3883,78	88,28	69,84
8	37,36	22,37	39,28	24,82	6630,02	60,25	40,78
9	37,36	22,37	49,24	31,10	8310,23	57,19	37,78
10	37,36	22,37	49,09	31,01	8285,28	56,54	37,15
11	37,36	22,37	39,41	24,89	6651,16	59,28	39,81
12	37,36	22,37	44,61	45,78	9912,94	22,17	23,44
13	37,36	22,37	55,15	44,75	10335,07	29,68	23,79
14	37,36	22,37	74,14	61,95	14079,95	0,00	0,00
15	37,36	22,37	27,35	17,28	4615,93	75,55	61,00
16	37,36	22,37	28,60	18,06	4826,29	75,14	60,36

Tablica 19 Rezultati sustava sa mehaničkom ventilacijom – debljina izolacije 12 cm

Sustavi sa mehaničkom ventilacijom							
Kombinacija	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)	E''_{prim} (kWh/m ²)	E''_{del} (kWh/m ²)	CO ₂ (kg)	RER _d (%)	RER _p (%)
1	22,87	21,3	73,30	56,91	13470,11	0,00	0,00
2	22,87	21,3	66,45	51,29	12180,54	0,00	0,00
3	22,87	21,3	51,23	37,64	9193,34	32,95	22,79
4	22,87	21,3	53,00	44,16	10052,05	22,80	19,93
5	22,87	21,3	38,90	67,08	6779,46	72,53	49,18
6	22,87	21,3	18,25	54,04	3295,52	91,97	77,72
7	22,87	21,3	33,98	42,47	5840,94	69,76	48,38
8	22,87	21,3					
9	22,87	21,3	57,89	36,57	9770,62	43,86	26,20
10	22,87	21,3	56,09	35,43	9466,60	44,20	26,46
11	22,87	21,3	45,87	28,97	7741,09	44,86	26,99
12	22,87	21,3	45,81	38,25	8696,60	25,42	22,62
13	22,87	21,3	51,60	37,88	9256,54	32,81	22,66
14	22,87	21,3	70,28	54,95	12955,12	0,00	0,00
15	22,87	21,3	34,99	22,10	5905,18	65,04	47,89
16	22,87	21,3	37,25	23,53	6286,68	63,88	46,49

Tablica 20 Rezultati sustava bez mehaničke ventilacije – debljina izolacije 20 cm

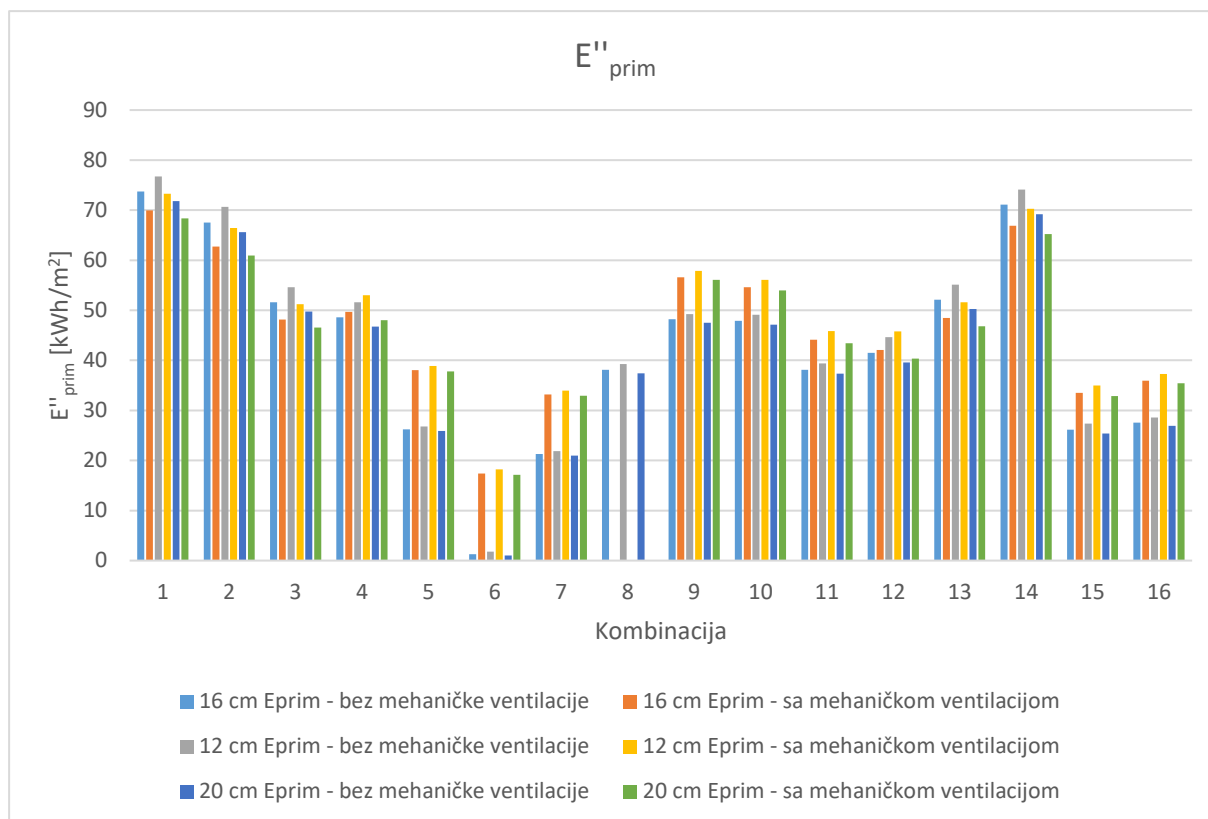
Sustavi bez mehaničke ventilacije							
Kombinacija	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)	E''_{prim} (kWh/m ²)	E''_{del} (kWh/m ²)	CO ₂ (kg)	RER _d (%)	RER _p (%)
1	32,92	22,58	71,84	59,43	13581,15	0,00	0,00
2	32,92	22,58	65,58	54,36	12408,14	0,00	0,00
3	32,92	22,58	49,74	40,14	9298,07	31,91	25,50
4	32,92	22,58	46,75	46,39	10097,21	21,94	22,70
5	32,92	22,58	25,91	71,6	4651,65	88,30	67,04
6	32,92	22,58	0,99	58,56	1167,70	100,00	100,00
7	32,92	22,58	20,98	47,01	3711,62	87,28	68,71
8	32,92	22,58	37,40	23,62	6311,87	59,14	39,67
9	32,92	22,58	47,54	30,03	8024,11	56,01	36,65
10	32,92	22,58	47,13	29,77	7954,63	55,55	36,22
11	32,92	22,58	37,31	23,57	6296,28	58,34	38,88
12	32,92	22,58	39,57	41,32	8924,20	23,99	25,79
13	32,92	22,58	50,24	40,47	9383,84	31,74	25,27
14	32,92	22,58	69,20	57,66	13123,45	0,00	0,00
15	32,92	22,58	25,37	16,03	4281,89	75,82	61,56
16	32,92	22,58	26,90	16,99	4540,16	75,11	60,48

Tablica 21 Rezultati sustava sa mehaničkom ventilacijom – debljina izolacije 20 cm

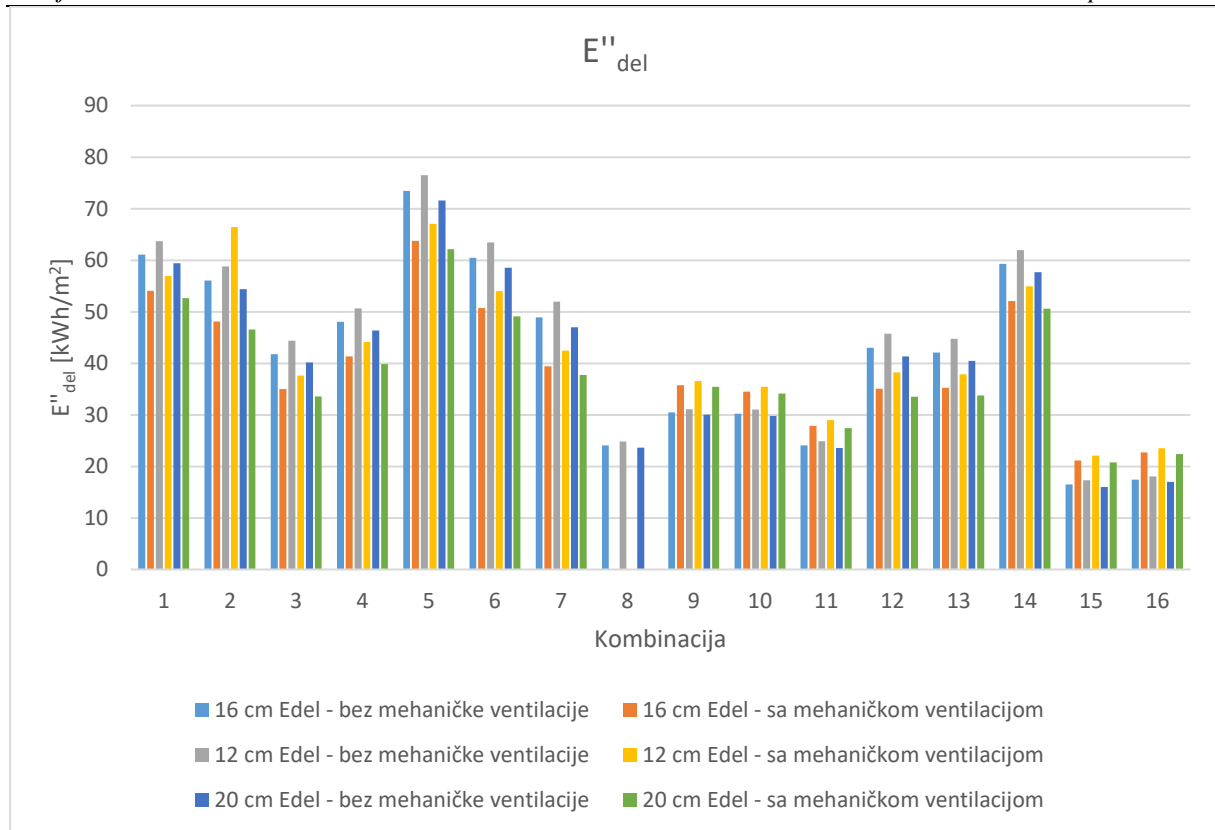
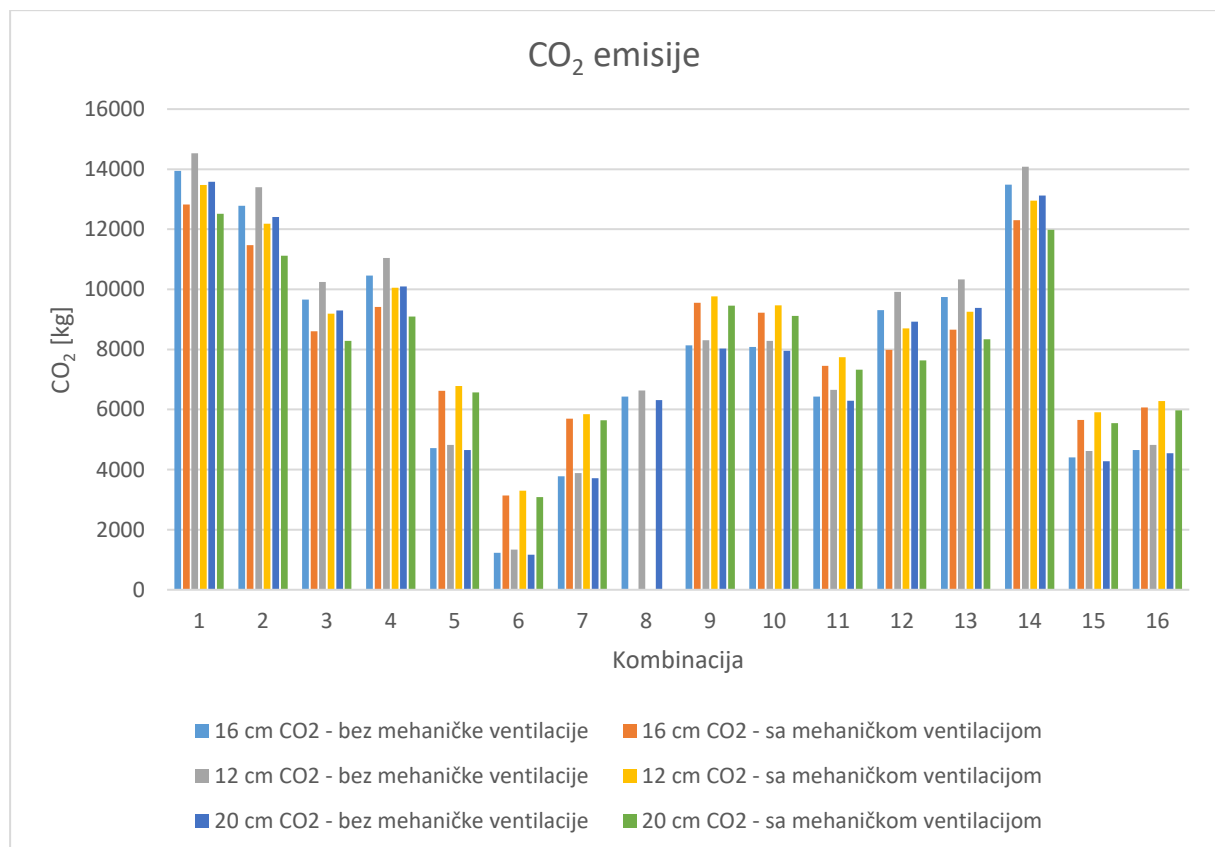
Sustavi sa mehaničkom ventilacijom							
Kombinacija	$Q''_{h,nd}$ (kWh/m ²)	$Q''_{c,nd}$ (kWh/m ²)	E''_{prim} (kWh/m ²)	E''_{del} (kWh/m ²)	CO ₂ (kg)	RER _d (%)	RER _p (%)
1	18,08	21,54	68,34	52,62	12513,91	0,00	0,00
2	18,08	21,54	60,96	46,56	11122,47	0,00	0,00
3	18,08	21,54	46,52	33,57	8285,01	35,12	23,90
4	18,08	21,54	48,04	39,88	9096,04	24,64	21,59
5	18,08	21,54	37,79	62,12	6571,74	70,47	47,12
6	18,08	21,54	17,15	49,08	3087,79	91,46	77,46
7	18,08	21,54	32,90	37,75	5639,03	67,21	45,93
8	18,08	21,54					
9	18,08	21,54	56,05	35,41	9460,02	41,92	24,69
10	18,08	21,54	53,99	34,11	9112,82	42,50	25,14
11	18,08	21,54	43,42	27,43	7327,91	42,52	25,16
12	18,08	21,54	40,32	33,52	7638,53	28,01	25,04
13	18,08	21,54	46,82	33,78	8337,53	34,99	23,78
14	18,08	21,54	65,23	50,62	11984,39	0,00	0,00
15	18,08	21,54	32,87	20,77	5548,19	64,82	47,79
16	18,08	21,54	35,41	22,37	5976,07	63,31	45,99

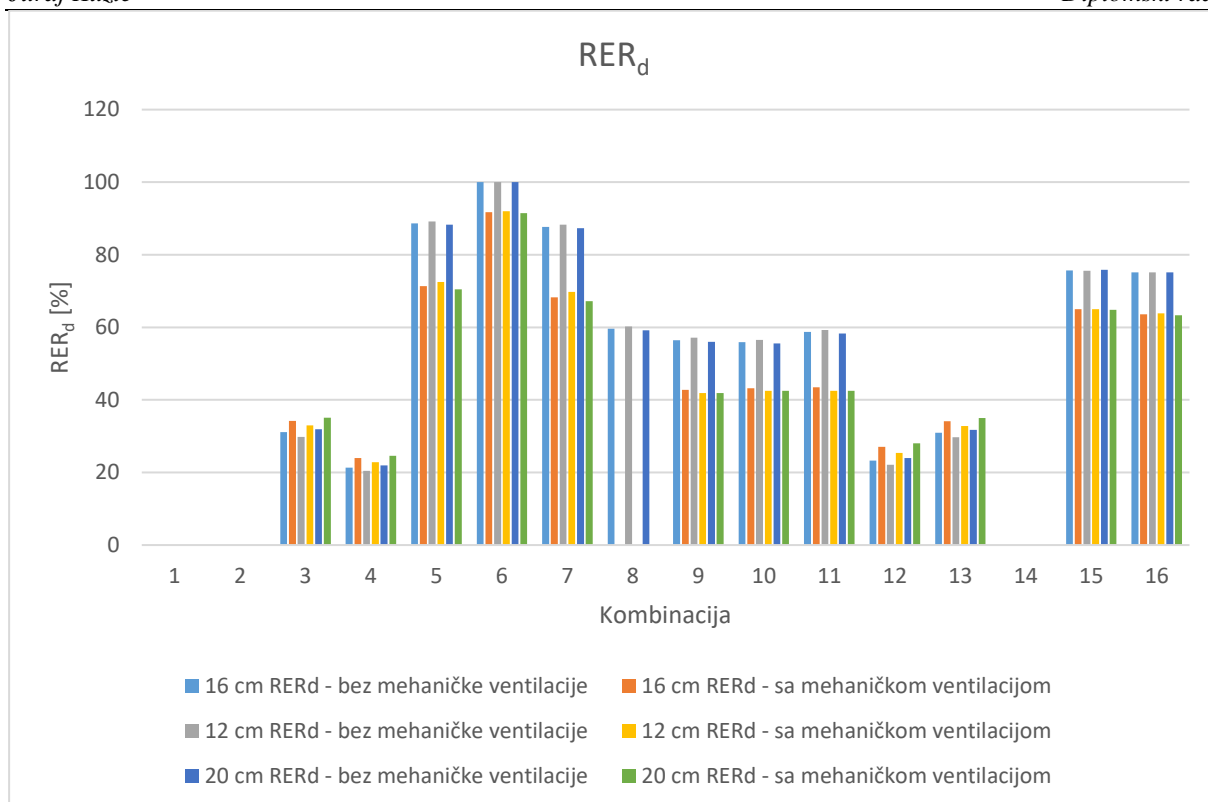
Nakon prikaza numeričkih rezultata slijedi i grafički prikaz. Dijagram 21 prikazuje usporedbe kretanja specifične primarne energije za sve kombinacije i sve debljine izolacije vanjskih zidova (12 cm, 16 cm i 20 cm). S obzirom na primarnu energiju, vidi se kako kombinacija 6 daje najniže vrijednosti za debljinu izolacije 20 cm. Također, niske vrijednosti pokazuju kombinacije 5, 7, 15 i 16 (kombinacije sa sustavom grijanja putem kotla na biomasu i dizalica topline sa dodatkom fotonaponskog sustava). Može se zamijetiti kako promjena debljine izolacije djeluje na promjenu E''_{prim} , no ne značajno. Usporedba ukupno isporučene energije dovodi do zaključka kako kombinacije s dizalicama topline i fotonaponskom elektranom (kombinacija 15 i 16) zahtijevaju najmanje isporučene energije. Po emisijama CO₂ i RER_d-u kombinacije s kotlom na biomasu i dizalicama topline s fotonaponskom elektranom daju najbolje rezultate. Utjecaj mehaničke ventilacije s povratom topline objašnjen je u poglavlju 3.3., no primjećuje se sličnost u kretanjima vrijednosti (E''_{prim} , E''_{del} , emisija CO₂ te RER_d) sa

sustavima bez nje za različite debljine izolacije. Odabir optimalnog rješenja, osim o tehničkoj, ovisi i o ekonomskoj analizi koja je obrađena u poglavlju 4.



Dijagram 21 Usporedba E''_{prim}

Dijagram 22 Usporedba E''_{del} Dijagram 23 Usporedba emisija CO_2

**Dijagram 24 Usporedba RER_d**

4. EKONOMSKA ANALIZA

Ekonomski analiza temelji se na izračunu globalnog troška kao neto sadašnje vrijednosti prema delegiranoj uredbi 244/2012 [12] sa smjernicama 2012/C 115/01 [13]. Sukladno uredbi, postoji nekoliko kategorija troškova:

- Troškovi početnog ulaganja
- Tekući troškovi – troškovi održavanja, zamjene dijelova, zarada od proizvedene energije
- Troškovi energije

Prilikom izračuna globalnog troška u obzir su uzeti svi troškovi koji su vezani na energetska svojstva zgrade. Procjena budućih kretanja cijena plina i električne energije se temelji na uredbi 2012/C 115/01. Prema toj uredbi, godišnji rast cijene plina iznosi 2,8%, električne energije 3,75%. Procjena godišnjeg povećanja cijene biomase (peleta) iznosi 0,24%. Troškovi održavanja izračunati su sa prosječnom stopom inflacije od 1,7% godišnje.

4.1. Proračun globalnog troška

Globalni trošak zgrada i dijelova zgrada se računa prema formuli:

$$C_g(\tau) = C_1 + \sum_j (\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau}(j)) \quad [€]$$

Pri čemu:

τ - razdoblje izračuna

$C_g(\tau)$ - globalni trošak (u odnosu na početnu godinu τ_0) tijekom razdoblja izračuna

C_1 - troškovi početnog ulaganja za mjeru odnosno skup mjera j

$C_{a,i}(j)$ - godišnji trošak tijekom godine i za mjeru odnosno skup mjera j

$V_{f,\tau}(j)$ - preostala vrijednost mjere odnosno skupa mjera j na kraju razdoblja izračuna (diskontirana na početnu godinu τ_0) – u radu je pretpostavljena vrijednost od 15% investicijskog troška

$R_d(i)$ - diskontni faktor za godinu i temeljen na diskontnoj stopi r

Izračun diskontnog faktora može se dobiti iz formule:

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1+\frac{r}{100}}\right)^p \quad [-]$$

Pri čemu:

p – broj godina od početnog razdoblja

r – realna diskontna stopa

4.2. Procijenjeni investicijski troškovi, troškovi održavanja i pogona

Tablica 22 prikazuje procijenjene investicijske troškove te troškove održavanja.

Tablica 22 Procijenjeni investicijski troškovi i godišnji troškovi održavanja ugrađenih termotehničkih i izolacijskih sustava

	Opis	Investicijski trošak (€)	Trošak održavanja (€/god)
Grijanje i PTV	Centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem kondenzacijskog kotla (60 kW) s radijatorskim razvodom	160000	500
	Centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem kondenzacijskog kotla (60 kW) s ventilokonvektorskim razvodom	200000	500
	Centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem kondenzacijskog kotla (60 kW) s podnim grijanjem	190000	500
	Lokalni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem 15 kombi bojlera (24 kW) s radijatorskim razvodom	175000	2250
	Centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem kotla na pelete s automatskim punjenjem (60 kW) s radijatorskim razvodom	145000	1000
	Lokalni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem 15 dizalica topline zrak-voda (15 x 6kW) s podnim grijanjem	285000	4500
	Centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem dizalice topline zrak-voda 70 kW s podnim grijanjem	200000	700
	Centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem dizalice topline zrak-voda 70 kW s ventilokonvektorskim razvodom	210000	700
	Lokalni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem 15 dizalica topline zrak-voda (15 x 6kW) s ventilokonvektorskim razvodom	295000	4500
	Sustav 15 split klima jedinica (3,5 kW)	17500	3000
	Centralni sustav hlađenja putem zrakom hlađenog „chillera“ (75 kW)	50000	700
Obnovljivi izvori energije	Fotonaponski sustav -70 m ² fotonaponskih panela	15750	378
	Solarni toplovodni sustav 30 m ² - pločastih kolektora	13000	350

Mehanička ventilacija	Sustav mehaničke ventilacije	52500	800
Izolacijski troškovi	Izolacija vanjskih zidova 16 cm + izolacija ostalih građevnih dijelova ovojnice	45000	-
	Izolacija vanjskih zidova 12 cm + izolacija ostalih građevnih dijelova ovojnice	38000	-
	Izolacija vanjskih zidova 20 cm + izolacija ostalih građevnih dijelova ovojnice	47500	-

Prikazani troškovi su procijenjeni temeljem kretanja tržišnih cijena. Troškovi prirodnog plina iznose 0,0547 €/kWh, električne energije u jednoj tarifi 0,16895 €/kWh, a peleta 0,0548 €/kWh.

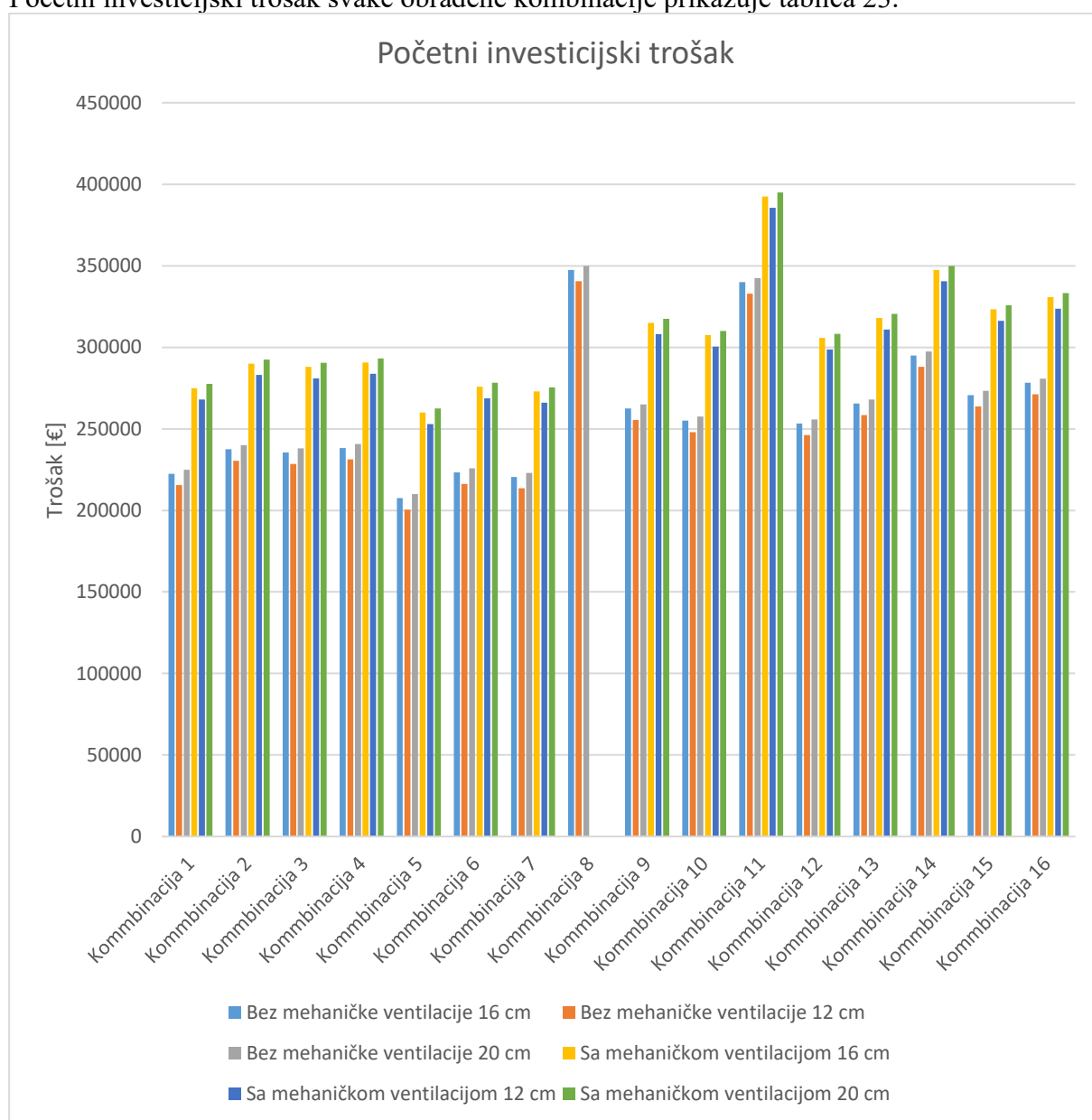
4.3. Rezultati kombinacija termotehničkih sustava za određenu debljinu izolacije vanjskog zida

Tablica 23 Početni investicijski troškovi kombinacija termotehničkih sustava te debljina izolacija vanjskih zidova

		Bez mehaničke ventilacije	Sa mehaničkom ventilacijom
		Početni investicijski trošak (€)	Početni investicijski trošak (€)
Debljina izolacije - 16 cm	Kombinacija 1	222500	275000
	Kombinacija 2	237500	290000
	Kombinacija 3	235500	288000
	Kombinacija 4	238250	290750
	Kombinacija 5	207500	260000
	Kombinacija 6	223250	275750
	Kombinacija 7	220500	273000
	Kombinacija 8	347500	
	Kombinacija 9	262500	315000
	Kombinacija 10	255000	307500
	Kombinacija 11	340000	392500
	Kombinacija 12	253250	305750
	Kombinacija 13	265500	318000
	Kombinacija 14	295000	347500
	Kombinacija 15	270750	323250
	Kombinacija 16	278250	330750
Debljina izolacije - 12 cm	Kombinacija 1	215500	268000
	Kombinacija 2	230500	283000
	Kombinacija 3	228500	281000
	Kombinacija 4	231250	283750
	Kombinacija 5	200500	253000
	Kombinacija 6	216250	268750
	Kombinacija 7	213500	266000
	Kombinacija 8	340500	
	Kombinacija 9	255500	308000
	Kombinacija 10	248000	300500
	Kombinacija 11	333000	385500
	Kombinacija 12	246250	298750
	Kombinacija 13	258500	311000
	Kombinacija 14	288000	340500
	Kombinacija 15	263750	316250
	Kombinacija 16	271250	323750
Debljina izolacije - 20 cm	Kombinacija 1	225000	277500
	Kombinacija 2	240000	292500
	Kombinacija 3	238000	290500
	Kombinacija 4	240750	293250

	Kombinacija 5	210000	262500
	Kombinacija 6	225750	278250
	Kombinacija 7	223000	275500
	Kombinacija 8	350000	
	Kombinacija 9	265000	317500
	Kombinacija 10	257500	310000
	Kombinacija 11	342500	395000
	Kombinacija 12	255750	308250
	Kombinacija 13	268000	320500
	Kombinacija 14	297500	350000
	Kombinacija 15	273250	325750
	Kombinacija 16	280750	333250

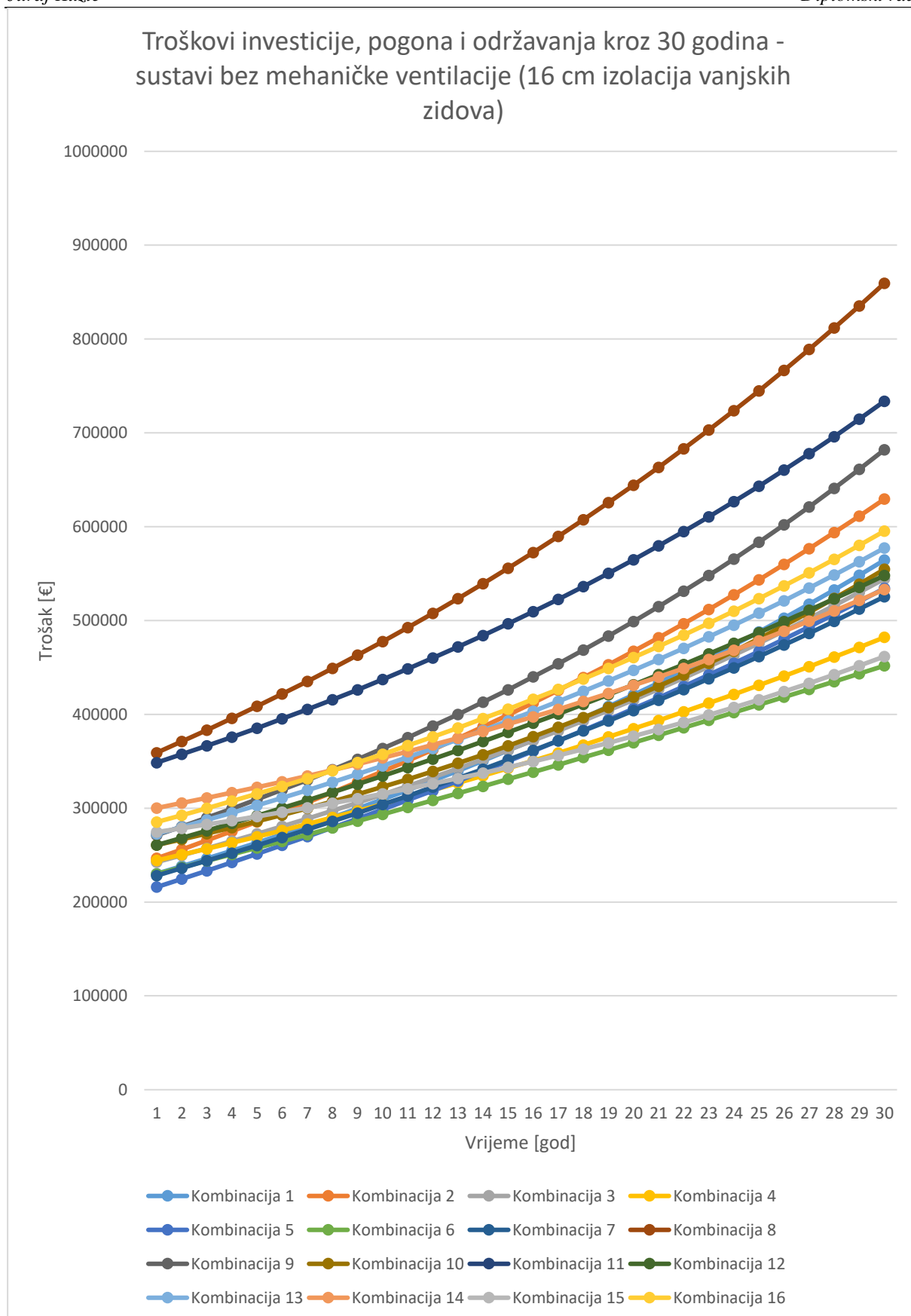
Početni investicijski trošak svake obrađene kombinacije prikazuje tablica 23.



Dijagram 25 Grafički prikaz početnog investicijskog troška sustava bez mehaničke ventilacije

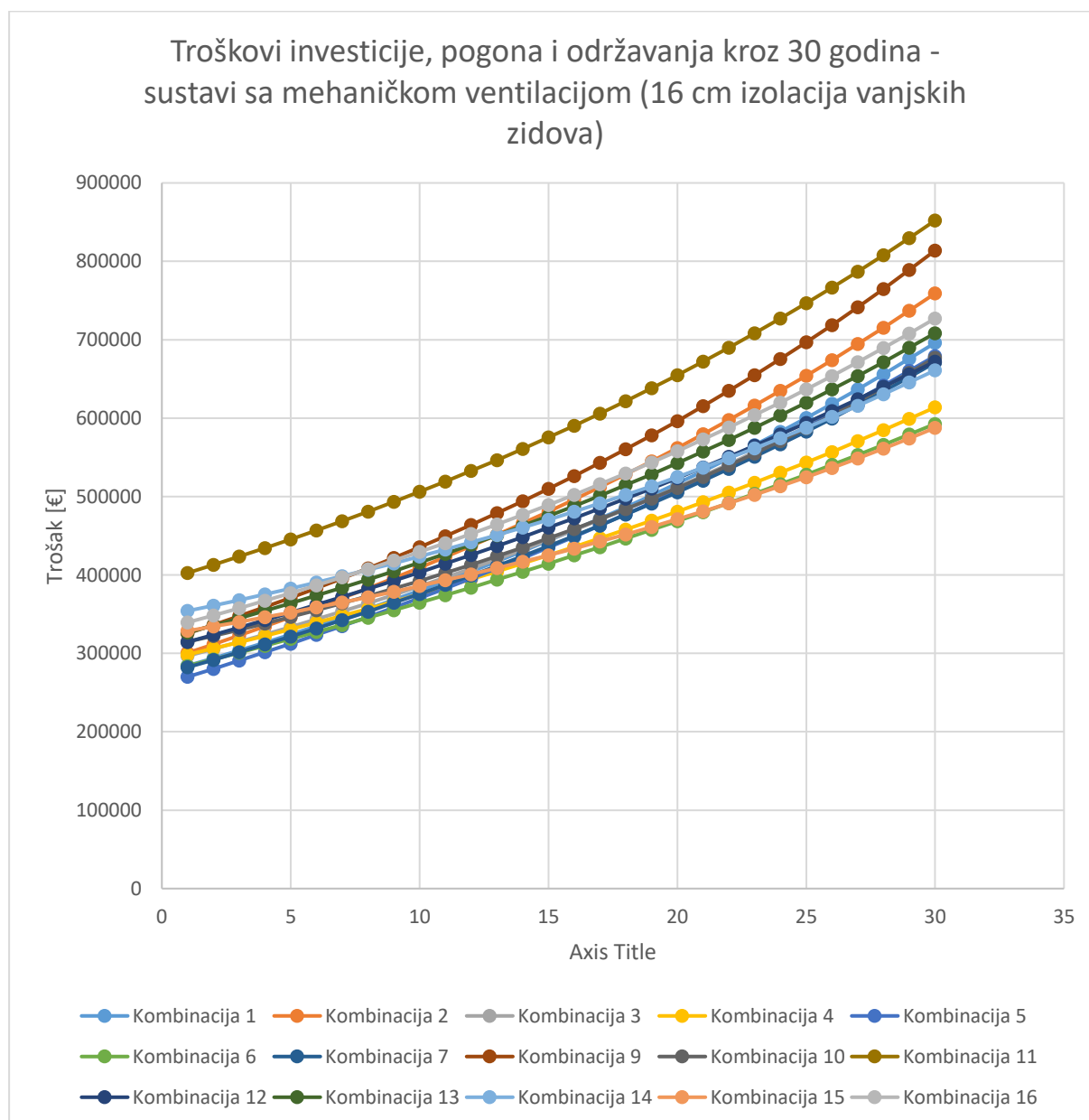
Dijagram 25 pokazuje razlike u investicijskom trošku različitih kombinacija i njihovih sustava grijanja i hlađenja te debljine izolacije objekta. Lako se može uočiti kako za istu kombinaciju sustava grijanja i hlađenja i načina ventilacije, najveću vrijednost investicijskog troška ima zgrada s najvećom debljinom izolacije vanjskih zidova od 20 cm. Nadalje, sustavi s mehaničkom ventilacijom rezultiraju povećanjem investicijskog troška. Uz sve navedeno, najveći početni investicijski trošak ima kombinacija 11 s mehaničkom ventilacijom i debljinom izolacije vanjskih zidova od 20 cm. Kombinaciju 11 čini lokalni sustav dizalica topline zrak - voda za grijanje i pripremu PTV-a, te centralni sustav hlađenja putem dizalice topline zrak - voda. Općenito, može se primjetiti kako najveći investicijski trošak imaju kombinacije s lokalnim sustavima grijanja i pripreme PTV-a putem dizalica topline te kombinacija 14, odnosno centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem kondenzacijskog kotla i centralni sustav hlađenja s zrakom hlađenim chillerom. S druge strane, najjeftiniji sustavi su sustavi centralnog grijanja i pripreme PTV-a putem kotla na biomasu s radijatorskim razvodom te lokalnim načinom hlađenja (split klima uređaji). Ovisno o debljini izolacije vanjskih zidova te ugradnji mehaničke ventilacije, takvi sustavi mogu varirati između 200500 € i 278250 € za promatranu zgradu.

Kako bi se lakše procijenila idealna kombinacija, potrebno je osim investicijskog troška promatrati i troškove pogona i održavanja pojedinih kombinacija tijekom godina. Troškovi pogona su troškovi energenata za rad promatranih sustava – električna energija, prirodni plin i biomasa (peleti). Ove dvije vrste troškova se povećavaju na godišnjoj razini po stopama objašnjenim pod točkom 4. Dijagrami koji obuhvaćaju investicijski trošak te troškove pogona i održavanja prikazani su u nastavku. Dijagrami 26 i 27 opisuju kretanje troškova kroz 30 godina za sustave bez (i sa) mehaničke ventilacije za objekt s debljinom izolacije vanjskih zidova od 16 cm. Najveće troškove sustava bez mehaničke ventilacije imaju kombinacije s lokalnim dizalicama topline. Ukupni trošak kroz 30 godina najveći je kod kombinacije 8. Naime, glavni razlog takvog ishoda je najveći investicijski trošak te vrlo visoki troškovi održavanja (7500 € godišnje). Općenito, kombinacije s lokalnim dizalicama topline imaju velike troškove održavanja i visoke investicijske troškove, stoga su i troškovi kroz 30 godina veliki. Kombinacija 6 s kotlom na biomasu te kombinacija 15 s centralnom dizalicom topline (sa ugrađenom fotonaponskom elektranom u oba slučaja) imaju najniže ukupne troškove kroz 30 godina. Iako kombinacija 15 ima visok investicijski trošak, mali godišnji troškovi održavanja te pogona doprinose njenoj isplativosti.



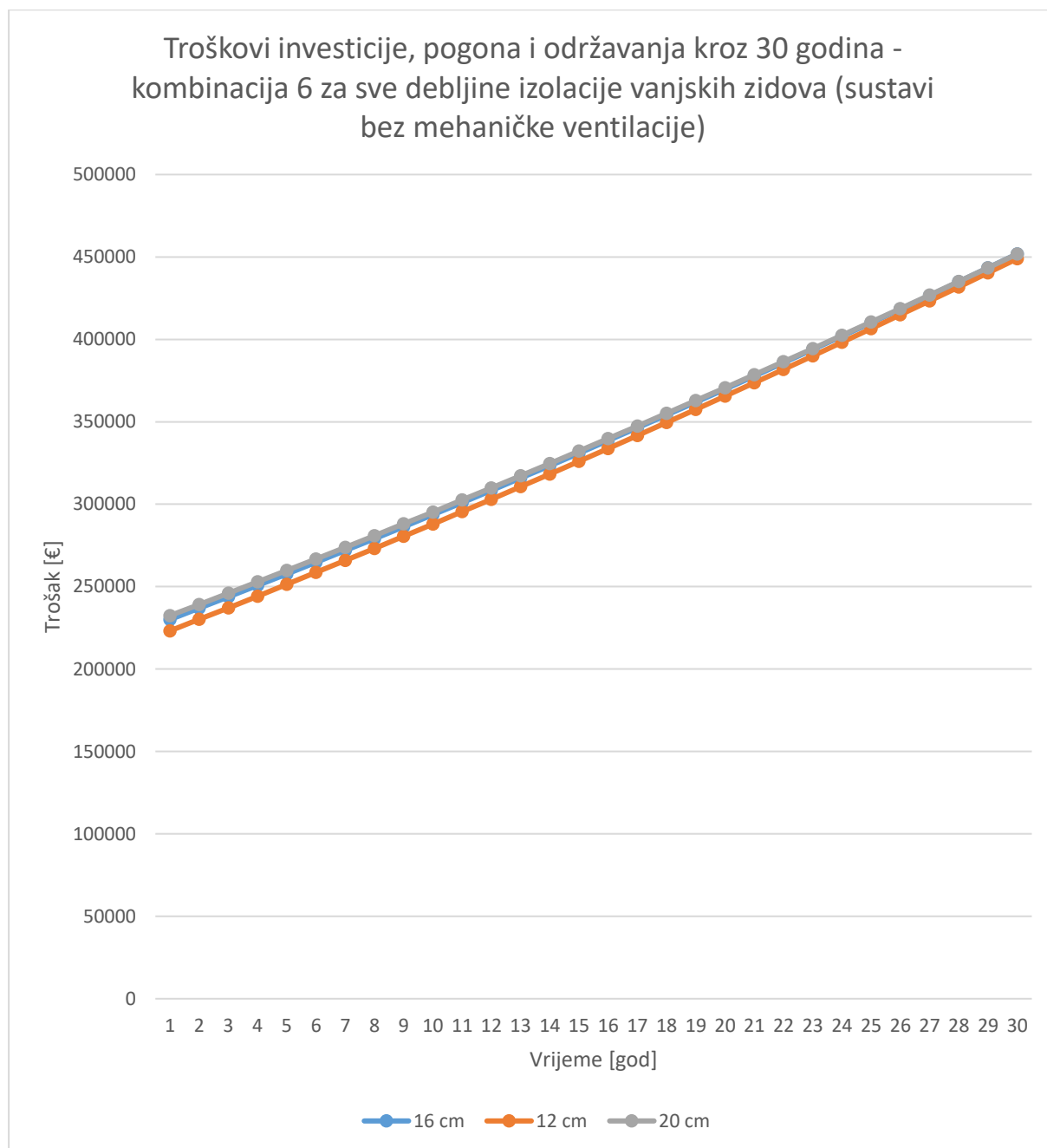
Dijagram 26 Troškovi investicije, pogona i održavanja kroz 30 godina - sustavi bez mehaničke ventilacije (16 cm izolacija vanjskih zidova)

Kod sustava s mehaničkom ventilacijom, najveći investicijski trošak i troškove održavanja i pogona kroz 30 godina ima kombinacija 11. Kombinacije 6 i 15 imaju najniže troškove kroz 30 godina slično kao i kod sustava bez mehaničke ventilacije. Može se primijetiti da su troškovi kroz 30 godina sustava s mehaničkom ventilacijom veći od sustava bez nje, najvećim dijelom zbog većeg investicijskog troška, a dijelom zbog nedovoljnog smanjenja troškova pogona (troškovi plina i biomase se smanjuju, no trošak električne energije raste). Stoga, zaključak je kako sustavi s mehaničkom ventilacijom nisu isplativi u slučaju referentne promatrane zgrade s debljinom izolacije 16 cm i odabranim termotehničkim sustavima.



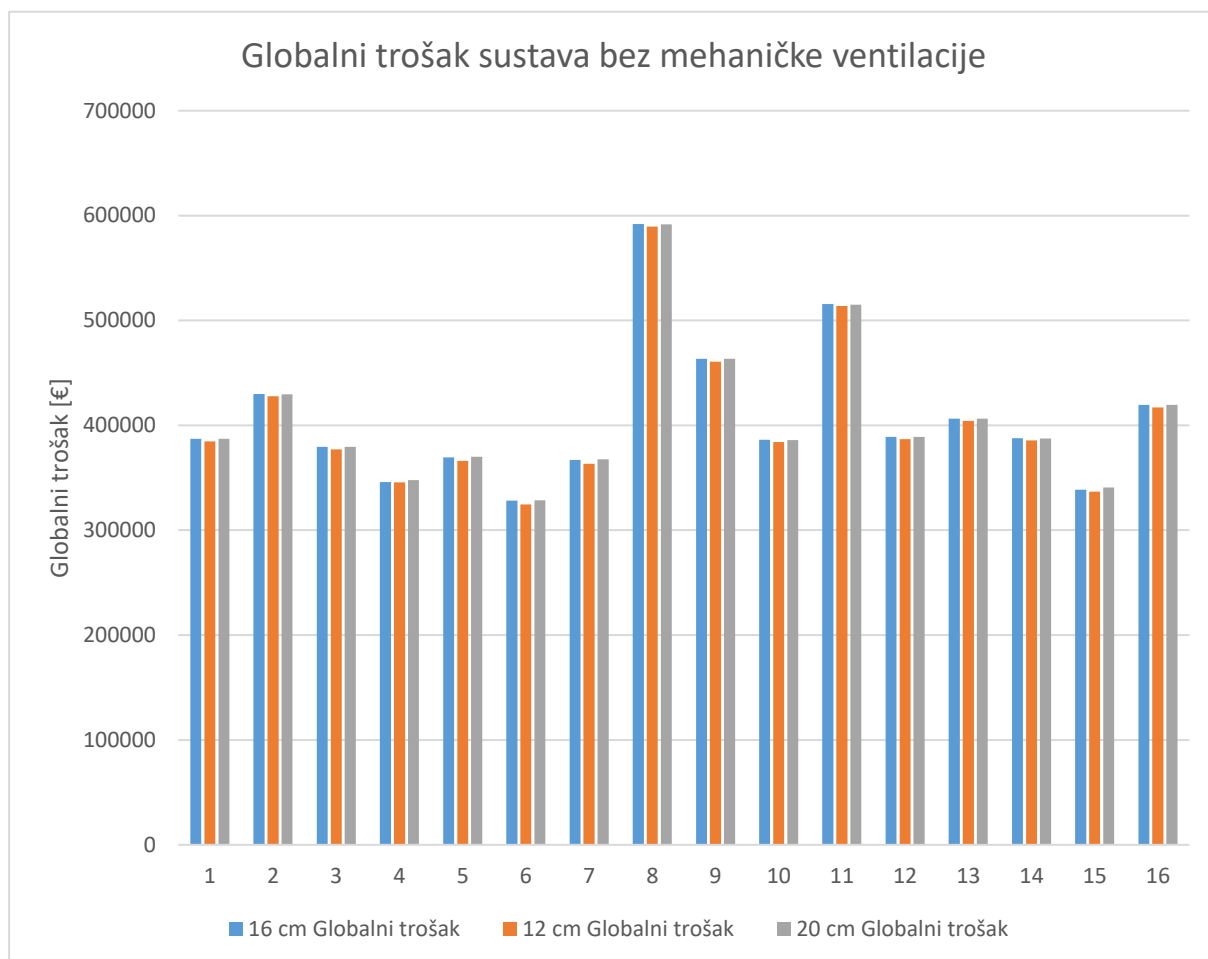
Dijagram 27 Troškovi investicije, pogona i održavanja kroz 30 godina - sustavi sa mehaničkom ventilacijom (16 cm izolacija vanjskih zidova)

Zanimljiva je i usporedba troškova pojedinih sustava kroz 30 godina za različite debljine izolacije. Ova usporedba će biti prikazana za kombinaciju 6 na dijagramu 28. Može se uočiti kako kombinacija 6 s debljinom izolacije od 20 cm ima najveći investicijski trošak, no isto tako se može uvidjeti kako se razlika u ukupnom trošku tijekom godina smanjuje. Nakon 30 godina investicija u veću debljinu izolacije vanjskih zidova postaje isplativa u odnosu na debljinu izolacije od 16 cm. Kombinacija 6 sa debljinom izolacije od 12 cm nakon 30 godina ima manje ukupne troškove za oko 3000 € u odnosu na kombinaciju 6 s preostale dvije debljine izolacije.

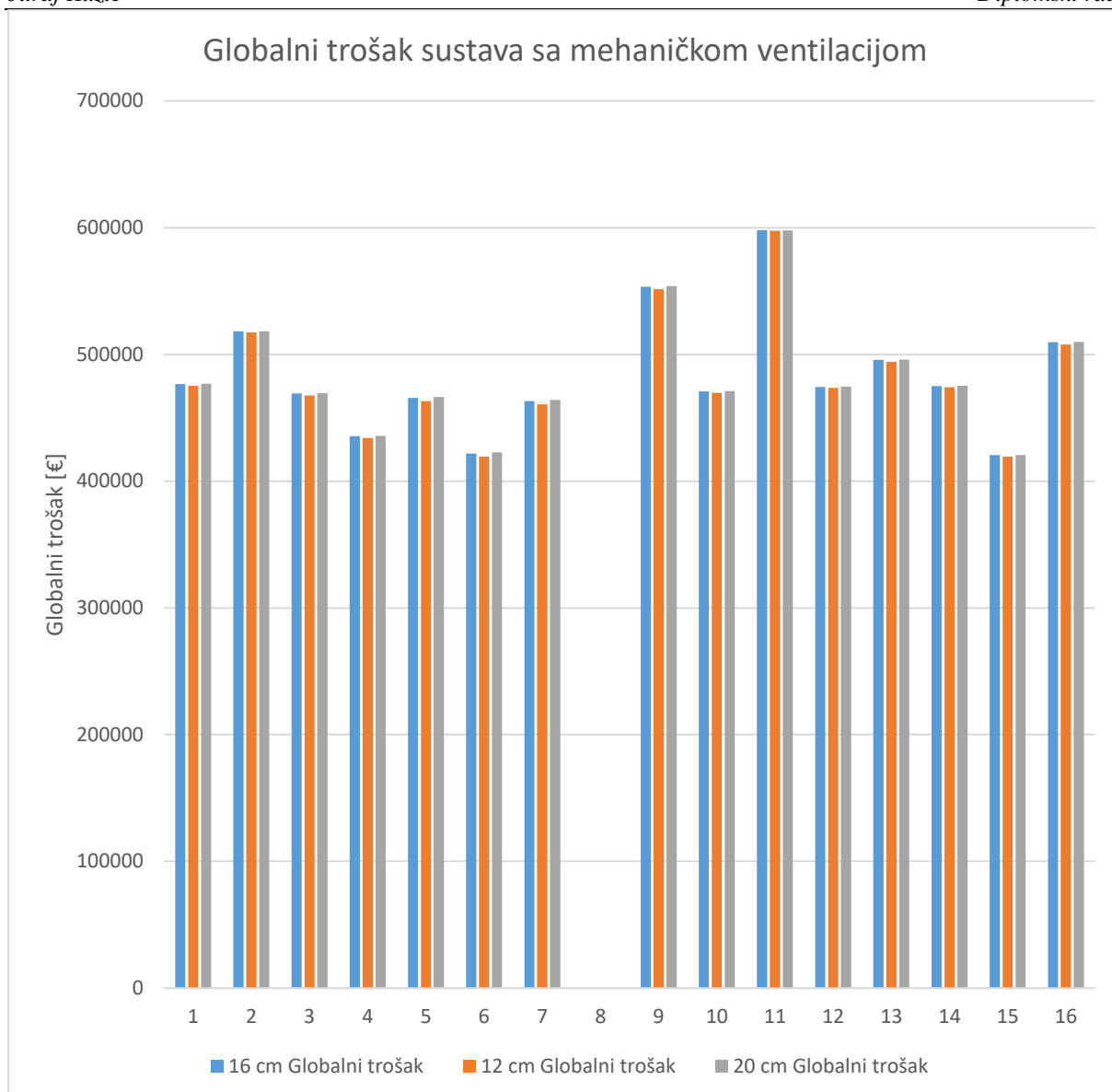


Dijagram 28 Troškovi investicije, pogona i održavanja kroz 30 godina - kombinacija 6 za sve debljine izolacije vanjskih zidova (sustavi bez mehaničke ventilacije)

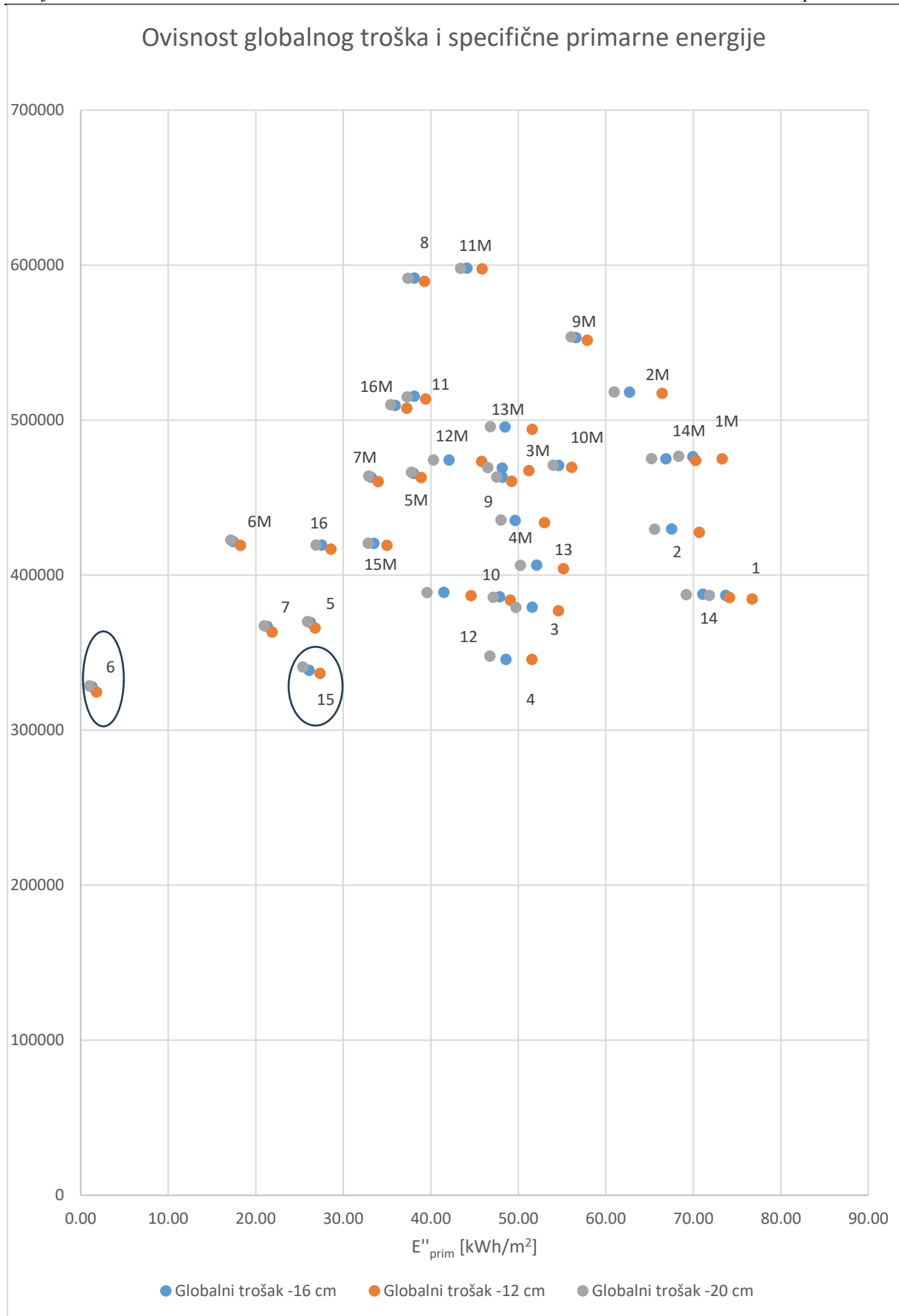
Dijagrami 29 i 30 prikazuju ukupne globalne troškove sustava bez (i sa) mehaničke ventilacije pojedinih kombinacija. Najveći globalni trošak sustava bez mehaničke ventilacije imaju kombinacije 8 i 11, a najmanji 6 i 15. Iako slične, kombinacija 16 ima veći globalni trošak od kombinacije 15 zbog značajno većih troškova održavanja (split klima uređaji). Kombinacija 11 ima najveći globalni trošak kod sustava s mehaničkom ventilacijom.



Dijagram 29 Globalni trošak sustava bez mehaničke ventilacije



Dijagram 30 Globalni trošak sustava sa mehaničkom ventilacijom



Dijagram 31 Ovisnost globalnog troška i specifične primarne energije

Dijagram 31 prikazuje usporedbu svih globalnih troškova u ovisnosti o specifičnoj primarnoj energiji. Najmanji globalni trošak imaju sustavi bez mehaničke ventilacije i to kombinacija 6 (kotao na biomasu, radijatori, split klima uređaji, fotonaponski sustav), dok neznatno viši globalni trošak imaju kombinacije 15 (dizalica topline, ventilokonvektori, fotonaponski sustav) i 4 (kondenzacijski kotao, radijatori, split klima uređaji, fotonaponski sustav) uz značajno veće vrijednosti primarne energije. Sve navedene kombinacije zadovoljavaju trenutne zahtjeve za nZEB zgrade. S obzirom da za ZEB zgrade prirodni plin kao energent ne dolazi u obzir, kombinacije 6 (kotao na biomasu, radijatori, split klima uređaji, fotonaponski sustav) i 15 (dizalica topline, ventilokonvektori, fotonaponski sustav) su one koje, prema rezultatima provedene analize, vrijedi razmatrati kao optimalnu opciju za ZEB zgrade. Iako kombinacija 6 ima manji investicijski trošak, globalni trošak i primarnu energiju te se pokazuje kao optimalan izbor termotehničkih sustava referentne zgrade i sa tehničke i sa ekonomske strane, treba u obzir uzeti i činjenicu je za navedeni termotehnički prostor potrebno osigurati i prostor za skladištenje peleta što je često, s arhitektonskog stajališta, teško za ostvariti. Stoga, se predlažu kombinacije 6 i 15 kao optimalne. U svim kombinacija tehničkih sustava, toplinska zaštita vanjskih zidova s debljinom izolacije 12 cm se pokazuje, prema globalnom trošku, kao optimalna opcija.

5. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada je bila provesti troškovno optimalnu analizu zgrade nulte emisije. Odabrana je referentna višestambena zgrada na području kontinentalne Hrvatske s neto korisnom površinom grijanog dijela $A_K = 954,2 \text{ m}^2$. Zgrada je izgrađena nakon 2006. godine i ima 5 grijanih etaža te negrijane garaže u prizemlju. Cjelokupna toplinska ovojnica grijanog prostora je izolirana s ekspanziranom polistirenom, prozori su izrađeni od PVC okvira s trostrukim ostakljenjem. Proračun potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje je proveden prema jednostavnoj satnoj metodi (HRN EN ISO 13790), uz korištenje satnih meteoroloških podataka iz baze Joint Research Centre (JRC) za 3 debljine izolacija vanjskih zidova – 12 cm, 16 cm i 20 cm. S izračunatim se podacima ušlo u proračun termotehničkih sustava, odnosno primarne E_{prim} i isporučene energije E_{del} . Svi navedeni proračuni su provedeni u softverskom paketu KI Expert Pro. Promatrani su i centralni i lokalni sustavi grijanja i hlađenja poput sustava s kondenzacijskim kotlom, kombiniranim protočnim bojlerima, kotlom na biomasu (peleti) i sustavi centralnih i lokalnih dizalica topline zrak – voda za grijanje te sustavi split klima uređaja, dizalice topline zrak - voda i zrakom hlađenog „chillera“ za hlađenje. Uz njih su promatrani i obnovljivi izvori energije u vidu fotonaponskog sustava i solarnog toplovodnog sustava, a promatran je i sustav mehaničke ventilacije s povratom topline. Osmišljeno je različitih 16 kombinacija uz kombiniranje sustava s mehaničkom ventilacijom. Neke od promatranih kombinacija ne zadovoljavaju ZEB i nZEB standarde, no analizirane su jer se radi o često korištenim kombinacijama termotehničkih sustava (kombinacije sa plinskim kondenzacijskim kotlovima). Utjecaj mehaničke ventilacije s povratom topline ima prednosti u vidu smanjenja potrošnje prirodnog plina/biomase, no s druge se strane povećava potrošnja električne energije. S obzirom na visok faktor primarne energije koji pripada uvezenoj električnoj energiji, a mali uvezenoj biomasu, mehanička ventilacija se isplati jedino kod sustava s kondenzacijskim bojlerima. Ekonomska analiza je provedena u skladu s uredbama 244/2012 i 2012/C 115/01 s ciljem pronalaska troškovno optimalne solucije. Procjena investicijskih troškova termotehničkih sustava se temelji na procijenjenim tržišnim vrijednostima. Ugradnja mehaničke ventilacije značajno povećava investicijski trošak, stoga su takvi sustavi neisplativi u slučaju referentne zgrade. Dobiveni su rezultati koji idu u prilog sustavima s kotlom na biomasu i dizalicama topline s ugrađenom fotonaponskom elektranom na krovu objekta u vidu primarne energije i globalnog troška nakon 30 godina bez sustava mehaničke ventilacije. Na kraju, optimalne kombinacije su 6 i 15, odnosno centralni sustav grijanja i pripreme PTV-a putem kotla na biomasu s lokalnim hlađenjem pomoću split klima

uređaja te centralni sustav grijanja, pripreme PTV-a i hlađenja putem dizalice topline zrak - voda za debljinu izolacije vanjskih zidova od 12 cm. Izolacija vanjskih zidova od 12 cm zadovoljava vrijednost maksimalno dopuštenog koeficijenta prolaska topline U prema „Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama“. Naime, uočeno je kako promjena debljine izolacije vanjskih zidova nema veliki utjecaj na promjenu primarne i isporučene energije te godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Razlozi su niska vrijednost faktora oblika zgrade f_0 , mali udio gubitaka kroz vanjske zidove s obzirom na ukupne transmisijske gubitke prema vanjskom okolišu (oko 40%) te veliki udio ventilacijskih gubitaka u ukupnim (>40%). Specifična primarna energija kombinacije 6 iznosi $E''_{\text{prim}} = 1,81$ kWh/m², udio obnovljivih izvora u ukupno isporučenoj energiji $RER_d = 100\%$, a globalni trošak nakon 30 godina 324676 €. Specifična primarna energija kombinacije 15 iznosi $E''_{\text{prim}} = 27,35$ kWh/m², udio obnovljivih izvora u ukupno isporučenoj energiji $RER_d = 75,55\%$, a globalni trošak nakon 30 godina 336704 €.

LITERATURA

- [1] Eurostat (2024), *Energy statistics - an overview*, preuzeto 5.11.2024. s linka: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption
- [2] European Environment Agency (2024), *Total net greenhouse gas emission trends and projections in Europe*, preuzeto 5.11.2024. s linka: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends#:~:text=ETS%20emissions%20from%20stationary%20installations,decarbonisation%20of%20the%20power%20sector>
- [3] Republika Hrvatska – Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, *Zgrade gotovo nulte energije nZEB*, preuzeto 5.11.2024. s linka: <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/zgrade-gotovo-nulte-energije-nzeb/10504>
- [4] *Energy Performance of Building Directive* 2010/31/EU, preuzeto 5.11.2024. s linka: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>
- [5] *Energy Performance of Building Directive* EU/2024/1275, preuzeto 5.11.2024. s linka: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024L1275>
- [6] Republika Hrvatska – Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, *Izvjješće prema članku 5(2) Direktive 2010/31/EU i članku 6 Uredbe (EU) 244/2012 od 16.1.2012.: Minimalni zahtjevi na energetska svojstva višestambene zgrade za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku, za razdoblje do 1970., 1971. -2005., iza 2006., i gotovo nula energetske zgrade*, preuzeto 6.11.2024. s linka: https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages//dokumenti/Propisi//EIHP-014-0185-01-06_vi%C5%A1estamb.pdf
- [7] Pravilnik o metodama procjene vrijednosti nekretnina, NN 105/2015, preuzeto 6.11.2024. s linka: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_10_105_2060.html
- [8] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, NN 128/2015, preuzeto 8.11.2024. s linka: <https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/dodatni/438515.pdf>
- [9] Soldo V., Novak S., Horvat I.: *Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

- [10] Dović D., Horvat I., Rodić A., Soldo V., Švaić S.: Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama - Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [11] Dović D., Duić N., Pukšec T., Dorotić H., Matak N., Horvat I.: ELABORAT: Faktori primarne energije i emisije CO₂ za izračun energetske svojstva zgrada, Centar za transfer tehnologije, Zagreb, 2021.
- [12] Delegirana uredba Komisije (EU) br. 244/2012, preuzeto 20.11.2024. s linka: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX:32012R0244>
- [13] Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012, preuzeto 20.11.2024. s linka: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.C_.2012.115.01.0001.01.ENG&toc=OJ%3A+C%3A2012%3A115%3ATOC