

Primljen / Received: 17.12.2014.

Ispravljen / Corrected: 4.6.2015.

Prihvaćen / Accepted: 23.7.2015.

Dostupno online / Available online: 10.10.2015.

Ugrađena primarna energija i optimizacija energetske učinkovitih kuća

Autori:



Dr.sc. **Miha Praznik**, dipl.ing.stroj.
Građevinski institut ZRMK
Ljubljana, Slovenija
miha.praznik@gi-zrmk.si



Prof.dr.sc. **Martina Zbašnik-Senegačnik**, dipl.ing.arh.
Sveučilište u Ljubljani
Arhitektonski fakultet
martina.zbasnik@fa.uni-lj.si

Pregledni rad

Miha Praznik, Martina Zbašnik-Senegačnik

Ugrađena primarna energija i optimizacija energetske učinkovitih kuća

Glavni zahtjev pri projektiranju moderne obiteljske kuće jest visoka energetska učinkovitost. Pravilnim odabirom sustava grijanja može se smanjiti potrošnja primarne energije i emisija stakleničkih plinova tijekom više desetljeća boravljenja u kući. Osim uporabnog vijeka građevine, faza gradnje također predstavlja energetske i okolišne opterećenje. Kuće imaju ugrađenu primarnu energiju i emisiju CO₂, zbog čega se danas teži poboljšanju ovojnice, ventilacije i sustava grijanja. Između ostalog, dodatni zahtjev za energetske učinkovite zgrade jest minimalni udio ugrađene energije.

Ključne riječi:

toplinska izolacija, sustav grijanja, pasivna kuća, niskoenergetska kuća, primarna energija, ugrađena energija, operativna energija

Subject review

Miha Praznik, Martina Zbašnik-Senegačnik

The embodied primary energy and optimisation of energy-efficient houses

The main requirement for the design of modern family houses is a high energy performance. With the properly selected heat generation system, the primary energy consumption and CO₂ emissions can be reduced over decades of building use. In addition to the service life of the building, the construction stage also constitutes a burden with regard to energy and environment. Houses have an embodied primary energy and CO₂ emissions, which is why efforts are currently made to improve the thermal envelope, ventilation, and the heat generation system. An additional requirement for energy-efficient buildings involves a minimum embodied energy.

Key words:

thermal insulation, heat generation, passive house, low-energy house, primary energy, embodied energy, operational energy

Übersichtsarbeit

Miha Praznik, Martina Zbašnik-Senegačnik

Eingebaute Primärenergie und Optimierung energieeffizienter Häuser

Die Hauptanforderung beim Entwurf moderner Familienhäuser ist eine hohe Energieeffizienz. Durch die richtige Auswahl des Heizungssystems können der Verbrauch an Primärenergie, sowie die Emission von Treibhausgasen während jahrzehntelanger Hausnutzung vermindert werden. Außer der Lebensdauer des Bauwerkes, stellt auch die Erbauungsphase eine Belastung für Energieverbrauch und Umwelt dar. Bei Häusern bestehen eingebaute Werte von Primärenergie und CO₂ Emission, daher wird heutzutage versucht, Gebäudehüllen sowie Ventilations- und Heizungssysteme zu verbessern. Unter anderem stellen minimale Werte der eingebauten Energie eine zusätzliche Anforderung an energieeffiziente Gebäude.

Schlüsselwörter:

Wärmeisolierung, Heizungssystem, Passivhaus, Niedrigenergiehaus, Primärenergie, eingebaute Energie, Betriebsenergie

1. Uvod

Izgradnja građevine podrazumijeva potrošnju energije u cijelom uporabnom vijeku, od energije potrebne za njezinu izgradnju, održavanje i rušenje (operativna energija) do energije potrebne za proizvodnju građevnih materijala i uređaja u uporabnom vijeku zgrade (ugrađena energija).

Energija potrebna za iskop, uklanjanje i transport materijala je nužna, a iznosi približno jedan posto energije koja se potroši u cjelokupnom uporabnom vijeku zgrade. U većini istraživanja obnova se zgrade ne smatra dijelom uporabnog vijeka te građevine [1].

Istraživači navode [2] da je operativna energija još uvijek dominantan parametar, posebno u hladnijim klimatskim uvjetima [3]. Sartori navodi da operativna energija čini veliki udio ukupne energije u niskoenergetskim i tradicijskim zgradama [1]. Ukupna operativna energija se odnosi na energiju potrebnu za rad kućanskih aparata, toplu vodu, grijanje, hlađenje i rasvjetu. Međutim, pri projektiranju se operativna energija odnosi samo na sustav grijanja i hlađenja, jer to ovisi o građevini. Sva je preostala operativna energija u pravilu neovisna [2]. U prošlim se desetljećima smanjenje ukupne potrošnje energije zgrade u njezinom vijeku trajanja odnosilo, ponajprije, na smanjivanje potrošnje operativne energije. Taj se cilj postiže poboljšanjem toplinske ovojnice zgrade (debljim slojem toplinske izolacije, prozorima s poboljšanom toplinskom izolacijom, toplinskom izolacijom bez toplinskih mostova i poboljšanom nepropusnosti zraka) te ugrađivanjem energetske učinkovite ventilacije i sustava za grijanje. Većina tih mjera se odnosi na smanjenje operativne energije, ali također uzrokuje povećanje udjela ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova. Nekoliko istraživanja je provedeno na temu raspodjele primarne energije u ukupnoj potrošnji energije tijekom uporabnog vijeka. Zaključeno je da je operativna faza zgrade najvažnija [4, 5], a neki su rezultati pokazali da se između 40 i 60 % ukupne potrošnje energije odnosi na izgradnju i održavanje niskoenergetskih kuća [6].

Međutim, neke studije navode da je potrošnja energije veća tijekom uporabne faze zgrade, dok se u drugim fazama može optimizirati ukupna potrošnja energije tijekom uporabnog vijeka zgrade [7]. Više od 90 % potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova odnosi se na gradnju zgrade [8]. Kako bi se smanjila ukupna potrošnja energije, vrlo je važno u fazi projektiranja, osim smanjenja operativne energije, odabrati odgovarajući građevni materijal [9]. S druge strane, zaključeno je da izbor opskrbnog sustava značajno utječe na potrošnju operativne primarne energije [5], čak i više nego toplinska ovojnica zgrade [3]. Optimizacija u smislu poboljšanja toplinske ovojnice i odabir prikladnog sustava za grijanje i ventilaciju postaju ključni koncepti u određivanju energetske učinkovitosti zgrada [10].

Rezultati analiza [11] novih stambenih zgrada čija je godišnja potrebna toplinska energija za grijanje po jedinici površine korisne površine zgrade Q_{NH}/A_u između 10 i 50 kWh/(m²a) pokazuju značajno promijenjen odnos između potreba za energijom i

emisije štetnih plinova u različitim fazama uporabnog vijeka zgrade.

Odnos potrošene primarne energije u sustavima grijanja u zgradama tijekom 60-ih godina i potrošene energije tijekom izgradnje i obnove može biti u rasponu od 0,75 do 2,2. Ti rezultati upućuju na to da operativna i ugrađena primarna energija u energetske učinkovite kućama mogu biti gotovo izjednačene. U ovom se istraživanju ispituju nove obiteljske kuće. Cilj je dobiti odgovore na razna pitanja o opravdanosti dodatne ugrađene energije i emisije stakleničkih plinova, zbog kojih stambene zgrade imaju visok stupanj energetske učinkovitosti. Rezultati analize mogu poslužiti za održivi razvoj suvremenih zgrada čija je investicija isplativa u relativno kratkom roku zbog dodatne ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova s obzirom na uporabni vijek poboljšanih elemenata zgrade.

2. Metodologija

Uspoređene su vrijednosti dobivene ispitivanjem modela zgrade kako bi se odredio potrebni udio ugrađene primarne energije i emisija stakleničkih plinova za izgradnju energetske učinkovite obiteljske kuće.

Pomoću dobivenih vrijednosti procijenjena je primarna energija i relevantna emisija stakleničkih plinova ugrađena u konstrukcijskim elementima zgrade do završetka njezine izgradnje.

Za potrebe ispitivanja, zgrada je projektirana i izgrađena kao pasivna kuća ili niskoenergetska kuća (prema uvjetima za energetske učinkovitost). S obzirom na energetske učinkovitost, usporedna analiza obuhvaća utjecaj odabranih sustava na toplinsku ovojnicu zgrade i različite sustave za grijanje.

Ulazni podaci za analizu, poput građevnog materijala, građevne stolarije i instalacija, preuzeti su iz dostupnih web aplikacija [12]. Izračunani su ključni energetske i okolišni pokazatelji.

Dobivene su vrijednosti primijenjene kako bi se usporedili uobičajeni konstrukcijski elementi toplinske ovojnice. Na temelju tih usporedbi pripremljene su smjernice za koncept održive toplinske ovojnice za energetske učinkovite zidane ili drvene zgrade koje zahtijevaju minimalni udio ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova.

Proučavan je i utjecaj centralnog ventilacijskog sustava na povećanje energetske učinkovitosti zgrada te udio potrebne ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova, kao i važnost prikladnog odabira sustava za grijanje. Taj odabir ima važnu ulogu u fazi gradnje, ali i u kasnijem uporabnom vijeku zgrade zbog potrošnje primarne energije i emisije stakleničkih plinova.

2.1. Opis modela zgrade

Za potrebe istraživanja izrađen je model obiteljske kuće na dva kata. Glavni parametri zgrade su: površina korisne površine zgrade $A_u = 137$ m², oplošje grijanog dijela zgrade $A = 454$ m², površina prozorskih otvora $A_w = 30$ m² i faktor

oblika $f_0 = 0,68 \text{ m}^{-1}$. Utjecaj tehnoloških rješenja za različite pasivne i niskoenergetske kuće izračunan je na posebnom arhitektonskom modelu.

Kako bi se postigli različiti traženi energetske razredi zgrada, modificirani su ključni parametri zgrada (tablica 1.), poput koeficijent prolaska topline ili U-vrijednosti elemenata ovojnice zgrade i građevne stolarije, nepropusnosti toplinske ovojnice i učinkovitosti očuvanja topline kroz centralni ventilacijski sustav. Ostali ključni parametri za pasivne i niskoenergetske kuće bili su jednaki.

Prosječna izmjena zraka po satu je $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$. Zgrada je smještena u klimatskom području referentnom za Sloveniju s temperaturnim deficitom HDD = 3200 K d a⁻¹. Kuća je namijenjena za četiri osobe. Proračun toplinskih karakteristika i prijenosa energije napravljen je primjenom PHPP metode [13], koja se temelji na metodologiji međunarodnih standarda [14, 15].

Rezultati izračuna potrebne toplinske energije za grijanje bili su različiti za niskoenergetske i pasivne kuće (tablica 1.). Međutim, u obje zgrade, dobivene vrijednosti potrebne toplinske energije za grijanje vode bile su jednake zbog istog broja članova kućanstva, a iznosile su približno 3 MWh/a, odnosno 22 kWh/(m²a).

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti za pasivne i niskoenergetske kuće

Promatrane vrijednosti	Pasivna kuća	Niskoenergetska kuća
Koeficijent prolaska topline za toplinsku ovojnicu U_m [W/m ² K]	0,15	0,20
Zračna nepropusnost toplinske ovojnice zgrade n_{50} [h ⁻¹]	0,6	0,8
Učinkovitost očuvanja topline u Iskoristivost sustava za povrat topline ventilacijskom sustavu η_{rek} [%]	90	85
Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje po jedinici ploštine korisne površine zgrade Q_{NH}/A_u [kWh/m ² a]	15	31
Potrebna toplinska snaga za grijanje u "špicu" sezone grijanja P_H/A_u [W/m ²]	14	21

2.2. Opis varijanti ovojnice

Analizirana su različita tehnološka rješenja za ovojnice pasivnih i niskoenergetskih kuća. Razmotreno je pet varijanti koje se primjenjuju u praksi.

- Varijanta V1: najčešća je jer je najprihvatljivija kada je riječ o drvenim kućama. Za toplinsku izolaciju upotrebljava se mineralna vuna. Fasade i podovi su izolirani ekspanziranom polistirenom (EPS), a na otvore su postavljeni PVC prozori.
- Varijanta V2: drveni I-profil primijenjeni su kao kruti drveni elementi. Za toplinsku izolaciju upotrebljavaju se celulozne pahuljice i drvena vlakna. Postavljeni su drveni prozori, a podovi su izolirani mineralnom vunom.
- Varijanta V3: zidane kuće koje su najčešći izbor zbog njihove niske cijene. Fasade i podovi su izolirani EPS-om, a samo je krov izoliran mineralnom vunom. Prozori imaju PVC okvire.

- Varijanta V4: odabir održivih rješenja za zidane kuće jer se za toplinsku izolaciju upotrebljava samo mineralna vuna. Svi prozori imaju drvene okvire.
- Varijanta V5: kuća napravljena od porobetona. Za izolaciju je upotrijebljena mineralna vuna. Prozori su s drvenim okvirima.

Konfiguracija elemenata toplinskoga omotača za varijante V1 i V5 prikazana je u tablici 2. Opis konstrukcijskih elemenata ovojnice prikazan je u tablicama 3. do 5.

Tablica 2. Konstrukcijski elementi ovojnice za pet analiziranih varijanti zgrade

Konstrukcijski elementi ovojnice	Analizirane varijante				
	V1	V2	V3	V4	V5
Podovi	GF1	GF2	GF1	GF2	GF2
Fasade	LW1	LW2	SB2	SB1	AC
Krov	PR1	PR4	PR2	PR2	PR3
Prozori	PVC/AL	W/AL	PVC/AL	W/AL	W/AL

2.2.1. Opisi konstrukcijskih elemenata

Opisi konstrukcijskih elemenata zidova, krovova i podova prikazani su u tablicama 3. do 5.

Tablica 3. Konstrukcijski elementi vanjskih zidova [12]

Oznaka	Opis	Schema
LW1	Lagani drveni zid 1 Mineralna vuna između nosivih drvenih elemenata, dodatni sloj EPS-a na vanjskoj površini. Utjecaj korištenja toplinske izolacije sintetičkog podrijetla ispitivan je ovom metodom.	
LW2	Lagani drveni zid 2 Drveni I-profil primjenjuje se kao kruti element. Prirodni izolacijski materijali - celulozne pahuljice i drvena vlakna ugrađuju se na unutarnje i vanjske površine.	
SB1	Kruti zidani zid 1 Zidani zid: mineralna upotrijebljena vuna je za izolaciju na vanjskoj površini.	
SB2	Kruti zidani zid 2: Na osnovi SB1: za toplinsku izolaciju upotrijebljen je EPS kao zamjena za mineralnu vunu.	
AC	Zid od porobetona Zid napravljen od porobetona: mineralna je vuna upotrijebljena kao toplinska izolacija na vanjskoj površini. Utjecaj modificiranog nosivog materijala za krute zidove ispitivan je ovom metodom.	

Tablica 4. Konstrukcijski elementi za kose krovove [12]

Oznaka	Opis	Shema
PR1	Kosi krov 1: Glavni konstrukcijski element kosog krova: mineralna vuna između roženica. Dodatni sloj toplinske izolacije od mineralne vune je ispod roženice.	
PR2	Kosi krov 2: Roženice iznad armiranobetonske ploče. Toplinska izolacije od mineralne vune između roženica i iznad armiranobetonske ploče. Utjecaj betona je ispitivan ovom metodom.	
PR3	Kosi krov 3: Konstrukcijski element se temelji na PR2. Armiranobetonske ploče su zamijenjene pločama od porobetona. Toplinska izolacija od mineralne vune postavljena je između roženica i iznad ploča..	
PR4	Kosi krov 4: Umjesto masivnih drvenih elemenata primjenjeni su drveni I-profil, između kojih je izolacija od celuloznih pahuljica. Bolja toplinska izolacija je postignuta podizanjem visine I-profila, čime je povećana i debljina toplinske izolacije.	

Tablica 5. Konstrukcijski elementi poda u prizemlju [12]

Oznaka	Opis	Shema
GF1	Pod u prizemlju 1 Armiranobetonska temeljna ploča s EPS-om. Debljina izolacija ovisi o potrebnoj toplinskoj zaštiti.	
GF2	Pod u prizemlju 2 Armiranobetonska temeljna ploča izolirana mineralnom vunom. Utjecaj odabira različitog materijala za toplinsku izolaciju ispitivan je ovom metodom.	

2.3. Sustavi grijanja zgrada

Analiza primarne energije i emisije stakleničkih plinova provedena je i za mehaničke instalacije. Pasivne i niskoenergetske kuće moraju biti opremljene sustavima za proizvodnju topline za grijanje i centralnim sustavima za ventilaciju zgrada.

Tablica 6. Najčešći sustavi grijanja u energetski učinkovitim zgradama

Vrsta sustava	Oznaka
Dizalica topline tipa zrak-voda	HP1
Dizalica topline koristi toplinu iz horizontalnog izmjenjivača u zemlji	HP2
Dizalica topline koja koristi toplinu iz vertikalnog izmjenjivača ili bušotine	HP3
Plinski kondenzacijski kotao sa solarnim panelima za grijanje vode	GS
Kamin na pelete za centralno grijanje i solarnim panelima za centralno grijanje	BS

Danas postoje brojne tehnologije koje proizvode korisnu toplinu s većom ili manjom razinom učinkovitosti i pretvaraju gorivo ili električnu energiju u toplinu, a istodobno se primjenjuju obnovljivi izvori energije u različitim omjerima. Postoje različite tehnologije za proizvodnju topline u obiteljskim kućama (tablica 6.). U energetski učinkovitim zgradama najčešće se postavljaju dizalice topline tipa zrak-voda (HP1) jer su najpovoljnije. Dizalice topline sa zemljanim kolektorima primjenjuju se u sustavima grijanja ili za pasivno hlađenje tijekom ljetnih mjeseci. U obje varijante dizalica topline tipa zemlja-voda izmjenjuje se toplina iz okoline u horizontalnom (HP2) ili vertikalnom (HP3) izmjenjivaču. U gradovima, zgrada može biti priključena na gradski plinovod. U tom slučaju, uz kondenzacijski plinski kotao primjenjuju se toplinski solarni sustavi s panelima manje ukupne površine (GS), kako bi se ispunili zahtjevi za primjenom obnovljivih izvora energije u sustavima grijanja zgrada. Gradnju novih zgrada izvan gradova obilježava različitost uređaja, od kamina s peletima do solarnih sustava s panelima manje ukupne površine, kako bi se osiguralo centralno grijanje zgrade.

2.4. Kontrolirani sustav za centralnu ventilaciju zgrada

Kontrolirani sustav za centralnu ventilaciju (oznaka CV) osmišljen je u dvije varijante kako bi se dobile ciljane vrijednosti. Energetska učinkovitost sustava u radu je jednaka u obje varijante, ali se razlikuju materijali za raspodjelu zraka kroz zgrade i zagrijavanje uz pomoć topline zemlje.

- Varijanta CV1: raspodjela zraka kroz plastične cijevi, kolektor s tekućinom indirektnim zagrijavanjem zraka uz pomoć topline zemlje zadržava toplinu tla koju dalje koristi za zagrijavanje zraka.
- Varijanta C2: raspodjela zraka kroz limene cijevi. Ukopana cijev služi za zagrijavanje svježeg zraka koristeći toplinu tla. Ovaj se sustav često primjenjivao u prošlosti.

3. Energetski i okolišni pokazatelji elemenata toplinskoga omotača zgrade

Određeni su ključni pokazatelji za procjenu energije potrebne za konstrukciju ovojnice i naknadne procjene utjecaja na okoliš. Analiza okoliša ograničena je na razdoblje do završetka proizvodnje građevnog materijala i konstrukcijskih elemenata.

Analizom se ispituju četiri pokazatelja za konstrukcijske elemente ovojnice i spojne elemente koji ovise o U-vrijednostima konstrukcijskih elemenata:

- $PEC_{n.r.}$ - pokazatelj energije, procjenjuje količinu primarne neobnovljive energije po jedinici površine elementa (oznaka jedinice je kWh/m²).
- GWP_{100} - okolišni pokazatelj, procjenjuje potencijal globalnog zatopljenja po jedinici površine konstrukcijskog elementa (oznaka jedinice je kg CO₂equ/m²).
- AP - okolišni pokazatelj, procjenjuje stanje povećane kiselosti okoliša po jedinici površine (oznaka jedinice je kg SO₂equ/m²).
- OI3 - pokazatelj [16] - kombinirani pokazatelj, omogućava potpunije informacije o kombiniranom djelovanju triju prethodnih pokazatelja kroz bezdimenzionalni sustav rezultata. Ta tri pokazatelja jednako su značajna (u trećinama), kao što pokazuje jednadžba (1):

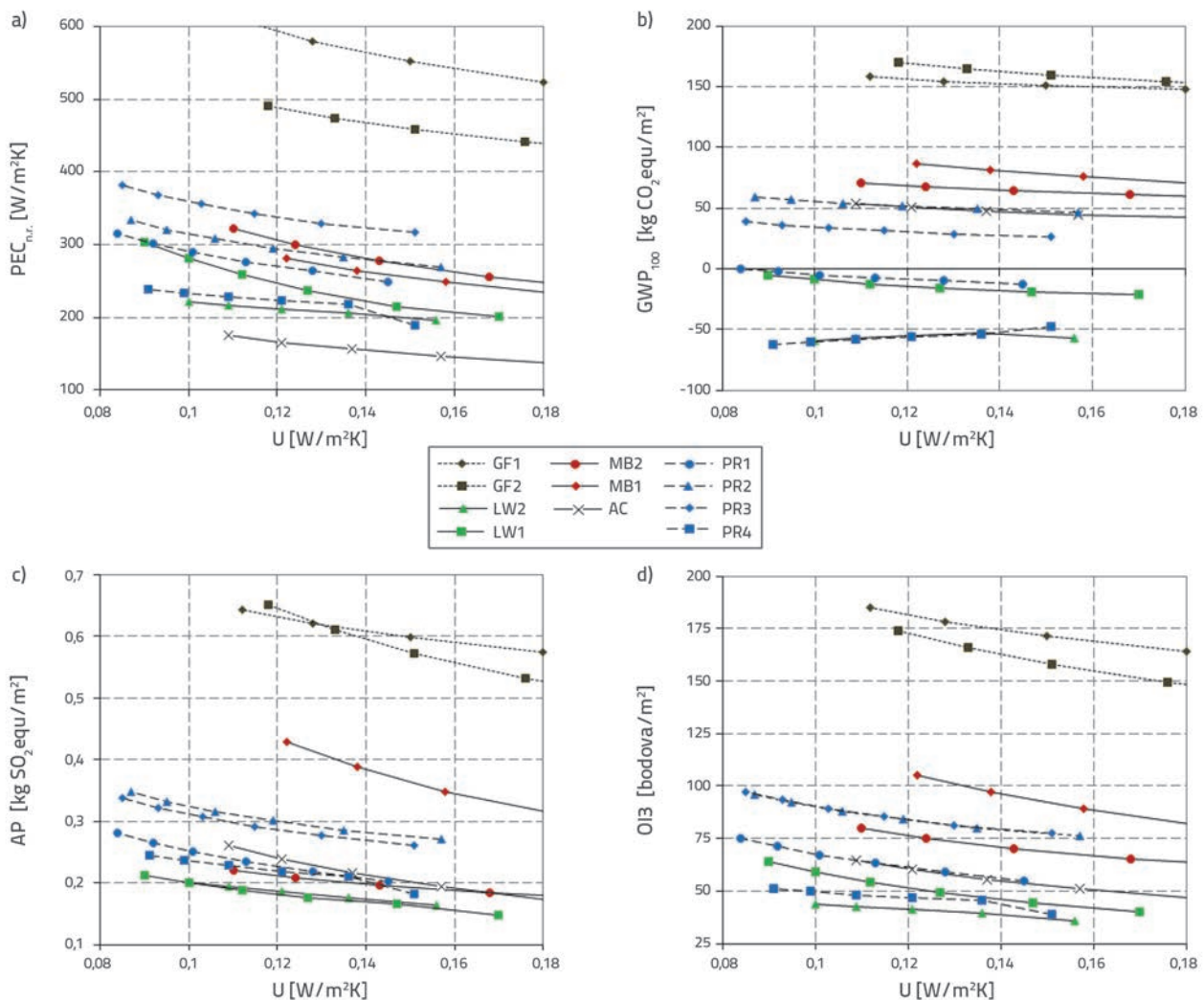
$$\Delta OI3 = \frac{1}{3} \times \left[\frac{1}{3} \times PEC_{n.r.} + \frac{1}{2} \times GWP_{100} + \frac{100}{0,25} \times AP \right] \text{ [bodova]} \quad (1)$$

3.1. Procjena konstrukcijskih elemenata ovojnice zgrade

Za daljnju analizu, vrijednosti su četiriju pokazatelja građevnih dijelova izračunane u širokom rasponu U-vrijednosti: za pasivne kuće (eng. *passive house* - PH) $U = 0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, za niskoenergetske kuće (eng. *low energy house* - LEH) $U = 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (slike 1.a do 1.d).

Smanjenjem U-vrijednosti u pojedinačnom građevnom dijelu, povećavaju se vrijednosti pokazatelja potrošnje primarne energije $PEC_{n.r.}$ (slika 1.a), vrijednost okolišnog pokazatelja AP (slika 1.c), vrijednost GWP_{100} (slika 1.b) i vrijednost OI3 kombiniranog okolišnog pokazatelja (slika 1.d).

Povećane vrijednosti tih pokazatelja nastupaju zbog veće količine toplinske izolacije, koja se odražava u obliku kontinuiranih krivulja u dijagramima. Međutim, tijekom kontinuiranih vrijednosti može odstupati u modeliranim elementima, kod kojih se za poboljšanje energetske učinkovitosti mijenja i konstrukcija, primjerice kod drvenih elemenata.



Slika 1. Kontinuirane vrijednosti za pokazatelj $PEC_{n.r.}$, GWP_{100} , AP i OI3, koje ovise o U-vrijednostima elemenata ovojnice, vrijednostima po jedinici površine građevnih dijelova

Za većinu elemenata koji se razmatraju, vrijednosti $PEC_{n.r.}$ su u rasponu od 150 (LEH) i 350 kWh/m² (PH), vrijednosti GWP_{100} su između 50 (LEH) i 100 kg CO₂equ/m² (PH), dok su AP vrijednosti između 0,15 (LEH) i 0,35 kg SO₂equ/m² (PH).

Odstupanje od uobičajenih kontinuiranih vrijednosti pojavilo se u okolišnom pokazatelju GWP_{100} u drvenim elementima montažnog zida LW2 i kosog krova PR4, koji su izolirani toplinskom izolacijom od celuloznih pahuljica. Zapravo, vrijednost GWP_{100} se smanjivala povećanjem količine drvenih elemenata (slika 1.b). Budući da su vrijednosti AP bile male za obje vrste promatranih konstrukcijskih elemenata, imale su najbolju ukupnu ocjenu, tj. najnižu vrijednost kombiniranog okolišnog pokazatelja OI3. Najveće vrijednosti za sva četiri pokazatelja ostvarene su u elementima GF1 i GF2.

Zbog veće količine ugrađene energije u armiranobetonskoj temeljnoj ploči, utjecaj naknadno ugrađene toplinske izolacije znatno je niži nego u ostalim konstrukcijskim elementima.

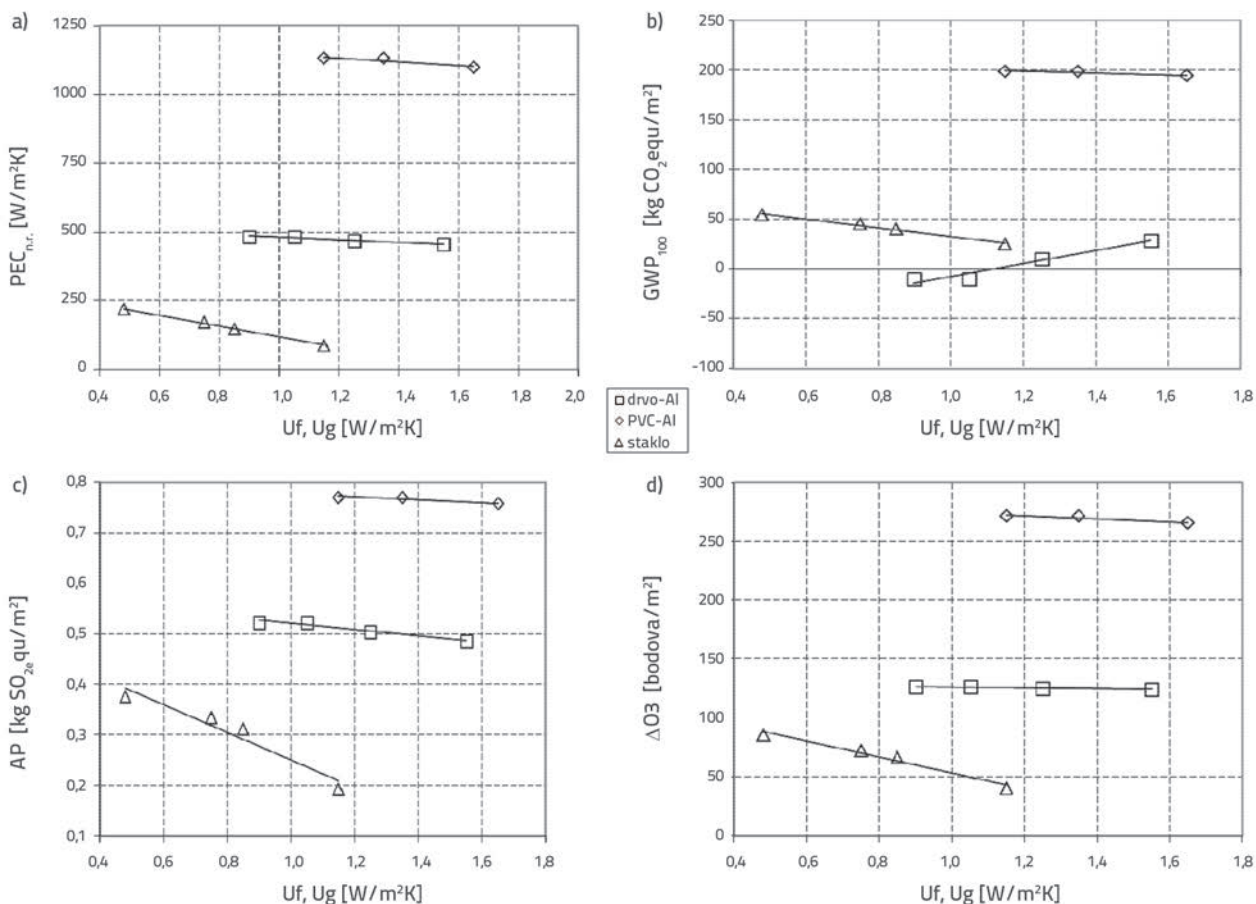
Razlika između vrijednosti kombiniranog pokazatelja okoliša OI3 za U - vrijednosti elemenata poda u prizemlju pasivne i niskoenergetske kuće približno je 15 %. Za ostale konstrukcijske elemente, na kojima je utjecaj konstrukcije nizak, razlika je iznosila 25 do 35 %.

Sobzirom na pokazatelj OI3, primjena mineralne vune u prizemlju je poželjno rješenje, jer ima bolja svojstva od ekspaniranog polistirena (EPS), a time i povoljnije pokazatelje $PEC_{n.r.}$ i AP.

Najbolji rezultati kombiniranog pokazatelja OI3 dobiveni su na drvenim elementima s izolacijom od celuloznih pahuljica. Najmanje vrijednosti pokazatelja OI3 ostvarene su na drvenom montažnom zidu s izolacijom od EPS-a.

Sljedeći najbolji rezultati dobiveni su na zidu od porobetona s izolacijom od mineralne vune (AC), ali su vrijednosti bile poprilično visoke s obzirom na malu količinu ugrađene primarne energije u porobetonu. Iste vrijednosti pokazatelja OI3 ostvarene su na drvenom kosom krovu PR1 s izolacijom od mineralne vune.

Malo veće, ali zapravo jednake vrijednosti pokazatelja OI3 dobivene su na konstrukcijskim elementima kosog krova od betona i porobetona, primjerice PR2 i PR3, koji su izolirani mineralnom vunom. Debljina betona ovisi o krovnim elementima od porobetona, zbog čega oba pokazatelja OI3 imaju iste vrijednosti. Vanjski zid od opeke je pokazao prednost izolacije mineralnog podrijetla u odnosu na EPS, jer su vrijednosti OI3 za SB2 bile manje nego za SB1. Pokazatelj OI3 bio je manji za SB2 zid u pasivnoj kući nego za SB1 zid u niskoenergetskoj kući.



Slika 2. Kontinuirane vrijednosti pokazatelja $PEC_{n.r.}$, GWP_{100} , AP i OI3 ovise o koeficijentima prolaska topline prozorskih okvira U_f i stakla U_g , vrijednosti po površini građevinskih dijelova

3.2. Procjena elemenata građevne stolarije

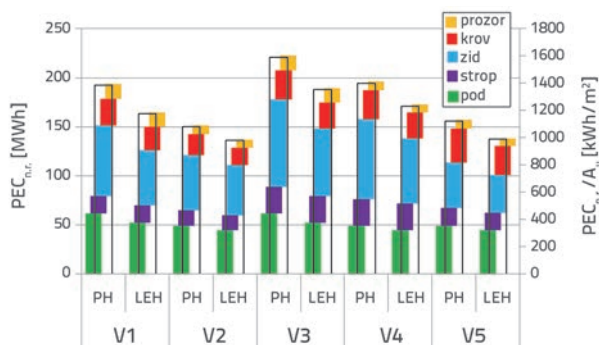
Ukupne U-vrijednosti za prozore iznosile su $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za pasivne kuće i $U_w = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za niskoenergetske kuće. Te vrijednosti su uglavnom određene koeficijentima prolaska topline između stakla U_g i prozorskog okvira U_r , uzimajući u proračun pripadajuću ploštinu površine ta dva elementa. U modelu obiteljske kuće, ploština površine prozorskog okvira se računa kao približno 25 % ukupne ploštine prozora. Izračunane vrijednosti za staklo pokazuju da su vrijednosti četiri pokazatelja u rasponu koji je karakterističan za neprozirne građevne dijelove ovojnice (slike 2.a do 2.d).

Međutim, aluminijski okviri imaju veće vrijednosti. Vrijednosti četiriju pokazatelja su bolje (tj. niže) u drvenim okvirima nego u PVC okvirima.

3.3. Procjena odabrane varijante toplinske ovojnice

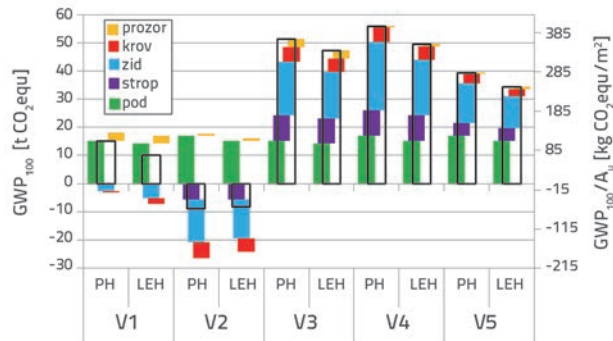
Ispitivano je pet varijanti ovojnice na temelju prethodno određenih vrijednosti. Izračunane su vrijednosti ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova za dva ključna pokazatelja, PEC_{nr} i GWP_{100} za cijelu zgradu te posebno za površinu grijanog poda zgrade ($A_u = 137 \text{ m}^2$) kao osnova za sljedeću analizu.

Udio ugrađene primarne energije za pet varijanti i njihova različita svojstva u granicama su između 137 MWh/po zgradi i 223 MWh/po zgradi (slika 3.). Specifična vrijednost PEC_{nr} , računana prema ploštini grijanog poda zgrade, iznosi između 980 kWh/m²a i 1 590 kWh/m²a (slika 3.).



Slika 3. PEC_{nr} pokazatelj u različitim varijantama toplinske ovojnice za PH i LEH vrijednosti za zgrade i po jedinici grijane površine

Usporedba rezultata pokazuje da dvije varijante imaju mali udio ugrađene primarne energije: drvena kuća izolirana celuloznim pahuljicama (varijanta V2) i kuća od porobetona izolirana mineralnom vunom (varijanta V5). Izjednačene su i vrijednosti u slučaju velikog udjela primarne energije, kod drvene kuće izolirane polistirenom (varijanta V1) i kuće od opeke, izolirane mineralnom vunom (V4). Usporedba svih pet varijanti s različitim energetske učinkovitošću pokazala je da je niskoenergetska kuća od opeke izolirana EPS-om, s PVC prozorima (varijanta V3), primjerice bila jednaka za pasivnu kuću od opeke izoliranu mineralnom vunom s drvenim prozorima (varijanta V4).



Slika 4. Pokazatelj GWP_{100} u različitim varijantama toplinske ovojnice za PH (pasivna kuća) i LEH (niskoenergetska kuća) vrijednosti za zgrade i po jedinici grijane površine

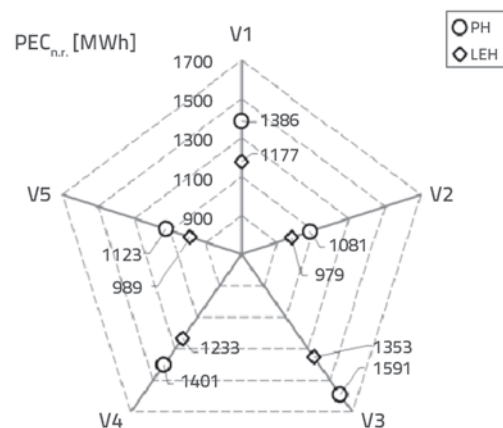
Izračunana je također emisija stakleničkih plinova za cijelu zgradu i posebno za ploštinu korisne površine zgrade A_u . Predstavljeni rezultati (slika 4.) pokazuju da je emisija stakleničkih plinova za drvene i zidane konstrukcije različita, što znači da minimalna vrijednost za laganu montažnu konstrukciju u varijanti 2 iznosi do 8 tona $\text{kg CO}_2\text{equ}$ ili do $60 \text{ kg CO}_2\text{equ}/\text{m}^2$, a rezultat je identičan za PH i LEH.

Maksimalna vrijednost ugrađene emisije stakleničkih plinova je dobivena za kuću od opeke (PH) izoliranu mineralnom vunom (varijanta 4), a iznosi $56 \text{ t CO}_2\text{equ}$ ili $400 \text{ kg CO}_2\text{equ}/\text{m}^2$. Od krutih konstrukcija, kuća od porobetona (varijanta 5) imala je najmanju emisiju stakleničkih plinova.

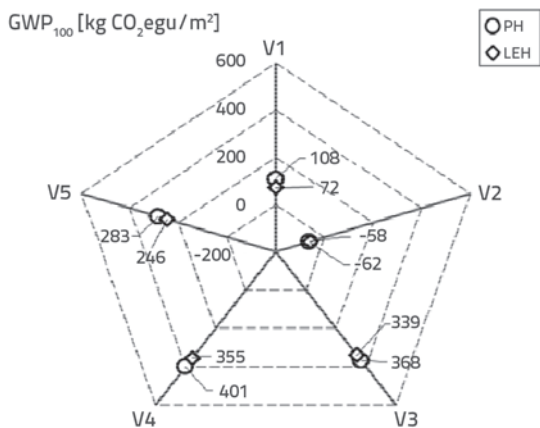
U usporedbi s niskoenergetskom kućom, pasivna kuća ima veći udio ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova, jer toplinska ovojnica ima deblji sloj izolacije (slike 5. i 6.).

Ugrađena primarna energija raste u svih pet varijanti, u rasponu od 10 do 18 %, s minimalnim povećanjem zabilježenim u V2, a s maksimalnim povećanjem u V1 i V3.

Ugrađena emisija stakleničkih plinova veća je u ovojnici u pasivnoj kući te je u rasponu od 8 do 15 %, dok je minimalna emisija CO_2 zabilježena u varijanti V2. Međutim, odstupanje (povećanje) od 50 % zabilježeno je u varijanti V1.



Slika 5. Razlike u pokazatelju energije za varijante ovojnice grijanog dijela između pasivnih i niskoenergetskih kuća, vrijednosti po jedinici grijane površine



Slika 6. Razlika u pokazatelju emisije stakleničkih plinova za varijante ovojnice između pasivne i niskoenergetske kuće, vrijednosti po jedinici grijane površine zgrade

4. Energetski i okolišni pokazatelji za energetske sustave zgrada

Kako bi se usporedile varijante ovojnice, izračunani su pokazatelj ugrađene primarne energije ($PEC_{n.r.}$), okolišni pokazatelj ugrađene emisije stakleničkih plinova (GWP_{100}) za centralni ventilacijski sustav i sustav grijanja.

4.1. Procjena sustava za ventilaciju

Za prethodno projektirane ventilacijske sustave CV1 i CV2 i primjenu ulaznih podataka elemenata [12], vrijednost pokazatelja $PEC_{n.r.}$ iznosi između 11 i 26 MWh/zgradi, a vrijednost pokazatelja GWP_{100} je između 0,6 i 1,4 t CO₂equ/zgradi. Te vrijednosti pokazuju sličan utjecaj sva tri glavna dijela ventilacijskog sustava: uređaja za ventilaciju, sustav kanala za distribuciju zraka u zgradi i sustav za temperiranje zraka toplinom zemlje.

Sustav za ventilaciju u niskoenergetskim i pasivnim kućama ima isti kapacitet i slične elemente, pa se rezultati odnose na obje zgrade. Uspoređujući pokazatelje za ventilacijski sustav u varijanti CV1 i prethodnu varijantu toplinske ovojnice zgrade, može se zaključiti da takav odabir ventilacijskog sustava troši tek 5 do 8 % primarne energije potrebne za toplinsku ovojnicu u varijantama V2 i V3. Međutim, emisija stakleničkih plinova je bila tek 1 % u odnosu na zidanu zgradu (varijanta 3).

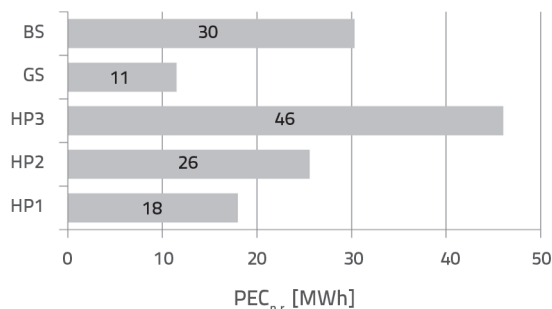
Zbog očuvanja topline ventilacijskom sustavu, godišnji zahtjevi za toplinu u modelu zgrade su smanjeni za 20 kWh/(m²a). Smanjeni udio ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova u instalaciji sustava za ventilaciju omogućuje velike uštede energije koje se mogu ostvariti dodatnim poboljšanjem ovojnice.

4.2. Procjena sustava za grijanje

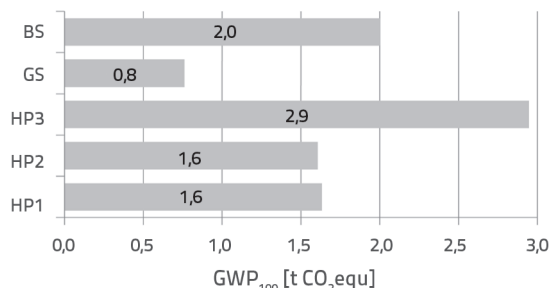
Radi jednostavnije usporedbe, procijenjeni su pokazatelji $PEC_{n.r.}$ i GWP_{100} za pet uobičajenih sustava grijanja (tablica 2.). Određene

su njihove vrijednosti za specifične vrste sustava grijanja, prema ulaznim podacima za svaki element i/ili dijelove elemenata sustava [12]. Vrijednosti su izračunane za određene vrste sustava grijanja, ovisno o ulaznim podacima za svaki element ili dijelove sustava [12].

Razlika u instaliranom sustavu grijanja prostora i sustava za toplu vodu za niskoenergetske i pasivne kuće iznosi približno 1 kW. Kao posljedica toga, odabrano je isto rješenje za sustav grijanja i u niskoenergetskim i u pasivnim kućama, a kasnije su dobiveni jednaki rezultati.



Slika 7. Potrošnja primarne energije za odabrane sustave grijanja



Slika 8. Emisija stakleničkih plinova za odabrane sustave grijanja

Instalacija odabranog sustava grijanja u zgradi zahtijeva potrošnju primarne energije u iznosu od 11 do 46 MWh (slika 7.), pri čemu je emisija stakleničkih plinova u rasponu od 0,8 do 2,9 t CO₂equ (slika 8.).

Najjednostavniji sustav grijanja GS imao je vrijednosti koje su slične ventilacijskom sustavu CV1.

S obzirom na potrošnju primarne energije i emisiju stakleničkih plinova, najsloženiji sustav za grijanje HP3 je imao četiri puta veće vrijednosti od GS.

Zbog visokog udjela ugrađene primarne energije, trebalo bi primijeniti složenije sustave grijanja u novim zgradama kako bi se smanjio utjecaj na okoliš tijekom njihovog uporabnog vijeka.

5. Analiza rezultata

Odgovarajući izbor građevnih materijala za toplinsku ovojnicu zgrade i njene građevne dijelove može imati značajan utjecaj na udio ugrađene primarne energije i emisiju stakleničkih plinova u zgradi. U procesu optimizacije toplinske ovojnice kada su poboljšana toplinska svojstva niskoenergetske kuće, odabrana

toplinska izolacija pasivne kuće može utjecati na dodatni dio ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova.

Dobiveni rezultati pokazuju da razlika iznosi 10 do 15 %, dok su zahtjevi za grijanjem zgrade smanjeni za 50 %. Izbor odgovarajućeg sustava za grijanje je sastavni dio održivog planiranja jer je povezan sa zahtjevom ugrađene primarne energije, a u nadolazećim desetljećima tijekom uporabnog vijeka zgrada, najvažniji parametar bit će potrošnja operativne energije.

Prikladno odabran sustav grijanja može smanjiti potrošnju primarne energije u zgradi i emisiju stakleničkih plinova u građevnim dijelovima ovojnice zgrade, kada se primjenjuju materijali i komponente ovojnice s većim ekološkim opterećenjem. Međutim, ako sustav grijanja nije prikladno odabran, zgrada s najboljim rezultatima ugrađene energije i emisije stakleničkih plinova može biti preopterećena tijekom uporabnog vijeka, a posljedično tome konačni rezultati mogli bi biti nepovoljni.

Prilikom planiranja treba uzeti u obzir da sustav grijanja ima znatno kraći uporabni vijek nego toplinska ovojnica, primjerice on iznosi 15-20 godina u odnosu na građevne dijelove ovojnice čiji je uporabni vijek dulji od 50 godina. Ugrađena energija i operativna energija moraju stoga biti uzete u obzir pri projektiranju toplinske ovojnice i energetskog sustava. Mjerenje ključnih pokazatelja $PEC_{n.r.}$ i GWP_{100} treba biti kumulativno tijekom vremenskog perioda u kojem se promatraju.

5.1. Isplativost investicije dodatne ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova u poboljšanoj ovojnici

Zgrada s poboljšanom toplinskom izolacijom ima manji gubitak topline, stoga je potrošnja energije za grijanje prostora manja. Toplina potrebna za grijanje prostora također je definirana potrošnjom primarne energije i emisijom stakleničkih plinova. U procjeni isplativosti primarne energije i emisije CO_2 ugrađenih u konstrukcijskim elementima, primijenjene su sljedeće pretpostavke:

- Budući da visokoenergetske zgrade primjenjuju toplinske crpke, u proračunu su upotrijebljeni električna energija s emisijom od $0,53 \text{ kg } CO_2/kWh$ i faktor pretvorbe primarne energije od 2,5. Obje vrijednosti su određene [17] za slučaj kada vrsta goriva nije točno definirana, ili nije poznata. Godišnja učinkovitost toplinskih crpki je $COP = 3,5$ i također je uključena u proračun. Ta vrijednost je uzeta kao minimalna dopuštena vrijednost za sustave grijanja koji koriste toplinsku crpku zrak/voda.
- Kako bi se odredio gubitak topline, uzeta je u obzir pozitivna temperaturna suma tj. temperaturni deficit HDD kao referentna vrijednost, određena kao najčešća i/ili najznačajnija vrijednost na području Slovenije [18].
- Referentne vrijednosti toplinske izolacije zgrada uzete su iz slovenskih tehničkih propisa [17], koji određuju maksimalnu dopuštenu U-vrijednost vanjske stolarije $U=1,3 \text{ W}/(m^2K)$, poda u prizemlju $U=0,30 \text{ W}/(m^2K)$, krova ili stropa $U=0,20 \text{ W}/(m^2K)$ i vanjskih zidova $U=0,28 \text{ W}/(m^2K)$.

- Referentna vrijednost za vanjske zidove je preuzeta iz propisa za zidane građevne dijelove, budući da se debljina ovojnice može stalno mijenjati. Praktički je nemoguće dobiti tako veliku U-vrijednost u vanjskim drvenim zidovima. Njihova referentna vrijednost iznosi $0,18 \text{ W}/(m^2K)$, što se može postići u tim elementima s minimalnom toplinskom izolacijom.
- Vrijeme povrata investicija jednostavno je računano kao odnos dodatne primarne energije i emisije stakleničkih plinova te ostvarenog smanjenja godišnjeg gubitka topline u toplinskoj ovojnici zgrade.

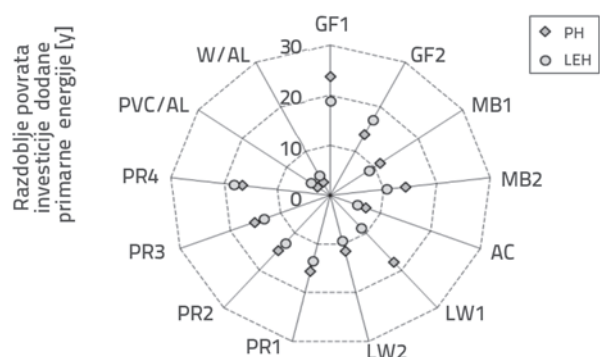
Povrat ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova kako bi se poboljšala toplinska ovojnica građevnih dijelova odnosi se na odnos između spomenute U-vrijednosti i ciljane U-vrijednosti konstrukcijskih elemenata za niskoenergetsku kuću ($U = 0,15 \text{ W}/(m^2K)$) i pasivnu kuću ($U = 0,10 \text{ W}/(m^2K)$). Dodana ugrađena primarna energija u analiziranim konstrukcijskim elementima vraća se u obliku uštede koja je rezultat smanjene potrošnje energije za grijanje prostora.

Vrijeme povrata ulaganja primarne energije je između 10 i 20 godina (slika 9.). Iznimka je vanjski zid od porobetona (AC), čije je vrijeme povrata znatno kraće zbog prethodno opisanih materijala (slika 1.a).

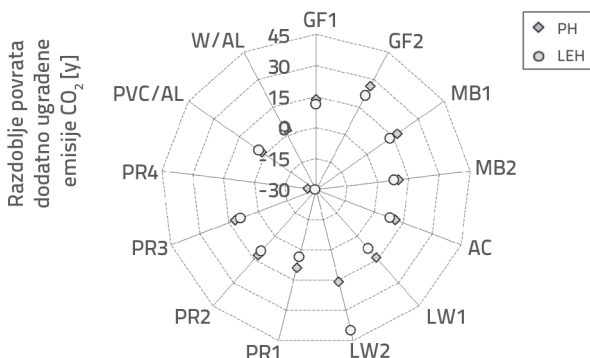
U građevnim dijelovima prizemlja, vrijeme povrata može biti dulje od 20 godina. Ukupno vrijeme povrata je mnogo kraće od uporabnog vijeka toplinske ovojnice zgrade.

Usporedni rezultati također pokazuju da dodana ugrađena primarna energija u elementima pasivne kuće ima povratni period kraći od 5 godina.

Ugrađena emisija stakleničkih plinova u elementima ima različite povratne periode (slika 10.) u operativnoj fazi zgrade zbog poboljšane toplinske izolacije. Uobičajeno vrijeme povrata iznosi između 10 i 20 godina. Jedino odstupanje u povratu zabilježeno je u elementima poda u prizemlju. Zbog primjene drvenih elemenata i izolacije od celuloznih pahuljica (slika 1.b), građevni dijelovi s višim stupnjem toplinske izolacije imaju kraći period povrata.



Slika 9. Povratni period dodane ugrađene primarne energije u građevnim dijelovima ovojnice LEH i PH



Slika 10. Povratni period dodane ugrađene emisije stakleničkih plinova u dijelovima ovojnice LEH i PH

Za spojne elemente karakteristično je da se U-vrijednost elemenata smanjuje s minimalnom dodanom primarnom energijom (slika 2.a), pa je vrijeme povrata vrlo kratko i vrlo slično kao kod prozora s drvenim i PVC okvirima. Tijekom naknadne upotrebe zgrade, više se primarne energije očuva zbog visokoenergetski učinkovitih prozora jer je velika razlika u odnosu U-vrijednosti i ciljane U-vrijednosti.

Vrijeme povrata investicije za niskoenergetske elemente stoga iznosi od 4 do 5 godina, s tim da je kod pasivnih kuća vrijeme povrata kraće (približno 3 godine) (slika 9.).

Vrijeme povrata dodane ugrađene emisije stakleničkih plinova za prozore s PVC okvirima je između 2 (PH) i 3 godine (LEH). Za prozore s drvenim okvirima vrijeme povrata je između 1,5 (PH) i 3,5 godine (LEH). Uspoređujući rezultate ostalih konstrukcijskih elemenata toplinske ovojnice, obrnuti slučaj je zabilježen u povratnim periodima vanjskih spojeva.

Vanjski spojevi s boljom energetskom učinkovitošću uvijek imaju kraće vrijeme povrata dodane ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova (slika 10.).

5.2. Utjecaj ključnih parametara na vrijeme povrata dodane ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova za visokoenergetski učinkovitu ovojnicu

Kumulativni rezultati primarne energije i emisije stakleničkih plinova za gradnju i naknadnu primjenu konstrukcijskih elemenata također su pod utjecajem ključnih parametara koji nisu izravno povezani s vrstom toplinske ovojnice i sustavom grijanja. Takav odnos je indirektan i trebalo bi ga uzeti u obzir prilikom projektiranja održive energetski učinkovite zgrade.

5.2.1. Utjecaj temperaturnog deficita

Analiziran je utjecaj odstupanja toplinskih gubitaka na lokaciji nove zgrade. Najveći utjecaj bio je na modificiranim toplinskim gubicima zgrade i stoga su modificirani i zahtjevi za potrošnjom primarne energije za grijanje prostora. Takav utjecaj je analiziran za vanjski zid SB1. U referentnim vrijednostima temperaturnog

deficita, vrijeme povrata dodane ugrađene primarne energije bilo je 11 godina za toplinsku izolaciju u niskoenergetskoj, odnosno 9 godina u pasivnoj kući (slika 9.). Vrijeme povrata za dodanu emisiju stakleničkih plinova bilo je 18, odnosno 13 godina (slika 10.). Da bi se procijenio utjecaj, odabrana su dva tipična temperaturna deficita, HDD 2000 i 4000 Kd/a. Slovenski gradovi na obali (primjerice Koper, Izola), s vrijednostima 2.100 Kd/a, imaju vrijednosti koje su ispod donjeg praga referentnog temperaturnog deficita, dok gradovi u alpskom području, primjerice Jesenice, s vrijednošću 4.100 Kd/a imaju vrijednosti iznad referentnog temperaturnog deficita.

U toplinskoj ovojnici nove zgrade smještene u području s izraženim temperaturnim gubicima, zabilježeni su pozitivni učinci u obliku povećane godišnje uštede energije, koji se očituju u kraćem vremenu povrata, približno između 20 % i 25 %. U području umjerene klime, dobivene vrijednosti su mnogo manje, pa je vrijeme povrata povećano za 40 do 50 %. Zaključeno je sljedeće:

- U hladnijim klimatskim uvjetima, najveća razina toplinske izolacije u elementima toplinske ovojnice uvijek je opravdana s obzirom na okolinu i stoga mora biti prioritet pri donošenju odluka.
- U umjerenim klimatskim uvjetima, okolišni pokazatelji i uštede energije u vanjskim zidovima niskoenergetske i pasivne kuće bili su gotovo jednaki na kraju uporabnog vijeka toplinske izolacije. U umjerenim klimatskim uvjetima, najviša razina toplinske izolacije nije potrebna.

5.2.2. Utjecaj načina grijanja

S obzirom na to da ugrađena primarna energija i emisija stakleničkih plinova mogu utjecati na sastav građevnih dijelova toplinske ovojnice, korištenje zgrade može biti pod utjecajem izvora energije i izbora sustava grijanja.

U proračunu referentnih vrijednosti primijenjen je uobičajen izvor energije (električna energija) i najčešće korišten sustav grijanja (toplinska crpka). Za proračun graničnih vrijednosti u smislu utjecaja energije i okoliša upotrijebljeni su najnepovoljniji sustavi grijanja (direktno pretvaranje električne energije u toplinu) i najpovoljniji sustavi grijanja (drvena biomasa u modernim kaminima).

U slučaju najnepovoljnijeg odabira sustava za grijanje (električne energije), vrijeme povrata za elemente toplinske ovojnice SB1 smanjeno je za 60 do 70 %, primjerice na period kraći od 10 godina, kao ekološki nepovoljno rješenje. Odabirom sustava grijanja s minimalnim utjecajem (drvena biomasa) na primarnu energiju i emisiju stakleničkih plinova, vrijeme povrata može premašiti uporabni vijek toplinske ovojnice. Ti zaključci navode da donošenje odluka može biti dvostrano:

- U sustavima grijanja koji nisu štetni za okoliš (primjerice drvena biomasa) trebalo bi primijeniti samo visokoučinkovite sustave toplinske zaštite s minimalnom početnom energijom i utjecajem na okoliš (primjerice konstrukcijske elemente od drva i prirodnih materijala). Sustav grijanja s niskim utjecajem

na okoliš zahtijeva toplinsku ovojnicu koja također ima minimalni utjecaj na okoliš.

- U sustavima grijanja koji imaju velik utjecaj na okoliš treba koristiti visokoenergetski učinkovite elemente toplinske ovojnice. Pri izboru takvih elemenata, njihova energetska učinkovitost trebala bi biti glavni kriterij. U tom slučaju, s obzirom na okoliš, tehnologija građenja nije od presudne važnosti, jer je utjecaj u fazi gradnje minimalan.

6. Zaključak

Prikladno odabrana tehnička rješenja od ključne su važnosti u projektiranju održivih građevina. Odluke projektanta ne utječu samo na smanjenu potrošnju primarne energije već i na smanjenje emisije stakleničkih plinova tijekom izgradnje, a pravilnim projektiranjem održavaju se najniže kumulativne vrijednosti energetske i okolišnog pokazatelja tijekom uporabnog vijeka zgrade. Visokoenergetski učinkovita zgrada može se izgraditi s minimalnim dodatnim ulaganjima, koja se isplate u kratkom roku zbog uštede energije tijekom uporabnog vijeka građevine.

Rezultati analize pokazuju da su dodana ugrađena primarna energija i emisija stakleničkih plinova za izgradnju pasivne kuće opravdani, s obzirom na lokaciju zgrade, odnosno gubitak topline.

Vrijeme povrata je kraće u odnosu na uporabni vijek građevnih dijelova, čak i pri graničnim vrijednostima toplinskih gubitaka. Pri projektiranju zgrada, trebalo bi uzeti u obzir da: visokoenergetski učinkoviti vanjski spojevi imaju kraće vrijeme povrata i stoga su povoljniji od drugih manje učinkovitih rješenja.

Poboljšana toplinska izolacija u građevnim dijelovima s velikim utjecajem nosivih materijala ima ograničen utjecaj, pa se rješenja održivosti moraju temeljiti na visokoučinkovitoj izolaciji. Da bi se smanjila potrošnja primarne energije u toplinskoj ovojnici zgrade, mogu se graditi i drvene i zidane građevine. S obzirom na emisiju stakleničkih plinova, drvene građevine ili izolacija od drvenih materijala uvijek su bolji izbor.

Sustav za ventilaciju ne zahtijeva veliku potrošnju energije u fazi gradnje zgrade, a omogućuje velike uštede energije potrebne za grijanje prostora tijekom uporabljivosti zgrade.

Takve se uštede ne mogu ostvariti u poboljšavanju toplinske ovojnice pri istom udjelu ugrađene primarne energije i emisije stakleničkih plinova. Izbor sustava grijanja s većom potrošnjom energije u fazi izgradnje treba biti u skladu s izborom sustava

toplinske ovojnice zgrade ili treba odgovarati principima održive gradnje.

Drvene pasivne kuće s modernim pećima na drvenu biomasu imaju minimalan dugoročni utjecaj na okoliš, dok se sustavi grijanja na fosilna goriva trebaju kombinirati sa sustavima toplinske zaštite koji odgovaraju principima za niskoenergetske i pasivne kuće.

Opis znakovlja

A_k	- ploština korisne površine zgrade [m ²]
A	- oplošje grijanog dijela zgrade [m ²]
A_w	- ploština površine prozora [m ²]
f_o	- faktor oblika zgrade [m ⁻¹]
U	- koeficijent prolaska topline [W/m ² K]
U_m	- koeficijent prolaska topline [W/m ² K]
U_f	- koeficijent prolaska topline okvira prozora [W/m ² K]
U_g	- koeficijent prolaska topline stakla [W/m ² K]
U_w	- koeficijent prolaska topline prozora [W/m ² K]
n	- broj izmjena zraka [h ⁻¹]
n_{50}	- zrakonepropusnost ovojnice zgrade, mjereno po razlici tlaka od 50 Pa [h ⁻¹]
HDD	- temperaturni deficit [Kd/a]
η_G	- iskoristivost ventilacijskog sustava za povrat topline [%]
Q_{NH}	- godišnja potrebna toplinska energija za grijanje [kWh/a]
P_H	- potrebna toplinska snaga tijekom najhladnijih dana [W]
$PEC_{n.r.}$	- količina potrošene primarne obnovljive energije po površini građevnog dijela [kWh/m ²]
GWP_{100}	- potencijal globalnog zatopljenja u 100 godina s obzirom na emisiju stakleničkih plinova po površini građevnog dijela [kg CO ₂ equ/m ²]
AP	- potencijal kiselosti okoliša s obzirom na emisiju SO ₂ po jedinici površine građevnog dijela zgrade [kg SO ₂ equ/m ²]
OI3	- kombinirani bezdimenzionalni pokazatelj okoliša

LITERATURA

[1] Sartori, I., Hestnes, A.G.: Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article, *Energy and Buildings*, 39, pp. 249-257, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>

[2] Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K., Bruno, F.: Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis, *Building and Environment*, 73, pp. 106-114, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.019>

- [3] Gustavsson, L., Joelsson, A.: Life cycle primary energy analysis of residential buildings, *Energy and Buildings*, 42, pp. 210-220, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.017>
- [4] Winther, B.N., Hestnes, A.G.: Solar versus green: the analysis of a Norwegian row house, *Solar energy*, 66(6), pp. 387-393, 1999., [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00037-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00037-7)
- [5] Feist, W.: Life cycle energy analysis: comparison of low-energy house, passive house, self-sufficient house, *Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser*, Protokollband nr 8, Passive House Institute, 1997.
- [6] Thormark, C.: A low-energy building in a life cycle - its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, *Building and Environment*, 37, pp. 429-435, 2002., [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6)
- [7] Citherlet, S., Defaux, T.: Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span, *Building and Environment*, 42, pp.591-598, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.025>
- [8] Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., Nyman, M.: Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input-output analysis, *Energy* 32, pp. 1593-1602, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.026>
- [9] Thormark, C.: The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building, *Building and Environment*, 41, pp. 1019-1026, 2006.
- [10] Bradič, H.: Proces projektiranja energetske učinkovitih stambenih obiteljskih zgrada, *Građevinar* 65 8, pp. 753-765.
- [11] Praznik, M., Butala, V., Zbašnik Senegačnik, M.: A Simple Method for Evaluating the Sustainable Design of Energy Efficient Family Houses, *Journal of Mechanical Engineering* 60(2014)6, pp. 425-436.
- [12] Baubook - Rechner für Bauteile, <http://www.baubook.at/>, 10.06.2012.
- [13] PHPP'07: Passive House Planning Package - The energy balance and Passive House design tool, Passive House Institute, Darmstadt, Germany.
- [14] Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, International standard SIST EN ISO 13790:2008.
- [15] Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method, International standard SIST EN ISO 13789:2007.
- [16] IBO - Austrian Institute for Healthy and Ecological Building, Guidelines to calculating the OI3 indicators, version 2.2, junij 2011.
- [17] The Ministry of the Environment and Spatial Planning of the Republic of Slovenia, Technical Guidelines TSG-1-004:2010, Efficient Use of Energy, June 2010.
- [18] Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, Climate Background Viewer, http://kazalci.arso.gov.si/?data=indicator&ind_id=350, 15.09.2011.