

Građevinsko-fizikalne osobine kompozitnog sustava drvo–nosivo staklo

Energy characteristics of CLT – glass composite

Nikola PERKOVIĆ*, Vlatka RAJČIĆ, Jure BARBALIĆ,
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska
Roko ŽARNIĆ, Fakultet za građevinarstvo i geodeziju
Univerziteta u Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

Ključne reči:
CLT; drvo; staklo;
energetska
učinkovitost

Nosivo staklo u kombinaciji s drvenim okvirom predstavlja novu generaciju nosivog kompozitnog sustava koji ima predispozicije za dobro ponašanje prilikom potresa, istovremeno je energetska efikasna i isplativo, estetski prihvatljivo te ima dobre nosive karakteristike. Ispitivanje i ocjenjivanje karakteristika koje definiraju energetska učinkovitost sustava kompozitnih konstrukcija od CLT (Cross Laminated Timber) okvira i stakla jedna su od ključnih faza njezina razvoja i optimizacije. Dobiveni rezultati omogućuju nastavak razvoja kompozitnog sustava u cilju optimizacije energetske učinkovitosti i usklađivanja sa zahtjevima nacionalnih i europskih standarda.

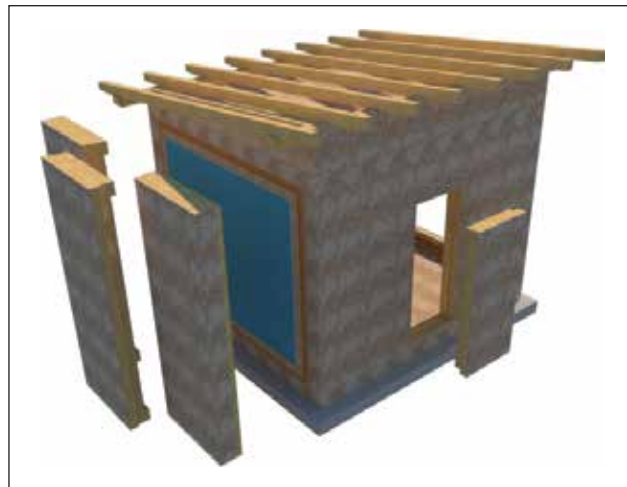
Key words:
CLT; timber; glass;
energy evaluation

The bearing glass in combination with the wooden frame represents a new generation of structural composite system that is predisposed to be earthquake resistant, while being energy-efficient and cost-effective, aesthetically acceptable and has good bearing characteristics. The testing and determination of properties defining the energy efficiency of the composite construction system made of CLT (Cross Laminated Timber) frame and glass are one of the key phases of its development and optimization. Results received enable the continuation of composite panel development in terms of energy performance optimization and alignment with the requirements of national and European standards.

1. Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do naglog razvoja križnog lameliranog drveta (cross laminated timber – CLT) i stakla kao nosivog materijala [1]. Križno lamelirano drvo inovativni je pločasti proizvod slojevite strukture i izvrsnih fizikalno-mehaničkih svojstava. Zbog velike krutosti i nosivosti u ravnini i okomito na ravninu elementa najčešće se primjenjuje u obliku zidnih ili stropnih panela. Povoljna ekološka, estetska i energetska svojstva dodatno ga pospješuju [2] iako postoje brojne norme vezane za proizvode od stakla [3] sama europska norma Eurokod za projektiranje nosivih elemenata konstrukcijskim staklom je u pripremi te su dane tek okvirne smjernice za uporabu i dimenzioniranje elemenata od stakla [4]. Trenutno je u uporabi prednorma prEN 13474 [4], koja je osnova za stvaranje zajedničke norme. U praksi postoje razne vrste sustava i konstrukcija drvenih zgrada kao što su panelni i okvirni sustavi, no još uvijek, razvojem se mogu postići bolje osobine sustava, naročito za gradnju u potresnim područjima u skladu s novom generacijom propisa [5]. Prethodno je kompozitni sustav analiziran s aspekta nosivosti, upotrebljivosti i stabilnosti [1, 6]. U svrhu ispitivanja termičko-fizikalnih karakteristika kompozitnog sustava drva – staklo (laminirano, IZO staklo), u sklopu projekta „Vetrolignum“ izgrađen je takozvani „živi laboratorij“, u obliku jednodimenzionalnog objekta u prirodnoj veličini (slika 1). Tlocrtne dimenzije prostorije su $3,22 \times 3,80$ m, a visina prostorije 2,8 m. Građevina je smještena na neprohodni krov Građevinskog Fakulteta sveučilišta u Zagrebu. Sukladno traženoj formi i energetske zahtjevima građevine, definirana je geometrija i tip gradnje građevine. Ista je izvedena od predgotovljenih panela tipičnih za gradnju drvenih kuća sustavom laganih okvira s bočnim OSB (oriented strand boards) pločama i termoizolacijom. Pod građevine sastavljen je od dva povezana panela, kao i strop građevine. Jedan uzdužni zid izgrađen je u cijelosti od jednog panela, dok drugi uz osnovni

panel sadrži i panel kojem je omogućena naknadna montaža, a koji predstavlja vrata građevine. Bočni zidovi izrađeni su od kompozitnih panela (drvo – nosivo staklo). Također, izrađena su tri dodatna panela kojima je omogućena naknadna montaža u jedan bočni zid, kako bi se simulirao slučaj samo s jednim kompozitnim panelom. Na strop građevine oslanjaju se paneli atike, a na njih krovne grede formirajući jednostrešni kosi krov. Svi paneli formirani su od KVH konstruktivnog punog drva označenog klasom C24 (smreka) prema normi HRN EN 338:2016 sušenog do 18% vlažnosti s blanjanom obradom. Drvena građa pozicionirana je u formi okvira s prečkama i vertikalama, pri čemu je geometrija određene temeljem statičkog proračuna. Između elemenata drvenog okvira postavljen je izolacijski materijal, odnosno višenamjenske ploče od kamene vune tipa NaturBoard VENTI dimenzija 600×1000 mm i debljine 200 mm proizvođača KNAUF Insulation d.o.o.. S unutarnje strane panela iznad izolacije postavljena je parna brana Delta-Dawi GP koja je zabrtvljena odgovarajućim trakama. S obje strane, drveni okviri su naposljetku obloženi OSB pločama dimenzija 125×2500 mm i debljine 18 mm sa završnom obradom u vidu impregnacije kako bi se postiglo svojstvo vodootpornosti. Svi spojevi izvedeni su pocinčanom vijčanom robom ili čavlima dostatne nosivosti. Sastavni elementi objekta jesu i kompozitni paneli drvo–nosivo staklo. Izradi panela istih dimenzija kao i oni koji su ispitani na mehanička svojstva, odnosno $3,22 \times 2,72$ m, pristupilo se na način da se prvo skrojila drvena građa za elemente okvira, koji za razliku od panela koji su ispitivani na mehaničke karakteristike, nisu formirani od CLT drva, već od KVH punog konstruktivnog drva. Razlog tome je jednostavnija izvedba u pogonu (nije potrebno naručivati materijal iz inozemstva), uz iste energetske karakteristike. Gradnja drvom je vrlo brza i u potpunosti pogodna prethodnoj pripremi u tvornicama, a u sveukupnom životnom rasponu (cradel to cradel – koljevka do koljevkice) pokazuju izuzetno dobre rezultate u smislu ekonomičnosti i održive gradnje te smanjenog CO₂ utiska



Slika 1. Objekt „Vetrolignum“

[9]. S obzirom na kompleksnost kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo i intencije prikazivanja što realnijeg ponašanja i karakteristika ovakvih sustava, istraživanje je podijeljeno u dvije cjeline: laboratorijska ispitivanja i istraživanja na numeričkim modelima. Također, planira se pristupiti LC analizama. Projekt i istraživanje će nadograditi znanje vezano uz dimenzioniranje konstrukcije, novih načina povezivanja nosivih elemenata i te omogućiti izradu studiju optimizacije određenih dijelova panela u svrhu što bolje energetske učinkovitosti sustava. Studije omogućuju zaključke potrebne za izradu objekta kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo, koja bi se u konačnici mogla ugraditi u stvarnu zgradu što je i krajnji cilj projekta.

2. Energetska učinkovitost kompozitnog sustava drvo – staklo

Ostvareno je istraživanje i razvoj energetske učinkovitosti kompozitnih sustava u trogodišnjem projektu pod nazivom Vetrolignum (prototip višenamjenskih kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo) koji financira Hrvatska zaklada za znanost. Ispitivanje energetske karakteristika i ponašanja kompozitnog sustava drvo – staklo osnova su za uvođenje ovog inovativnog građevnog elementa u praksu, posebice kada se radi o fasadnom elementu. Fasadni element je ključni faktor koji definira energetske ocjene i razred cjelokupnog objekta. U Europi, jedna od važnijih zakonodavnih direktiva s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti europskih zgrada je Direktiva 2010/31/EU [7]. Također, ova vrsta hibridnog elementa može se koristiti kao neovisni element u izgradnji drvenih konstrukcija, privremeno ili trajno ojačanje i stabiliziranje elemenata postojećih objekata i objekata kulturne baštine, te kao element za izgradnju višenamjenskih i adaptivnih fasadnih sustava. Uzimajući u obzir navedeno, elementi fasade moraju biti projektirani tako da zgradama

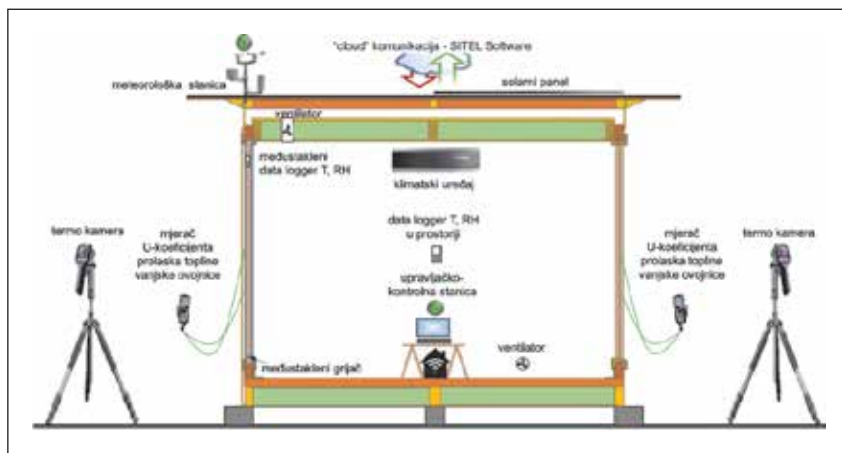
pružaju potrebnu fleksibilnost u pogledu protoka energije i toplinske udobnosti. Ispitivanje i određivanje osobina koje definiraju energetske učinkovitost prototipa hibridnog konstrukcijskog sustava sastavljenog od drvenog lameliranog okvira i ispunom iz dvoslojnog lameliranog stakla jedna je od ključnih faza njegova razvoja i optimizacije u okviru projekta Vetrolignum.

Eksperimentalnim i analitičkim ispitivanjem toplinskih osobina prototipa u drugoj i trećoj godini projekta pridonosi se postizanju razine tehnološke spremnosti TRL6 do TRL 7.

2.1. Program ispitivanja i kontinuirani monitoring termalno-fizikalnih karakteristika

Ispitivanja su provedena u dva jednogodišnja ciklusa koja su u nastavku nazvana „Ciklus 1“ i „Ciklus 2“. Ciklusi se razlikuju u orijentaciji objekta i različitim vrstama staklenih panela koji se periodično mijenjaju. Ovaj rad opisuje Ciklus 1 koji se odvijao kroz sva godišnja doba u razdoblju od rujna (septembra) 2018. do kolovoza 2019. Ciklus 2 je predviđen od rujna (septembra) 2019. do kolovoza (avgusta) 2020. Ciklus 1 sadržava mjerenje relativne vlažnosti i temperature u prostoru, između dva staklena panela, kao i preliminarna mjerenja potrošnje energije u sustavu. Dodatno su napravljene snimke termografskom kamerom gdje se mogu uočiti toplinski mostovi i problematični detalji spajanje pojedinih elemenata. Na kraju, izvršeno je i preliminarno mjerenje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti u kompozitnom panelu. Svrha istraživanja je dobiti uvid u ponašanje sustava u realnim uvjetima, a sve s ciljem da se postepeno prati poboljšanje i optimizacija energetske učinkovitosti sustava. Tijekom izrade kompozitnog panela između stakala ugrađeni su mjerni uređaji povezani kablovima do mjesta prikupljanja podataka. Na objekt je pričvršćena meteorološka stanica, koja mjeri vanjske klimatske parametre (brzina vjeta i smjer vjeta, ko-

ličina oborina, temperatura i vlaga) te je osiguran sistem kontinuiranog praćenja klimatskih uvjeta i pribavljanja podataka preko namjensko za ovaj projekt razvijene upravljačko-kontrolne stanice (proizvod poduzeća Sitel d.o.o iz Ljubljane), čiji su stručnjaci surađivali pri izvedbi i kontroli mjerenja u živom laboratoriju. U tu svrhu su razvili i izradili centralnu kontrolnu stanicu za prikupljanje podataka i upravljanje mjernim sistemom laboratorija. Kao posebnost, koja nije poznata u praksi, uvodimo i grijanje prostora između dva staklena panela kod dvostrukog zastakljivanja okvira. Budući da će se mjeriti temperatura i relativna vlaga u tom prostoru, automatski će se uključivati grijač kada se postignu uvjeti za rošenje stakala (postizanje točke rosišta ili „dew point“-a).



Slika 2. Mjerna mjesta i mjerni uređaji

Osim toga, na osnovu podataka mjerenja u zimsko doba ustanovit će se i utjecaj tog grijanja na toplinsku transmisiju i utjecaj na potrošnju energije za održavanje stalne temperature u prostoru uz uzimanje u obzir i potrošnje energije za grijanje prostora između stakala. Na krov objekta postavljeni su solarni paneli koji su dodatan vanjski izvor energije. Električna energija za grijanje odnosno hlađenje objekta dovedena je iz priključka na elektro-mrežu, ali i iz solarnih panela pričvršćenih na krov objekta. Naknadno, ugrađeni su klima uređaj i ventilator koji približavaju uvjete u laboratoriju onima u realnom stanju, tj. u svakodnevnom boravku ljudi u stambenim i poslovnim objektima. Ispitivanjem količine isporučene i utrošene energije dobivaju se podaci za proračun energetske bilance zgrade. Pozicija i opis mjernih uređaja može se vidjeti na slici 2.

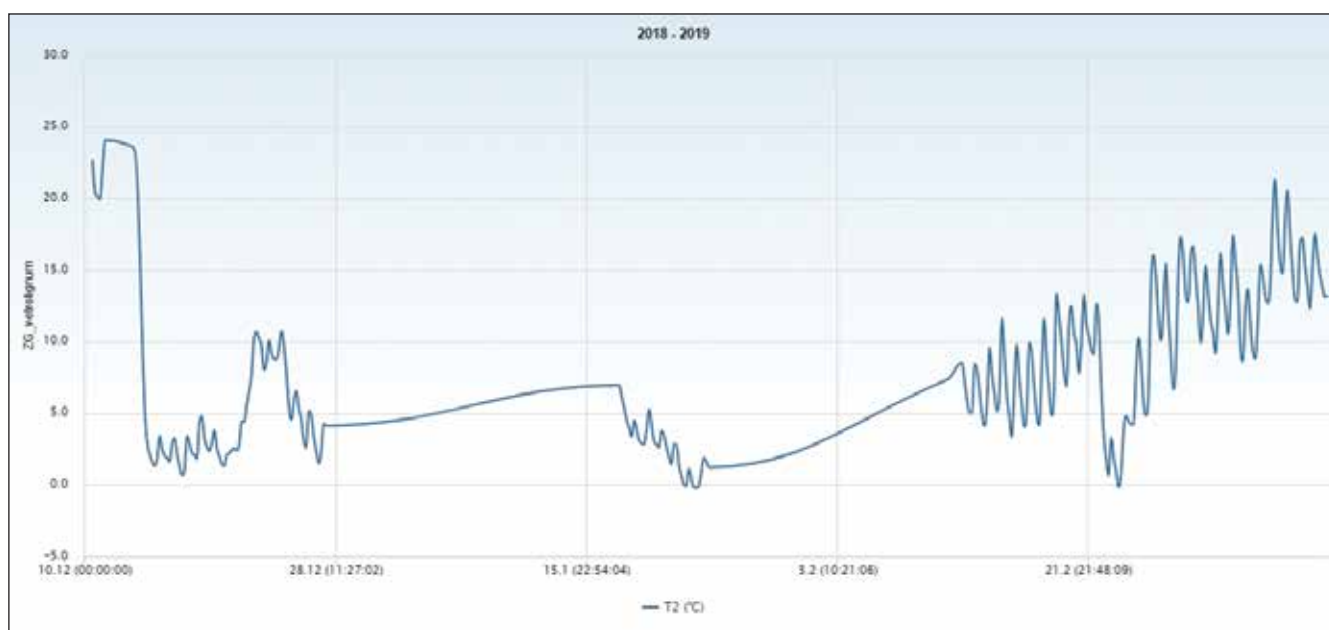
2.2. Rezultati ispitivanja

U nastavku su dani rezultati kontinuiranog mjerenja za zimski period. Na slikama 3 i 4 mogu se vidjeti uvjeti koji su vladali unutar objekta. U ovisnosti u vanjskim uvjetima nastojalo se postići određena temperatura i vlažnost koja je ugodna za boravak ljudi. Praćen je utrošak snage, odnosno potrošnja električne energije.

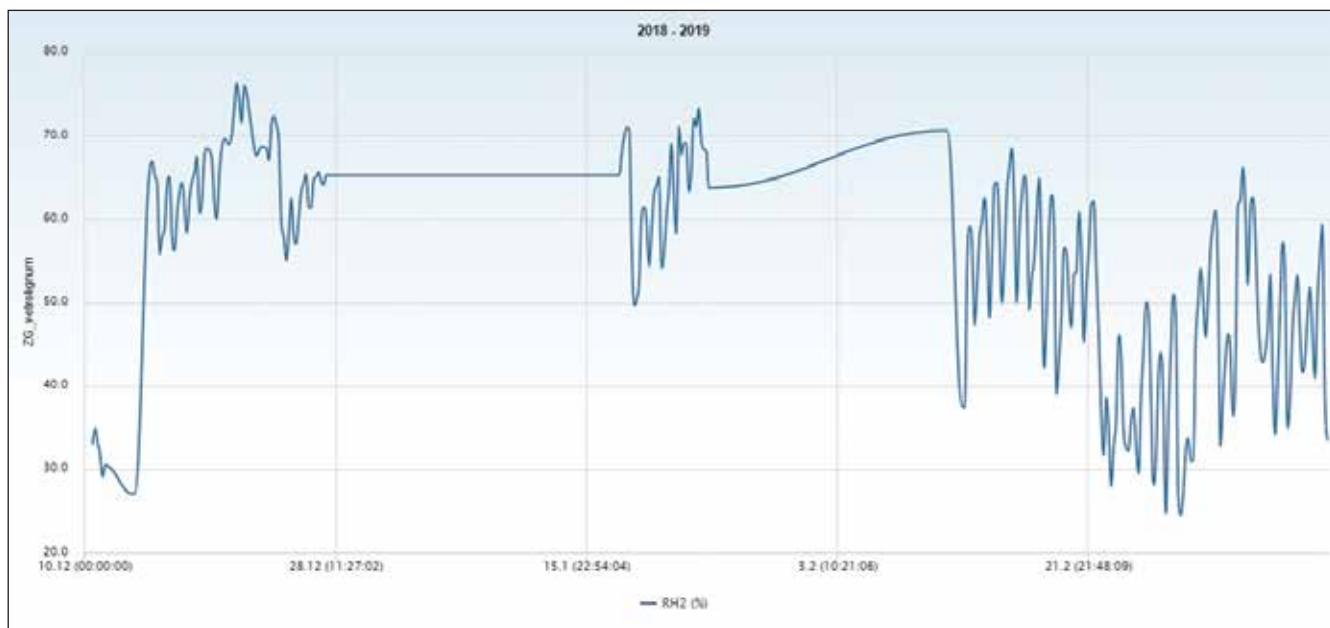
Prilikom kontinuiranog monitoringa uočena je nešto veća potrošnja električne energije za ostvarivanje traženih uvjeta. Razlog tome su linijski toplinski mostovi. Pomoću termo-kamere uočeni su problematični detalji. Na kutnim spojevima, na dodiru drva i stakla javlja se povećan toplinski tok (slika 5).

3. Model za simulaciju toplotnog odaziva panela

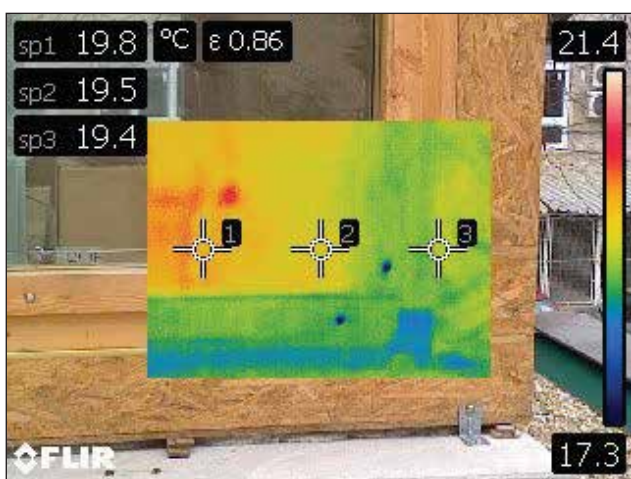
Simulacije predstavljaju jedan od najmoćnijih i najvažnijih alata u modernom svijetu. Osnovna ideja za izradu modela i simulacija je to da je jeftinije i brže napraviti virtualni model koji je zasnovan na poznatim fizičkim procesima, nego realan prototip. Također, ovo se odnosi i na testiranje potencijalno mogućih alternativnih rešenja. Osnovni cilj ovih simulacija bio je da se što točnije izračunaju toplinska opterećenja (gubici i dobici topline), kao i cjelokupna energetska analiza objekta sa aspekta procjene potrošnje svih vidova energije [8]. Postupak i redoslijed modeliranja može se vidjeti na slici 3. Model daje rezultate koji upućuju na racionalnu uporabu energije i toplinske zaštite objekta Vetrolognum. Proračun je napravljen prema zahtjevima iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama „Narodne novine“, broj. 128/15 [9].



Slika 3. Temperatura unutar objekta



Slika 4. Relativna vlaga unutar objekta

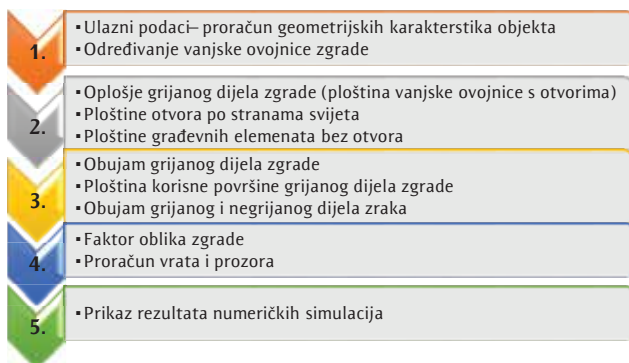


Slika 5. Toplinski mostovi

3.1. Proračun geometrijskih karakteristika zgrade

Na slici 3 mogu se vidjeti oblik i raspored konstitucijskih elemenata. Nakon određivanja vanjske ovojnice objekt pristupilo se proračunu grijanih površina za svaku pojedinu stranu

svijeta. U tablici 1 prikazani su Građevni elementi zone na granici grijano – vani. Konačno, proračunata je površina svih otvora, kao i površina otvora na granici grijano – vani (tablica 2).



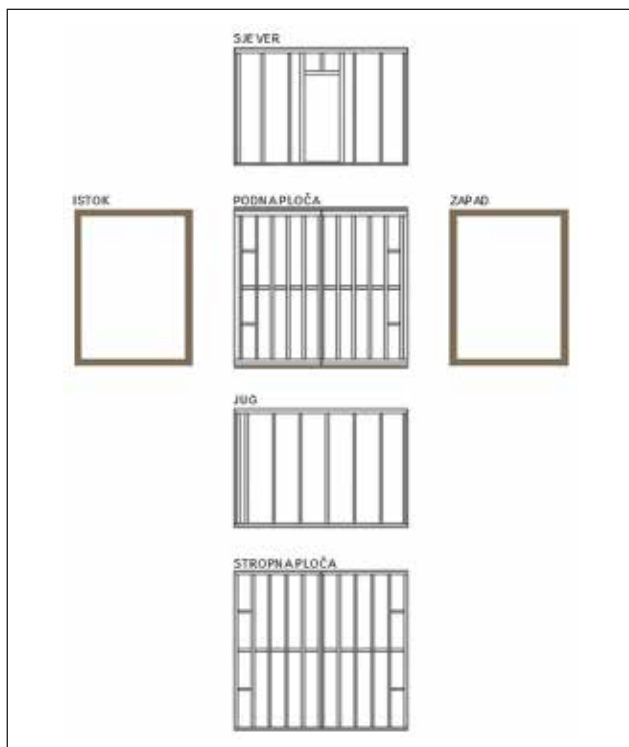
Slika 6. Shema postupaka numeričke analize

Tablica 1. Građevni elementi zone na granici grijano – vani

Vanjski zidovi grijanog dijela s otvorima [m ²]			
Sjever	Istok	Jug	Zapad
10,98	9,82	10,98	9,82
Vanjski zidovi grijanog dijela bez otvora [m ²]			
Sjever	Istok	Jug	Zapad
10,98	0,00	9,38	0,00

Tablica 2. Otvori zone orijentirani po stranama svijeta

Strana svijeta	Grijano			Van		
	Oznaka otvora	Broj komada	Širina [m]	Visina [m]	Površina A _i	Σ
Istok	P1	1	3,61	2,72	9,8192	9,8192
	Ukupna ploština otvora na istoku					9,82
Sjever	Vrata	1	0,8	2	1,6	1,6
	Ukupna ploština otvora na zapadu					1,60
Zapad	P1	1	3,61	2,72	9,8192	9,8192
	Ukupna ploština otvora na zapadu					9,82
	Ukupna površina svih otvora					21,24



Slika 7. Raspored elemenata po stranama svijeta

Faktor oblika zgrade dan je kao omjer površine i volumena grijanog dijela zgrade. Površina grijanog dijela zgrade iznosi 71,40 m², a volumen 46,49 m³.

$$f_0 = \frac{A}{V_e} = 1,54 \text{ m}^{-1}$$

3.2. Proračun prozora i vrata

Objekt Vetrolignum karakterizira velik postotak staklene površine (prozora) koji je direktno izložen vanjskim utjecajima. Sukladno tome, velika količina dobitaka, odnosno gubitaka energije očituje se upravo kroz takve fasadne elemente. Stoga, od iznimne važnosti je napraviti detaljan proračun prozora (i vrata), kako bi dobili što bolji uvid u same energetske karakteristike cijelog objekta. U tablicama 3 i 4 mogu se vidjeti glavni parametri koji karakteriziraju prozore i vrata.

Tablica 3. Proračun prozora

koeficijent prolaska topline dvostrukog vezanog prozora	U _w	2,42	W/m ² K
stupanj propuštanja sunčeve energije kroz ostakljenje	g	0,64	
površina prozora	A _w	9,82	m ²
udio ostakljenja	1-f _f	0,8	-
udio panela	f _p	0	-
površina okvira	A _f	1,964	m ²
površina ostakljenja	A _g	7,856	m ²
površina panela	A _p	0	m ²
koeficijent prolaska topline vanjskog ostakljenja	U _{g1}	5,15	W/m ² K
stupanj propuštanja sunčeve energije kroz ostakljenje	g ₁	0,80	
koeficijent prolaska topline unutarnjeg ostakljenja	U _{g2}	5,15	W/m ² K
stupanj propuštanja sunčeve energije kroz ostakljenje	g ₁	0,80	
debljina zračnog sloja		35	mm
koeficijent prolaska topline okvira	U _f	1,8	W/m ² K
koeficijent prolaska topline ostakljenja	U _g	2,51	W/m ² K
koeficijent prolaska topline panela	U _p		W/m ² K
opseg ostakljenja	l _g	11,54	m
linijski toplinski most ruba ostakljenja	g	0,05	W/mK
opseg panela	l _p	0	m
linijski toplinski most ruba panela	p		W/mK
kut prozora prema horizontali		90	deg
R _{si}	R _{si}	0,13	m ² K/W
R _{se}	R _{se}	0,04	m ² K/W
R _s	R _s	0,18	m ² K/W

3.3. Racionalna uporabe energije i toplinske zaštite objekta

Objekt se nalazi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na adresi Kačićeva 26. Kategorija objekta iz TPRU-ETZZ prema namjeni zone s najvećim Ak (obiteljske kuće), dok je namjena objekta samostalna uporabna cjelina. Objekt je izgrađen 2018. godine. Meteorološki podaci dobavljeni su sa lokalne meteo – stanice koja je instalirana na sami objekt. Meteorološki podaci dani su u tablici 5.

Geometrijske karakteristike dane su u nastavku:

- Obujam grijanog dijela, V_e (m³): 46,64
- Neto obujam, V (m³): 31,33
- Korisna površina, A_K (m²): 11,52
- Bruto podna površina, A_f (m²): 14,95
- Vanjska površina grijanog dijela, A (m²): 71,20
- Faktor oblika, f_o (m⁻¹): 1,53

Tablica 4. Proračun vrata

koeficijent prolaska topline vrata	U_w	0,43	W/m ² K
stupanj propuštanja sunčeve energije kroz ostakljenje	g	0,00	
površina vrata	A_w	1,78	m ²
udio ostakljenja	$1-f_f$	0,7	-
udio panela	f_p	0	-
površina okvira	A_f	0,534	m ²
površina ostakljenja	A_g	1,246	m ²
površina panela	A_p	0	m ²
koeficijent prolaska topline okvira	U_f	1	W/m ² K
koeficijent prolaska topline ostakljenja	U_g	0,18	W/m ² K
stupanj propuštanja sunčeve energije kroz ostakljenje	g	0,00	
koeficijent prolaska topline panela	U_p	0	W/m ² K
opseg ostakljenja	l_g	0	m
linijski toplinski most ruba ostakljenja	g	0,05	W/mK
opseg panela	l_p	0	m
linijski toplinski most ruba panela	p	0	W/mK
kut vrata prema horizontali		90	deg

Tablica 5. Meteorološki podaci

Vanjska temperatura i vlaga zraka						
mjesec	I	II	III	IV	V	VI
temperatura, t (°C)	1,0	2,9	7,1	11,7	16,8	20,3
vlaga, e (°C)	81,0	74,0	68,0	67,0	66,0	67,0
mjesec	VII	VIII	IX	X	XI	XII
temperatura, t (°C)	21,9	21,3	16,3	11,4	6,5	1,4
vlaga, e (°C)	67,0	69,0	76,0	80,0	83,0	85,0

Utjecaj toplinskih mostova uzet je u obzir povećanjem koeficijenta prolaska topline, U (W/m²K), svakog građevnog dijela oplošja grijanog dijela zgrade za $U_{TM} = 0,05$ (W/m²K).

3.3.1. Proračun građevnog dijela objekta

Na osnovu parametara danih u tablici 6 proračunata koeficijent prolaska topline i provjereno je li je zadovoljen zahtjev za dinamičku toplinsku karakteristiku. Dozvoljeni koeficijent prolaska topline za građevni dio, $U_{max} = 0,30$ W/m²K.

Tablica 6. Građevni dio: panel – mineralna vuna

Sloj	Materijal	debljina d (cm)	spec. topl. cp (J/kgK)	gustoća ρ (kg/m ³)	topl. prov. ρ (W/mK)	dif. otpor. Sd (m)
1	4.09 – drvene ploče od usmjerenog iverja (OSB)	1,80	1700	650	0,130	0,9
2	DELTA-DAWI-GP-parna brana	0,02	1250	180	0,190	100,0
3	7.01 – mineralna vuna (MW) prema HRN EN 13162	20,00	1030	30	0,040	0,2
4	4.09 – drvene ploče od usmjerenog iverja (OSB)	1,80	1700	650	0,130	0,9
Ukupno:		23,62				102,0

Koeficijent prolaska topline za građevni dio je dobiven na sljedeći način:

- Plošni otpor prijelaza topline:
 $R_{si} = 0,13$ m²K/W, $R_{se} = 0,04$ m²K/W
- Toplinski otpor homogenih slojeva:
 $RT = R_{si} + d_i/i + R_{se} = 5,45$ m²K/W
- Koeficijent prolaska topline:
 $U = 1/(RT + Ru) + U = 0,18 + 0,00 = 0,18$ W/m²K

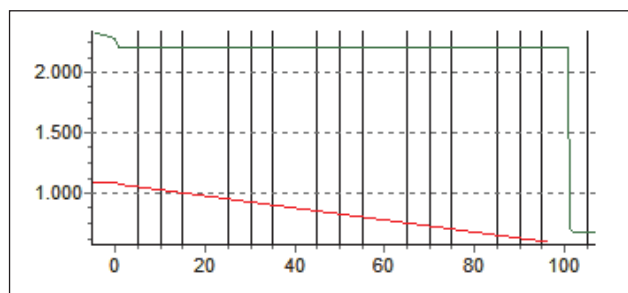
Iz navedenog se može zaključiti da panel zadovoljava zahtjev za koeficijent prolaska topline, kao i zahtjev za dinamičku toplinsku karakteristiku.

Kondenzacija na površini (tablica 6) i unutarnja kondenzacija (slika 8) uvelike određuju ugodnost i uporabivost objekta.

Također, određuje uvjete za stvaranje plijesni. U nastavku su dani tablični prikaz kondenzacije na površini i raspodjela tlakova vodene pare u građevnom dijelu za mali intenzitet korištenja objekta (mock-up).

Tablica 7. Kondenzacija na površini

Mjesec	Tlak pare u prost. pi (Pa)	Tlak zasić. pare psat (Pa)	Površ. temp. $t_{si,min}$ (°C)	Faktor temp. frsi
1 siječanj	1.075	1.075	8,0	0,370
2 veljača	1.119	1.119	8,6	0,335
3 ožujak	1.218	1.218	9,9	0,216
4 travanj	1.396	1.396	11,9	0,026
5 svibanj	1.778	1.778	15,7	–
6 lipanj	2.058	2.058	18,0	–
7 srpanj	2.058	2.058	18,0	–
8 kolovoz	2.058	2.058	18,0	–
9 rujanj	1.737	1.737	15,3	–
10 listopad	1.376	1.376	11,7	0,035
11 studeni	1.204	1.204	9,7	0,238
12 prosinac	1.084	1.084	8,2	0,364



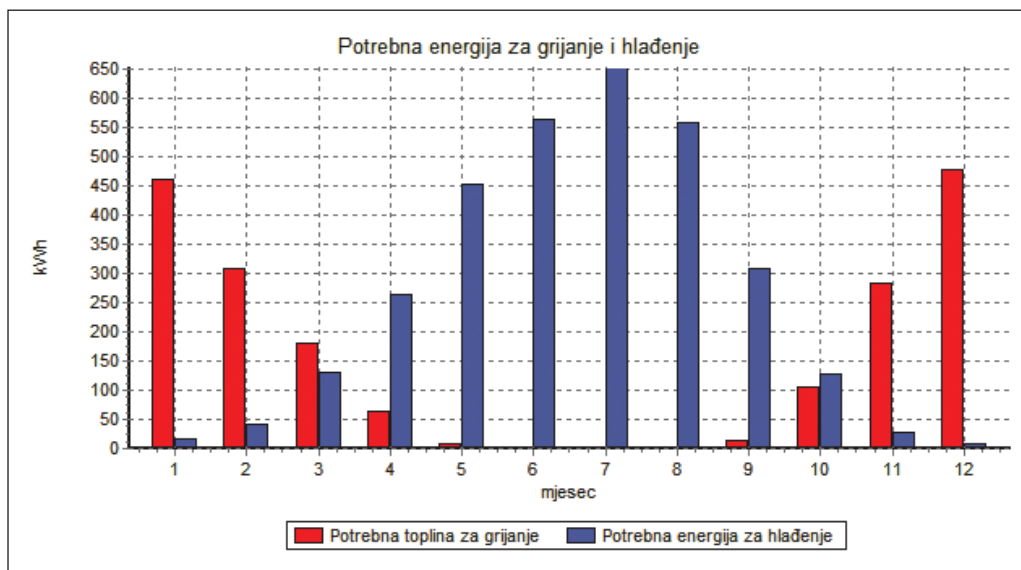
Slika 8. Unutarnja kondenzacija – Raspodjela tlakova vodene pare u građevnom dijelu

Građevni dio zadovoljava zahtjev za unutarnju kondenzaciju.

3.4. Energetska učinkovitost

Na slici 9 može se uočiti raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje za stvarne meteorološke podatke dobivene

pomoću lokalne meteo – postaje. Direktni toplinski gubici kroz prozirne i neprozirne plohe vanjskih građevnih dijelova izražavaju se pomoću koeficijenta transmisijskih toplinskih gubitaka. Toplinski gubici su računati sa povećanim koeficijentom prolaska topline. Energija se dijelom gubi kroz tlo, a dijelom kroz negrijane prostore. U proračunu je uzet i koeficijent toplinskog gubitka zbog provjetravanja. Koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka iznosi 75. Međutim, zbog izrazito velike ostakljenja površine, javljaju se toplinski dobici od sunca. Potrebna energija za hlađenje najviše vrijednosti dostiže od travnja (aprila) do rujna (septembra) s vrijednošću $QC = 260$ – 650 kWh. Najviše vrijednosti potrebne energije za grijanje postižu se od studenog (novembra) do veljače (februara) $QH = 300$ – 460 kWh. Godišnja potrebna energija



Slika 9. Potrebna energija za grijanje i hlađenje

za grijanje iznosi $Q_{H,nd} = 1.906 \text{ kWh/a}$, a godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi $Q_{c,nd} = 3.155 \text{ kWh/a}$. Može se uočiti da je veća potrošnja energije za hlađenje. Visoki gubici energije uzrokovani su neizoliranim toplinskim mostovima, toplinskim mostovima zbog promjene materijala te linijskim toplinskim mostovima zbog promjene geometrije.

4. Zaključak i smjernice za daljnje istraživanje

Rezultati u ovoj fazi ispitivanja pokazuju da su uvjeti u laboratoriju u skladu s očekivanjima. Proračunske vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje ukazuju da je potrebno obratiti pažnju na toplinske mostove i obraditi karakteristične detalje objekta u kojima je očekivano povećanje toplinskog toka. To se prvenstveno odnosi na mjesto spoja različitih građevinskih dijelova, gdje su pretpostavljeni toplinski mostovi zbog promjene geometrije i materijala. Visoki dobici energije rezultat su i toga što nije projektirano zasjenjenje velikih površina ostakljenih dijelova konstrukcije čime se povećava potreba za energijom za hlađenje. U sljedećoj fazi istraživanja pristupit će se razradi detalja i dodatnih mehanizama brtvljenja i rješavanja problema eventualne pojave negativnih čimbenika kao rezultat povišene vlage. Iako je bilo i kišnih razdoblja, nije se pokazala veća vlažnost u zraku između stakala, što ukazuje na uspješno djelovanje brtvi. Mjerenje unutarnje temperature i vlažnosti omogućuje kontrolu i postizanje potrebnih unutarnjih uvjeta. Na temelju analize rezultata mjerenja poboljšana su toplinska svojstva kompozitnog panela i time značajno doprinose podizanju razine njegove tehnološke spremnosti. Mjerenje unutarnje temperature i vlažnosti omogućuje kontrolu i postizanje potrebnih unutarnjih uvjeta. Numeričkim simulacijama može se dobiti detaljniji uvid u ponašanje kompozitnih sustava i pojedinih dijelova sustava. Postupci modeliranja su od velike pomoći pri projektiranju ovakvih sustava te se na njima može zasnivati budući istraživački rad. Eksperimentalna ispitivanja su dijelom potvrđena numeričkim simulacijama, no postoji prostor za detaljniju analizu sustava. Na temelju analize rezultata mjerenja poboljšana su toplinska svojstva kompozitnog panela i time značajno doprinose njegovom tehnološkom razvoju. Ovi rezultati nam daju detaljniji uvid u prednosti i mane sustava, što će biti temelj za daljnje rješavanje i ispitivanje u sljedećoj fazi. Energetska učinkovitost je najbolji i najjeftiniji način za postizanje ciljeva održivog razvoja i u skladu s klimatskim promjenama.

Literatura

- [1] Antolinc, D., *Uporaba steklenih panelov za potresno varno gradnju objekata*, doktorska disertacija, 2013.
- [2] Jeleč, M., D. Varevac, V. Rajčić, *Križno lamelirano drvo (CLT) – pregled stanja područja*, Građevinar, 2018.
- [3] *** EN 12543-2 Glass in building – Laminated glass and laminated safety glass – Part 2: Laminated safety glass, CEN 2011
- [4] *** CEN, prEN 13474-2 Glass in building – Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed loads. 2000.
- [5] Winter, W. H. W., K. Kreher, *Load bearing and stiffening timber-glass composites*, WCTE 2010, 2010.
- [6] Rajčić, V., R. Zarnić, *Seismic response of timber frames with laminated glass infill*, CIB-W18/45-15-4, Växjö, Sweden, 2012. 45: p. 11.
- [7] *** <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0031> pristupljeno: 09.07.2019
- [8] Anđelković A., *Modeliranje energetske karakteristike dvostrukih ventilisanih fasada*, doktorska disertacija, Novi Sad, 2015.
- [9] *** HRN EN ISO 13788:2002 Značajke građevnih dijelova i građevnih dijelova zgrada s obzirom na toplinu i vlagu — Temperatura unutarnje površine kojom se izbjegava kritična vlažnost površine i unutarnja kondenzacija — Metode proračuna (ISO 13788:2001; EN ISO 13788:2001)
- [10] *** Zakon o gradnji, NN 153/13, 20/17
- [11] *** Zakon o energetske učinkovitosti, NN 127/14
- [12] *** Pravilnik o energetske pregledu zgrade i energetske certifikiranju NN (88/17), Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinske zaštiti zgrada NN 128/15, Tehnički propis za prozore i vrata NN 69/06
- [13] *** HRN EN 12524:2002 Građevni materijali i proizvodi — Svojstva s obzirom na toplinu i vlagu — Tablice projektiranih vrijednosti (EN 12524:2000)
- [14] *** HRN EN ISO 13790:2008 Energetska svojstva zgrada — Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora (EN ISO 13790:2008)
- [15] *** HRN EN 15251:2008 Ulazni mikroklimatski parametri za projektiranje i ocjenjivanje energijskih značajka zgrada koji se odnose na kvalitetu zraka, toplinsku lagodnost, osvjjetljenje i akustiku (EN 15251:2007)