

RAZVOJ LESENO-STEKLENEGA FASADNEGA PANELA PO NAČELU FASADE Z DVOJNIM OVOJEM

DEVELOPMENT OF A TIMBER-GLASS FACADE PANEL ON THE PRINCIPLE OF DOUBLE SKIN FACADE

Nina Kolarič Tibaut, univ. dipl. inž. grad., mag. inž. arh.

ninak@atrij.si

Atrij, d. o. o., Gajska ulica 39, 9233 Odranci

red. prof. dr. Miroslav Premrov, univ. dipl. inž. grad.

miroslav.premrov@um.si

izr. prof. dr. Vesna Žegarac Leskovar, univ. dipl. inž. arh.

vesna.zegarac@um.si

Univerza v Mariboru,

Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 620.9:692.232(047.31)

Povzetek | Članek povzema izsledke dosedanjih raziskav na področju fasad z dvojnimi ovojem ter na področju leseno-steklenih stenskih sistemov. Natančneje sta obravnavana dva tipa leseno-steklenih fasadnih panelov (LSFP), prosojni in neprosojni tip, s podtipi glede na različne spremenljive parametre panela. Izdelani so računska analiza toplotne prehodnosti, izračun koeficienta solarnih toplotnih dobitkov, prepustnosti svetlobe obeh zasnovanih tipov LSFP ter izračun temperature v treh določenih točkah znotraj panela s programskimi orodji Window in Therm ter delno tudi U-wert, kjer so upoštevani različni izhodiščni parametri. Spremenljivi parametri v izračunih so globina vmesnega prostora, intenzivnost prezračevanja vmesnega prostora ter možnost senčenja panela.

Ključne besede: leseno-stekleni fasadni panel, fasada z dvojnimi ovojem, toplotna prehodnost, energijska učinkovitost

Summary | This paper describes the results of previous researches in the field of double skin façades and in the field of timber-glass wall systems. Two types of timber-glass facade panels are designed, transparent and opaque type, with subtypes depending on the various variable parameters of the panel. A numerical analysis of the thermal transition, solar heat gain coefficient and visible transmittance of the two types of timber-glass wall systems was carried out with software tool Window and Therm, and partially U-wert, where different starting parameters were taken into account. Temperature at three specified points inside the panel is calculated. Variable parameters in the calculations are the depth of the intermediate space, the ventilation of the intermediate space and the shading of the panel.

Key words: timber-glass composite, facade panel, energy efficiency

1 • UVOD

Stavbe so velik porabnik energije. V Sloveniji so leta 2016 približno 15 % vse porabljene energije potrošile stanovanjske stavbe za ogrevanje in hlajenje. Povprečno gospodinjstvo v Sloveniji potroši za ogrevanje 65 % celotne porabljene energije v stavbi (SURS, 2016). To so vrednosti porabljene energije, ki se jo lahko enostavno zniža s smotrnim načrtovanjem novih stavb in prenovami obstoječih stavb.

Za zmanjšanje porabe energije za ogrevanje in hlajenje v stavbah je zelo pomembno, kakšen ovoj stavbe bomo izbrali. Od oblike posamezne stavbe je seveda odvisno, kolikšen delež ovoja zavzame fasada, vendar je po navadi ta delež velik in je zato izbira fasade zelo pomembna.

Fasada z dvojnimi ovojem (DSF) je ena izmed dobrih možnih izbir, in sicer zaradi učinka, ki ga dobimo pri energetski bilanci stavbe – v primerjavi z enojno stekleno fasado se občutno zmanjšajo poraba energije za ogrevanje kot tudi za hlajenje in s tem povezani stroški. Stopnja prihranka je sicer odvisna od klimatskih razmer oz. lokacije posamezne

stavbe kakor tudi od oblike oz. arhitektonske zasnove stavbe. DSF ima v primerjavi z enojno stekleno fasado tudi višjo zvočno izolativnost (Batungbakal, 2013).

Večino znanstvenih raziskovanj je bilo do sedaj opravljenih na DSF-sistemih, kjer je nosilni konstrukcijski material aluminij. Pascha se je ukvarjala z vplivi na okolje različnih enojnih steklenih fasadnih sistemov (Pascha, 2016). Izdelala je primerjalno LCA-analizo med leseno-steklenim fasadnim sistemom ter klasičnim alusteklenim fasadnim sistemom. V raziskavi je ugotovila, da je za proizvodnjo aluprofila v primerjavi z lesenim profilom potrebne štirikrat več primarne energije, pri tem pa se v ozračje spusti šestnajstkrat več emisij CO₂. Zaradi okoljskih vplivov je torej ena izmed primernih rešitev pri strukturnih steklenih fasadah zamenjava aluokvirjev z lesenim okvirjem.

Leseno-stekleni fasadni panel, ki je zasnovan po principu fasade z dvojnimi ovojem, je primeren za uporabo pri novogradnjah in pri prenovah vseh vrst stavb. Z izbiro fasade, sestavljene iz leseno-steklenih fasadnih panelov,

se lahko pri prenovi stavbe poveča arhitekturna vrednost stavbe ob hkratnem povečanju energetske učinkovitosti stavbe.

DSF je v osnovi sestavljena iz treh slojev: zunanje fasade, vmesnega prostora in notranje fasade. V našem primeru zunanjo fasado predstavlja enoslojna zasteklitev, notranjo fasado pa dvoslojna izolacijska zasteklitev (LSFP, tip 1) ali neprosojna lesena plošča (LSFP, tip 2). Prostor med zunanjo in notranjo fasado imenujemo vmesni prostor.

V članku je obravnavan pregled stanja na področju znanstvenih raziskovanj fasad z dvojnimi ovojem ter leseno-steklenih stenskih kompozitnih sistemov. Predstavljeni so koncept razvoja dveh tipov leseno-steklenega fasadnega panela v sistemu DSF (prosojni in neprosojni tip) ter računska analiza toplotne prehodnosti, izračun koeficienta solarnih toplotnih dobitkov, prepustnosti svetlobe obeh zasnovanih tipov LSFP in izračun temperature v treh določenih točkah znotraj panela s programskimi orodji Window in Therm ter delno tudi U-wert, kjer so upoštevani različni izhodiščni parametri. Spremenljivi parametri v izračunih so globina vmesnega prostora, intenzivnost prezračevanja vmesnega prostora in možnost senčenja panela.

2 • PREGLED STANJA

Tematika fasadnih sistemov z dvojnimi ovojem se v obdobju zadnjih 25 let ob sami aplikaciji v praksi intenzivneje pojavlja tudi v okviru znanstvenih študij.

2.1 Fasada z dvojnimi ovojem

Fasada z dvojnimi ovojem je poseben tip stavbnega ovoja, kjer je drugi ovoj, navadno transparentna zasteklitev, lociran pred običajno fasado stavbe. Prostor med obema slojema fasade je pomemben in se imenuje vmesni prostor. V splošnem je ta vmesni prostor prezračevan (naravno, mehansko ali z uporabo hibridnega sistema) v želji, da se zmanjša pregrevanje stavbe poleti ter da se povečajo prihranki pri ogrevanju pozimi (Safer, 2005).

Fasada z dvojnimi ovojem je torej sestavljena iz zunanje fasade, vmesnega prostora in notranje fasade. Zunanji sloj fasade (zasteklitev) ščiti stavbo pred zunanjimi vremenskimi vplivi ter vpliva na izboljšanje zvočne izolativnosti (pred zunanjim hrupom). Naprave oziroma pripomočki za senčenje so po navadi

nameščeni v vmesnem prostoru, da zaščitijo notranost stavbe (Ding, 2005).

Glede na geometrijo vmesnega prostora ločimo več tipov DSF: škatlasti tip (horizontalne in vertikalne pregrade delijo fasado v manjše med seboj neodvisne dele), kanalski tip (sestavlja ga več škatlastih elementov, med seboj povezanih preko vertikalnih odprtini), koridorna fasada (horizontalne pregrade so vgrajene zaradi akustičnih, požarnovarnostnih ali ventilacijskih razlogov) in večetažna DSF (brez horizontalnih ali vertikalnih pregrad v vmesnem prostoru, prezračevanje poteka skozi odprtino pri tleh in pri strehi) (Oesterle, 2001).

Pri fasadah z dvojnimi ovojem, kjer je notranji ovoj fasade neprosojen, pričakujemo akumulacijo toplote v neprosojnem delu stene, torej govorimo o tipu DSF po načelu Trombe-Michelovega zidu. Gre za masiven zid s selektivno absorpcijsko površino na strani, ki meji proti vmesnemu prostoru z dodanim zunanjim slojem iz stekla. Večjo gostoto ima

ta masivni del, več toplote lahko akumulira. Ko sončni žarki ogrevajo zid, ta akumulira toploto in jo potem s časovnim zamikom oddaja v prostor, ko je temperatura zraka nižja od temperature zidu. Zöllner in sodelavci (Zöllner, 2002) so v svoji raziskavi ugotovili, da bi z vgradnjo druge transparentne fasade okoli stavbe s horizontalnimi prezračevalnimi odprtinami zmanjšali pritisk vetra in omogočili naravno prezračevanje z odpiranjem oken do hitrosti vetra 10 m/s. S tem bi se skrajšal čas mehanskega prezračevanja in znižali stroški porabe. Ta ugotovitev je pomembna predvsem za večetažne stavbe, saj je obtežba vetra na fasado bolj problematična v višjih etažah stavbe.

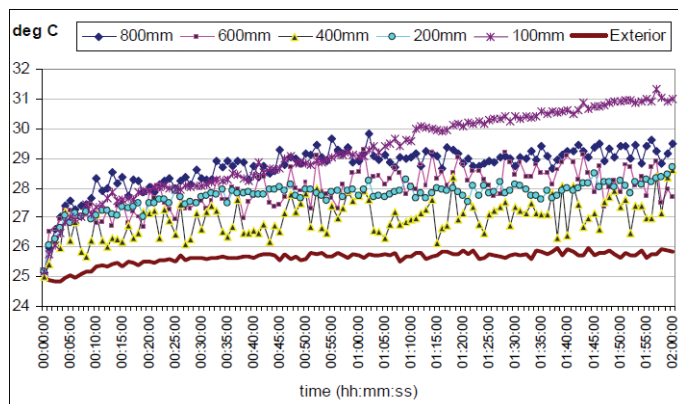
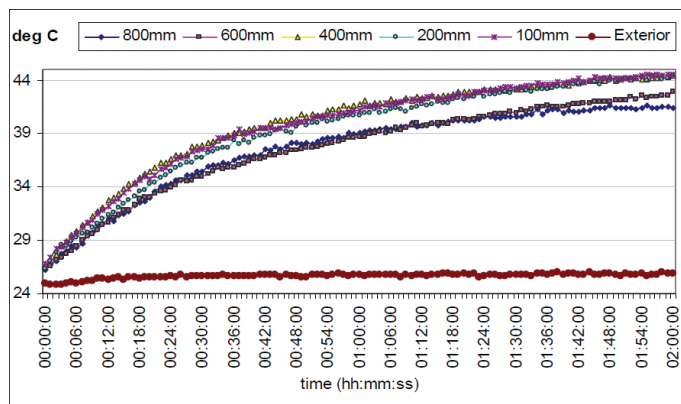
Høseggen in sodelavci (Høseggen, 2008) so raziskovali alternative izvedbe fasade za pisarniško stavbo v Trondheimu na Norveškem. Študija je pokazala, da se potrebna energija za ogrevanje stavbe pri DSF v primerjavi z enojno fasado zmanjša za približno 20 %. Z uporabo zračnega prostora za predgrevanje zraka se lahko dosežejo še večji prihranki. Z vgradnjo oken z izboljšano U-vrednostjo v enojno fasado je potrebna toplota za ogrevanje v primerjavi

z DSF skoraj enaka, zato tu DSF nima več prednosti. V tem primeru se je izkazalo, da je z ekonomskega vidika DSF dražja in neupravičena, in DSF ne bo izbrana zaradi ekonomskih razlogov, temveč zaradi drugih (arhitekturnih ali estetskih).

Vpliv širine vmesnega prostora na temperaturo v zaprtem vmesnem prostoru skozi čas je prikazan na sliki 1 levo, medtem ko je vpliv širine vmesnega prostora na temperaturo v prezračevanem vmesnem prostoru prikazan na sliki 1 desno.

V praksi se pojavljajo različni adhezivi za stik med steklom in lesom, največkrat uporabljena adheziva pa sta silikon in poliuretani.

Na Univerzi v Mariboru je bilo doslej opravljenih več raziskav o leseno-steklenih stenskih elementih. Raziskovali so vpliv zasteklitve



Slika 1 • Vpliv širine vmesnega prostora na temperaturo v vmesnem prostoru, levo – neprezračevan, desno – prezračevan vmesni prostor (Tascon, 2008).

Gavan in sodelavci (Gavan, 2010) so raziskovali vpliv senčil na temperaturni režim DSF in testne celice. Ugotovili so, da postopno zapiranje lamel privede do večje spremembe temperature znotraj testne celice kot dvakratno povečanje zračnega pretoka, kar nam pove, da je boljše avtomatizirati senčila, da se sama zapirajo ob močnem soncu, kot povečati kapaciteto zračnega pretoka, v obeh primerih pa porabimo dodatno električno energijo za izvedbo ene ali druge stvari. Naklon lamel ima bistven vpliv na temperaturo zraka v prostoru (testni celici). Večji ko je naklon (bolj so zaprte žaluzije), manjša je temperatura v prostoru. Iz raziskave sledi, da imajo senčila veliko vlogo pri zmanjšanju pregrevanja prostorov poleti.

Zöllner in sodelavci (Zöllner, 2002) so pri svoji raziskavi variirali širino vmesnega prostora od 0,3 do 1,2 m. Perez-Grande in sodelavci (Perez-Grande, 2005) so izbrali širino vmesnega prostora 0,9 m, da lahko človek opravlja vzdrževanje in čiščenje stekel. Tascon, 2008, je v svoji eksperimentalni raziskavi variiral širino vmesnega prostora od 0,1 m do 0,8 m. Ugotovil je, da je pri večji širini vmesnega prostora temperatura v vmesnem neprezračevanem prostoru manjša. V vseh primerih temperatura v vmesnem neprezračevanem prostoru sčasoma narašča in ni konstantne vrednosti. V primeru prezračevanega vmesnega prostora pa je temperatura vmesnega prostora dokaj stabilna ves čas trajanja preizkusa, razen v primeru, ko je globina vmesnega prostora najmanjša, in sicer 0,1 m, ko se temperatura začne dvigati podobno kot v primeru zaprtega vmesnega prostora.

Globina vmesnega prostora ima tudi neposreden vpliv na temperaturo v sobi (objektu). Najvišje temperature v sobi so bile izmerjene, ko je bila globina vmesnega prostora 0,1 in 0,2 m, najnižja temperatura v sobi pa je bila izmerjena, ko je bila širina 0,4 m, z večanjem razdalje na 0,6 in 0,8 m se je temperatura dvigovala (Tascon, 2008).

Na podlagi navedenih raziskav je mogoče sklepati, da so prednosti DSF predvsem v boljši toplotni izolativnosti, večjih solarnih toplotnih dobitkih v času ogrevalne sezone, manjši potrebi po ohlajevanju prostorov, manjši celotni porabi energije in v zmanjšanih vplivih na okolje. Prednost DSF je tudi v možnosti zaščite senčil pred vremenskimi vplivi, transparentnosti ovoja in arhitekturnega oblikovanja fasade. Slabosti DSF so v večjih stroških izgradnje v primerjavi s klasično fasado, vprašljivi požarni varnosti, ker ni dovolj raziskav in izkušenj na tem področju. Slabosti so tudi izguba uporabne površine zaradi globine vmesnega prostora, večji stroški vzdrževanja in problemi pregrevanja notranjih prostorov, če je steklenih površin veliko.

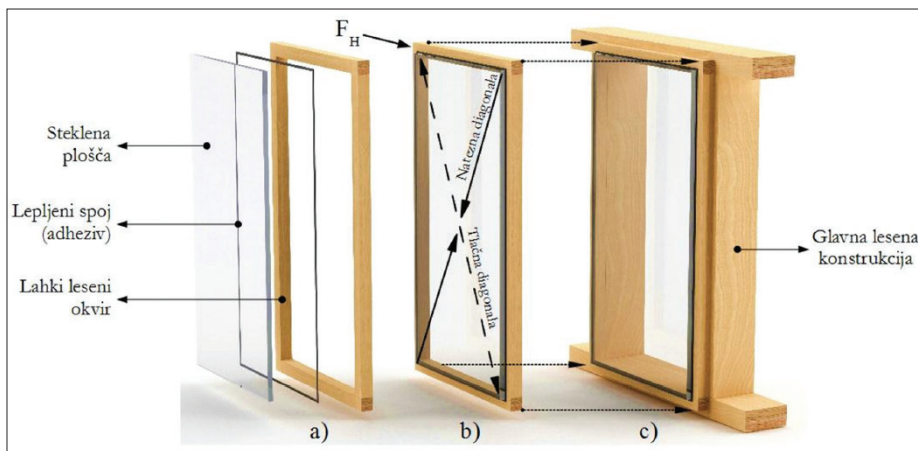
2.2 Leseno-stekleni stenski kompozitni sistemi

Leseno-stekleni paneli se v praksi pojavljajo kot sestavljen sistem iz lesenega okvirja in stekla, ki prevzema funkcijo obloge. Steklo je na leseni okvir običajno prilepljeno ter v takšnih panelih nadomesti klasične obloge (mavčno-vlakenne ali OSB-obloge). Takšni sistemi se obnašajo kot sovprežna konstrukcija, pri čemer tudi steklo prispeva k togosti in horizontalni nosilnosti stenskega panela.

na horizontalno nosilnost in togost lesenih okvirnih stenskih elementov. Ber s sodelavci je v sklopu raziskovalnega dela izvedel razvoj konceptov leseno-steklenih stenskih elementov (LSSE), opravil eksperimentalne oziroma mehanske preiskave ter numerično analizo in ovrednotenje numeričnih modelov. Dokazal je, da so zlasti trdnostne karakteristike razvitih leseno-steklenih stenskih elementov lahko primerljive z okvirno-panelnimi stenskimi elementi s klasičnim obložnim materialom, kot so OSB-plošče, mavčno-vlakenne plošče ali podobno. Razlika v togosti je nekoliko večja in je zlasti odvisna od načina pritrdjevanja in vrste adheziva. Takšne leseno-steklene stenske elemente je smiselno vključiti v konstrukcijski sistem kot nosilni element stavbe, ki lahko bistveno prispeva k povečani horizontalni nosilnosti in togosti celotnega objekta in zlasti zmanjša vpliv torzije po posameznih etažah, posebno v primerih potrebnih obremenitev ((Ber, 2014), (Ber, 2015a), (Ber, 2015b), (Ber, 2016), (Štrukelj, 2015)).

Leseno-steklenemu fasadnemu panelu (LSFP) lahko damo oznako trajnostni element, saj je v primerjavi s klasično strukturno stekleno fasado za proizvodnjo takšnega panela potrebne manj primarne energije, posledično pa se v ozračje spusti manj emisij CO₂. V raziskavi (Pascha, 2016) je bilo ugotovljeno, da je za proizvodnjo aluprofila v primerjavi z lesenim profilom potrebne štirikrat več primarne energije, pri tem pa se v ozračje spusti šestnajstkrat več emisij CO₂.

Druga prednost kompozitnega leseno-steklenega sistema pa je v možni prefabrikaciji elementov ali celotne fasadne stene v tovarni.



Slika 2 • Koncept uporabe LSSE v lahkih montažnih lesenih konstrukcijah (Ber, 2015b).

Opravljenih je bilo veliko raziskav o fasadah z dvojnimi ovojmi. Večina raziskav je bila opravljena na DSF, kjer je nosilna konstrukcija kovinska. Raziskovali so DSF v povezavi s prezračevanjem stavbe, dnevno svetlobo v stavbi, energetskimi prihranki stavbe, senčenjem, fotovoltaike in izkoriščanjem obnovljivih virov energije, vrsto zasteklitve, globino

vmesnega prostora, vplivom vetra oziroma obtežbo vetra ter simulacijo DSF v računalniških programih. V obdobju zadnjih petih let pa so se začele opravljati tudi raziskave na področju leseno-steklenih stenskih kompozitnih sistemov, predvsem glede nosilnosti in vpliva zasteklitve na horizontalno nosilnost in togost lesenih okvirnih stenskih elementov kakor tudi

z vidika trajnostne gradnje in vpliva takšnega leseno-steklenega sistema na okolje v primerjavi s klasičnim sistemom steklene fasade, kjer je nosilna konstrukcija iz aluminija. V teh raziskavah leseno-stekleni stenski element ni razvit po načelu fasade z dvojnimi ovojmi, temveč gre za klasično stekleno fasado, kjer je nosilna konstrukcija iz lesa.

V raziskavi smo se osredotočili na fasado oziroma fasadni sistem, kjer je nosilna konstrukcija v celoti iz lesa, panel pa je razvit po načelu fasade z dvojnimi ovojmi. Takšna rešitev prispeva k trajnostnemu razvoju stavb, vplivi na okolje se zmanjšajo v primerjavi s klasično strukturno stekleno fasado. Racionalno izbrani stekleni del fasade pa prispeva k boljši energetski učinkovitosti stavb. Želimo torej razviti panel, kjer bodo optimalno izkoriščeni sončni dobitki, potreba po hlajenju pa bo minimalna. V računskih izračunih smo tako raziskali tri spremenljive parametre panela: globino vmesnega prostora, intenzivnost prezračevanja vmesnega prostora in možnost senčenja panela.

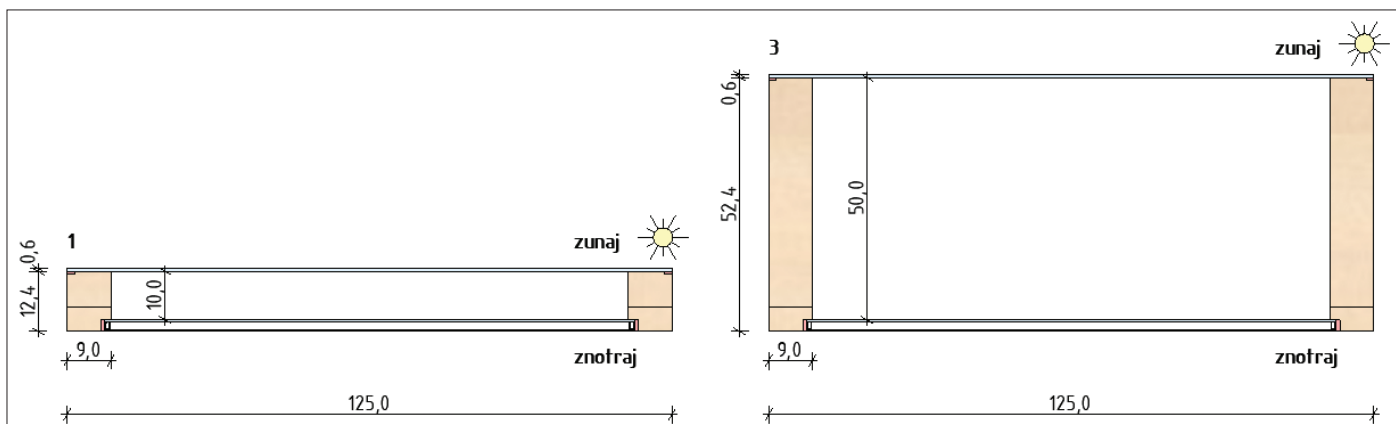
3 • ZASNOVA LESENO-STEKLENEGA FASADNEGA PANELA V SISTEMU DSF

Študija obravnava koncept razvoja panela, namenjenega za uporabo pri različnih gradnjah, in sicer pri objektih lahke lesene gradnje kakor tudi pri objektih masivne gradnje z nosilno konstrukcijo iz opečnih zidakov ali armiranega betona. Ob ustrezni tehnološki pripravi je možno uporabljati panel pri novogradnjah in prenovah stavb. Za potrebe raziskovalne naloge se odločimo za leseni okvir iz lepljenega lesa iglavcev trdnostnega razreda GL24h (SIST EN 338, 2004), ki je sestavljen iz pokončnikov dimenzije 9 cm x

12,4–52,4 cm ter spodnje in zgornje prečke dimenzije 8 cm x 12,4–52,4 cm. Za spoj pokončnikov ter spodnje in zgornje prečke se uporabita po dva samorezna lesna vijaka dimenzije 6 x 160 mm. Na tem mestu je treba poudariti, da v tej nalogi nismo opravljali statičnih izračunov nosilne konstrukcije panela. Iz predhodno opravljenih raziskav sledi, da je primerna dimenzija lesenih pokončnikov (masivni les) lesene strukturne fasade 6,0 x 10,0 cm (Pascha, 2016), in v primeru, da taka stena prispeva k togosti celotnega objekta, se

dimenzije teh pokončnikov gibljejo od 6,0 x 16,0 cm (Hochhauser, 2011), 9,0 x 9,0 cm do 16,0 x 16,0 cm (Ber, 2015). Višina izkustveno racionalnega dopustnega prereza lesenega pokončnika je, ob širini 9,0 cm, do 20,0 cm. Kljub temu smo prerez pokončnika v tej nalogi prilagodili glede na globino vmesnega prostora, saj predstavlja globina enega izmed parametrov, ki ga želimo raziskati v nalogi. Dimenzija panela je odvisna od posamezne stavbe, v katero se bo vgrajeval. Za potrebe raziskave se odločimo računsko raziskovati panel dimenzije 1,25 m x 2,9 m.

Globina vmesnega prostora je eden izmed spremenljivih parametrov v tej raziskavi. Naredili bomo računske izračune za različne glo-



Slika 3 • Prikaz panela z najmanjšo globino vmesnega prostora (10 cm) in največjo globino (50 cm).

bine vmesnega prostora od 0,10 m do 0,50 m s korakom po 0,20 m, torej za globine 0,1 m, 0,3 m in 0,5 m.

Ovisno od zasnove posamičnega tipa panela smo na notranji strani predvideli različne tipe zasteklitve: brez zasteklitve pri neprosojnih panelih, primernih za vgradnjo na obstoječo masivno steno, ter dvoslojno zasteklitev pri transparentnih panelih (možna je tudi vgradnja troslojne zasteklitve). Na zunanji strani smo predvideli enoslojno zasteklitev. V primeru, ko nimamo senčil v medstekelnem vmesnem prostoru, smo predvideli refleksi solarni nanos na zunanji zasteklitvi.

Pri zasnovi LSFP smo uporabili silikonski adheziv, saj ima le ta soglasje za uporabo pri SSF v Evropi. Pri izračunih smo upoštevali materialne karakteristike silikona Kódiglaze S.

Vmesni medstekelni prostor ima možnost kontroliranega prezračevanja. Zajem zraka je iz zunanjega prostora. Računsko analizo smo naredili za prezračevani in neprezračevani tip panela. Detajli izvedbe prezračevanih odprtih kakor tudi zasnova panela na ravni tehnologije izvedbe niso predmet tega dela. Pri izračunih želimo ugotoviti le, kakšen vpliv ima prezračevanje vmesnega prostora na toplotno prehodnost panela. Predvsem v poletnem času predpostavljamo ugodni vpliv prezračevanja vmesnega prostora.

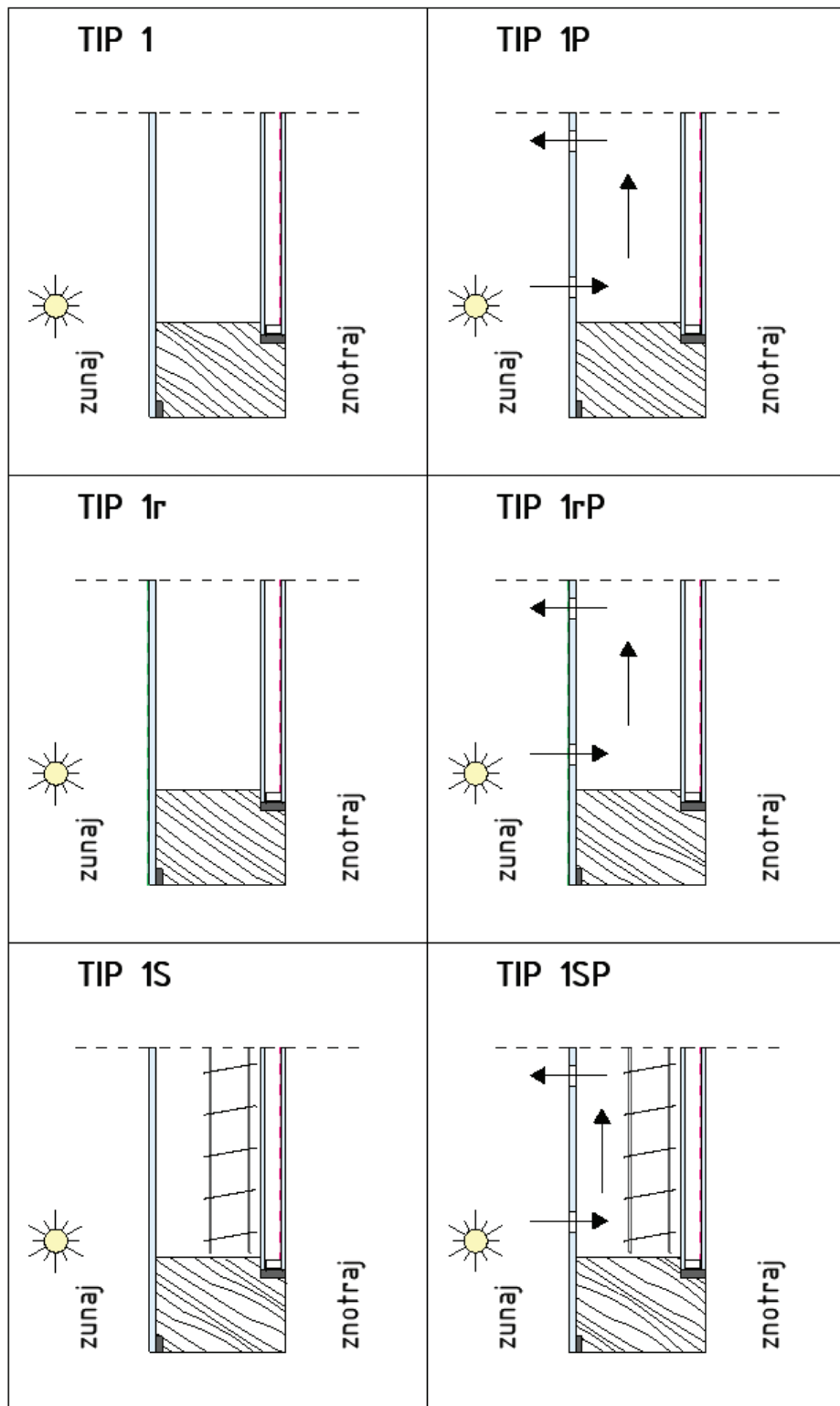
Pri zasnovi LSFP smo upoštevali možnost vgradnje senčil v prostor med zunanjo in notranjo zasteklitvijo. Naredili smo računske izračune za tip panela, kjer so vgrajena senčila v medstekelni prostor, ter za tip panela, kjer ni vgrajenih senčil. Za senčenje smo uporabili žaluzije, pri izračunih pa smo upoštevali, da so senčila spuščena in da so lamele pod kotom 90 oziroma 45 stopinj.

3.1 LSFP tip 1

LSFP tip 1 je škattlasti tip panela po principu fasade z dvojnimi ovojem. Na notranji strani smo predvideli dvoslojno zasteklitev, na zunanji strani smo predvideli enoslojno zasteklitev. Variacije tega tipa panela so v odvisnosti od globine vmesnega prostora (a: 0,1 m, b: 0,3 m in c: 0,5 m), aplikacije senčil v vmesni prostor (S) ali refleksnega nanosa na zunanjo zasteklitev (r) ter možnosti prezračevanja vmesnega prostora (P).

3.2 LSFP tip 2

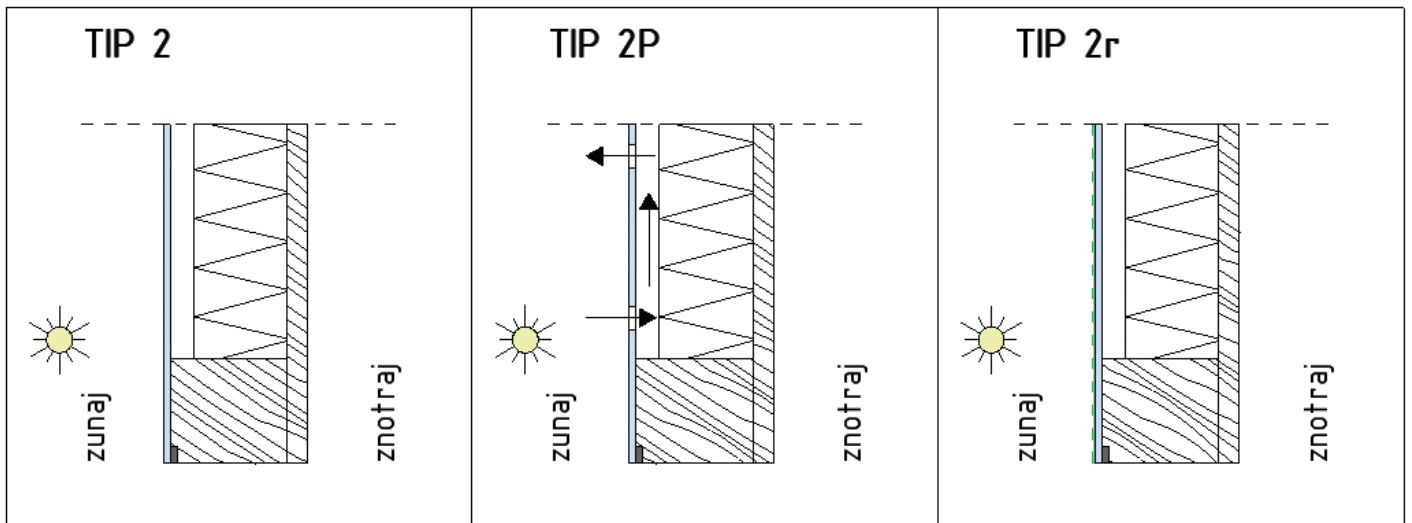
LSFP tip 2 je fiksni, neprosojni panel, primeren za vgradnjo pred zunanjo neprosojno steno. Tak tip panela je cenejši od tipa 1. Primeren je za vgradnjo takrat, ko želimo doseči enak videz fasade, nimamo pa potrebe po vgradnji



Slika 4 • Shematski prikaz podtipov LSFP tip 1.

izolacijskega stekla ali zahtev po prosojnosti panela. Panel je sestavljen iz lesenega nosilnega okvirja, lesne plošče na notranji strani okvirja (npr. OSB- ali druga lesna plošča), toplotne izolacije med okvirjem, opcijo prezračevanega sloja ter enojno zasteklitvijo na

zunanji strani okvirja. Variacije tega tipa panela so v odvisnosti od globine vmesnega prostora (a: 0,1 m, b: 0,3 m in c: 0,5 m), aplikacije refleksnega nanosa na zunanjo zasteklitev (r) in možnosti prezračevanja vmesnega prostora (P).



Slika 5 • Shematski prikaz podtipov LSFP tip 2.

4 • RAČUNSKA ANALIZA

V tem poglavju so predstavljeni izsledki računske analize s programskimi orodji Therm, Window in delno tudi U-wert.

4.1 Metodologija

Programski orodji Window in U-wert računata enodimenzionalni tok skozi zasteklitev, tako da si v prerezu zasteklitve določi točke, preko katerih prehaja toplotni tok. Računa koeficiente prehoda toplote od posamezne točke do druge, in sicer po predpostavki, da je neto energija, ki vstopi v točko, enaka tisti, ki točko zapusti, ter da so robni pogoji konstantni. Iterativna metoda izračuna je potem uporabljena za pravilno razporeditev temperature znotraj določenih točk.

Programsko orodje Therm računa dvodimenzionalni tok prenosa toplote skozi model z metodo končnih elementov.

Računsko analizo smo izdelali za dva tipa in vse podtype leseno-steklenega fasadnega panela. Za vsak podtip LSFP smo posebej izrisali okvir panela v programu Therm in generirali več tipov zasteklitve v programu Window. Variabilni parametri pri obeh tipih so bili enaki, in sicer globina vmesnega prostora, senčenje in prezračevanje vmesnega prostora. Vhodni podatki, kot so tip nosilne konstrukcije panela, dimenzija panela, vrsta uporabljenega adheziva in zasteklitev na zunanji strani panela, so prav tako enaki pri obeh tipih LSFP. Pri vseh podtipih smo opazovali naslednje parametre: toplotno prehodnost celotnega panela in temperaturo v treh točkah znotraj panela. Pri podtipih prosojnega panela smo opazovali še faktor prepustnosti sončnega sevanja in faktor prepustnosti svetlobe. V izračunih so upoštevani robni pogoji CEN, ki so predstavljeni v

nadaljevanju. Izračuni opazovanih parametrov LSFP so izdelani v skladu s standardom ISO 15099. Za podtype LSFP brez senčil je toplotna prehodnost panela izračunana še v skladu s standardom EN 673 in ISO 10077.

4.2 Programska orodja in upoštevani standardi

Računsko analizo smo izvedli s programskimi orodji Window, Therm in U-wert.

S programskim orodjem Window smo generirali različne zasteklitve ter zanje izdelali izračune toplotne prehodnosti. Nato smo v programu Therm izrisali okvir, v katerega smo vstavili zasteklitve, ki smo jih predhodno generirali. Tako smo lahko izračunali toplotno prehodnost in druge karakteristike okvirja. Podatke od okvirja smo nato vstavili v program Window, s katerim smo izračunali toplotno prehodnost celotnega prosojnega tipa panela, faktor prepustnosti sončnega sevanja in faktor prepustnosti svetlobe.

Vhodni parametri

- lesena nosilna konstrukcija panela
- dimenzija panela 1,25 m x 2,9 m
- zasteklitev/obloga na notranji strani panela
- zasteklitev na zunanji strani panela
- silikonski adheziv

Variabilni vhodni parametri

- globina vmesnega prostora (0,1 m, 0,3 m in 0,5 m)
- senčenje (da/ne)
- prezračevanje vmesnega prostora (da/ne)

Opazovani parametri

- toplotna prehodnost celotnega panela
- faktor prepustnosti sončnega sevanja
- faktor prepustnosti svetlobe
- temperatura v treh točkah znotraj panela

Slika 6 • Shematski prikaz vhodnih in opazovanih parametrov pri računski analizi.

Toplotno prehodnost neprosojnega tipa panela smo izračunali s spletnim programskim orodjem U-wert, temperature znotraj panela s programom Therm (niso upoštevani solarni dobitki) oziroma programoma Window in U-wert (upoštevani solarni dobitki).

Izračuni toplotne prehodnosti so izdelani v skladu s standardom EN673. Po tem standardu navajajo toplotno prehodnost oken evropski (in slovenski) proizvajalci stavbnega pohištva (oken). Toplotno prehodnost panela v skladu s standardom EN 673 in ISO 10077 smo s pomočjo karakteristik zasteklitve in okvirja, ki smo jih izračunali v programih Window in Therm, izračunali v posebej zasnovani Excelovi tabeli.

Parametrov zasteklitve s senčilom ne moremo izračunati v skladu s standardom EN673, temveč s standardom ISO 15099. Tako smo izdelali še izračune po standardu ISO 15099, kar nam direktno omogoča program Window. V obeh izračunih smo upoštevali enake robne pogoje okolja glede zunanje in notranje temperature, koeficiente prestopa in druge. Spremenili smo samo nastavitve standarda, po katerem naj program računa toplotne karakteristike zasteklitve in celotnega panela.

4.3 Robni pogoji izračunov

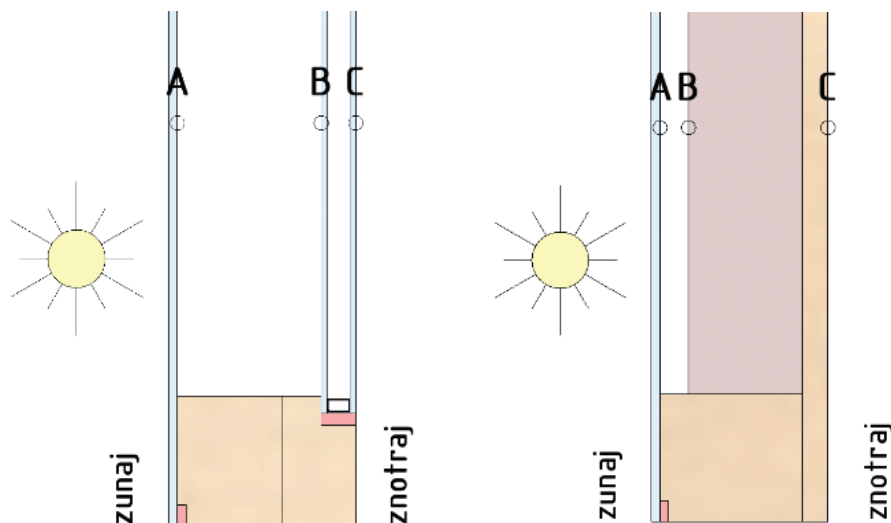
Pri vseh izračunih smo upoštevali robne pogoje CEN, ki so različni za zimski in poletni čas in so prikazani v preglednici 1.

CEN	Zimski čas	Poletni čas
notranja temperatura	20 °C	25 °C
zunanja temperatura	0 °C	30 °C
hitrost vetra zunaj	4 m/s	1 m/s
koeficient prestopa toplote na notranji strani, hcv, int	8 W/(m ² K)	8 W/(m ² K)
koeficient prestopa toplote na zunanji strani, hcv, ext	23 W/(m ² K)	23 W/(m ² K)
svetlobni tok sončnega sevanja, is	300 W/m ²	500 W/m ²

Preglednica 1 • Robni pogoji v zimskem in poletnem času, upoštevani pri računskih izračunih.

Z računsko analizo smo prikazali še temperaturo, in sicer v treh točkah znotraj panela tip 1: na notranji strani zunanje enoslojne

zasteklitve, na zunanji strani notranje dvoslojne zasteklitve in na notranji strani dvoslojne



Slika 7 • Prikaz točk A, B in C, kjer smo odčitali temperaturo pri LSFP tip 1 (levo) in LSFP tip 2 (desno).

zasteklitve. Odčitke temperatur smo grafično naredili v programu Window, posebej za zimski čas, ko je zunanja temperatura 0 °C ter notranja temperatura 20 °C, in posebej za poletni čas, ko je zunanja temperatura 30 °C ter notranja temperatura 25 °C. Za panel tip 2 smo temperaturo prav tako prikazali v treh točkah znotraj panela, in sicer na notranji strani zunanje zasteklitve, na zunanji strani toplotne izolacije in na notranji strani panela.

cient prepustnosti svetlobe smo izračunali s programskima orodjema Window in Therm,

temperature znotraj panela pa s programom Window. Rezultati računske analize opazovanih parametrov za vse podtipе LSFP tip 1 so predstavljeni v preglednicah 2 in 3.

Iz računskih izračunov, prikazanih v preglednicah 2 in 3, sledi, da ima širina vmesnega prostora vpliv na toplotno prehodnost panela. Bistven vpliv na izboljšanje toplotne prehodnosti je pri povečanju vmesnega prostora z 10 cm na 30 cm. Pri dodatnem povečanju na 50 cm izboljšanje toplotne prehodnosti ni več izrazito.

Pričakovani rezultat je, da refleksni nanos ne vpliva na izboljšanje toplotne prehodnosti panela, ima pa bistven vpliv na znižanje temperature znotraj panela. Poleti je temperatura na notranji strani zasteklitve za skoraj 3 °C nižja kot brez refleksnega nanosa. Pozimi pa je temperatura na notranji strani zasteklitve enaka kot v primeru panela brez refleksnega nanosa. Iz tega sledi, da ima refleksni nanos poleti ugoden vpliv na toplotno bivalno ugodje v prostoru, ne da bi znižal nivo tega pozimi.

Tipi panelov, kjer smo imeli prezračevani vmesni prostor, dosegajo višjo toplotno pre-

4.4 Rezultati analize za LSFP tip 1

Toplotno prehodnost prosojnega tipa panela, koeficient solarnih toplotnih dobitkov in koefi-

Podtipi	Rezultati parametrov LSFP			
	žaluzije kot 90° / 45°	Standard EN 673 in ISO 10077	Standard ISO 15099	
Tip 1 a	U vrednost panela (W/m ² K)	U vrednost panela (W/m ² K)	SHGC (koeficient solarnih toplotnih dobitkov)	VT (prepustnost svetlobe)
	0,94	0,975	0,371	0,541

Tip 1 b		0,904	0,946	0,371	0,541
Tip 1 c		0,901	0,944	0,371	0,541
Tip 1P a		1,231	1,283	0,428	0,603
Tip 1P b		1,222	1,281	0,428	0,603
Tip 1P c		1,221	1,275	0,428	0,603
Tip 1r a		0,941	0,976	0,225	0,460
Tip 1r b		0,904	0,946	0,225	0,460
Tip 1r c		0,900	0,944	0,225	0,460
Tip 1rP a		1,234	1,255	0,246	0,500
Tip 1rP b		1,223	1,247	0,246	0,500
Tip 1rP c		1,224	1,249	0,246	0,500
Tip 1S a	žaluzije kot 90° / 45°	/	0,813 / 0,882	0,003 / 0,127	0,000 / 0,080
Tip 1S b		/	0,549 / 0,848	0,003 / 0,127	0,000 / 0,080
Tip 1S c		/	0,487 / 0,844	0,003 / 0,127	0,000 / 0,080
Tip 1SP a		/	1,472 / 1,117	0,005 / 0,084	0,000 / 0,083
Tip 1SP b		/	1,467 / 1,111	0,005 / 0,083	0,000 / 0,083
Tip 1SP c		/	1,441 / 1,108	0,005 / 0,083	0,000 / 0,083

Preglednica 2 • Prikaz rezultatov računske analize za LSFP tip 1, izdelanih v programih Window in Therm.

Podtipi		Odcitane temperature v vmesnem prostoru LSFP (Standard ISO 15099)					
		Zimski čas			Poletni čas		
		Temperatura v točki A (°C)	Temperatura v točki B (°C)	Temperatura v točki C (°C)	Temperatura v točki A (°C)	Temperatura v točki B (°C)	Temperatura v točki C (°C)
Tip 1 a		0,9	4,6	17,8	35,7	39,7	30,2
Tip 1 b		0,9	4,6	17,8	35,7	39,6	30,2
Tip 1 c		0,9	4,6	17,8	35,7	39,6	30,2
Tip 1P a		(Tz=0)	1,0	17,1	(Tz=30)	32,1	29,9
Tip 1P b		(Tz=0)	1,0	17,1	(Tz=30)	32,1	29,9
Tip 1P c		(Tz=0)	1,0	17,1	(Tz=30)	32,1	29,9
Tip 1r a		0,9	4,6	17,8	33,2	33,2	27,4
Tip 1r b		0,9	4,6	17,8	33,2	33,2	27,4
Tip 1r c		0,9	4,6	17,8	33,2	33,2	27,4
Tip 1rP a		(Tz=0)	1,0	17,1	(Tz=30)	32,7	27,5
Tip 1rP b		(Tz=0)	1,0	17,1	(Tz=30)	32,7	27,5
Tip 1rP c		(Tz=0)	1,0	17,1	(Tz=30)	32,7	27,5
Tip 1S a	žaluzije kot 90° / 45°	1,0 / 0,8	15,2 / 6,0	18,6 / 18,0	29,8 / 44,1	26,2 / 59,5	25,4 / 31,5
Tip 1S b		0,4 / 0,8	18,0 / 6,1	19,4 / 18,0	29,9 / 44,1	25,5 / 59,6	25,1 / 31,6
Tip 1S c		0,3 / 0,8	18,7 / 6,1	19,6 / 18,0	29,9 / 44,1	25,3 / 59,7	25,1 / 31,6
Tip 1SP a		(Tz=0)	11,0 / 4,0	17,3 / 17,7	(Tz=30)	27,3 / 38,3	25,7 / 27,7
Tip 1SP b		(Tz=0)	11,0 / 4,0	17,3 / 17,7	(Tz=30)	27,3 / 38,3	25,7 / 27,7
Tip 1SP c		(Tz=0)	11,0 / 4,0	17,3 / 17,7	(Tz=30)	27,3 / 38,3	25,7 / 27,7

Preglednica 3 • Prikaz temperature znotraj zasteklitve panela LSFP tip 1, izračunane v programu Window.

hodnost panela kot panel, kjer ni možnosti prezračevanja vmesnega prostora. Rezultat je pričakovan, saj smo pri prezračevanih panelih upoštevali le sloje do prezračevanega sloja, kar pomeni le okvir in notranjo dvoslojno zasteklitev. S prezračevanjem vmesnega prostora pri osnovnem tipu 1 se poleti zniža temperatura na notranji strani zasteklitve za 0,3 °C, pozimi pa za 0,7 °C. Iz tega sledi, da je pozimi smiselno zmanjšati tok zraka ali popolnoma onemogočiti prezračevanje vmesnega prostora, nasprotno pa poleti prezračevanje vmesnega prostora ugodno vpliva na temperaturo na notranji strani zasteklitve kakor tudi na znižanje stroškov za hlajenje.

V preglednicah 2 in 3 smo prikazali rezultate za senčni tip panela za primer, ko so lamele senčil pod kotom 45 stopinj, ter za primer, ko so pod kotom 90 stopinj (zastrita senčila). Iz računskih izračunov sledi, da senčila pomembno vplivajo tako na toplotno prehodnost panela kakor tudi na temperature znotraj panela. Senčila predstavljajo dodatno izolativnost in tako toplotno prehodnost panela znižajo, seveda če so v celoti spuščena. Senčila imajo bistven vpliv na temperaturo na notranji strani panela: če so spuščena in zastrita (kot lamel 90 stopinj), znižajo temperaturo poleti v točki C tudi za 5 °C pri neprezračevanem tipu panela in za 4 °C pri prezračevanem tipu panela. V primerjavi s panelom Tip 1r je temperatura na notranji strani panela nižja le za 2 °C. Tako je jasno, da senčila bistveno prispevajo k zmanjšanemu pregrevanju prostorov poleti in znižajo potrebe stavbe za hlajenje.

4.5 Rezultati analize za LSFP tip 2

Toplotno prehodnost neprosojnega tipa panela smo izračunali s spletnim programskim orodjem U-wert, temperature znotraj panela pa s programskim orodjem Therm (niso upoštevani solarni dobitki) oziroma s programskima orodjema Window in U-wert (upoštevani solarni dobitki). Rezultati so predstavljeni v preglednicah 4 in 5.

Iz računskih izračunov sledi, da globina vmesnega prostora pri panelu tipa 2 nima bistvenega vpliva na toplotno prehodnost panela, kar je pričakovano, saj nam v tem panelu predstavlja toplotna izolacija bistveni del toplotne upornosti panela. Ker pa je ta ostala enake debeline v vseh treh variacijah globine vmesnega prostora, se posledično tudi U-vrednost panela bistveno ne spreminja s spremembo globine vmesnega prostora.

Iz preglednice 4 je razvidno, da na temperaturo v točki C globina vmesnega prostora

Očitane temperature v vmesnem prostoru LSFP (niso upoštevani solarni dobitki)							
Podtipi	U vrednost panela (W/m ² K)	Zimski čas			Poletni čas		
		Temp. v točki A (°C)	Temp. v točki B (°C)	Temp. v točki C (°C)	Temp. v točki A (°C)	Temp. v točki B (°C)	Temp. v točki C (°C)
Tip 2 a	0,48	0,4	2,0	18,9	29,9	29,5	25,3
Tip 2 b	0,47	0,4	2,0	18,9	29,9	29,5	25,3
Tip 2 c	0,47	0,4	2,1	18,9	29,9	29,5	25,3
Tip 2P a	0,50	/	0,4	18,8	/	29,9	25,3
Tip 2P b	0,50	/	0,4	18,8	/	29,9	25,3
Tip 2P c	0,50	/	0,4	18,8	/	29,9	25,3
Tip 2r a	0,48	0,4	2,0	18,9	29,9	29,5	25,3
Tip 2r b	0,47	0,5	2,0	18,9	29,9	29,5	25,3
Tip 2r c	0,47	0,5	2,1	18,9	29,9	29,5	25,3

Preglednica 4 • Prikaz rezultatov računske analize za LSFP tip 2, izdelane v programu U-wert.

Očitane temperature v vmesnem prostoru LSFP (upoštevani solarni dobitki skozi steklo)						
Podtipi	Zimski čas			Poletni čas		
	Temp. v točki A (°C)	Temp. v točki B (°C)	Temp. v točki C (°C)	Temp. v točki A (°C)	Temp. v točki B (°C)	Temp. v točki C (°C)
Tip 2 a	2,7	13,0	19,6	36,6	42,4	26,1
Tip 2 b	2,7	12,9	19,6	36,6	42,4	26,1
Tip 2 c	2,7	12,9	19,6	36,6	42,4	26,1
Tip 2r a	2,7	13,0	19,6	34,1	35,8	25,7
Tip 2r b	2,7	12,9	19,6	34,1	35,8	25,7
Tip 2r c	2,7	12,9	19,6	34,1	35,8	25,7

Preglednica 5 • Prikaz rezultatov računske analize za LSFP tip 2, izdelane v programih U-wert in Window.

dli refleksni nanos nima velikega vpliva, če gledamo rezultate, kjer solarni dobitki za gretje zraka v vmesnem prostoru niso upoštevani. Če upoštevamo vrednost solarnih dobitkov (preglednica 5), globina vmesnega prostora sicer res nima vpliva na temperaturo znotraj panela, ima pa vpliv na temperaturo refleksni nanos na zunanjem steklu, saj ta odbija sončne žarke in tako prepusti manj solarne energije. Posledično so temperature na notranji strani panela poleti nižje za 0,4 °C, če je na zunanji zasteklitvi izdelan refleksni nanos.

Prezračevanje vmesnega prostora zniža temperaturo znotraj panela v primerjavi s panelom podtipa 2, in sicer temperature pozimi so do 0,4 °C nižje na notranji strani T1 pozimi, medtem ko je poleti temperatura v točki C enaka.

4.6 Zaključki računske analize

Z računsko analizo smo ugotovili, da ima večanje globine vmesnega prostora vpliv na toplotno prehodnost celotnega panela in tako tudi na celotno energijsko bilanco stavbe, kjer je tak panel vgrajen. Trend izboljšanja toplotne prehodnosti je opazen do globine vmesnega prostora 30 cm, pri večjih globinah pa ni več tako opaznega izboljšanja.

Način senčenja prosojnih tipov panela ima velik vpliv na rezultate, ki so simulirani na poletni čas, in sicer na temperaturo na notranji strani panela. Ugodnejše rezultate dobimo z vgradnjo senčil, zadovoljivi rezultati znižanja temperature znotraj panela pa so že tudi z aplikacijo refleksnega nanosa na zunanjo stran stekla. S senčenjem steklenih površin znižamo stroške za hlajenje v stavbi in izboljšamo bivalno ugodje uporabnikov stavbe.

Prezračevanje vmesnega prostora ima neugoden vpliv na toplotno prehodnost celotnega panela pri vseh podtipih panela tip 1 ter nima bistvenega vpliva pri vseh podtipih panela tip 2. V primeru, ko imamo prezračevanje vmesnega prostora, se temperatura na notranji strani panela pozimi zniža za 0,7 do 0,9 °C pri prosojnih tipih panela (LSFP tipi 1), poleti pa za 0,3 °C pri nesenčenih prosojnih tipih panela oziroma se celo poveča pri senčenih tipih panela za 0,1 do 0,3 °C. Temperatura na notranji strani panela pri LSFP tip 2P je pozimi do 0,1 °C nižja v primerjavi z neprezračevanim LSFP tip 2. Z upoštevanjem slojev osnovne stene, na katero bo panel tipa 2 pritrjen, prezračevanje vmesnega prostora nima bistvenega vpliva na temperaturo na notranji strani stene.

5 • SKLEP

Z računsko analizo smo raziskovali vpliv globine vmesnega prostora, načina senčenja in možnosti prezračevanja na toplotno prehodnost panela kakor tudi na temperaturo znotraj panela. Povečanje globine vmesnega prostora ugodno vpliva na izboljšanje toplotne prehodnosti celotnega panela pri vseh prosojnih tipih panelov, do globine 30 cm je to izboljšanje občutno, širše globine pa nimajo bistvenega vpliva na izboljšanje toplotne prehodnosti. Izvedba panelov večje globine je dražja, prerezi nosilne lesene konstrukcije pa so neracionalni in občutno predimenzionirani. Tako iz izvedenih numeričnih izračunov sklepamo, da je globina vmesnega prostora do 30 cm še racionalna za LSFP tip 1. Globina vmesnega prostora nima bistvenega vpliva na izboljšanje toplotne prehodnosti neprosojnih tipov panela.

Način senčenja panelov bistveno vpliva na temperaturo na notranji strani prosojnih tipov panelov predvsem v poletnem času. Ugodnejše rezultate dobimo z vgradnjo žaluzij, zadovoljivi rezultati znižanja temperature znotraj panela so tudi že z aplikacijo refleksnega nanosa na zunanjo stran stekla. S senčenjem steklenih površin znižamo stroške za hlajenje v stavbi in izboljšamo bivalno ugodje uporabnikov stavbe. Spuščena senčila vplivajo tudi na toplotno prehodnost panela, medtem ko refleksni nanos nima vpliva na toplotno prehodnost panela. Bistvena prednost senčil pred re-

fleksnim nanosom je možnost uravnavanja senčenja. Poleti in pozimi imamo lahko ponoči senčila spuščena, da znižamo solarne dobitke poleti ter zmanjšamo toplotne izgube skozi panele pozimi. Pozimi imamo senčila dvignjena podnevi, da dobimo čim več toplotnih dobitkov v stavbo. Refleksni nanos te regulacije nima, saj ga ni mogoče regulirati.

Prezračevanje vmesnega prostora prosojnih tipov LSFP ima neugoden vpliv na toplotno prehodnost celotnega panela ter nima bistvenega vpliva na toplotno prehodnost neprosojnih tipov panela. V primeru, ko imamo prezračevanje vmesnega prostora, se temperatura na notranji strani panela pozimi zniža pri prosojnih tipih panela (LSFP tipi 1) za manj kot stopinjo Celzija, poleti pa za 0,3 stopinje Celzija pri nesenčenih prosojnih tipih panela oziroma se celo minimalno poveča pri senčenih tipih panela, do 0,3 stopinje Celzija. LSFP tip 2 je v tej nalogi razvit kot element, ki bo nadgradil neko osnovno steno. Z upoštevanjem slojev osnovne stene, na katero bo panel tipa 2 pritrjen, prezračevanje vmesnega prostora potem nima bistvenega vpliva na temperaturo na notranji strani celotne fasadne stene. Rezultati pri prezračevanih tipih panelov so tudi posledica tega, da so pri prezračevanem tipu panela upoštevani le sloji do prezračevanega sloja, tako ni mogoče upoštevati solarnih dobitkov v vmesnem prostoru,

ki bi gotovo vplivali na rezultat, niti toplotne upornosti zraka v vmesnem prostoru, ki je sicer odvisna od toka zraka skozi sloj in je pri velikem pretoku lahko tudi zanemarljiva, pri majhnem pretoku zraka pa bi v resnici imela vpliv na temperaturo in na toplotno prehodnost panela.

Rezultati računske analize predstavljajo osnovo za nadaljevanje raziskovalnega dela glede optimalne zasnove leseno-steklenega fasadnega panela, ki bi se lahko uporabljal širše v gradbeništvu. Pred dejansko množično uporabo panela v gradbeništvu bo treba narediti še analizo okoljskih vplivov celotne življenjske dobe panela, vključno z zasnovo vseh potrebnih detajlov ter tehnologijo izvedbe, in sicer v fazi proizvodnje, transporta, montaže, demontaže in uničenja. Izdelati bo treba še eksperimentalne analize in jih primerjati z numeričnimi rezultati v tem članku.

Prednost predstavljenega panela vidimo predvsem v prispevku k trajnostnemu razvoju stavb in majhnimi vplivi na okolje pri uporabi takšnega panela v nasprotju s klasičnimi strukturnimi steklenimi fasadami. Racionalno izbrani stekleni del fasade oziroma delež steklene fasade prispeva tudi k boljši energetski učinkovitosti celotne stavbe, kjer je tak panel vgrajen. Predstavljeni panel ima tudi prednost v možnosti prefabrikacije le-tega in tipski proizvodnji posamičnega panela ali celotne fasadne stene. LSFP je uporaben pri vseh tipih stavb, tako pri novogradnjah in prenovah, predvsem pri poslovnih, hotelskih in javnih stavbah ter tudi pri stanovanjskih stavbah.

6 • LITERATURA

- Batungbakal, A., Konis, K., Gerber, D., Valmont, E., The Acoustic Performance of Double-Skin Glass Facades: A Design Support Tool For Architects, BESS-SB13 CALIFORNIA: Advancing Towards Net Zero. Pomona, California, USA. 24-25 June, 2013.
- Ber, B., Premrov, M., Štrukelj, A., Kuhta, M., Experimental investigations of timber-glass composite wall panels, *Construction & building materials*, ISSN 0950-0618. (Print ed.), Sep. 2014, vol. 66: str. 235–246, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.044, 2014.
- Ber, B., Šušteršič, I., Premrov, M., Štrukelj, A., Dujič, B., Testing of timber-glass composite walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, ISSN 0965-0911. (Print ed.), July 2015, vol. 168, iss. SB7, str. 500–513, <http://www.icevirtuallibrary.com/content/serial/stbu>, doi: 10.1680/stbu.13.00105, 2015a.
- Ber, B., Vpliv zasteklitve na horizontalno nosilnost in togost lesenih okvirnih stenskih elementov, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, 2015b.
- Ber, B., Premrov, M., Štrukelj, A., Finite element analysis of timber-glass walls. *Glass structures & engineering*. (Print ed.), June 2016, vol. 1, iss. 1, str. 19-37, doi: 10.1007/s40940-016-0015-4, 2016.
- Ding, W., Hasemi, Y., Yamada, T., Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney, *Energy and Buildings*, (37) 2005, 411–418, 2005.
- EN 673:2011: Steklo v gradbeništvo - Določevanje toplotne prehodnosti (vrednost U) - Računska metoda, 2011.
- Gavan, V., Woloszyn, M., Kuznik, F., Roux, J. J., Experimental study of a mechanically ventilated double-skin facade with venetian sun-shading device: A full-scale investigation in controlled environment, *Solar energy*, 84 (2010), 183–195, 2010.
- Hochhauser, W., A contribution to the calculation and sizing of glued and embedded timber-glass composite panes, Doctoral Thesis, Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Wien, 2011.
- Høseggen, R., Wachenfeldt, B.J., Hanssen, S.O., Building simulation as an assisting tool in decision making Case study: With or without a double-skin facade?, *Energy and Buildings*, 40 (2008), 821–827, 2008.
- ISO 10077-1:2006: Toplotne lastnosti oken, vrat in polken - Izračun toplotne prehodnosti - 1. del: Splošno, 2006.
- ISO 10077-2:2012: Toplotne lastnosti oken, vrat in polken - Izračun toplotne prehodnosti - 2. del: Računska metoda za okvirje, 2012.
- ISO 15099:2003: Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations.
- Kolarič Tibaut, N., Leseno-stekleni fasadni panel kot element sodobne arhitekture, magistrsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, 2018.
- Oesterle, E., Lieb, R-D., Lutz, M., Heusler, W., *Double Skin Facades – Integrated Planning*, Prestel Verlag, München, Nemčija, 2001.
- Pascha, V., Winter, W., A comparative study on ecological impact of timber-glass-façade and conventional facade systems, *World Conference on Timber Engineering*, Vienna, Austria, 2016.
- Perez-Grande, I., Meseguer, J., Alonso, G., Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades, *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005), 3163–3175, 2005.
- Poirazis, H., *Double skin facades, a literature review*, 2006.
- Safer, N., Woloszyn, M., Roux, J. J., Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind, *Solar Energy*, 79 (2005), 193–203, 2005.
- SURS, Statistični urad Republike Slovenije, Energetska statistika, Slovenija, 2016.
- Štrukelj, A., Ber, B., Premrov, M., Racking resistance of timber-glass wall elements using different types of adhesives. *Construction & building materials*, ISSN 0950-0618. (Print ed.), Sep. 2015, vol. 93, str. 130–143. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815006273#>, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.112, 2015.
- Tascon, M. H., *Experimental and computational evaluation of thermal performance and overheating in double skin facades*, 2008.
- Torcellini, P., Pless, S., *Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences*, NREL/CP-550-36277, 2004.
- Zöllner, A., Winter, E. R. F., Viskanta R., Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (2002), 4401–4408, 2002.