

Primljen / Received: 18.7.2024.

Ispravljen / Corrected: 11.2.2025.

Prihvaćen / Accepted: 14.2.2025.

Dostupno online / Available online: 10.3.2025.

Procjena utjecaja strategija za ublažavanje učinaka toplinskih mostova na rast plijesni

Autori:



Domagoj Tkalcic, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
domagoj.tkalcic@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Bojan Milovanovic**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
bojan.milovanovic@grad.unizg.hr



Dr.sc. **Mergim Gasi**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mergim.gasi@grad.unizg.hr



Prof.dr.sc. **Ivana Banjad Pecur**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ivana.banjad.pecur@grad.unizg.hr

Pregledni rad

Domagoj Tkalcic, Bojan Milovanovic, Mergim Gasi, Ivana Banjad Pecur

Procjena utjecaja strategija za ublažavanje učinaka toplinskih mostova na rast plijesni

Ovaj rad istražuje rizik rasta i razvoja plijesni/gljivica na dva različita pristupa smanjenja utjecaja toplinskih mostova. Promatrani su balkoni obavijeni toplinskom izolacijom i balkoni sa sustavom prekida toplinskog mosta u ZEB (engl. Zero Emission Building) zgradama. Promatrani su linearna toplinska vodljivost (ψ -vrijednost), temperatura unutarnje površine i rizik pojave plijesni/gljivica na pet različitih slučajeva balkonskih ploča. Svaki slučaj ima tri varijacije, od kojih su dvije obavijene toplinskom izolacijom, a treća varijacija umjesto toplinske izolacije koristi sustav za prekid toplinskog mosta. Rezultati varijacija s prekidom toplinskog mosta nadmašuju ostale varijacije, što je u suprotnosti s uobičajenim pristupom u kojem se koristi obloga od toplinske izolacije. Rad također naglašava neadekvatnost norme EN ISO 13788 zbog sveobuhvatnih HAM (engl. *Heat, Air and Moisture*) modela.

Ključne riječi:

toplinski mostovi, prekid toplinskog mosta, površinska temperatura, temperaturni faktor, razvoj plijesni, ZEB, balkonska ploča

Subject review

Domagoj Tkalcic, Bojan Milovanovic, Mergim Gasi, Ivana Banjad Pecur

Performance evaluation of thermal bridge mitigation strategies against the mould growth

This study investigates mould/fungi growth risk on two different approaches of thermal bridge mitigation. Thermally insulated balconies and thermally broken balconies in Zero Emission Building (ZEB) are reviewed. Linear thermal transmittance (ψ - value), interior surface temperature and mould/fungi growth risk for five balcony designs is performed. Each design has three variations, two of which have thermal insulation wrap, and a thermal break replacing insulation. Results show thermal breaks outperform all variations. This contradicts the common practice of using thermal insulation wrap. The study also emphasizes EN ISO 13788 inadequacy as comprehensive HAM models are available.

Key words:

thermal bridges, thermal break, surface temperature, temperature factor, mould growth, ZEB, balcony slab

1. Uvod

Kvaliteta unutarnjeg zraka (engl. *Indoor Air Quality* - IAQ) jako je bitna zbog količine vremena koju ljudi provode u zatvorenom prostoru. Većina Europljana provodi čak 85 do 90 % vremena u zatvorenom prostoru [1, 2].

Građevine štite ljude od brojnih vanjskih uvjeta, ali ne mogu ih zaštititi od loše kvalitete zraka koja se nalazi unutar građevine. Plijesan i gljivice imaju značajan utjecaj na kvalitetu zraka u stambenim zgradama. Plijesan i gljivice sveprisutne su u ljudskoj okolini, a njihove se čestice lako prenose zrakom, što dovodi do opasnosti od udisanja. Posebno je zabrinjavajuće ako se plijesan i gljivice nalaze u unutarnjem okolišu zbog značajne količine vremena koju provodimo u zatvorenom prostoru [1, 3]. Veličina njihovih čestica kreće se u rasponu od 2 do 5 m, zbog čega lako prodiru u bronhijalne cijevi i duboko u pluća, što značajno povećava rizik od astme [4, 5].

Autori u članku [6] naglašavaju utjecaje loše toplinske izolacije na povećanu potrošnju energije i povećan rizik od razvoja plijesni, pri čemu predlažu korištenje adekvatne toplinske izolacije radi povećanja kvalitete unutarnjeg zraka. Vлага i plijesan česti su problemi u europskim zgradama. Pretpostavlja se da se čak svaki šesti dom suočava s tim problemom [7]. Prema [5, 8], plijesan se može naći u gotovo četvrtini zgrada u sjevernoj Europi i Sjevernoj Americi i time utječe na zdravlje milijuna ljudi izlažući ih mikrobnim zagađenjima iz zraka kao sporama, fragmentima gljivica, mikotoksinima, endotoksinima, glukanu i hlapljivim organskim spojevima. Izlaganje sporama plijesni i gljivica može uzrokovati brojne zdravstvene probleme kod stanara uključujući alergijske reakcije, preosjetljivost, pneumonitis i infekcije [9-12]. Pregled literature pokazuje da su temperature unutarnjeg okoliša zgrade u kojima žive ljudi pogodne za klijanje plijesni i gljivica jer se razvijaju na temperaturama od 0 do 50 °C [4]. Vjerojatnost pojave plijesni proporcionalna je povećanju relativne vlažnosti zraka. Za većinu plijesni, idealna relativna vlažnost zraka je oko 80 %. Daljnje povećanje relativne vlažnosti zraka do raspona od 90 % i 96 % pogoduje samo nekoliko vrsta plijesni. Nasreću, kako bi se ostvarili potrebni uvjeti za razvoj plijesni i gljivica, potrebno je ostvariti povoljne uvjete temperature i vlažnosti u isto vrijeme kroz određen period. Parametri poput količine kisika u zraku, obrade površine, bioloških utjecaja, pH vrijednosti, sadržaja soli u podlozi, osvjetljenja i duljine trajanja pogodnih uvjeta također utječu na brzinu rasta i razvoja plijesni i gljivica.

Zimi se u području toplinskih mostova povećava opasnost od razvoja plijesni i gljivica. Područja s povećanim toplinskim tokom zimi imaju nižu unutarnju površinsku temperaturu od ostatka ovojnice zgrade. Niža temperatura u kombinaciji s povećanom relativnom vlažnosti zraka tijekom zimskih mjeseci stvara povoljne uvjete za uspješan razvoj plijesni i gljivica.

Utjecaj toplinskih mostova na transmisijske gubitke zgrade značajan je; rad [13] ukazuje da udio toplinskih mostova u pojedinim slučajevima može dosežati čak 30 %. Međutim, ovako visok udio javlja se samo u jako razvedenim zgradama s velikim brojem nosivih istaka i konzola u dijelu vanjske ovojnice

zgrade. Istraživanje [14] naglašava važnost nZEB (engl. nearly Zero Energy Buildings) standarda i utjecaja toplinskih mostova na transmisijske gubitke topline, degradaciju materijala i građevinsku štetu.

Prema trenutnim propisima o nZEB-u i s nadolazećim propisima o ZEB-u u EU-u, toplinski mostovi mogu uzrokovati dodatne probleme u budućnosti.

Općenito se smatra da je stacionarni tok topline kroz građevni element bez utjecaja toplinskog mosta jednodimenzionalan, u smjeru okomitom na zid [15]. Međutim, toplinski mostovi mogu poremetiti smjer toka topline i uzrokovati dodatne gubitke topline. Što se tiče potrošnje energije zgrada, neprekinuti toplinski mostovi uzrokovani pločama balkona imaju jedan od najznačajnijih udjela na ukupnu zgradu [16]. Ti elementi uzrokuju toplinske mostove zbog nekoliko ključnih čimbenika. Ploče balkona obično su izrađene od armiranog betona, istog materijala kao i međukatne konstrukcije zgrade ili zidovi. Armirani beton ima visoku toplinsku vodljivost, stvarajući put prijenosa topline s niskim toplinskim otporom između unutarnjeg i vanjskog prostora. Ograničenja projektiranja često ne dopuštaju da se balkon pravilno izolira, a uz to ploče balkona imaju veliku, izloženu površinu u usporedbi s dobro izoliranim zidom.

Praksa ugradnje toplinske izolacijske obloge na istake poput balkona i atika još se uvijek može naći na hrvatskim gradilištima. Iako su sustavi prekida toplinskih mostova poznati i prisutni na tržištu građevinskih materijala, praksa njihove ugradnje još uvijek nije uobičajena. Toplinska učinkovitost sustava za prekid toplinskih mostova toplinskih prekida i dalje je relevantna tema u akademskoj zajednici s visokim istraživačkim interesom [17-22]. Dva najčešća pristupa minimiziranju toplinskih mostova u pločama balkona su primjena toplinske izolacijske obloge na sve strane ploče balkona i sustav za prekid toplinskog mosta koji ne ugrožava nosivost balkona [21-24, 27]. Na današnjem tržištu dostupni su i različiti materijali za ojačanje sustava za prekid toplinskih mostova. Utjecaj različitih materijala za ojačanje predstavljen je u radu [17].

Studija [28] naglašava važnost projektiranja obloga od toplinske izolacije koje minimiziraju toplinske mostove, koji su kritični u sprječavanju gubitka topline i potencijalnih problema s vlagom u ovojnicama zgrada. Istraživanje u [27] također razmatra postavljanje toplinske izolacije na unutarnju površinu zida kako bi se minimizirao učinak toplinskog mosta uzrokovan pločom balkona. Iako je temperatura unutarnje površine viša, studija zaključuje da unutarnja izolacija ne smanjuje toplinski tok i stoga ne smanjuje učinak toplinskog mosta, kao ni njegove posljedice. Balkoni od armiranog betona koji su izgrađeni kao izravno produženje međukatne konstrukcije stvaraju značajan toplinski most. To ne samo da smanjuje energetske učinkovitost zgrade, već i dovodi do hladnih unutarnjih površina tijekom zimskog razdoblja, što povećava rizik od kondenzacije i rasta plijesni [17, 27].

Postoji mnogo studija koje uspoređuju toplinsku učinkovitost neizoliranih ploča balkona s balkonskim pločama s ugrađenim

sustavom za prekid toplinskog mosta [17, 18, 24, 27, 29-35] ali vrlo malo ih uspoređuje učinkovitost obloge od toplinske izolacije sa sustavom za prekid toplinskog mosta.

Prilikom promatranja stambenih zgrada s vrlo izraženim toplinskim mostovima, stanari možda ne znaju kako toplinski mostovi utječu na njihove mjesečne račune, ali mogu osjetiti nelagodu uzrokovanu rastom plijesni u kutovima svojih soba, iza namještaja ili nelagodu uzrokovanu hladnim stropom ili podom u slučaju velikih površina toplinskih mostova. Toplinski mostovi na pločama balkona mogu utjecati na temperaturu unutarnje površine zida i uzrokovati toplinsku nelagodu ili čak rast plijesni i gljivica.

Problem klijanja plijesni i gljivica na toplinskim mostovima proizlazi iz niskih temperatura i povećane vlažnosti zraka tijekom zimskih mjeseci, koje stvaraju povoljne uvjete za njihov razvoj.

Hrvatski propisi trenutno propisuju proračun samo temperaturnog faktora (f_{Rsi}) kao pokazatelja rizika od kondenzacije i rasta plijesni na površini građevnih elemenata. Međutim, pojava klijanja plijesni i gljivica relativno je česta [5, 7, 8] čak i kada sama zgrada ispunjava propisane zahtjeve za faktorom f_{Rsi} što ukazuje na dublji problem koji se ne može adekvatno riješiti samo f_{Rsi} faktorom.

U hrvatskoj praksi najčešće se koristi uvjet za f_{Rsi} faktor od 0,7. Ova vrijednost izvedena je iz norme DIN 4108-3 [36] i u skladu je s hrvatskim Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [37]. Za detaljniji proračun treba uzeti u obzir normu EN ISO 13788 [38].

Prema hrvatskom Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [37], postoji još jedan kriterij, ali primjenjuje se na zgrade s parcijalnim tlakom vodene pare većim od 1750 Pa, koje imaju toplinske mostove s Ψ -vrijednošću većom od 0,15 W/(mK). Za te zgrade potrebno je dokazati da se vodena para neće kondenzirati na unutarnjoj površini toplinskih mostova. Ovaj se dokaz provodi u skladu s HRN EN ISO 10211:2008 [39] i HRN EN ISO 13788:2002 [38]. Kondenzacija vodene pare unutar građevnih elemenata i njezino isparavanje izračunavaju se prema HRN EN ISO 13788:2002 [38].

Iako nepotreban za većinu domova zbog odsutnosti značajki koje stvaraju visoki parcijalni tlak vodene pare (> 1750 Pa), ovaj proračun mogao bi biti vrijedan alat za rješavanje problema vlage prisutnih u mnogim zgradama. Studija [40] istražuje kako modifikacije poput perforacija i proreza u ekspaniranom polistirenu (EPS) utječu na difuziju vodene pare i toplinsku vodljivost. Rezultati ukazuju da, iako takve modifikacije mogu poboljšati difuziju vodene pare do 42,18 %, također dovode do 9,02 % povećanja toplinske vodljivosti, što bi moglo utjecati na izolacijske performanse materijala.

Iako spore plijesni trebaju nekoliko dana za klijanje pri zadanim rubnim uvjetima, povijesni podaci o vremenu za Zagreb (kontinentalni klimatski uvjeti) [41] ukazuju na značajnu mogućnost klijanja spora i naknadnog rasta micelija zbog stalno niskih temperatura zraka s dovoljno visokom relativnom

vlažnosti (Rh) u blizini toplinskih mostova. Temperature toplinskih mostova tijekom zime nedovoljne su za uništavanje plijesni i gljivica.

Pod odgovarajućim uvjetima temperature i vlažnosti, spore mogu klijeti na ili unutar građevnih materijala. Nakon klijanja, te će spore nastaviti rasti tvoreći mrežu poznatu kao micelij, ako okoliš ostane povoljan [42]. Važno je napomenuti da ova studija nije uzela u obzir potencijalni inhibitory učinak sunčeve svjetlosti na rast plijesni.

2. Studija slučaja

U ovoj studiji promatrane su dvije metode za smanjenje utjecaja toplinskih mostova balkonskih ploča, pri čemu su uspoređene s tradicionalnim pristupom kontinuiranih armirano-betonskih konzola. Fokus je na promatranju utjecaja dvaju različitih pristupa na unutarnju površinsku temperaturu i njezin utjecaj na razvoj plijesni i gljivica.

Provedena je 2D računalna simulacija kako bi se analiziralo pet različitih detalja spojeva balkonske ploče i zgrade. Svaki detalj ima tri varijacije:

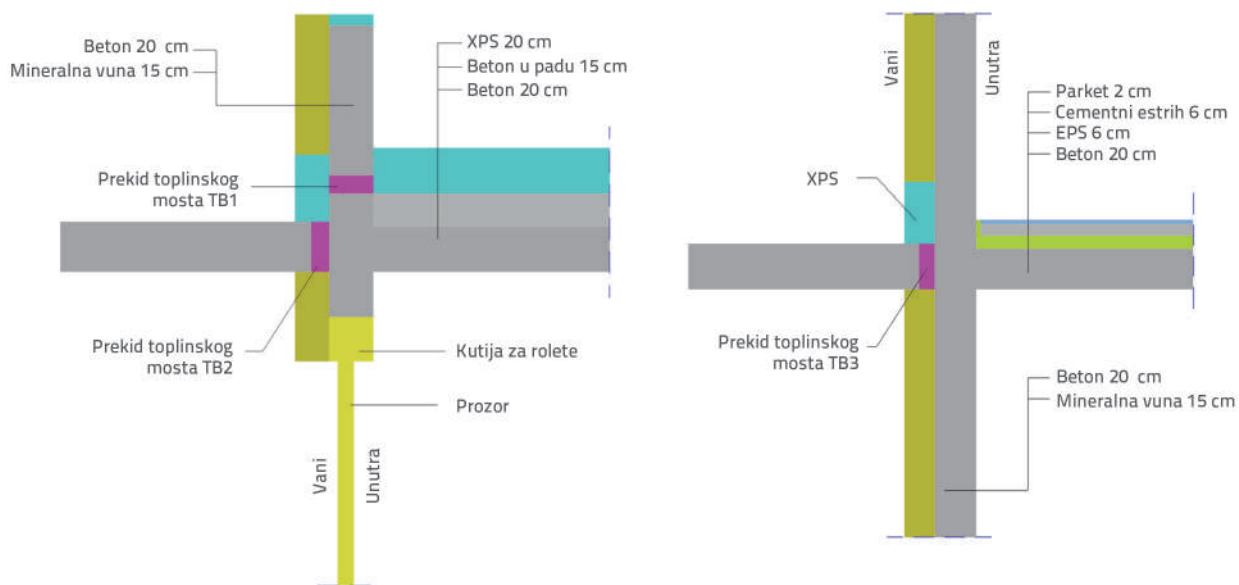
- Najčešći pristup u Hrvatskoj je oblaganje s 5 cm toplinske izolacije sa svih strana balkonske ploče, iako regulativa zahtijeva 8 cm.
- Rijetko viđeni slučajevi u praksi, u kojima se koristi obloga od 10 cm toplinske izolacije, ovdje služe kao ekstremni primjer zbog usporedbe.
- Ovaj pristup umjesto obloge od toplinske izolacije koristi prekid toplinskog mosta u samoj betonskoj ploči.

Detalji u nastavku izrađeni su prema stvarnom projektu izgrađene zgrade u Hrvatskoj. Slika 1. prikazuje slojeve zida, krova i nadstrešnice.

Materijali poput završnih slojeva, parnih brana i hidroizolacije, kao i cementni estrih i pločice s vanjske strane modela, imaju zanemariv utjecaj na toplinska svojstva toplinskog mosta, zbog čega nisu navedeni (slika 1.), jer nemaju značajan utjecaj na stacionarni toplinski tok. Opsežan opis svakog detalja i njegovih varijacija prikazani su na slici 1.

Detalj 1a (slika 2.) prikazuje vanjski zid s 5 cm oblogom toplinske izolacije balkonske ploče. Detalj 1b (slika 3.) varijacija je Detalja 1a; razlika je u debljini obloge toplinske izolacije, pri čemu je debljina obloge Detalja 1b 10 cm. Detalj 1c (slika 4.) ima ugrađen prekid toplinskog mosta TB3 umjesto obloge od toplinske izolacije.

Detalj 2a (slika 5.) prikazuje vanjski zid s 5 cm obloge od toplinske izolacije oko balkonske ploče. Staklena vrata postavljena su iznad balkonske ploče, pri čemu se vanjski zid nalazi ispod balkonske ploče. Detalj 2b (slika 6.) varijacija je Detalja 2a, pri čemu je debljina obloge toplinske izolacije povećana na 10 cm. Detalj 2c (slika 7.) ima ugrađen prekid toplinskog mosta TB3 umjesto obloge od toplinske izolacije. Detalj 2 prikazuje neispravno ugrađena balkonska vrata, ali ovakva je ugradnja česta u Hrvatskoj.



Slika 1. Primjer varijacije detalja sa slojevima



Slika 2. Detalj 1a, debljina obloge 5 cm



Slika 3. Detalj 1b, debljina obloge 10 cm



Slika 4. Detalj 1c, prekid toplinskog mosta TB3



Slika 5. Detalj 2a, debljina obloge 5 cm



Slika 6. Detalj 2b, debljina obloge 10 cm



Slika 7. Detalj 2c, prekid toplinskog mosta TB3

Detalj 3a (slika 8.) prikazuje vanjski zid s balkonskom pločom obavijenom toplinskom izolacijom od 5 cm. Iznad balkonske ploče nalazi se vanjski zid. Ispod balkonske ploče nalaze se vanjski zid, kutija za rolete i prozor. Detalj 3b (slika 9.) varijacija

je Detalj 3a, pri čemu je povećana debljina obloge od toplinske izolacije na 10 cm. Detalj 3c (slika 10.) ima ugrađen prekid toplinskog mosta TB3 umjesto obloge od toplinske izolacije. Detalj 4a (slika 11.) prikazuje vanjski zid na kojem su balkonska



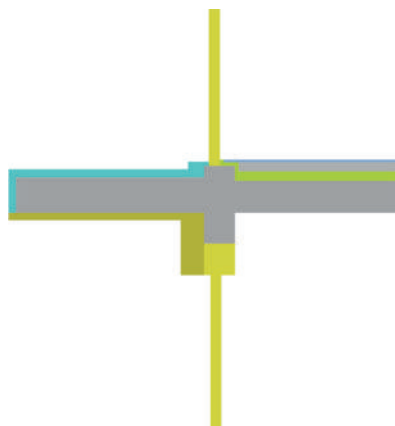
Slika 8. Detalj 3a, debljina obloge 5 cm



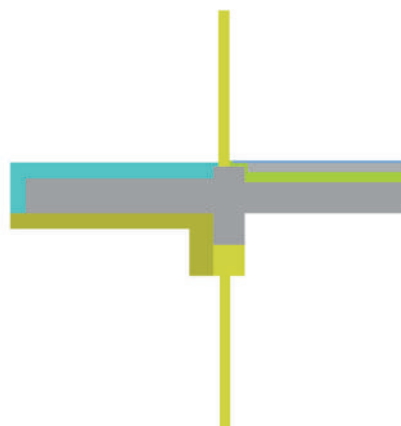
Slika 9. Detalj 3b, debljina obloge 10 cm



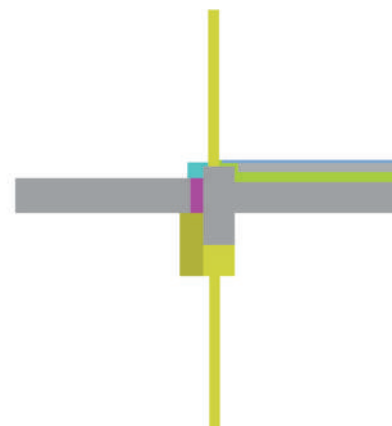
Slika 10. Detalj 3c, prekid toplinskog mosta TB3



Slika 11. Detalj 4a, debljina obloge 5 cm



Slika 12. Detalj 4b, debljina obloge 10 cm



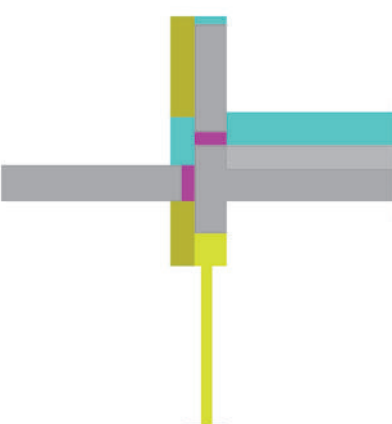
Slika 13. Detalj 4c, prekid toplinskog mosta TB3



Slika 14. Detalj 5a, debljina obloge 5 cm



Slika 15. Detalj 5b, debljina obloge 10 cm



Slika 16. Detalj 5c, prekid toplinskog mosta TB1 i TB2

vrata koja vode na balkon, ispod kojeg su kutija za rolete i prozor. Balkonska ploča obavijena je toplinskom izolacijom debljine 5 cm sa svih strana. Detalj 4b (slika 12.) varijacija je Detalja 4a, pri čemu je debljina obloge balkonske ploče povećana na 10 cm. Detalj 4c (slika 13.) ima ugrađen prekid toplinskog mosta TB3 umjesto obloge od toplinske izolacije. Detalj 4 prikazuje neispravno ugrađena balkonska vrata, ali ovakva je ugradnja česta u Hrvatskoj.

Detalj 5a (slika 14.) prikazuje vanjski zid s nadstrešnicom i zidom atike na krovu. Na vanjskom zidu nalazi se kutija za rolete i prozor. Betonska nadstrešnica i zid atike obavijeni su toplinskom izolacijom debljine 5 cm. Detalj 5b (slika 15.) varijacija je Detalja 5a, pri čemu je debljina obloge betonske nadstrešnice i atike povećana na 10 cm. Detalj 5c (slika 16.) ima ugrađen prekid toplinskog mosta TB2 u betonsku nadstrešnicu, dok je u atiku ugrađen prekid toplinskog mosta TB1.

Tablica 1. Koeficijenti plošnih prijelaza topline

Smjer toplinskog toka	Rubni uvjet	h [W/m ² K]
Horizontalni	Vanjski	25,0
	Unutarnji	7,69
Gore	Vanjski	25,0
	Unutarnji	10,0
Dolje	Vanjski	25,0
	Unutarnji	5,88

Završni slojevi ne nalaze se u modelima (slike 1. do 16.) jer imaju zanemariv utjecaj na toplinski most.

U ovom članku uspoređene su dvije metode smanjenja utjecaja toplinskog mosta u betonskim konzolama. Fokus članka je na Ψ -vrijednosti, unutarnjoj površinskoj temperaturi vanjskog zida, bezdimenzionalni temperaturni faktor (f_{Rsi}) i njihov utjecaj na razvoj plijesni i gljivica.

Numerička analiza provedena je u programskom paketu CRORAL [43], pri čemu je napravljen proračun dvodimenzionalnog toplinskog toka u stacionarnom stanju, s prikazom temperature u presjeku detalja. CRORAL je razvijen na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu na Zavodu za materijale i sukladan je s normama EN ISO 10211 [39] i EN ISO 10077-2 [44]. Kriteriji za sukladnost dvodimenzionalnog toplinskog toka pri stacionarnim uvjetima određeni su prema metodi visoke preciznosti. Bilo je potrebno zadovoljiti kriterije:

- razlika između temperatura izračunatih CRORAL-om i temperatura iskazanih u EN ISO 10211 moraju biti manje od 0,1 °C
- razlike između toplinskog toka izračunatih CRORAL-om i toplinskog toka iskazanog u EN ISO 10211 moraju biti manje od 0,1 W/m
- razlika između L_{2D} izračunatog u CRORAL-u i iskazanog u normi EN ISO 10077-2 mora biti manja od 3 %.

Na prikazanim detaljima (slike 2. do 16.) izračunate su vrijednosti f_{Rsi} faktora, pri čemu je korištena najučestalija metoda u Hrvatskoj (Poglavlje 2.2.). Uz to, postavljen je i stroži kriterij za slučajeve s višim parcijalnim tlakom vodene pare (> 1750 Pa), pri čemu je napravljena varijacija unutarnje i vanjske temperature zraka kako bi se pokrio veći broj kućanstava zbog različitih klimatskih uvjeta u Hrvatskoj.

Završna usporedba provedena je na Sedlbauerovom modelu koji koristi izoplete. Ovakva analiza uzima obzir duljinu izlaganja povoljnim uvjetima za razvoj plijesni i gljivica.

2.1. Proračun toplinskih mostova

Ψ -vrijednost izračunata je prema izrazu (1) [39]:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^n U_i \cdot l_i \quad (1)$$

pri čemu je:

L_{2D} - koeficijent toplinske veze dobiven pomoću dvodimenzionalnog proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša [W/(mK)]

U_i - plošni toplinski koeficijent prolaska topline jednodimenzionalne komponente i koja razdvaja dva promatrana okoliša [W/(m²K)]

l_i - duljina na koju se odnosi vrijednost U_i [m]

n - broj jednodimenzionalnih komponenti.

Tablica 1. prikazuje koeficijente plošnih prijelaza topline korištenih za proračun prema EN ISO 6946 [45].

2.2. Proračun temperaturnog faktora

Standardizirani klimatski uvjeti prema DIN 4108-3 [36] postavljaju uvjete temperature zraka od 20 °C i 50 % relativne vlažnosti. Pri tim uvjetima temperatura rosišta iznosi $T_{dp} = 9,3$ °C. Ako je minimalna površinska temperatura ($T_{si,min}$) građevnog elementa viša od 9,3 °C, neće doći do kondenzacije vodene pare. Međutim, važno je napomenuti da kondenzacija vodene pare nije jedini uvjet za razvoj plijesni i gljivica.

Povoljni uvjeti za razvoj plijesni i gljivica obično se pojavljuju pri 80 % relativne vlažnosti. Pri standardiziranim klimatskim uvjetima (20 °C i 50 % relativne vlažnosti) kritična razina relativne vlažnosti doseže se pri temperaturi površine od 12,6 °C. Te dvije kritične temperature (9,3 °C i 12,6 °C) korištene su za proračun temperaturnog faktora f_{Rsi} na unutarnjoj strani prema DIN 4108-3 [36], rubni uvjeti također su standardizirani i iznose -5 °C za vanjsku temperaturu zraka i 20 °C za unutarnju. Sukladno tome, izračunat je minimalni f_{Rsi} faktor kako bi se spriječio rast i razvoj plijesni, a iznosi $f_{Rsi} = 0,7$. Temperaturni faktor na unutarnjoj strani građevnog elementa izračunat je prema izrazu (2) [39]:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} \quad (2)$$

pri čemu je:

$T_{si,min}$ - temperatura unutarnje površine dobivena pomoću dvodimenzionalnog numeričkog proračuna toplinskog mosta [°C]

T_i - temperatura unutarnjeg zraka [°C]

T_e - temperatura vanjskog zraka [°C].

Tablica 2. Karakteristike materijala korištene za proračun

Materijal	λ [W/mK]	μ
Armirani beton	2,6	80
Cementni estrih	1,6	80
EPS	0,04	70
XPS	0,04	80
Keramičke pločice	1,3	200
Kutija za rolete	0,6	100000
Mineralna vuna	0,04	1
Okvir prozora	0,13	100000
Parket	0,13	60
Element za prekid toplinskog mosta TB1	0,177	80
Element za prekid toplinskog mosta TB2	0,119	80
Element za prekid toplinskog mosta TB3	0,166	80

Ovakav način proračuna, kao i kriterij temperaturnog faktora $f_{Rsi} = 0,7$ najčešće je korištena metoda u Hrvatskoj. U detaljnijoj metodi proračuna određuje se f_{Rsi} faktor za svaki mjesec prema podacima za prosječne mjesečne temperature vanjskog zraka umjesto korištenja fiksne vrijednosti $f_{Rsi} = 0,7$, pri čemu je također potrebno uzeti u obzir i tlak zasićenja (p_{sat}). Mjesec s najvišim f_{Rsi} faktorom odabran je kao mjerodavan ($f_{Rsi,max}$), i postavljen je uvjet $f_{Rsi} > f_{Rsi,max}$.

Minimalni dozvoljeni tlak zasićenja $p_{sat}(T_{si})$ izračunat je prema izrazu (3) [38]:

$$p_{sat}(T_{si}) = p_i / 0,8 \tag{3}$$

pri čemu:
0,8 predstavlja kritičnu relativnu vlažnost od 80 % pri kojoj dolazi do razvoja plijesni prema EN ISO 13788, a p_i parcijalni tlak vodene pare zraka s unutarnje strane [Pa].

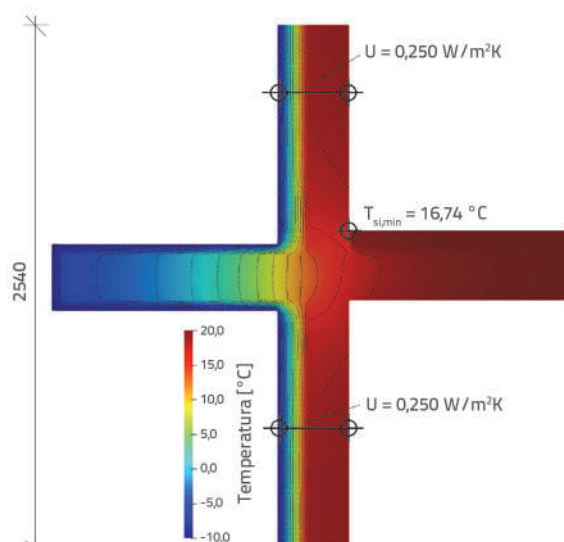
2.3. Karakteristike materijala

Elementi za prekid toplinskih mostova TB1, TB2 i TB3 korišteni su u ovom istraživanju za jedinstvene zadaće smanjenja utjecaja toplinskih mostova u raznim građevnim elementima (slika 1.). Element za prekid toplinskog mosta TB1 namijenjen je za zidove atike, a TB2 je namijenjen za armirano-betonske nadstrešnice. Element TB3 koristi se u balkonskim pločama. Toplinska vodljivost elemenata za prekid toplinskog mosta pod utjecajem je dizajna i materijala od kojih je napravljena, pri čemu je potrebno uzeti u obzir nosivost elementa kako bi se ostvarila tražena mehanička otpornost i stabilnost zgrade. Toplinsku vodljivost i otpor difuziji vodene pare korištenih u proračunu prikazuje tablica 2., a vrijednosti su uzete u skladu s [37, 46]. U_w -vrijednosti koje prikazuje tablica 2. uzete su prema DIN 4108, Beiblatt 2 [47]. Schild [48] priznaje ovaj pristup u fazi projektiranja u slučaju kada su nedostupne karakteristike

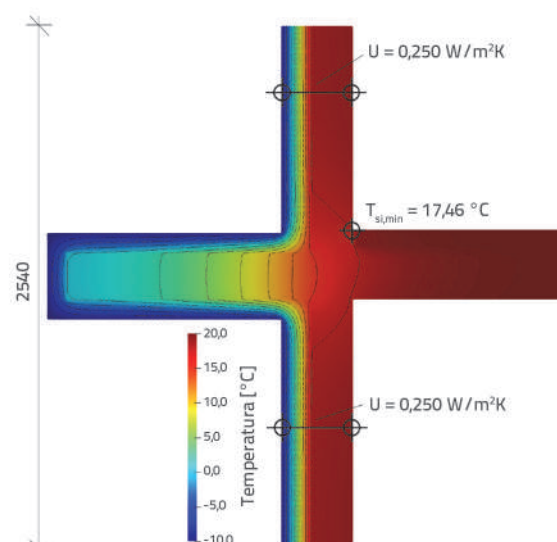
prozora. Schild [48] obrazlaže ovu metodu hipotezom i govori da se ukupna U -vrijednost prozora može aproksimirati pomoću pojednostavljenog modela. Pojednostavljeni model sastoji se od blokova debljine ekvivalentne realnom okviru prozora, pri čemu blokovi imaju vrijednost toplinskog otpora (R -vrijednost) jednaku realnom prozoru [49].

3. Rezultati toplinskog proračuna

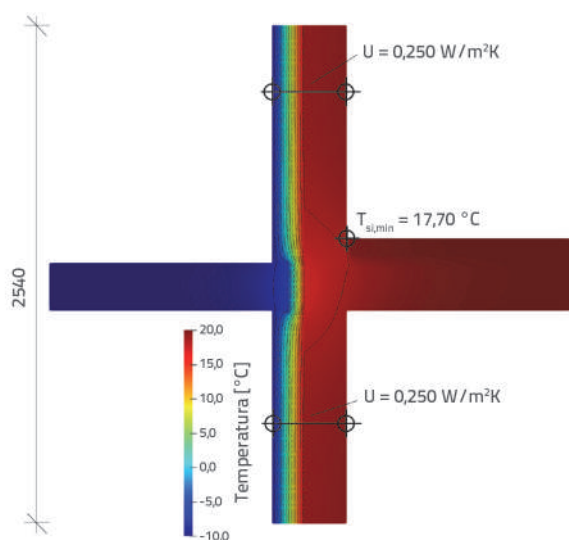
Slike 17. do 31. prikazuju distribuciju temperature u presjeku, poziciju i iznos minimalne površinske temperature, U -vrijednosti i dimenzije s kojima je proveden proračun Ψ -vrijednosti za varijacije detalja koje prikazuju slika 2. i 16. Analizom distribucije temperature u poprečnom presjeku jasno se vidi razlika između varijacija detalja u kojima je korištena obloga od toplinske izolacije i elementi za prekid toplinskog mosta. Zbog elemenata za prekid toplinskog mosta dolazi do diskontinuiteta u prijenosu topline nadstrešnice, zbog čega se drastično smanjuje prolazak topline. Ovakav diskontinuitet dovodi do smanjenja toplinskog toka kroz građevni element, što dovodi do viših površinskih temperatura s unutarnje strane zgrade. Slike 32. do 36. predstavljaju grafički prikaz rezultata dobivenih numeričkim proračunom. Prilikom analize i usporedbe rezultata dobivenih numeričkim proračunom potrebno je usporediti samo rezultate varijacija istih detalja. Detalji s ugrađenim elementima prekida toplinskog mosta u svim detaljima imaju povoljnije rezultate s nižim Ψ -vrijednostima i višim površinskim temperaturama na unutarnjoj strani elementa, što također doprinosi nižom potrošnjom energije i nižim rizikom za rast i razvoj plijesni i gljivica uz istovremeno povećanje toplinske ugodnosti. Potrebno je naglasiti da je obloga toplinske izolacije oko balkonske ploče debljine 10 cm mnogo i da je jako rijetko viđeno u praksi zbog povećanih troškova i potencijalnih problema kod usklađivanja visina unutarnjeg i vanjskog poda, zbog čega se najčešće koriste manje debljine toplinske izolacije za obavljanje, što, naravno, dovodi do lošijih rezultata.



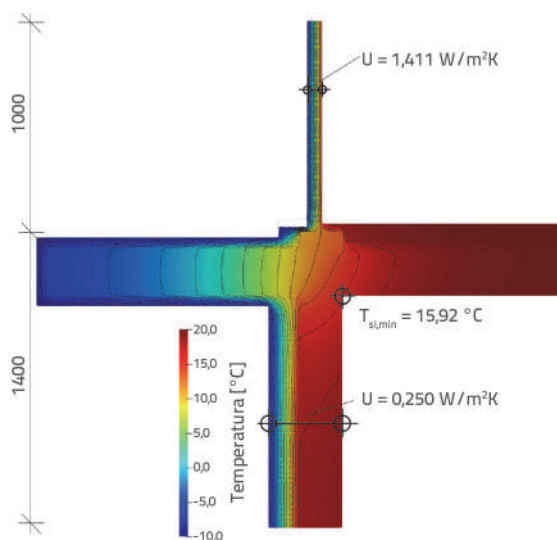
Slika 17. Detalj 1a: Obloga toplinske izolacije od 5 cm



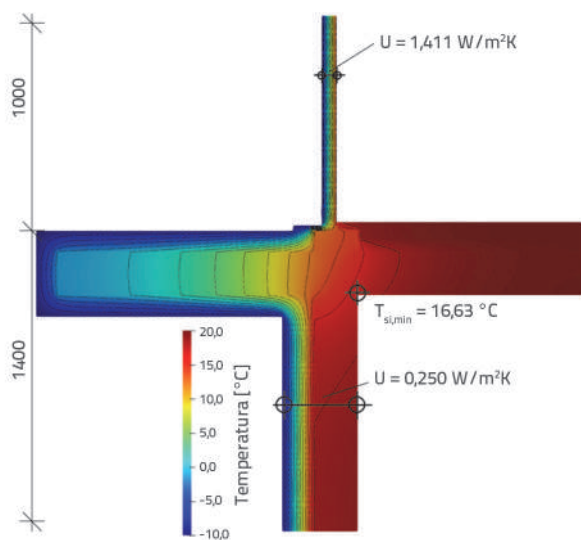
Slika 18. Detalj 1b: Obloga toplinske izolacije od 10 cm



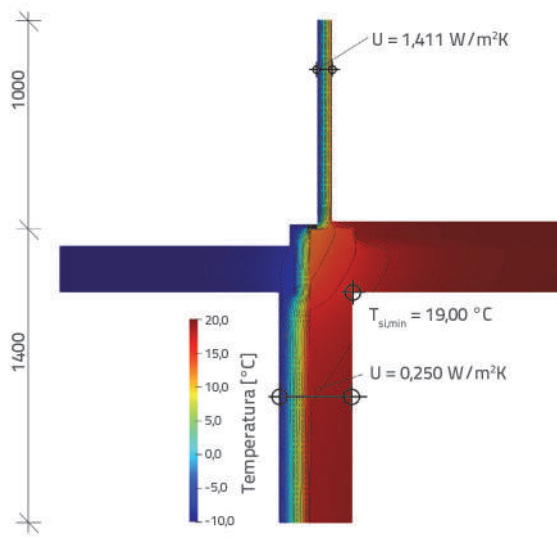
Slika 19. Detalj 1c: Prekid toplinskog mosta TB3



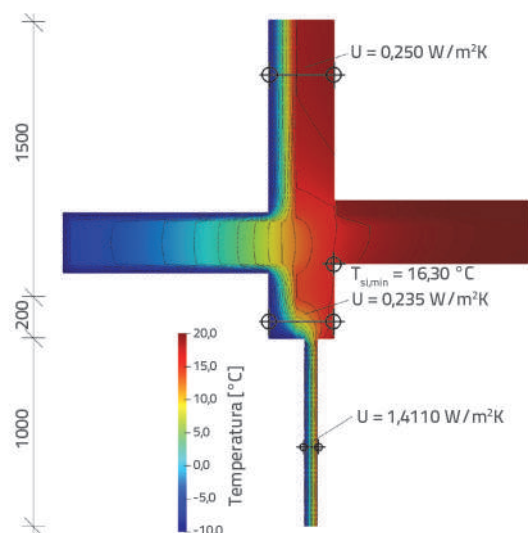
Slika 20. Detalj 2a: Obloga toplinske izolacije od 5 cm



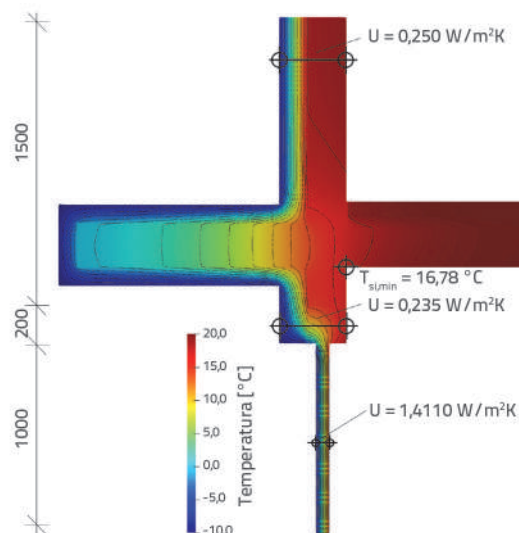
Slika 21. Detalj 2b: Obloga toplinske izolacije od 10 cm



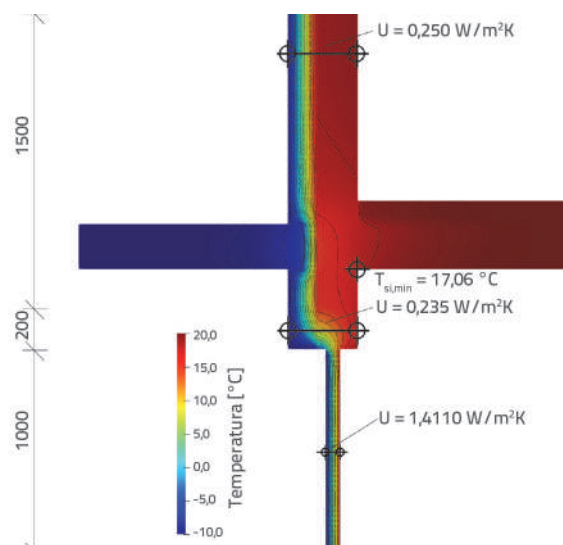
Slika 22. Detalj 2c: Prekid toplinskog mosta TB3



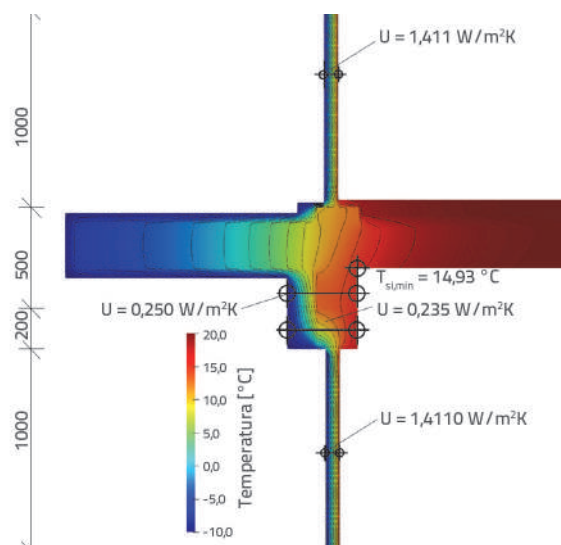
Slika 23. Detalj 3a: Obloga toplinske izolacije od 5 cm



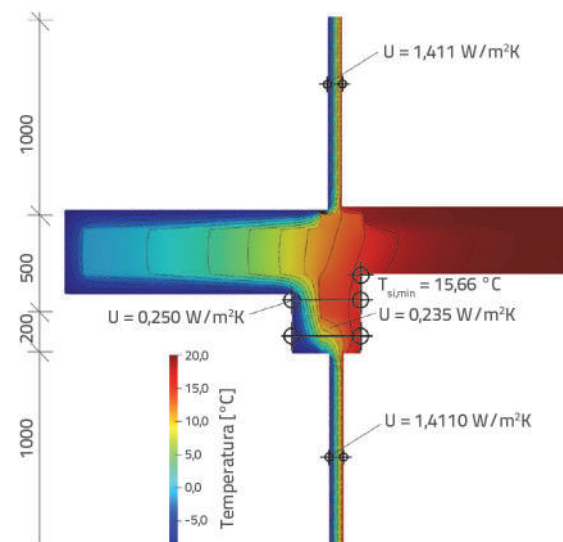
Slika 24. Detalj 3b: Obloga toplinske izolacije od 10 cm



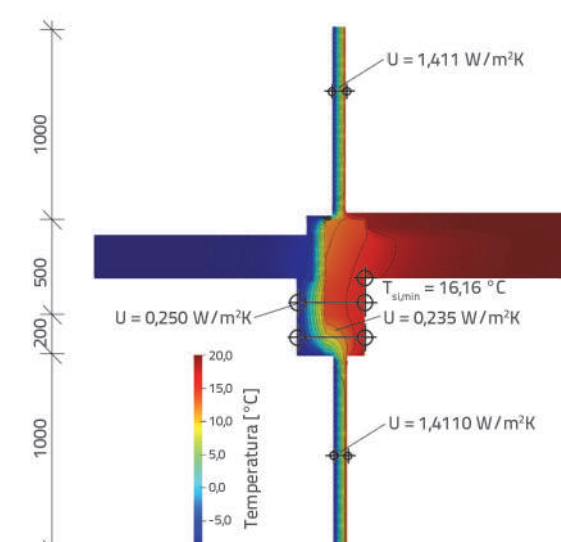
Slika 25. Detalj 3c: Prekid toplinskog mosta TB3



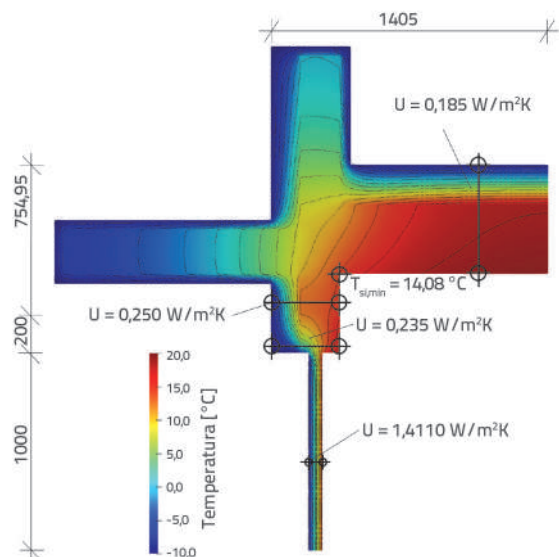
Slika 26. Detalj 4a: Obloga toplinske izolacije od 5 cm



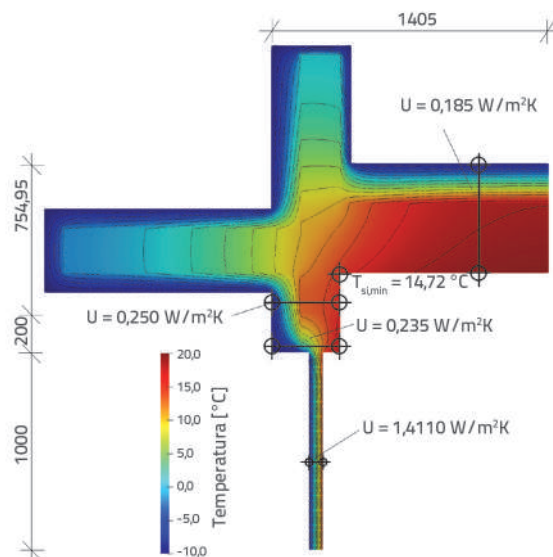
Slika 27. Detalj 4b: Obloga toplinske izolacije od 10 cm



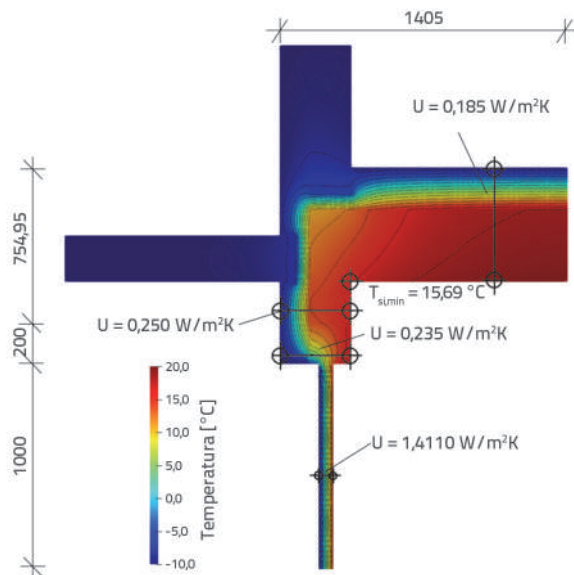
Slika 28. Detalj 4c: Prekid toplinskog mosta TB3



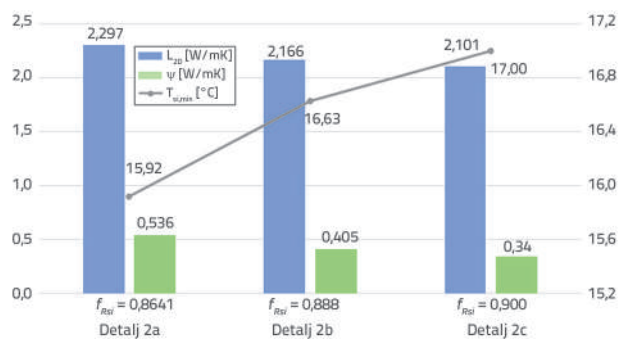
Slika 29. Detalj 5a: Obloga toplinske izolacije od 5 cm



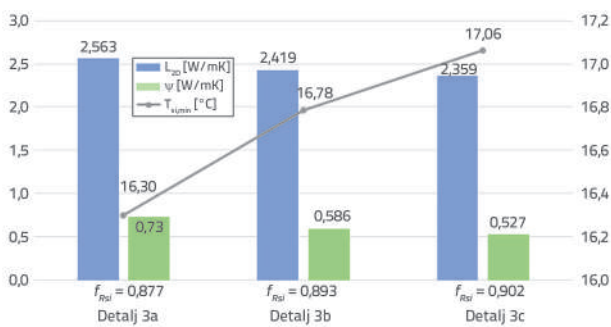
Slika 30. Detalj 5b: Obloga toplinske izolacije od 10 cm



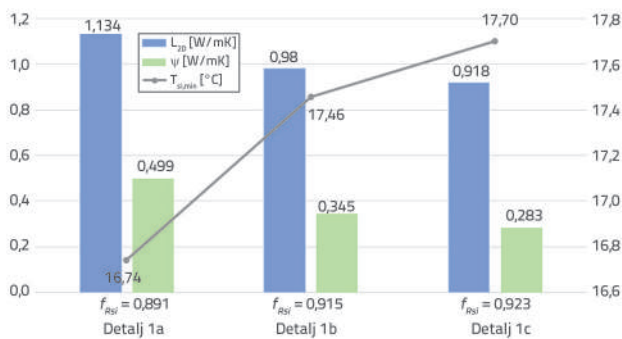
Slika 31. Detalj 5c: Prekid toplinskog mosta TB1 i TB2



Slika 33. Rezultati za Detalj 2a, 2b i 2c



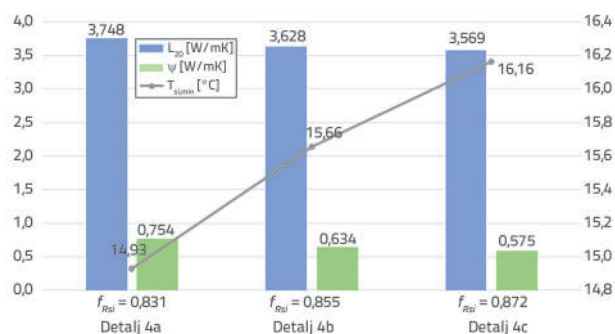
Slika 34. Rezultati za Detalj 3a, 3b i 3c



Slika 32. Rezultati za Detalj 1a, 1b i 1c

Kada se uspoređuju L_{2D} vrijednosti, Detalj 4a i 4b imaju najviše vrijednosti zbog dvaju prozora s visokim U -vrijednostima u modelu.

Slika 36. prikazuje rezultate Detalja 5a, 5b i 5c. U navedenim detaljima postoje dva glavna toplinska mosta; prvi je spoj atike s vanjskim zidom i krovnom pločom, a drugi je spoj nadstrešnice s vanjskim zidom.



Slika 35. Rezultati za Detalj 4a, 4b i 4c

Razlika između varijacija Detalja 1 – Detalja 4 u pogledu površinskih temperatura na unutarnjim površinama zidova minimalna je.

Pri usporedbi -vrijednosti najviša vrijednost pripada Detalju 5a. Od svih detalja analiziranih u ovom istraživanju elementi za prekid toplinskog mosta imaju najveći utjecaj na Detalju 5c.

Promatrajući svaki detalj zasebno, razlike u Ψ -vrijednostima između varijanti s oblogom od toplinske izolacije i varijacija s elementom za prekid toplinskog mosta kreću se između 9 do 43 %. Do najveće razlike dolazi između Detalja 1a i 1c jer nema dodatnog utjecaja toplinskog mosta uzrokovanog prozorom, balkonskim vratima ili atikom koji bi mogli povećati utjecaj toplinskog mosta i time umanjiti učinak prekida elemenata za prekid toplinskog mosta.

Iako povećanje debljine obloge toplinske izolacije oko balkonske ploče na 10 cm u Detalju 1b uzrokuje smanjenje Ψ -vrijednosti za 30 %, proračun pokazuje da bi se ugradnjom elemenata za prekid toplinskog mosta, kao što je prikazano u Detalju 1c, postiglo dodatno smanjenje -vrijednosti za čak 43 %.

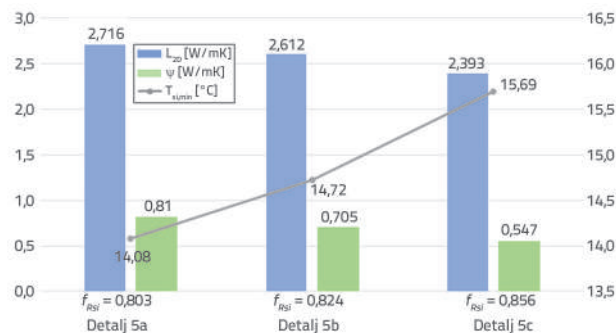
Ako se promatra temperatura unutarnje površine, razlika između varijacija s 5 cm debelom oblogom od toplinske izolacije i 10 cm iznosi otprilike 1 °C. Najveća razlika uočena je između Detalja 5a i 5c, gdje je razlika gotovo 2 °C.

Kao što je vidljivo iz prikazanih rezultata, svi detalji zadovoljavaju postavljen uvjet 0,7. Čak i u slučaju Detalja 1a, koji je obložen toplinskom izolacijom debljine 5 cm i ima najnižu površinsku temperaturu unutarnje površine zida, uspješno je zadovoljen kriterij s izračunatom vrijednosti daleko iznad kritičnih 0,7, a rezultat iznosi $f_{Rsi} = 0,803$.

Iz navedenog proizlazi pitanje: ako svi detalji i sve varijacije detalja bez problema zadovoljavaju postavljene f_{Rsi} kriterije, zbog čega su onda problemi s pojavom plijesni i gljivica u stambenim prostorima tako česti? Da bi se moglo odgovoriti na ovo pitanje, potrebno je dublje ući u higrotermalnu analizu i modele klijanja spora i rasta micelija. Ovi aspekti detaljno su istraženi u sljedećim poglavljima.

4. Higrotermalni modeli

Prema EN ISO 13788 [38], samo je jedna metoda prihvaćena za provjeru razvoja plijesni na površini građevnog elementa,



Slika 36. Rezultati za Detalj 5a, 5b i 5c

definiran je i prihvaćen samo jedan postupak, nema drugih prihvaćenih metoda u ovom području. Postupak naveden u normi [38] temelji se na Glaserovoj metodi. Glaserov postupak ima niz nedostataka, kao što su nekombiniranje prijenosa topline i vlage te pretpostavka stacionarnog stanja, itd. Ostale nedostatke Glaserove metode moguće je pronaći u [4, 50].

4.1. Kriterij temperaturnog faktora

Predmetna zgrada na kojoj je proveden proračun smještena je u Zagrebu, što spada pod kontinentalne klimatske uvjete. Proračun uzima u obzir temperaturu unutarnjeg zraka (T_i) i relativnu vlažnost (Rh). Ovi proračuni temelje se na projektiranim temperaturama, projektiranoj relativnoj vlažnosti te dnevnim prosječnim temperaturama ($T_{e,davg}$), (tablice 3. do 5.). Provedeni su i drugi proračuni s mjesečnim prosječnim temperaturama ($T_{e,mavg}$), koje prikazuje tablica 6.

Slak zasićenja vodenom parom ($p_{sat,i}$) određuje se prema temperaturi unutarnje površine (T_{si}) sukladno Dodatku E norme EN ISO 13788. Ukupni parcijalni tlak vodene pare (p) u unutrašnjem prostoru uključuje utjecaj povećane relativne vlažnosti za 5 % (tablice 3. do 6.).

Najniža dopuštena površinska temperatura ($T_{si,min}$) izvodi se iz najmanjeg dopuštenog parcijalnog tlaka zasićenja vodene pare $p_{sat,i}(T_{si})$, sukladno Dodatku E norme EN ISO 13788 (tablice 3. do 6.). Temperatura od -10 °C predstavlja minimalnu dnevnu prosječnu zimsku temperaturu zraka u Zagrebu za razdoblje od 1991. do 2020. godine smanjenu za dvije standardne devijacije [41] te je postavljena kao minimalna proračunska temperatura.

Tablica 3. Zahtjevi za minimalni f_{Rsi} pri unutarnjoj temperaturi zraka $T_i = 20$ °C

$T_{e,davg}$ [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	p_i [Pa]	$p_{sat,i}(T_{si})$ [Pa]	$T_{si,min}$ [°C]	f_{Rsi} [-]
-10	20	65 %	1519	1899	16,7	0,89
-5	20	65 %	1519	1899	16,7	0,87
0	20	65 %	1519	1899	16,7	0,83
5	20	65 %	1519	1899	16,7	0,78

EN 16798-1:2019 [51] preporučuje unutarnje temperature tijekom sezone grijanja i dijeli ih u četiri kategorije, ali sve imaju istu gornju graničnu temperaturu koja je jednaka $T_i = 25\text{ °C}$. Slična temperatura ($25,5\text{ °C}$) postavljena je kao gornja granica udobnosti prema normi ASHRAE 55 [52].

Znanstvenici su proveli studiju [53] u Hrvatskoj u kojoj su mjerili kvalitetu unutarnjeg zraka (engl. *Indoor Air Quality* - IAQ). Izmjerene temperature zraka tijekom sezona grijanja bile su blizu spomenutih 25 °C .

Vodeći se tim informacijama, provedena je dodatna simulacija. Za iste detalje kao u gornjoj analizi napravljena je još jedna varijacija prethodno prikazanih rubnih uvjeta. Unutarnja temperatura zraka podignuta je na 22 °C (tablica 4.) i 24 °C (tablica 5.). Maksimalno od 24 °C odabran je kako bi se obuhvatilo više domova.

Tablica 4. Zahtjevi za minimalni f_{Rsi} pri unutarnjoj temperaturi zraka $T_i = 22\text{ °C}$

$T_{e,davg}$ [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	P_i [Pa]	$P_{sat}(T_{si})$ [Pa]	$T_{si,min}$ [°C]	f_{Rsi} [-]
-10	22	65 %	1718	2147	18,6	0,89
-5	22	65 %	1718	2147	18,6	0,88
0	22	65 %	1718	2147	18,6	0,85
5	22	65 %	1718	2147	18,6	0,80

Tablica 5. Zahtjevi za minimalni f_{Rsi} pri unutarnjoj temperaturi zraka $T_i = 24\text{ °C}$

$T_{e,davg}$ [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	P_i [Pa]	$P_{sat}(T_{si})$ [Pa]	$T_{si,min}$ [°C]	f_{Rsi} [-]
-10	24	65 %	1938	2423	20,6	0,90
-5	24	65 %	1938	2423	20,6	0,88
0	24	65 %	1938	2423	20,6	0,86
5	24	65 %	1938	2423	20,6	0,82

Tablica 6. Proračun temperaturnog faktora za unutarnju površinu (f_{Rsi})

Mjesec	1	2	3	4	5	6	7
	$T_{e,mavg}$ [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	P_i [Pa]	$P_{sat}(T_{si})$ [Pa]	$T_{si,min}$ [°C]	f_{Rsi} [-]
Siječanj	-1,2	20	65 %	1519	1899	16,7	0,844
Veljača	2,3	20	65 %	1519	1899	16,7	0,813
Ožujak	7,4	20	65 %	1519	1899	16,7	0,737
Travanj	12,7	20	65 %	1519	1899	16,7	0,546
Svibanj	16,8	20	65 %	1519	1899	16,7	-0,035
Lipanj	20,8	20	65 %	1519	1899	16,7	5,139
Srpanj	22,1	20	65 %	1519	1899	16,7	2,577
Kolovoz	23,4	20	65 %	1519	1899	16,7	1,974
Rujan	18,4	20	65 %	1519	1899	16,7	-1,070
Listopad	12,6	20	65 %	1519	1899	16,7	0,553
Studen	8,9	20	65 %	1519	1899	16,7	0,702
Prosinac	2,0	20	65 %	1519	1899	16,7	0,816

Kriteriji temperaturnog faktora izračunatog na temelju pretpostavljenih temperatura (tablice 3. do 5.) prestrogi su i ne mogu ih ispuniti zgrade s oblogom od toplinske izolacije niti s elementima za prekid toplinskog mosta.

Analiza povijesnih podataka o temperaturama za Zagreb pokazala je da je mjesečna prosječna vanjska temperatura od -10 °C preniska, što dovodi do nerealnih f_{Rsi} kriterija.

Kako bi se riješio ovaj problem, korištene su realne temperature dobivene iz povijesnih podataka [41] te je izračunat temperaturni koeficijent na temelju tih informacija. Proračuni su izvedeni za svaki mjesec u godini s mjesečnim srednjim temperaturama ($T_{e,mavg}$) kako bi se odredila kritična vrijednost f_{Rsi} faktora (tablica 6.).

Siječanj je odabran kao kritičan mjesec, a maksimalna dopuštena vrijednost temperaturnog faktora na unutarnjoj površini je $f_{Rsi,max} = 0,844$.

Unatoč smanjenju f_{Rsi} kriterija na $f_{Rsi,max} = 0,844$, detalji s toplinskom izolacijom i dalje ne zadovoljavaju uvjet $f_{Rsi} > f_{Rsi,max}$ što ukazuje na visoki rizik od klijanja plijesni i gljivica. Suprotno tome, detalji koji sadrže elemente za prekid toplinskog mosta zadovoljavaju kriterije zbog povišene površinske temperature koja nastaje zbog prekida toplinskog mosta.

Ovi modeli nude realnije kriterije, ali mjesečni vremenski interval je prevelik. Povijesni podaci ukazuju na prisutnost temperatura nižih od prosjeka koje traju nekoliko dana ili čak tjedana, kao i na izrazito niske temperature, koje se također moraju uzeti u obzir.

4.2. Izopletni model

EN ISO 13788 [38] prihvaća povremenu, manju kondenzaciju na površinama poput prozora u kupaonici i na pločicama. Kondenzacija je prihvatljiva sve dok vlaga ne prodire u materijal i dok se poduzimaju mjere za sprječavanje njezinog širenja na susjedne materijale koji mogu biti oštećeni vlagom. Kao što je već spomenuto, Glaserova metoda ima svoje nedostatke koje

treba uzeti u obzir, dok su dostupni dinamički higrotermalni modeli koji pružaju mnogo bolji uvid u prijenos topline i vlage, što bi moglo odrediti sadržaj vode u građevnim materijalima. Temperature i sadržaj vode u materijalima kroz presjek mogu se zatim koristiti kao ulazni podaci za modele klijanja spora i rasta plijesni.

Daljnja analiza 2D problema uočenih u ovom istraživanju temelji se na normi EN ISO 13788 [38] u stacionarnom stanju, dok će se rezultati prikazati u odnosu na postojeće modele klijanja spora i rasta plijesni.

Pretpostavka prihvaćena u ovom istraživanju jest da problemi s rastom plijesni nastaju u zimskom razdoblju i da je apsolutna vlažnost konstantna u cijeloj prostoriji, tj. na sredini prostorije i neposredno uz vanjski zid. Na primjer, u slučaju projektiranih uvjeta s temperaturom zraka u prostoriji od 20 °C i relativne vlažnosti $Rh = 60\%$, kada taj zrak dođe u dodir s hladnijim toplinskim mostom, temperatura zraka u blizini toplinskog mosta će pasti kako bi se podudarila s površinskom temperaturom toplinskog mosta, a apsolutna vlažnost (Ah) ostaje konstantna neovisno o temperaturi zraka. Međutim, kako se zrak hladi u blizini toplinskog mosta, Rh će naravno porasti. Kada Rh poraste iznad određene točke, stvaraju se povoljni uvjeti za rast plijesni, a u ekstremnim slučajevima čak može doći i do kondenzacije na površini toplinskog mosta.

Uz poznatu relativnu vlažnost (Rh), apsolutna vlažnost može se izračunati prema izrazu (4) [54]:

$$Ah = \frac{6,112 \cdot e^{\left[\frac{17,67 \times T}{T+243,5}\right]} \cdot Rh \cdot 2,1674}{273,15 + T} \quad [\text{g/m}^3] \quad (4)$$

Naravno, vrijedi i suprotno, jer topliji zrak može pohraniti više vlage. Ako relativna vlažnost ostane konstantna na npr. 60 % pri povećanju temperature, apsolutna vlažnost mora porasti. Rubni uvjeti za temperaturu unutarnjeg zraka preuzeti su prema [38], gdje se smatra da je prostor grijan i iznosi $T_i = 20$ °C. Također, razmatrani su i slučajevi s višom temperaturom zraka (22 °C i 24 °C), dok je relativna vlažnost (Rh_i) ostala konstantna.

Kako bi se uzele u obzir godišnje varijacije vanjskih temperatura u Hrvatskoj, simulacije su provedene na nizu reprezentativnih zimskih uvjeta. Zagreb povremeno bilježi temperature do -10 °C, ali tipične zimske temperature ipak su nešto više. Ova

vrijednost temperature predstavlja prosječnu dnevnu zimsku temperaturu zraka u Zagrebu za razdoblje od 1991. to 2020. godine smanjenu za dvije standardne devijacije [41]. Da bismo bili precizniji, simulacija je prilagođena rasponu temperatura koji se može primijeniti i na širi raspon područja Hrvatske i na češće ostvarene temperature. Simulacija se provodi za vanjske temperature od -5 °C, 0 °C i 5 °C.

Trenutne metode za izračun rizika od plijesni u zidovima (f_{Rsf}) oslanjaju se na konstantne uvjete ili mjesečne prosječne razine vlažnosti na temelju vrste korištenja prostora.

Kako bi razumjeli kako građevni materijali i stanje površine utječu na rast plijesni, znanstvenici [55] su predložili korištenje izopleta u računalnim modelima. Izoplete su postavljene za dvije glavne kategorije materijala, na temelju podataka prikupljenih iz proračuna toplinskih mostova. Rezultati su prikazani za dvije kategorije podloga:

Kategorija I: Biološki reciklirajući građevinski materijal poput tapeta, gips-kartonskih ploča, građevinskih materijala od biorazgradivih sirovina, materijala za trajno-elastične spojeve [55].

Kategorija II: Biološki nepovoljni reciklirajući građevinski materijali poput žbuka, mineralnih građevinskih materijala, određenih vrsta drva, kao i izolacijski materijali koji nisu u obuhvaćeni kategorijom I [55].

Apsolutna vlažnost računa se prema izrazu (4), uz pretpostavku temperature zraka od 20 °C, 22 °C, 24 °C i 60 % Rh. Na temelju prethodno izračunate apsolutne minimalne površinske temperature (slika 36.), Detalj 5 pokazao se kao najkritičniji detalj za daljnje istraživanje. Unutar skupa varijacija provedenih na detalju 5, Detalj 5a (slika 29.) pokazao je najnižu temperaturu, a Detalj 5c (slika 31.) pokazao je najpovoljniji ishod, stoga će se analiza usredotočiti na ova dva specifična detalja.

Tablica 7. (Detalj 5a) i tablica 8. (Detalj 5c) prikazuju temperature zraka i površine zida zajedno s odgovarajućom relativnom vlagom za zadanu temperaturu i vlažnost zraka, pri čemu je:

- Rh_i - relativna vlažnost zraka unutarnjeg prostora
- Ah - apsolutna vlažnost zraka pri T_i i Rh_i
- $T_{si,min}$ - temperatura unutarnjeg zraka u neposrednoj blizini unutarnje površine vanjskog zida dobivene pomoću numeričkog proračuna toplinskog mosta (slike 29. i 31.)
- Rh_{si} - relativna vlažnost zraka u neposrednoj blizini unutarnje površine vanjskog zida izračunata s Ah i $T_{si,min}$

Tablica 7. Podaci temperature i vlažnosti za slučajeve s oblogom od toplinske izolacije (Detalj 5a)

Obloga od toplinske izolacije (5 cm)					
T_e [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	Ah [g/m ³]	$T_{si,min}$ [°C]	Rh_{si} [%]
-10	20	60	10.37	14,08	86
-5				15,07	81
0				16,05	76
5				17,04	72

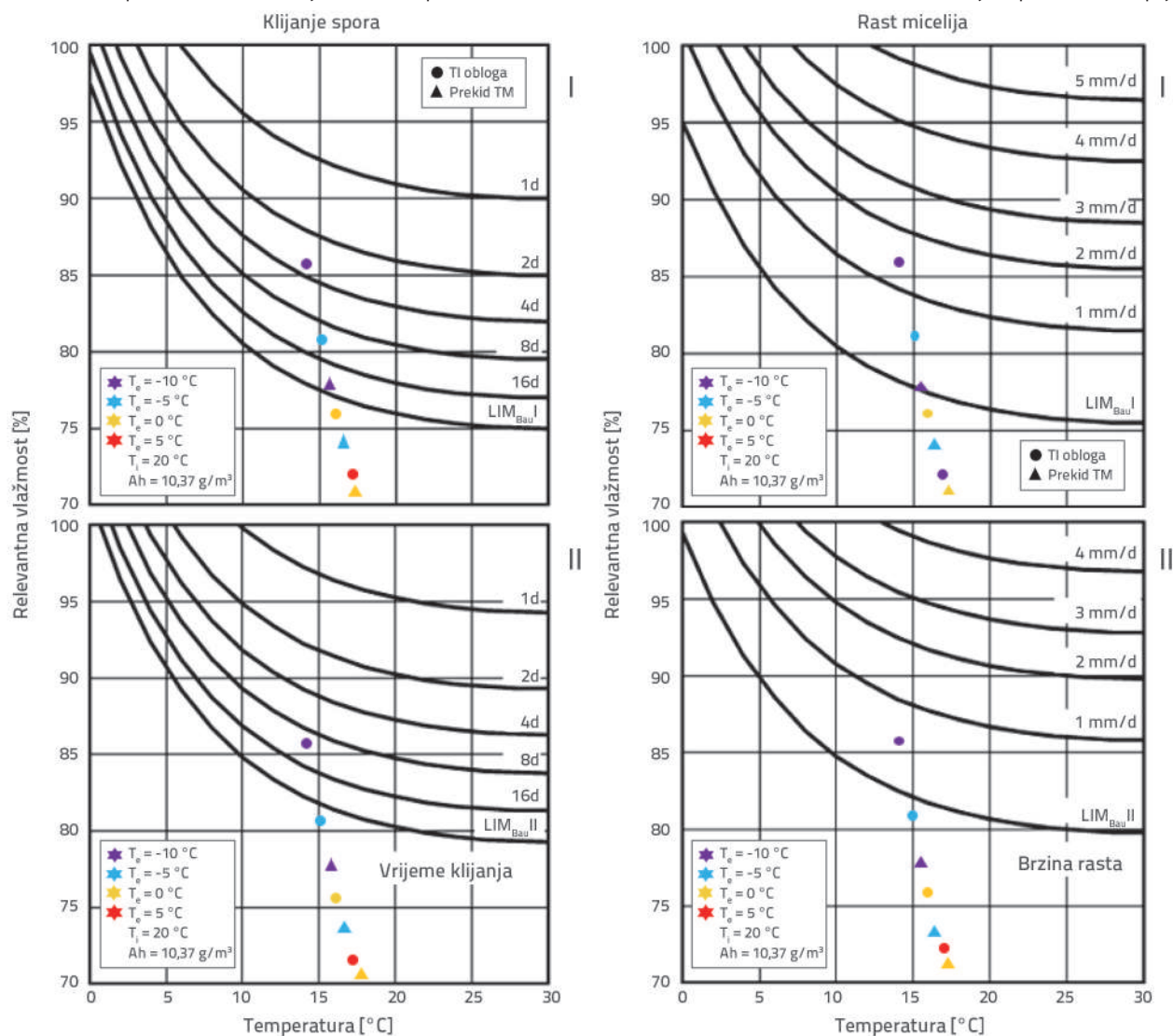
Tablica 8. Podaci temperature i vlažnosti za slučajeve s prekidom toplinskog mosta (Detalj 5c)

Prekid toplinskog mosta					
T_e [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	Ah [g/m ³]	$T_{si,min}$ [°C]	Rh_{si} [%]
-10	20	60	10.37	15,69	78
-5				16,40	74
0				17,11	71
5				17,84	68

Izračunati podaci kombinirani su sa Sedlbauerovim [41] dijagramom rasta plijesni i gljivica, a dobivene rezultate prikazuje slika 37. Podaci su prikazani na grafikonu kako bi se procijenilo jesu li uvjeti povoljni za klijanje spora plijesni. Spore plijesni klijat će samo ako temperatura i relativna vlažnost premaše određeni prag u dovoljno dugom kontinuiranom vremenskom razdoblju. Nakon klijanja započinje faza rasta. Podaci o temperaturi i relativnoj vlažnosti prikazani su na

zasebnom dijagramu namijenjenom rastu micelija. Ovaj grafikon omogućava određivanje specifične brzine rasta za svaku kombinaciju temperature i vlažnosti.

Grafikoni prikazuju generalizirani izopletni sustav za klijanje spora, koji vrijedi za sve gljivice opasnosti klase A (iznad) i B/C (ispod). Detaljno objašnjenje klasa gljivica nalazi se u referenci [4]. Najniži izopletni za plijesan (LIM) označava minimalnu razinu biološke aktivnosti unutar klasifikacije opasnosti od plijesni.



Slika 37. Razvoj spora i micelija za Detalj 5a i 5c

Tablica 9. Podaci temperature i vlažnosti za slučajeve s oblogom od toplinske izolacije (Detalj 5a)

Obloga od toplinske izolacije (5 cm)					
T_e [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	Ah [g/m ³]	$T_{si,min}$ [°C]	Rh_{si} [%]
-10	22	60	11,65	15,86	86
-5				16,67	82
0				17,66	77
5				18,65	73

Tablica 10. Podaci temperature i vlažnosti za slučajeve s prekidom toplinskog mosta (Detalj 5c)

Prekid toplinskog mosta					
T_e [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	Ah [g/m ³]	$T_{si,min}$ [°C]	Rh_{si} [%]
-10	22	60	11,65	17,39	78
-5				18,11	75
0				18,83	72
5				19,55	69

Tablica 11. Podaci temperature i vlažnosti za slučajeve s oblogom od toplinske izolacije (Detalj 5a)

Obloga od toplinske izolacije (5 cm)					
T_e [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	Ah [g/m ³]	$T_{si,min}$ [°C]	Rh_{si} [%]
-10	24	60	13,06	17,29	89
-5				18,28	84
0				19,26	79
5				20,25	75

Tablica 12. Podaci temperature i vlažnosti za slučajeve s prekidom toplinskog mosta (Detalj 5c)

Prekid toplinskog mosta					
T_e [°C]	T_i [°C]	Rh_i [%]	Ah [g/m ³]	$T_{si,min}$ [°C]	Rh_{si} [%]
-10	24	60	13,06	19,10	80
-5				19,82	76
0				20,54	73
5				21,26	70

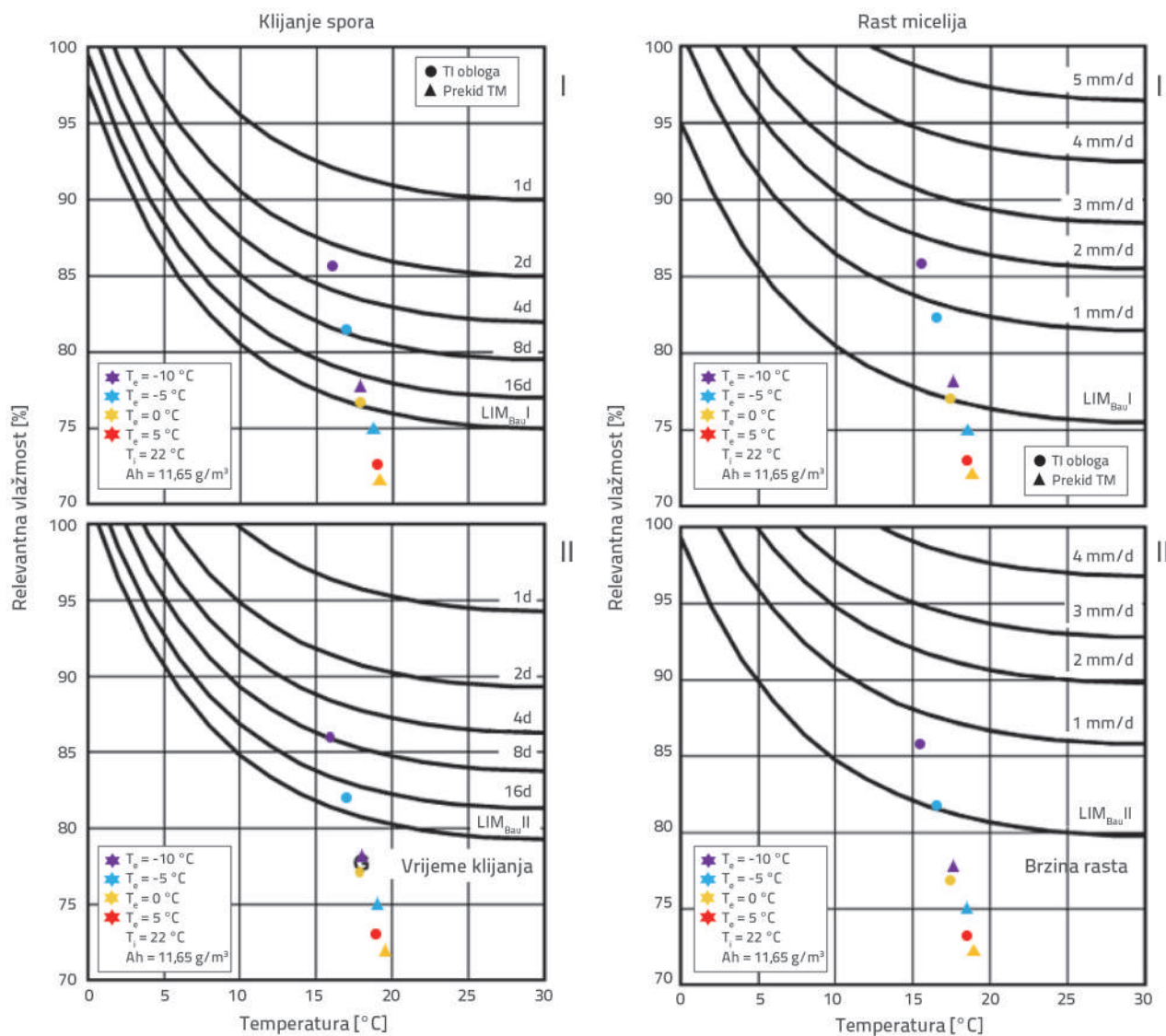
Odgovarajući broj dana predstavlja vremenski okvir potreban za pojavu prvih znakova rasta plijesni na toj razini [4]. Najniži izoplet za plijesan (LIM) označava minimalnu razinu aktivnosti plijesni unutar klase opasnosti. Odgovarajući broj u mm/d označava očekivanu brzinu rasta plijesni na toj razini [4]. LIM je teoretska linija na kojoj je vrijeme klijanja spora beskonačno veliko ili je brzina rasta 0 mm/d.

Vrsta građevnog materijala značajno utječe na vrstu mikroorganizama koji na njemu mogu rasti. Različiti mikroorganizmi imaju specifične zahtjeve za vodom i hranjivim tvarima.

Grafikoni u nastavku (slike 37. do 39.) prikazuju različiti razvoj plijesni i brzinu rasta na temelju rezultata koje prikazuju tablice 7. i 8., vizualno prikazujući utjecaj različitih pristupa smanjenju

utjecaja toplinskog mosta (predstavljenih točkama i trokutima) i temperatura okoline (različite boje). Neki dokazi pokazuju da je sadržaj vode glavni faktor mikrobijalnog rasta na građevinskim materijalima [8], ali potrebno je više istraživanja kako bi se poboljšalo razumijevanje i predviđanje mikrobijalnog rasta na građevinskim materijalima.

Izračunate temperature (tablice 7. i 8.) više su od temperatura rosišta, ali plijesni gljivice ne trebaju tekuću vodu za rast. Rezultati koje prikazuje (slika 37.) ukazuju da će do klijanja spora doći na detaljima koji su obavijeni s 5 cm toplinske izolacije kada su vanjske temperature niže od -5 °C. Detalji s prekidom toplinskog mosta izvan su opasnosti i neće doći do klijanja spora. Znanstvenici u članku [56] pronašli su ograničenja koja Sedlbauerov izopletni model ne pokriva. Zaključili su da prekidi



Slika 38. Razvoj spora i micelija za Detalj 5a i 5c

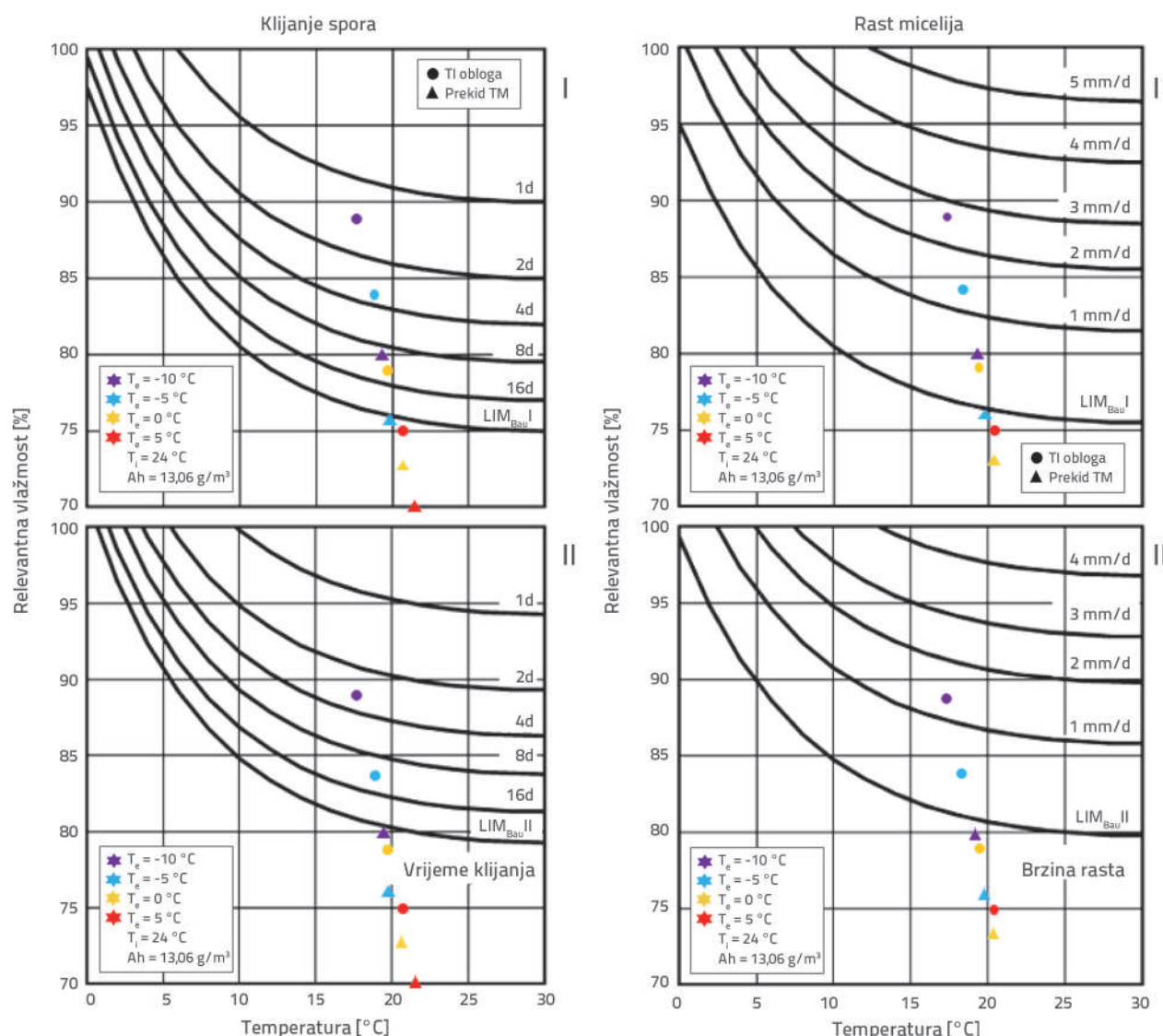
tijekom nepovoljnih uvjeta mogu uzrokovati isušivanje spora, što nije uključeno u studiju. Klijanje i rast plijesni sami po sebi razlog su za zabrinutost, što bi trebalo spriječiti na prvom mjestu. Prema Martensu [57], kontinuirano izlaganje Rh od 55 % ili nižoj tijekom najmanje mjesec dana može ubiti aktivne gljivice. Na istim detaljima kao na prethodno provedenoj gornjoj analizi napravljena je još jedna varijacija prema prethodno spomenutim rubnim uvjetima. Temperatura unutarnjeg zraka povećana je na 22 °C (tablice 9., 10. i slika 38.) i 24 °C (tablice 11., 12. i slika 39.). Maksimalna temperatura od 24 °C odabrana je kako bi se zahvatio što veći broj domova.

Uz povećanu temperaturu unutarnjeg zraka na 22 °C, grafikon pokazuje veći rizik od klijanja spora. Detalji s toplinski izoliranim balkonskim pločama imat će veću vjerojatnost klijanja spora i brži rast micelija, posebno kada su vanjske temperature niže od 0 °C. Povećanje grijanja ne zaustavlja niti usporava klijanje spora i rast micelija. Na primjer, 5 cm debela obloga toplinske

izolacijske (slika 38., ljubičaste točke) bit će ugrožena klijanjem spora ako je vanjska temperatura zraka -10 °C i traje približno 3 dana te u tim uvjetima nastavi, brzina rasta micelija bit će 1,5 mm/dan u slučaju podloge kategorije I. S druge strane, slučaj s prekidom toplinskog mosta (slika 38., ljubičasti trokuti) i istim vanjskim uvjetima (-10 °C) i podlogom kategorije I, nalazi se na LIM izopletu, što znači da je vrijeme klijanja spora beskonačno veliko, a rast micelija 0 mm/dan.

Ako se promatra slika 38., može se zaključiti da detalji s prekidom toplinskog mosta imaju veću vjerojatnost klijanja spora i rasta plijesni nego u slučaju s 20 °C, ali još su uvijek izvan kritičnog područja.

Uz povećanje unutarnje temperature zraka, trend većeg rizika od klijanja spora i rasta plijesni nastavlja se povećavati. U slučajevima s oblogom od toplinske izolacije debljine 5 cm, klijanje spora dogodit će se unutar jednog i pol dana (slika 39.). Detalji s prekidom toplinskog mosta također su ušli u kritično



Slika 39. Razvoj spora i micelija za Detalj 5a i 5c

područje, ali je vrijeme potrebno za klijanje spora mnogo dulje, tj. potrebno je između 8 i 16 dana u ekstremnim vanjskim uvjetima od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ za klijanje spora u slučaju podloge kategorije I. Važno je napomenuti da opet svi slučajevi ispunjavaju zahtjeve za minimalne vrijednosti faktora f_{Rsi} što pokazuje da taj faktor sam po sebi nije dovoljan da bi ukazao na klijanje spora.

5. Zaključak

U ovom istraživanju promatra se utjecaj dvaju pristupa smanjenja utjecaja toplinskog mosta u kontinuiranim armirano-betonskim istakama: tradicionalni pristup u kojem se istake oblažu toplinskom izolacijom sa svih strana istake i sustavi za prekid toplinskog mosta. Provedena je 2D računalna simulacija u programu CRORAL na pet različitih detalja spoja balkona, usredotočujući se na njihov utjecaj na Ψ -vrijednost, temperature unutarnje površine vanjskog zida i rizik od klijanja plijesni i gljivica. Uočena

je superiornost sustava za prekid toplinskih mostova u odnosu na obloge od toplinske izolacije. Iako je deblja izolacija (slučajevi s 10 cm) poboljšala performanse u usporedbi sa slučajevima s 5 cm, i dalje su imali lošije rezultate od detalja sa sustavom prekida toplinskih mostova. Nadalje, povećanje debljine toplinske izolacije iznad 5 cm može dovesti do neučinkovite uporabe materijala i potencijalnih izazova u gradnji.

Simulacije su pokazale značajne razlike u površinskoj temperaturi, posebno za detalje s pločom i atikom na krovu (Detalj 5a i 5c). Detalj s izolacijom pokazao je 48 % veću Ψ -vrijednost i gotovo $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nižu površinsku temperaturu u usporedbi s varijantom sa sustavom prekida toplinskog mosta. Iako su oba pristupa zadovoljila f_{Rsi} uvjet od 0,7, istražen je utjecaj razlike u površinskoj temperaturi od $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ na rizik od klijanja spora i rasta micelija.

Početno je postavljen vrlo strog f_{Rsi} uvjet temeljen na ekstremnoj zimskoj temperaturi kontinentalne Hrvatske od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Međutim,

čak ni uz primjenu različitih tehnika ublažavanja toplinskog mosta, nijedan slučaj nije zadovoljio ovaj zahtjev jer proračun je ovisio o niskim prosječnim mjesečnim temperaturama, a -10 °C nerealno je niska temperatura za Zagreb.

Realniji pristup koristio je prosječnu mjesečnu zimsku temperaturu od -1,2 °C, što je rezultiralo revidiranim kriterijem od 0,844. Čak i uz ovu korekciju, slučajevi s oblogom od toplinske izolacije i dalje nisu zadovoljili kriterije. Međutim, slučajevi sa sustavom za prekid toplinskog mosta uspjeli su zadovoljiti postavljene kriterije zbog viših površinskih temperatura.

Za proces klijanja plijesni i gljivica povoljnim uvjetima dovoljan je i kraći period od cijelog mjeseca, tako da se moraju uzeti u obzir i kraća vremenska razdoblja s povoljnim uvjetima, kao i materijali elementa.

Izopletni model uzima u obzir svojstva materijala, površinsku temperaturu, relativnu vlažnost i vremenski interval s povoljnim uvjetima za klijanje plijesni/gljivica.

Varijanta s 5 cm izolacije pokazala je visok rizik od rasta plijesni/gljivica tijekom zime na standardnoj temperaturi zraka prostorije od 20 °C. Literatura sugerira da stanovnici griju svoje domove na više temperature kako bi ujedno i smanjili rizik od razvoja plijesni i gljivica, ali analiza pokazuje da će povećanje temperature zraka samo povećati rizik od rasta plijesni/gljivica. Varijanta sa sustavom za prekid toplinskih mostova nije ušla u kritično područje rizika sve dok unutarnja temperatura zraka nije podignuta na 24 °C.

Ovi rezultati sugeriraju da za kvalitetnu procjenu rizika od razvoja plijesni i gljivica nije dovoljno promatrati samo *fRsi* vrijednost, a naročito u scenarijima s unutrašnjim temperaturama višim od 20 °C. Standardni rubni uvjeti usredotočeni su na kondenzaciju vodene pare i temelje se na zastarjeloj Glaserovoj metodi. Tijekom projektiranja potrebno je uzeti u obzir i rizik od rasta plijesni/gljivica i performanse toplinskog mosta kako bi se stvorila zdravija unutarnja okolina.

LITERATURA

- [1] European Commission: Indoor air pollution - New EU research reveals higher risks than previously thought, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_03_1278, [1.9.2024.]
- [2] Klepeis, N., Nelson, W., Ott, W., Robinson, J.: The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for assessing exposure to environmental pollutants, 2001.
- [3] Bennet, J.W.: An overview of the Genus *Aspergillus*, Caister Academic Press, 2010.
- [4] Sedlbauer, K.: Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001., pp. 75–141
- [5] Mendell, M., Mirer, A., Cheung, K., Tong, M., Douwes, J.: Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: A Review of the epidemiologic evidence, *Environ Health Perspect*, 119 (2011), pp. 748–756, <https://doi.org/10.1289/ehp.1002410>.
- [6] Zhu, Y., Liu, L., Sang, G., Cui, X.: Effect of advanced insulation materials and passive optimization strategies on interior thermal comfort of traditional houses in winter, *Građevinar*, 76 (2024) 10, pp. 633–646, <https://doi.org/10.14256/JCE.3870.2023>.
- [7] Haverinen-Shaughnessy, U., et al.: Occurrence of moisture problems in schools in three countries from different climatic regions of Europe based on questionnaires and building inspections - the HITEA study, *Indoor Air*, 22 (2012), <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00780.x>.
- [8] Verdier, T., Bertron, A., Johansson, P.: Overview of indoor microbial growth on building materials, 2016.
- [9] Mendell, M., Macher, J., Kumagai, K.: Measured moisture in buildings and adverse health effects: A review, *Indoor Air*, 28 (2018) 4, <https://doi.org/10.1111/ina.12464>.
- [10] Holzheimer, R.: Moisture damage and fungal contamination in buildings are a massive health threat - a surgeon's perspective, *Cent. Eur. J. Public Health*, 31 (2023) 3, pp. 63–68, <https://doi.org/10.21101/cejph.a7504>.
- [11] Adams, R.I., Sylvain, I., Spilak, M.P., Taylor, J.W., Waring, M.S., Mendell, M.J.: Fungal signature of moisture damage in buildings: Identification by targeted and untargeted approaches with mycobiome data, *Appl. Environ. Microbiol.*, 86 (2000) 17, <https://doi.org/10.1128/AEM.01047-20>.
- [12] Cox, J., et al.: Quantitative and semiquantitative estimates of mold exposure in infancy and childhood respiratory health, *Environmental Epidemiology*, 4 (2020), p. e101, <https://doi.org/10.1097/EE9.000000000000101>.
- [13] Theodosiou, T., Papadopoulos, A.: The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, *Energy Build.*, 40 (2008) 12, pp. 2083–2089, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>.
- [14] Milovanović, B., Bagarić, M.: Kako postići standard zgrade gotovo nulte energije, *Građevinar*, 72 (2020) 9, pp. 703–720, <https://doi.org/10.14256/JCE.2923.2020>.
- [15] Clarke, J.: Energy Simulation in Building Design, 2007., <https://doi.org/10.4324/9780080505640>.
- [16] Ghazi Wakili, K., Simmler, H., Frank, T.: Experimental and numerical thermal analysis of a balcony board with integrated glass fibre reinforced polymer GFRP elements, *Energy and Buildings*, 39 (2007), pp. 76–81, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.002>.
- [17] Zhang, X., Jung, G.J., Rhee, K.N.: Performance evaluation of thermal bridge reduction method for balcony in apartment buildings, *Buildings*, 12 (2022) 1, p. 63, <https://doi.org/10.3390/buildings12010063>.
- [18] Pérez-Carramiñana, C., Morena-Marqués, A., Gonzalez Aviles, A.B., Castilla-Cabanes, N., Galiano-Garrigos, A.: Influence of balcony thermal bridges on energy efficiency of dwellings in a warm semi-arid dry Mediterranean climate, *Buildings*, 14 (2024) 3, p. 703, <https://doi.org/10.3390/buildings14030703>.

- [19] Ramenah, H.: Applying infrared thermography to a latest residential building in France: A case study, verifying dwellings national thermal regulations RT 2012 mainly thermal bridges assessment, *Sustainable Buildings*, 2024.
- [20] Susorova, I., Stephens, B., Skelton, B.: The effect of balcony thermal breaks on building thermal and energy performance: Field experiments and energy simulations in Chicago, IL, 2019., <https://doi.org/10.3390/buildings9090190>.
- [21] Kim, M.Y., Kim, H.G., Kim, J.S., Hong, G.: Investigation of thermal and energy performance of the thermal bridge breaker for reinforced concrete residential buildings, *Energies*, 15 (2022) 8, <https://doi.org/10.3390/en15082854>.
- [22] Aghasizadeh, S., Kari, B.M., Fayaz, R.: Thermal performance of balcony thermal bridge solutions in reinforced concrete and steel frame structures, *Journal of Building Engineering*, 48 (2022), p. 103984, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103984>.
- [23] Murad, C., Doshi, H., Ramakrishnan, R.: Impact of insulated concrete curb on concrete balcony slab, *Procedia Eng.*, 118 (2015), pp. 1030–1037, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.545>.
- [24] Ge, H., McClung, V.R., Zhang, S.: Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study, *Energy Build*, 60 (2013), pp. 163–173, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.004>.
- [25] Garay, R., Uriarte, A., Apraiz, I.: Performance assessment of thermal bridge elements into a full-scale experimental study of a building façade, 2013.
- [26] Goulouti, K., Castro, J., Keller, T.: Aramid/glass fiber-reinforced thermal break - thermal and structural performance, *Compos. Struct.*, 136 (2016) 2, pp. 113–123, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.001>.
- [27] Alhawari, A., Mukhopadhyaya, P.: Thermal bridges in building envelopes – An overview of impacts and solutions, *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9 (2018) 6, pp. 31–40, <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.1.5>.
- [28] Osman, B., Chen, Z., Carroll, A., Abuserriya, A.: Optimization and design of mixture ratio and basic properties for new energy-saving concrete self-insulation block, *Građevinar*, 76 (2024) 3.
- [29] Zhang, T., Mukhopadhyaya, P.: Thermal transmittance reduction through exposed balcony slabs, *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 8 (2017) 6, pp. 75–81, <https://doi.org/10.1556/1848.2017.8.1.11>.
- [30] Goulouti, K., Castro, J., Vassilopoulos, A., Keller, T.: Thermal performance evaluation of fiber-reinforced polymer thermal breaks for balcony connections, *Energy Build*, 70 (2014) 2, pp. 365–371, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.070>.
- [31] Roppel, P., Hardock, D., Hershfield, M.: Thermal breaks and energy performance in high-rise concrete balconies, 2013.
- [32] Kalousek, M., Rybakova, A.: Linear thermal transmittance of holding unit of balcony slab to external wall, *Advanced Materials Research*, 649 (2010), <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.649.163>.
- [33] Dikarev, K., Berezyuk, A., Kuzmenko, O., Skokova, A.: Experimental and numerical thermal analysis of joint connection «floor slab – balcony slab» with integrated thermal break, *Energy Procedia*, 85 (2016) 1, pp. 184–192, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.325>.
- [34] Finch, G., Higgins, J., Hanam, B.: The importance of balcony and slab edge thermal bridges in concrete construction, *Proceedings of the 14th Canadian Conference on Building Science and Technology*, Toronto, Ontario, 2014.
- [35] Buday, P., Ingeli, R., Cekon, M.: Advanced Thermal performance analysis of thermal break element applied in balcony slab, *Advanced Materials Research*, 1041 (2014), <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.167>.
- [36] DIN 4108-3: Thermal protection and energy economy in buildings – Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions – Requirements, calculation methods and directions for planning and construction, *Deutsches Institut für Normung*, 2024.
- [37] Ministarstvo prostornog uređenja graditeljstva i državne imovine: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, *Narodne novine*, 2020.
- [38] EN ISO 13788:2012: Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods, *The European Committee for Standardization*, 2013.
- [39] EN ISO 10211: Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations, *Hrvatski zavod za norme*, 2017.
- [40] Gaši, M., Milovanović, B., Banjad Pečur, I., Bagarić, M.: Effect of perforations and slits on hygrothermal properties of EPS, *Građevinar*, 74 (2024), pp. 369–392, <https://doi.org/10.14256/JCE.3483.2022>.
- [41] Državni hidrometeorološki zavod: Usporedba sa srednjakom za razdoblje 1991–2020., Zagreb-Maksimir, https://meteo.hr/klima.php?section=klima_pracenje¶m=srednja_temperatura&Grad=zm_sred&Godina=2023, [1.9.2024.]
- [42] Xue, Y., et al.: Heat and moisture transfer in wall-to-floor thermal bridges and its influence on thermal performance, *Energy Build*, 279 (2023), p. 112642, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112642>.
- [43] Gaši, M.: CRORAL-Computer Program for Thermal Bridge Analysis and Vapour Analysis, *Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb*, 2023.
- [44] HRN EN ISO 10077-2: Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames, *Hrvatski zavod za norme*, 2017.
- [45] EN ISO 6946: Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods, *The European Committee for Standardization*, 2017.
- [46] Schöck: Building physics characteristics values Schöck Isokorb T for reinforced concrete constructions, <https://www.schoeck.com/hr/podloge-za-projektiranje/eyJYXRIZ29yeSI6eYlyNSI6MjV9fQ>, [4.9.2024.]
- [47] DIN 4108 Beiblatt 2: 2019-06 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken, *Deutsches Institut für Normung*, 2018., <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.31030/3054799>.
- [48] Schild, K.: Wärmebrücken-Berechnung und Mindestwärmeschutz, *Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2018.
- [49] Tkalčić, D., Milovanović, B., Gaši, M., Rukavina, M.J., Pečur, I.B.: Optimization of thermal bridges effect of composite lightweight panels with integrated steel load-bearing structure, *Energies*, 16 (2023), pp. 1–24.
- [50] Bagarić, M.: Higrotermalno ponašanje ventiliranih teških ovojnica zgrada, *Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu*, 2020.

- [51] EN 16798-1:2019: Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acous, The European Committee for Standardization, 2019.
- [52] ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2020.
- [53] Milovanović, B., Bagarić, M.: Toplinska ugodnost i kvaliteta zraka u višestambenim zgradama, Građevinar, 74 (2022) 12, pp. 1110–1114
- [54] Carnotcycle: How to convert relative humidity to absolute humidity, <https://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/>, [2.9.2024.]
- [55] Sedlbauer, K., Krus, M.: A new model for mould prediction and its application in practice, Research in Building Physics, (2020), pp. 921–927, <https://doi.org/10.1201/9781003078852-128>.
- [56] Vereecken, E., Roels, S.: Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation, Build Environ., 51 (2012), pp. 296–310, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003>.
- [57] Martens, M.: Climate risk assessment in museums: degradation risks determined from temperature and relative humidity data, Build. Environ., 2005 (2012), pp. 41–44, <https://doi.org/10.6100/IR729797>.