

# Utjecaj perforacija i proreza na higrotermalna svojstva EPS-a

---

Gaši, Mergim; Milovanović, Bojan; Banjad Pečur, Ivana; Bagarić, Marina

Source / Izvornik: **Građevinar, 2022, 74, 369 - 381**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.3483.2022>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:551506>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 21.2.2022.

Ispravljen / Corrected: 14.4.2022.

Prihvaćen / Accepted: 25.4.2022.

Dostupno online / Available online: 10.6.2022.

# Utjecaj perforacija i proreza na higrotermalna svojstva EPS-a

## Autori:



**Mergim Gaši**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[mergim.gasi@grad.unizg.hr](mailto:mergim.gasi@grad.unizg.hr)



Doc.dr.sc. **Bojan Milovanović**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[bojan.milovanovic@grad.unizg.hr](mailto:bojan.milovanovic@grad.unizg.hr)  
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Ivana Banjad Pečur**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[ivana.banjad.pecur@grad.unizg.hr](mailto:ivana.banjad.pecur@grad.unizg.hr)



Dr.sc. **Marina Bagarić**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[marina.bagaric@grad.unizg.hr](mailto:marina.bagaric@grad.unizg.hr)

Prethodno priopćenje

**Mergim Gaši, Bojan Milovanović, Ivana Banjad Pečur, Marina Bagarić**

## Utjecaj perforacija i proreza na higrotermalna svojstva EPS-a

Ovaj rad prikazuje rezultate istraživanja utjecaja perforacija i proreza na difuzivnost vodene pare ekspaniranog polistirena (EPS-a) te utjecaj veličine i broja perforacija i proreza na toplinsku vodljivost ploče EPS-a. Istraživanje je provedeno primjenom numeričkih modela (metode kontrolnih volumena), pri čemu je varirana debljina uzorka, razmak proreza te dubina i promjer perforacija. Numeričkim modelom se pokazalo da je moguće dobiti i do 42,18 % bolju difuzivnost vodene pare u odnosu na EPS ploču bez perforacija uz povećanje toplinske vodljivosti od 9,02 %. Također, iz rezultata ovog istraživanja vidljivo je da efektivni koeficijent difuzije vodene pare ovisi o debljini perforiranih uzoraka EPS-a.

### Ključne riječi:

numerički model, perforirani EPS, toplinski tok, difuzija vodene pare, ekvivalentna toplinska vodljivost

Research Paper

**Mergim Gaši, Bojan Milovanović, Ivana Banjad Pečur, Marina Bagarić**

## Effect of perforations and slits on hygrothermal properties of EPS

This paper presents the results of research on the influence of perforation and slits on the water vapour diffusion of expanded polystyrene (EPS) and the influence of the size and number of perforations and slits on the thermal conductivity of EPS board. The research was conducted using numerical models (control volume methods) with varying sample thickness, slit spacing, and depth and diameter of perforations. The numerical model showed that it is possible to obtain up to 42.18 % better water vapour diffusion compared to EPS board without perforation with an increase in thermal conductivity of 9.02 %. Also, the results of this study show that the effective vapour diffusion coefficient depends on the thickness of the perforated EPS samples.

### Key words:

numerical model, perforated EPS, heat flow, water vapor diffusion, equivalent thermal conductivity

## 1. Uvod

Europsko tržište toplinskih izolacijskih materijala karakterizira dominacija dviju skupina proizvoda: anorganskih vlaknastih materijala i organskih pjenastih materijala [1], a posljednjih godina zbog promjena u regulativi i sufinanciranju energetske obnova zgrada došlo je do velikog rasta primjene tih materijala, između ostalog i ekspanziranog polistirena (EPS).

Prilikom projektiranja zgrade, jedan od prvih koraka koji treba uzeti u obzir je postizanje potrebne razine toplinske zaštite, u smislu koeficijenta prolaska topline (U-vrijednosti), koji je otprilike od 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) za visokoenergetske standarde do 0,3 W/(m<sup>2</sup>K) ili više za standardne i danas uobičajene sastave vanjske ovojnice zgrade. Izazov je postići takve vrijednosti odabirom najprikladnijih i najekonomičnijih materijala, koji osiguravaju najtanju moguću izolaciju s najvećom toplinskom učinkovitošću [2]. Istovremeno, osim gubitaka topline, potrebno je razmatrati i kontrolu prijenosa vodene pare i vlage kroz ovojnicu zgrade, ponašanje materijala pri ciklusima promjene temperature kao i ponašanje u požaru, prijenos buke, mogućnost uporabe materijala nakon kraja njegove uporabljivosti itd. [3].

Između ostalih dostupnih materijala, EPS je dobro poznati toplinski izolacijski materijal koji se upotrebljava u građevinarstvu jer ima laganu, ali čvrstu pjenastu strukturu s malom toplinskom vodljivosti od 0,030 do 0,050 W/(m K) [4, 5]. Osim toga, ima relativno visoku čvrstoću uz malu gustoću, relativno dugo trajanje [6] i zahtijeva relativno malo održavanja, a omogućuje brzu i ekonomičnu gradnju [7]. EPS pjena se obično sastoji od više perli koje se spajaju najčešće u ploče. Te perle su savršeno sferične, a presjek perle otkriva strukturu saća promjera 15 µm do 300 µm [8, 9] i ovojnicu s nekoliko membrana. To objašnjava, s jedne strane, činjenicu da EPS sadrži oko 98 % zraka i 2 % polistirena [7, 8], a s druge strane ima relativno nisko upijanje vode i relativno visoku vodu i paronepropusnost. Svojstva polimerne pjene mogu se relativno lako prilagoditi kontroliranjem veličine pora, relativne gustoće, strukture pora i upotrebe aditiva [10, 11].

Međutim, uporaba EPS-a važan je ekološki problem i potencijalno ima ozbiljne zdravstvene posljedice za ljude [12]. Sadrži tvari, poput stirena i benzena, za koje se sumnja da su neurotoksini i karcinogeni, koji bi mogli biti štetni za ljude kada se ispuste [10]. Za stiren postoje uvjerljive relevantne informacije da tvar djeluje putem mehanizama koji upućuju na to da bi vjerojatno uzrokovao rak kod ljudi [12].

S obzirom na to da je polistiren dio skupine organskih materijala, dobro je poznato njegovo ponašanje u požaru [13]. Međutim, njegovo ponašanje pri realnim uvjetima požara u zgradama ovisi o uvjetima u kojima se koristi, kao i o svojstvima materijala koja mogu varirati ovisno o tome je li polistiren izrađen s usporivačem gorenja ili bez njega.

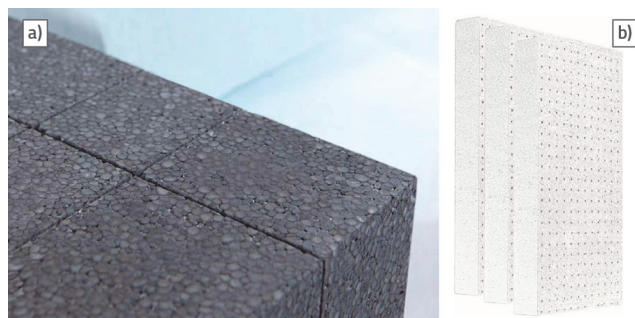
S tehničkoga gledišta, nedostatak EPS-a je toplinsko izduženje. Za svakih 17 °C temperaturne razlike EPS mijenja duljinu za približno 1 mm/m [14]. Stoga se može dogoditi da se izolacijski materijal koji je (pogrešno) uskladišten na gradilištu i ima površinsku temperaturu primjerice 55 °C, zbog hlađenja nakon ugradnje skрати za 2 do 4 mm (tablica 1.). Naravno, to se može dogoditi i u suprotnom smjeru ako se materijal ugradi zimi (izravno sunčevo zračenje zagrijava fasadu i uzrokuje širenje izolacijskog materijala).

Koeficijent linearnog toplinskog izduženja polimera veći su od onih kod većine krutih materijala na sobnoj temperaturi zbog toga što se radi o pothlađenoj polimernoj taljevini [11]. Taj veliki koeficijent prenosi se izravno u ekspanzirano stanje. Autori [11] utvrđuju varijaciju ovog svojstva s gustoćom i temperaturom za polistirenske pjene i pjene općenito. Kada se ekspanzirani polimeri koriste u proizvodima velikih dimenzija, koeficijent toplinskog širenja mora se pažljivo razmotriti zbog njegove veličine u usporedbi s onom većine nepolimernih materijala [11]. Problem se javlja kod mogućeg pregrijavanja zbog Sunčevog zračenja koje uzrokuje deformaciju ploča EPS-a [15], naročito kod EPS-a s dodatkom grafita [9, 16]. To tada dovodi do gubitka prionjivosti slojeva fasada i pucanja završnih slojeva sustava kontaktnih fasada (slika 1.) kao i do povećanih gubitaka topline kroz šupljine između ploča izolacije tijekom hladnog



Slika 1. Primjer popucalih završnih slojeva ETICS sustava zbog deformiranja ploča EPS-a

perioda. Kako bi se relaksirala naprezanja koja se javljaju pri temperaturnim promjenama ploča EPS-a, pojedini proizvođači EPS-a su razvili proizvode s prorezima po debljini ploče EPS-a (slika 2.a, tablica 1.).



Slika 2. Primjer proreza na pločama: a) prorezi za relaksiranje naprezanja uslijed promjene temperature kod grafitnog EPS-a; b) perforirane ploče EPS-a za smanjenje otpora difuziji vodene pare

Tablica 1. Linearno toplinsko izduženje (dimenzijska stabilnost) EPS-a u usporedbi s drugim toplinskim izolacijskim materijalima

| Materijal      | Linearno toplinsko izduženje $\times 10^{-6} [K^{-1}]$ | Izduženje ploče dužine 1 m pri $\Delta T = 50^\circ C$ [mm] |
|----------------|--|---|
| Bijeli EPS     | 50 - 70 [17,18]<br>63 [19]<br>80 [20]                  | 2,5 - 3,5<br>3,15<br>4,0                                    |
| Grafitni EPS   | 65 [21]<br>60 - 80 [22]                                | 3,25<br>3,0 - 4,0   |
| XPS            | 80 [18]<br>63 [19]                                     | 4,0<br>3,15   |
| PUR            | 100 [18]<br>30 - 80 [24]                               | 5,0<br>1,5 - 4,0  |
| PIR            | 120 [18]<br>30 - 80 [23]<br>54 - 140 [19]              | 6,0<br>1,5 - 4,0<br>2,7 - 7,0                               |
| Mineralna vuna | 5,5 [18]<br>9 - 14 [19]                                | 0,28<br>0,45 - 0,7  |

Za prorezanu i perforiranu ploču EPS-a koeficijent linearnog toplinskog izduženja jednak je kao i za sam materijal od kojeg je ploča EPS-a izrađena (bijeli ili grafitni EPS), a relativno produženje ili smanjenje ploče kontrolira se izvođenjem proreza (šliceva).

Nadalje, vezano uz higrotermalno ponašanje, faktor otpora difuzije vodene pare  $\mu$  (-) jedno je od najvažnijih svojstava za prolazak vodene pare kroz vanjsku ovojnicu zgrade. On dakle određuje sposobnost materijala da propusti, ili obrnuto, da spriječi kretanje vodene pare koja prolazi kroz njega, a određuje se prema normi HRN EN 12086 [24] metodom suhe čaše. Za mirni zrak  $\mu$ -vrijednost jednaka je 1. Što je  $\mu$ -vrijednost veća, veći je otpor koji materijal pruža prolasku vodene pare.

Difuzija pare je kretanje molekula vodene pare kroz porozne materijale (npr. drvo, izolacija, beton, itd.) potaknuto razlikom

parcijalnog tlaka pare. Razlike u parcijalnom tlaku pare nastaju kao posljedica razlika u temperaturi i količini vodene pare u zraku. Difuzija vodene pare uvijek se događa kroz građevni element od strane visokog prema niskom parcijalnom tlaku vodene pare, što je najčešće s tople na hladnu stranu, budući da topli zrak može zadržati više vodene pare nego hladan zrak. U hladnim klimama to znači da vodena para prolazi prije svega iz grijanog unutarnjeg prostora u hladnije vanjske prostore, a u vrućim klimama smjer je vodene pare obrnut i događa se prije svega iz tople, vlažne vanjske strane u klimatiziranu unutrašnjost. Smjer prolaska vodene pare također se može obrnuti kada Sunce zagrije vlažne, upijajuće zidne obloge i ziđa, tjerajući vodenu paru prema unutra.

Sve stroži zahtjevi regulative u području energetske učinkovitosti zahtijevaju povećanje debljine toplinske izolacije. Dodatna debljina izolacije i promjene toka vodene pare koje se događaju nakon dodavanja izolacije zahtijevaju ponovno razmatranje prolazak vodene pare i kontrolu kondenzacije, odnosno povećanje vlažnosti materijala unutar građevnih elemenata.

Različita paropropusnost različitih izolacijskih proizvoda, membrana i drugih građevnih materijala uvodi značajnu složenost u pogledu projektiranja i izvođenja građevnih elemenata. Neki izolacijski materijali, poput mineralne vune, jesu paropropusni, a drugi, kao što su ekstrudirani polistiren (XPS), ekspanzirani polistiren (EPS), poliizocijanurat (PIR) i poliuretani (PUR), relativno su paronepropusni (tablica 2.).

Tablica 2. Difuzija vodene pare kroz EPS u usporedbi s drugim toplinskim izolacijskim materijalima

| Materijal               | Gustoća $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Koeficijent difuzije vodene pare $\mu$ [-] |
|-------------------------|-------------------------------------|--|
| Bijeli EPS              | 15 [28]                             | 20-40 [28]                                 |
|                         | 20-25 [28]                          | 30-70 [28]                                 |
|                         | 30-35 [28]                          | 40-100 [28]                                |
|                         | 10-50 [4]                           | 20-100 [4]                                 |
|                         | >15 [20]                            | 35+2,1*( $\rho$ -15) [20]                  |
| Grafitni EPS            | 15-18 [22]                          | 20-70 [22]                                 |
| Prorezani (šlicani EPS) | 15 [29]                             | 45 [29, 31]                                |
|                         | 25 [30]                             | 40-100 [30]                                |
| Perforirani EPS         | 15-18 [30]                          | 7 [34]                                     |
|                         | 15-18 [32]                          | 8 [30]                                     |
|                         | 20 [29]                             | 10 [32]                                    |
|                         | 15-20 [33]                          | 10 [29]<br>10-30 [33]                      |
| XPS                     | 20-65 [4]                           | 80-250 [4]                                 |
|                         | >20 [20]                            | 114+3,42*( $\rho$ -20) [208]               |
| PUR                     | 34,03 [35]                          | 56 [35]                                    |
|                         | 28-55 [4]                           | 40/200 [4]                                 |
| PIR                     | 26,5 [36]                           | 51,5 [36]                                  |
| Mineralna vuna          | 10-200 [4]                          | 1 [4]                                      |
|                         | 39 [37]                             | 2 [37]                                     |

Odabir određenog rasporeda slojeva materijala u građevnom elementu zgrade i paropropusnost tih slojeva kontrolirat će prolazak vodene pare, pri čemu je u slučaju EPS-a dominantan mehanizam difuzija vodene pare [25]. Kontrola difuzije vodene pare jedan je od načina kontrole pojave kondenzacije i položaja točke rosišta unutar zida.

Patent DE A110007774 [26] prikazuje, na primjer, toplinsku izolacijsku ploču izrađenu od polistirena (EPS/XPS) ili poliuretana (PUR) s koeficijentom difuzije vodene pare  $\mu < 10$  [26, 27]. Da bi se postigla ova vrijednost, ploča EPS-a mora imati rupe (perforacije) malog promjera raspoređene po površini. Promjer rupe je između 1 i 5 mm, poželjno je između 1, 5 i 3 mm, a razmak između rupa (perforacija) između 10 i 100 mm, a poželjno je da bude 50 - 70 mm [26, 27], kako bi se održala niska vrijednost toplinske vodljivosti ploča EPS-a. Za izradu perforacija predlaže se naknadno bušenje gotovih ploča vrućim iglama kako bi se na oplošju rupa dobila zavarena, a time i glatka površina, što bi trebalo biti povoljno za prolazak vodene pare [26, 27].

Fizikalne prednosti izolacije od mineralnih vlakana u kontaktnim sustavima toplinske izolacije (ETICS) u srednjoj Europi proizlaze uglavnom iz difuzijske otvorenosti materijala. Razmatra li se sušenje zidnih konstrukcija s različitim ETICS sustavima, vidljivo je da pri izolaciji od krute pjene (EPS-a) difuzijska struja, koja je važna za sušenje prema van, bude smanjena zbog relativno većega difuzijskog otpora samog EPS-a kao toplinske izolacije [38]. Zbog toga postoje određeni proizvođači koji razvijaju proizvode na bazi polistirena sa smanjenim koeficijentom

otpora difuziji vodene pare. Istovremeno, proizvođači deklariraju vrijednosti toplinske vodljivosti ploča jednake kao za klasične ploče EPS-a (ovisno o tome radi li se o grafitnom ili bijelom EPS-u) [26, 32, 33]. Široka primjena EPS-a kao toplinske izolacije u građevinarstvu zahtijeva održivo poboljšanje higrotermalnih svojstava tradicionalnih građevnih proizvoda. Na taj se način određeni napredak postiže u smanjenju toplinske vodljivosti dodavanjem primjerice grafita [8, 16], u slučaju smanjenja otpora difuziji vodene pare izvođenjem perforacija ili izvođenjem proreza (šliceva) na pločama koji omogućuju relaksaciju naprezanja pri temperaturnim promjenama.

Prilikom uvođenja različitih tehnoloških promjena, važno je razumjeti fizičke posljedice koje takve promjene uzrokuju. Bolje razumijevanje može se omogućiti primjenom numeričkog modeliranja na razini materijala te time potvrditi smjer razvoja proizvoda. Numeričko modeliranje može omogućiti inženjerima da razviju nove materijale i potaknuti zainteresirane strane u industriji učinkovitijom optimizacijom troškova proizvodnje takvih proizvoda, a sve uz mogućnost bolje kontrole prolaska topline i vlage kroz vanjsku ovojnicu zgrade.

Stoga je svrha ovog istraživanja primjena numeričkih modela za izvođenje zaključaka koji mogu odgovoriti na sljedeća dva pitanja:

- Koliki je utjecaj perforacija i proreza (šliceva) na difuzivnost vodene pare EPS-a?
- Utječu li veličina i broj perforacije i proreza (šliceva) na toplinska svojstva ploče EPS-a?

Tablica 3. Oznake kombinacija

| Br. | DU (debljina uzorka)<br>[cm] | RS (razmak proreza)<br>[cm] | DP (dubina perforacije)<br>[cm] | PP (promjer perforacija)<br>[mm] | Oznaka kombinacije |
|-----|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1   | 10                           | 10                          | 5                               | 2                                | DU10_RS10_DP5_PP2  |
| 2   | 10                           | 10                          | 5                               | 5                                | DU10_RS10_DP5_PP5  |
| 3   | 10                           | 10                          | 10                              | 2                                | DU10_RS10_DP10_PP2 |
| 4   | 10                           | 10                          | 10                              | 5                                | DU10_RS10_DP10_PP5 |
| 5   | 10                           | 20                          | 5                               | 2                                | DU10_RS20_DP5_PP2  |
| 6   | 10                           | 20                          | 5                               | 5                                | DU10_RS20_DP5_PP5  |
| 7   | 10                           | 20                          | 10                              | 2                                | DU10_RS20_DP10_PP2 |
| 8   | 10                           | 20                          | 10                              | 5                                | DU10_RS20_DP10_PP5 |
| 9   | 20                           | 10                          | 5                               | 2                                | DU20_RS10_DP5_PP2  |
| 10  | 20                           | 10                          | 5                               | 5                                | DU20_RS10_DP5_PP5  |
| 11  | 20                           | 10                          | 20                              | 2                                | DU20_RS10_DP20_PP2 |
| 12  | 20                           | 10                          | 20                              | 5                                | DU20_RS10_DP20_PP5 |
| 13  | 20                           | 20                          | 5                               | 2                                | DU20_RS20_DP5_PP2  |
| 14  | 20                           | 20                          | 5                               | 5                                | DU20_RS20_DP5_PP5  |
| 15  | 20                           | 20                          | 20                              | 2                                | DU20_RS20_DP20_PP2 |
| 16  | 20                           | 20                          | 20                              | 5                                | DU20_RS20_DP20_PP5 |
| 17  | 30                           | 10                          | 5                               | 2                                | DU30_RS10_DP5_PP2  |
| 18  | 30                           | 10                          | 5                               | 5                                | DU30_RS10_DP5_PP5  |
| 19  | 30                           | 10                          | 30                              | 2                                | DU30_RS10_DP30_PP2 |
| 20  | 30                           | 10                          | 30                              | 5                                | DU30_RS10_DP30_PP5 |
| 21  | 30                           | 20                          | 5                               | 2                                | DU30_RS20_DP5_PP2  |
| 22  | 30                           | 20                          | 5                               | 5                                | DU30_RS20_DP5_PP5  |
| 23  | 30                           | 20                          | 30                              | 2                                | DU30_RS20_DP30_PP2 |
| 24  | 30                           | 20                          | 30                              | 5                                | DU30_RS20_DP30_PP5 |



## 2. Metodologija istraživanja

Istraživanje je provedeno primjenom numeričkih metoda za simulaciju prolaska topline i vodene pare kroz ploče EPS-a. Numerički proračun provođenja topline i vodene pare proveden je prema normama HRN EN ISO 10211 (Toplinski mostovi u zgradarstvu – toplinski tokovi i površinske temperature – Detaljni proračuni) [39] i HRN EN ISO 13788 (Značajke građevnih dijelova i građevnih dijelova zgrada s obzirom na toplinu i vlagu – Temperatura unutarnje površine kojom se izbjegava kritična vlažnost površine i unutarnja kondenzacija – Metode proračuna) [40]. Proces razmjene topline kroz granične površine pretpostavljen je adijabatskim – nema izmjene topline s okolinom kroz graničnu površinu. Rubni uvjeti i ekvivalentne toplinske karakteristike zraka izračunane su prema normama HRN EN ISO 6946 (Građevni dijelovi i građevni elementi – Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline – Metode proračuna) [41] i HRN EN ISO 10077-2 (Toplinska svojstva prozora, vrata i zaslona – Proračun koeficijenta prolaska topline – 2. dio: Numerička metoda za okvire) [42]. Numerički proračun je proveden korištenjem AnTherma [43], računalnog programa specijaliziranog za proračun toplinskih mostova / prijenosa topline te difuzije vodene pare.

Cilj je ovog istraživanja kvantificirati utjecaj perforacija ploče ekspaniranog polistirena (EPS-a) na njezina higrotermalna svojstva, tj. toplinski tok i prijenos vodene pare, primjenom numeričkih simulacija. Kako bi se uzeo u obzir različit raspored i veličina perforacija te debljina uzorka napravljene su 24 različite kombinacije (tablica 3.). Tijekom istraživanja su varirani sljedeći parametri:

- debljina uzorka (DU) od 10, 20 i 30 cm
- razmak proreza (šliceva) (RS) od 10 i 20 cm
- dubina perforacija (DP) od 5 cm i kroz cijelu debljinu uzorka (10, 20 i 30 cm)
- promjer perforacija (PP) od 2 i 5 mm.

Dimenzije ploča EPS razmatranih u ovom istraživanju su 1500 × 500 mm, a raspon debljina ploče je od 100 do 300 mm. Širina proreza (šliceva) u svim je slučajevima 2 mm.

## 3. Teorijske osnove

### 3.1. Provođenje topline

U fizikalnom smislu svojstvo materijala koje nazivamo "toplinska vodljivost" predstavlja omjer između vektora "brzine protoka topline" u materijalu i vektora "gradijenta temperature" na istom mjestu u materijalu [20]. U izotropnim materijalima taj je omjer skalar, a vođenje topline kroz homogeni materijal definirano je Fourierovim zakonom [44]:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (1)$$

gdje je  $T$  temperatura u koordinati  $(x, y, z)$ , a  $\lambda$  toplinska vodljivost materijala.

Ako se izraz (1) prikaže za konačni volumen  $dx \times dy \times dz$ , tada je suma toplinskih tokova kroz površine koje opisuju volumen jednaka toplini generiranoj u tom elementu.

$$\begin{aligned} Q_x &= -\lambda \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\Delta T}{dx} \\ Q_y &= -\lambda \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{\Delta T}{dy} \\ Q_z &= -\lambda \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\Delta T}{dz} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{i=x,y,z} Q_i = Q_{gen}$$

U slučaju da nema generirane topline (npr., podnog grijanja), tada je član  $Q_{gen} = 0$ .

Raspisivanjem jednadžbi za svaki konačni volumen te rješavanjem sustava jednadžbi dobivaju se nepoznate temperature. Radi analogije provođenja topline i difuzije vodene pare, izraz (1) možemo zapisati na sljedeći način:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \Delta T \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

### 3.2. Ekvivalentna difuzija vodene pare

Izraz "ekvivalent" naglašava da takozvana difuzija u poroznim materijalima kombinira molekularnu i frikcijsku difuziju, površinski tok i prijenos vode u malim porama, ispunjenim kapilarnom kondenzacijom [44]. Budući da dominira faza pare, tu složenu stvarnost opisujemo Fickovim zakonom difuzije. Kad god je konvekcija zanemariva, ta vrsta difuzije daje model za procjenu prijenosa "pare" kroz građevne elemente. Naravno, nepostojanje konvekcije pretpostavlja da građevni element ne sadrži slojeve zraka, nema pukotina, itd., odnosno zrakonepropusna je ovojnica. S obzirom na to da EPS ima vrlo nisku zrakopropusnost i da je riječ o materijalu bez otvorenih pora, može se pretpostaviti da je difuzija vodene pare kroz njega definirana prvim Fickovim zakonom:

$$\vec{d} = -\delta \cdot \text{grad } c \quad (4)$$

gdje je  $c$  koncentracija vodene pare, a  $\delta$  koeficijent proporcionalnosti (koeficijent difuzije).

Koeficijent difuzije  $\delta$  za zrak pri tlaku zraka od 1 atm (101325 Pa) i temperaturu zraka od 10 °C iznosi:

$$\delta = 2,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5)$$

Ako se gustoća pare  $R_D$  koristi kao mjera za koncentraciju vodene pare, uz pretpostavku valjanosti Daltonovog zakona [44], izraz (4) za zrak poprima oblik:

$$\vec{d} = -\frac{\delta}{R_D \cdot T} \cdot \text{grad } p_D \quad (6)$$

gdje je  $R_D$  plinska konstanta za vodenu paru,  $T$  je apsolutna temperatura, a  $p_D$  je parcijalna gustoća vodene pare (parcijalni tlak vodene pare).

Za temperaturu od 10 °C (283, 15K), plinsku konstantu  $R_D = 4615 \text{ J/kgK}$  koeficijent proporcionalnosti  $\delta/(R_D \cdot T)$  iznosi [45]:

$$\frac{\delta}{R_D \cdot T} = 1,806 \cdot 10^{-10} \text{ s} = 6,502 \cdot 10^{-7} \text{ h} \quad (7)$$

Za slučaj difuzije vodene pare kroz homogeni sloj zraka debljine  $d$  izraz (4) se može zapisati kao:

$$\vec{d} = -\frac{6,502 \cdot 10^{-7}}{d} \Delta p_D \text{ kgm}^2\text{h}^{-1} \quad (8)$$

Nadalje, uz analogiju provođenja topline i povećanjem toplinskog otpora povećanjem debljine, tada jednadžbu (8) možemo zapisati na način da se difuzijski otpor povećava s povećanjem debljine sloja (pri tlaku od 101325 Pa i temperaturi od 283,15 K) [45]:

$$\frac{d}{6,502 \cdot 10^{-7}} = 1,538 \cdot 10^6 \cdot d \text{ mh}^{-1} \quad (9)$$

to jest, u programskom paketu AnTherm [43] i u normi ÖNORM B 8110-2 je proračunski otpor difuziji vodene pare  $s$  uzet kao:

$$s = 1,5 \cdot 10^6 \cdot d \text{ mh}^{-1} \quad (10)$$

U građevnim materijalima difuzija vodene pare definirana je bezdimenzijskim faktorom otpora difuziji vodene pare ( $\mu$ -vrijednost). Faktor  $\mu$  pokazuje koliko je puta veći otpor difuziji vodene pare homogenog sloja građevnog materijala u usporedbi sa slojem zraka jednake debljine. Tako je jednadžbu (5) u slučaju građevnih materijala bolje prikazati kao:

$$\vec{d} = -\frac{10^{-6}}{1,5 \cdot \mu \cdot d} \cdot \Delta p_D \text{ kgm}^2\text{h}^{-1} \quad (11)$$

Model provođenja topline i difuzije vodene pare u ovom istraživanju uzeti su kao analogni, a jedina razlika je zamjena toplinske vodljivosti  $\lambda$  s  $10^{-6}/(1,5 \cdot \mu \cdot d)$  te zamjene razlika temperature  $\Delta T$  s razlikom parcijalnih tlakova vodene pare  $\Delta p_D$ . U slučaju difuzije vodene pare, u modelu je zanemaren otpor prolasku vodene pare iz okoliša na površinu elementa.

U normi HRN EN ISO 13788 [40] definiran je koeficijent vodljivosti difuzije vodene pare jednak  $2 \cdot 10^{-10} \text{ kg/(Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s)}$ . Pretvorbom tog koeficijenta u mjerne jedinice korištene u AnThermu, dobiva

se koeficijent 1,3888 pa je koeficijent 1,5 inače korišten u AnThermu zamijenjen koeficijentom 1,3888 [45].

## 4. Veličine potrebne za prikaz rezultata

### 4.1. Minimalna površinska temperatura $\Theta_{si, \min}$

Minimalna površinska temperatura na unutarnjoj površini  $\Theta_{si, \min}$  (°C) predstavlja mjesto s najvećim rizikom od kondenzacije vodene pare te nastanka gljivica i plijesni.

### 4.2. Faktor temperature $f_{Rsi}$

Faktor temperature na unutarnjoj površini  $f_{Rsi}$  bezdimenzijski je faktor koji pokazuje rizik od površinske kondenzacije. Faktor  $f_{Rsi}$  računa se na sljedeći način [44]:

$$f_{Rsi, \min} = \frac{\Theta_{si, \min} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} \quad (12)$$

Vrijednosti faktora  $f_{Rsi}$  kreću se između 0 i 1:

$f_{Rsi} \approx 0$ : površinska temperatura na unutarnjoj površini je blizu temperaturi vanjskog zraka te je rizik od površinske kondenzacije velik.

$f_{Rsi} \approx 1$ : površinska temperatura na unutarnjoj površini je blizu temperature unutarnjeg zraka i rizik od kondenzacije je mali.

Koeficijent  $f_{Rsi}$  se izračunava iz minimalne temperature na unutarnjoj površini  $\Theta_{si, \min}$ .

### 4.3. Koeficijent toplinske veze $L_{3D, therm}$

Ukupni toplinski tok u vatima između dva odabrana okoliša za jediničnu razliku temperature dobiven 3D numeričkim proračunom naziva se koeficijent toplinske veze ( $L_{3D, therm}$ ) [37].

$$L_{3D, therm} = \frac{\Phi_T}{T_i - T_j} \text{ W / K} \quad (13)$$

gdje je  $\Phi_T$  ukupni toplinski tok između okoliša "i" i "j", a  $T_i$  i  $T_j$  temperature okoliša "i" i "j".

### 4.4. Koeficijent difuzijske veze $L_{3D, diff}$

Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.2, proračun difuzije vodene pare i provođenja topline dva su ekvivalentna proračuna u smislu numeričkog proračuna. Razlikuju se samo u koeficijentu proporcionalnosti koji je u slučaju provođenja topline jednak  $\lambda$ , izraz (3), a u slučaju difuzije vodene pare jednak je  $10^{-6}/(1,5 \cdot \mu \cdot d)$ , izraz (11). Budući da u oba slučaja riječ o linearnom sustavu za koji vrijedi princip superpozicije, postupak proračuna koeficijenta difuzijske veze ekvivalentan je proračunu koeficijenta toplinske veze danom u normi HRN EN ISO 10211 [39].

Koeficijent difuzijske veze ( $L_{3D, diff}$ ) jednak je ukupnom toku vodene pare u miligramima po satu između dva odabrana okoliša za jediničnu razliku u tlaku zraka od 1 Pa dobivenom 3D numeričkim proračunom.

$$L_{3D, diff} = \frac{\Phi_D}{p_i - p_j} \quad \text{mg}/(\text{Pa} \cdot \text{h}) \quad (14)$$

gdje je  $\Phi_D$  ukupni tok vodene pare između okoliša "i" i "j", a  $p_i$  i  $p_j$  parcijalni tlakovi zraka pojedinih okoliša.

## 5. Numerički proračun

Numerički proračun proveden je u računalnom programu AnTherm [41] specijaliziranom za proračun toplinskih mostova / prolaska topline i difuzije vodene pare.

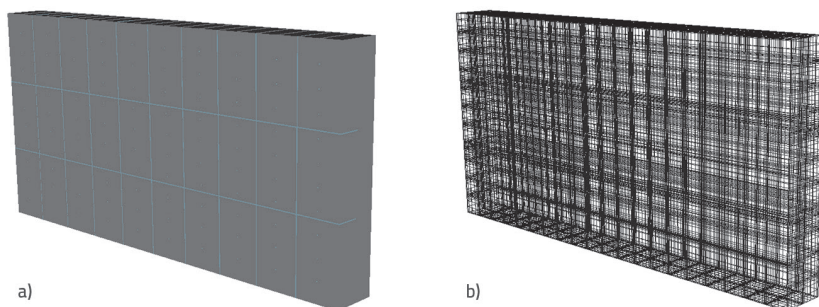
Numerički proračun u AnThermu je zasnovan na metodi kontrolnih volumena (MKV), tj. mreža kontrolnih volumena je takva da mora biti prizmatična. Površine pojedinih kontrolnih volumena se moraju dodirivati u potpunosti te se za njih prema drugom Kirchhoffovom zakonu za difuziju računaju tokovi topline i vodene pare iz kojih se određuju nepoznate veličine:

- temperature
- parcijalni tlakovi vodene pare.

Prema normi HRN EN ISO 10211 [39], mreža kontrolnih volumena se određuje na način da se u dva uzastopna numerička proračuna s dvije različite mreže zadovolji uvjet:

$$L_{3D}^{i+1} - L_{3D}^i < 1 \% \quad (15)$$

gdje su "i+1" i "i" dva uzastopna numerička proračuna.



Slika 3. Primjer mreže kontrolnih volumena: a) Geometrijski model; b) Mreža kontrolnih volumena

Tablica 5. Rubni uvjeti

| Rubni uvjet | Plošni koeficijent prolaska topline h [W/(m <sup>2</sup> K)] | Toplinski otpor R [(m <sup>2</sup> K)/W] | Temperatura T [°C] | Relativna vlažnost RH [%] |
|-------------|--|--|--------------------|---------------------------|
| Vani        | 25,0   | 0,04                                     | -10,0              | 80,0                      |
| Unutra      | 7,69   | 0,13                                     | 20,0               | 53,0                      |

Veličina mreže kontrolnih volumena zadana je u AnThermu u rasponu između 2 i 50 mm s rastom koraka od 2 mm između dva proglašivanja mreže. Slika 3. prikazuje primjer mreže kontrolnih volumena.

U ovom istraživanju veličina uzorka EPS-a jednaka je za sve 24 kombinacije i to 1500 × 500 mm.

## 5.1. Materijalne karakteristike

S obzirom na to da je pregledom literature utvrđeno kako koeficijent difuzije vodene pare za EPS ovisi o specifičnom proizvodu svakog proizvođača (tablica 2.), u ovom su istraživanju materijalne karakteristike uzete iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (TPRUETZZ) [5] te izračunane prema normama HRN EN ISO 10077-2 i HRN EN ISO 6946 (tablica 4.).

Tablica 4. Materijalne karakteristike

| Materijal | $\lambda$ [W/(m K)] | $\mu$ [--] | Izvor  |
|-----------|---------------------|------------|--|
| EPS       | 0,032               | 40,0       | TPRUETZZ [5]                                     |
| Zrak      | 0,250*              | 1,0        | HRN EN ISO 10077-2 [42]/<br>HRN EN ISO 6946 [41] |

Napomena (\*): Toplinska vodljivost zraka se mijenja s dimenzijama zračnog sloja (šupljine) te njegove izloženosti vanjskom zraku

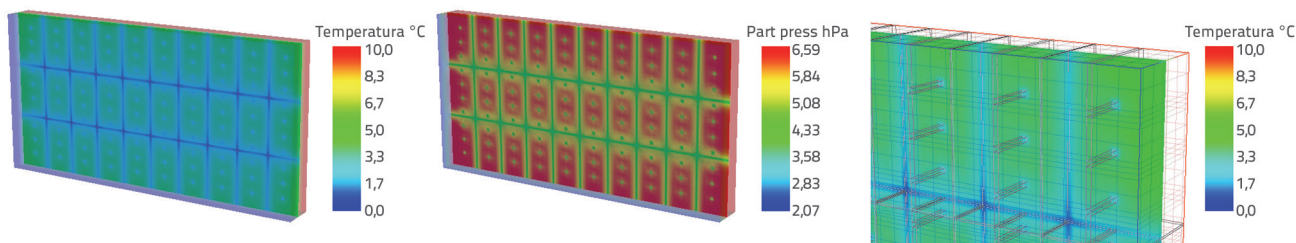
## 5.2. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti određeni su prema normama HRN EN ISO 10211 [39] i HRN EN ISO 6946 [41] (tablica 5.).

## 6. Rezultati proračuna

Slika 4. prikazuje distribuciju temperature i parcijalnog tlaka vodene pare za kombinaciju DU10\_RS10\_DP5\_PP2 iz kojih se izračunavaju iznosi minimalnih temperatura na unutarnjoj površini te relativna vlažnost po presjeku elementa. Za sve ostale kombinacije, rezultati numeričkih proračuna su analogni te nisu ovdje prikazivani zbog nedostatka prostora. Vidljivo je da postoji povećan toplinski tok kroz perforacije i proreze, što rezultira nižom temperaturom u polju temperatura na mjestima perforacija i proreza (slika 4.a). Analogno, vidljiv je smanjen parcijalni tlak vodene pare na mjestima perforacija i proreza (slika 4.b), što upućuje na to da postoji povećan difuzijski tok vodene pare na tim mjestima. Slika 4.c daje uvećani prikaz





Slika 4. Rezultati proračuna: a) temperatura; b) parcijalni tlak vodene pare; c) temperatura u okolini perforacija (uvećani prikaz)

distribucije temperature na dubini od 50 mm preklopljeno preko mreže kontrolnih volumena.

Rezultati proračuna su minimalne temperature na unutarnjoj površini  $\Theta_{si,min}$ , temperaturni faktori na unutarnjoj površini  $f_{Rsi}$  te koeficijenti toplinske i difuzne veze  $L_{3D}$  (tablice 6. i 7.).

Nadalje, pokazano je i povećanje toplinskih gubitaka i toka difuzije vodene pare (tablica 6.) u odnosu na referentne slučajeve za EPS bez proreza (šliceva) i perforacija (tablica 7.):

$$\Delta L_{3D}^1 = \frac{(L_{3D,therm} - L_{3D,therm,ref})|_{d=10,20,30}}{L_{3D,therm,ref}} \quad (16)$$

$$\Delta L_{3D}^2 = \frac{(L_{3D,diff} - L_{3D,diff,ref})|_{d=10,20,30}}{L_{3D,diff,ref}} \quad (17)$$

Tablica 6. Rezultati numeričkog proračuna

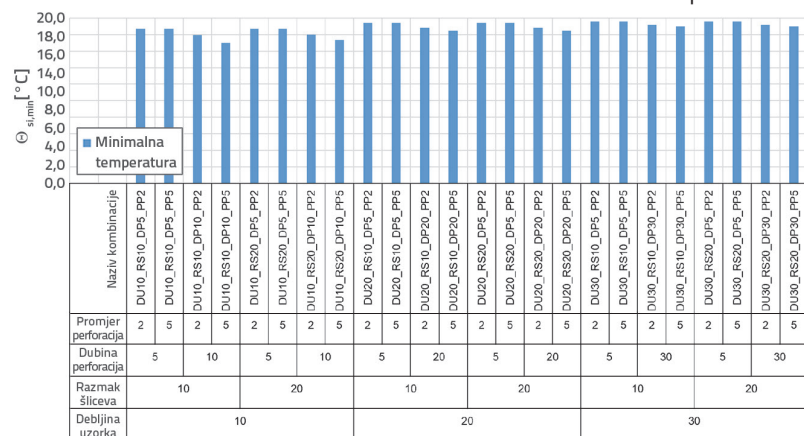
| Rb. | Oznaka kombinacije | $\Theta_{si,min}$<br>[°C] | $f_{Rsi}$<br>[-] | $L_{3D,therm}$<br>[W/K] | $L_{3D,diff}$<br>[mg/(Pa h)] | $\Delta L_{3D}^1$<br>[%] | $\Delta L_{3D}^2$<br>[%] |
|-----|--------------------|---------------------------|------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1   | DU10_RS10_DP5_PP2  | 18,74                     | 0,96             | 0,161985                | 0,111911                     | -6,59                    | 24,35                    |
| 2   | DU10_RS10_DP5_PP5  | 18,74                     | 0,96             | 0,163022                | 0,113485                     | -7,27                    | 26,09                    |
| 3   | DU10_RS10_DP10_PP2 | 17,94                     | 0,93             | 0,162410                | 0,114030                     | -6,87                    | 26,70                    |
| 4   | DU10_RS10_DP10_PP5 | 16,96                     | 0,90             | 0,165690                | 0,127966                     | -9,02                    | 42,18                    |
| 5   | DU10_RS20_DP5_PP2  | 18,75                     | 0,96             | 0,158351                | 0,104487                     | -4,19                    | 16,10                    |
| 6   | DU10_RS20_DP5_PP5  | 18,74                     | 0,96             | 0,159922                | 0,107966                     | -5,23                    | 19,96                    |
| 7   | DU10_RS20_DP10_PP2 | 17,98                     | 0,93             | 0,158766                | 0,106458                     | -4,47                    | 18,29                    |
| 8   | DU10_RS20_DP10_PP5 | 17,34                     | 0,91             | 0,162538                | 0,121422                     | -6,95                    | 34,91                    |
| 9   | DU20_RS10_DP5_PP2  | 19,39                     | 0,98             | 0,080386                | 0,049610                     | -3,14                    | 10,24                    |
| 10  | DU20_RS10_DP5_PP5  | 19,39                     | 0,98             | 0,080742                | 0,050168                     | -3,59                    | 11,48                    |
| 11  | DU20_RS10_DP20_PP2 | 18,82                     | 0,96             | 0,080711                | 0,050897                     | -3,55                    | 13,10                    |
| 12  | DU20_RS10_DP20_PP5 | 18,47                     | 0,95             | 0,082776                | 0,058405                     | -6,20                    | 29,79                    |
| 13  | DU20_RS20_DP5_PP2  | 19,40                     | 0,98             | 0,079514                | 0,048145                     | -2,02                    | 6,99                     |
| 14  | DU20_RS20_DP5_PP5  | 19,40                     | 0,98             | 0,079889                | 0,048820                     | -2,50                    | 8,49                     |
| 15  | DU20_RS20_DP20_PP2 | 18,83                     | 0,96             | 0,079835                | 0,049385                     | -2,43                    | 9,74                     |
| 16  | DU20_RS20_DP20_PP5 | 18,48                     | 0,95             | 0,081896                | 0,056833                     | -5,07                    | 26,30                    |
| 17  | DU30_RS10_DP5_PP2  | 19,60                     | 0,99             | 0,053504                | 0,031981                     | -2,09                    | 6,60                     |
| 18  | DU30_RS10_DP5_PP5  | 19,60                     | 0,99             | 0,053662                | 0,032212                     | -2,39                    | 7,37                     |
| 19  | DU30_RS10_DP30_PP2 | 19,22                     | 0,97             | 0,053746                | 0,032870                     | -2,55                    | 9,57                     |
| 20  | DU30_RS10_DP30_PP5 | 18,98                     | 0,97             | 0,055172                | 0,037850                     | -5,27                    | 26,17                    |
| 21  | DU30_RS20_DP5_PP2  | 19,60                     | 0,99             | 0,053117                | 0,031365                     | -1,35                    | 4,55                     |
| 22  | DU30_RS20_DP5_PP5  | 19,60                     | 0,99             | 0,053284                | 0,031650                     | -1,67                    | 5,50                     |
| 23  | DU30_RS20_DP30_PP2 | 19,22                     | 0,97             | 0,053356                | 0,032232                     | -1,80                    | 7,44                     |
| 24  | DU30_RS20_DP30_PP5 | 18,99                     | 0,97             | 0,054780                | 0,037183                     | -4,52                    | 23,94                    |

Legenda:

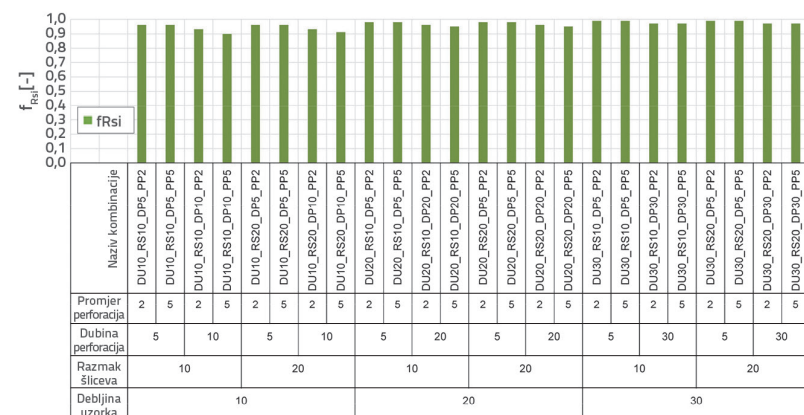
■ najbolji slučaj; ■ srednji slučaj; ■ najgori slučaj

Tablica 7. Rezultati proračuna za EPS bez proreza (šliceva) i perforacija

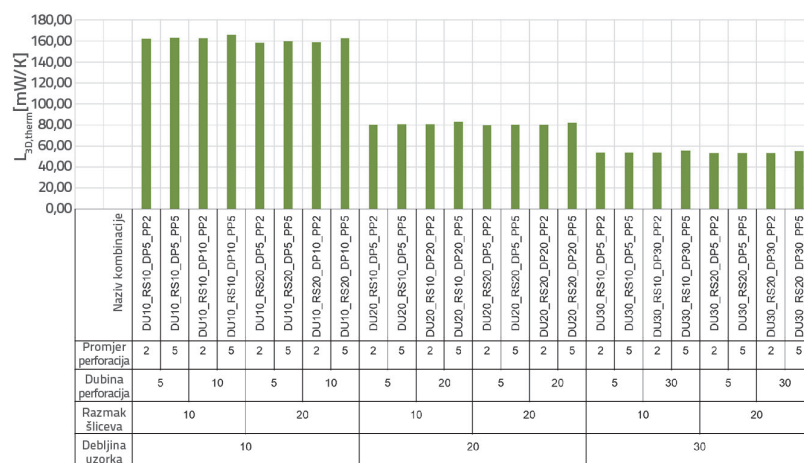
| Referentni modeli | $\Theta_{si,min}$ [°C] | $f_{Rsi}$ [–] | $L_{3D,therm,ref}$ [W/K] | $L_{3D,diff,ref}$ [mg/(Pa h)] |
|-------------------|------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| DU10              | 18,86                  | 0,96          | 0,151976                 | 0,090000                      |
| DU20              | 19,42                  | 0,98          | 0,077942                 | 0,045000                      |
| DU30              | 19,61                  | 0,99          | 0,052411                 | 0,030000                      |



Slika 5. Minimalne temperature na unutarnjoj površini



Slika 6. Temperaturni faktori na unutarnjoj površini



Slika 7. Koeficijenti toplinske veze

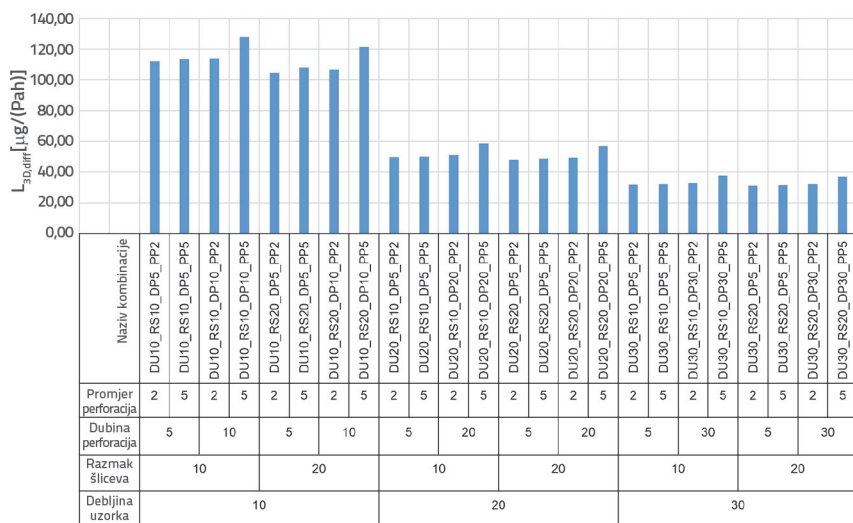
Slike 5. do 10. daju grafički prikaz rezultata proračuna za sve 24 kombinacije. Rezultati su grupirani po debljini uzorka (10 do 30 cm), razmaku proreza (šliceva) (10 i 20 cm), dubini perforacija (5 cm te cijela dubina uzorka) te promjeru perforacija (2 i 5 mm).

Slike 5. i 6. prikazuju minimalne temperature na unutarnjoj površini i pripadne temperaturne faktore. Kao što je i očekivano, iz rezultata proračuna se vidi da unutarnje površinske temperature rastu s povećanjem debljine uzorka i

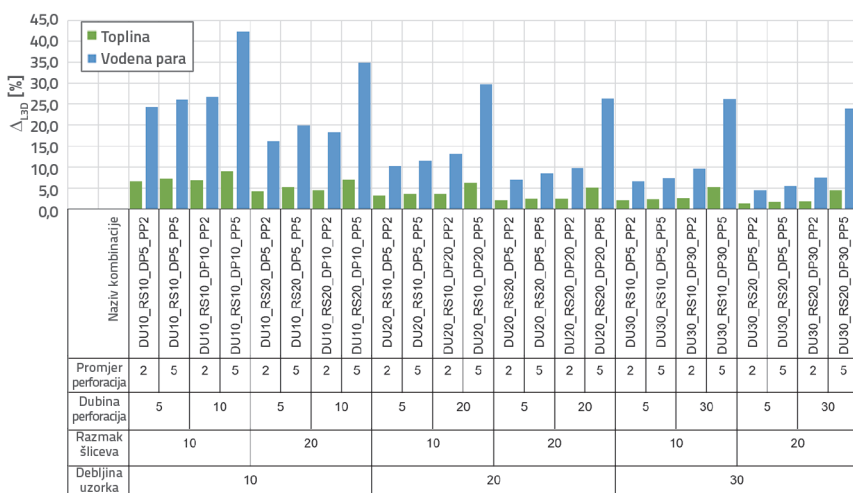
dubine perforacija (slika 5.). Dobivena je tako razlika površinske temperature od 1,78 °C (za perforacije dubine 5 i 10 cm promjera 5 mm kod uzorka debljine 10 cm s razmakom šliceva 10 cm), a 0,62 °C (za perforacije dubine 5 i 30 cm promjera 5 mm kod uzorka debljine 30 cm s razmakom šliceva 10 cm). S druge strane, vidljivo je da za manju dubinu perforacija (5 cm) njihov promjer neznatno utječe na unutarnju površinsku temperaturu, dok je za perforacije koje prolaze kroz cijeli uzorak (10, 20 i 30 cm) vidljiv njegov značajniji utjecaj (0,98 °C za debljinu uzorka od 10 cm) koji se pak smanjuje za veće debljine uzorka (0,24 °C za debljinu uzorka od 30 cm) (slika 5.). S obzirom na izraz (12), posljedično se na analogni način ponaša i faktor temperature  $f_{Rsi}$  (slika 6.). Budući da su faktori temperature za sve kombinacije veći od 0,90, rizik od površinske kondenzacije vodene pare nije kompromitiran zbog izvođenja perforacija.

Kako koeficijent toplinske veze ( $L_{3D,therm}$ ) reflektira zapravo ukupni toplinski tok kroz uzorak, rezultati proračuna pokazuju zapravo očekivane tendencije (slika 7.): smanjenje  $L_{3D,therm}$  za veću debljinu uzorka te umanjenu promjenu ako se uspoređuje povećanje debljine s 20 cm na 30 cm u odnosu na povećanje debljine uzorka s 10 cm na 20 cm. Koeficijent difuzne veze pak pokazuje ovisnost o debljini uzorka (što je očekivano), o razmaku proreza (značajniji utjecaj kod manjih debljina uzorka) te o promjeru perforacija, gdje rezultati pokazuju pomalo iznenađujuće ponašanje da perforacije promjera 2 mm koje prolaze kroz cijeli uzorak imaju minimalan utjecaj na difuzijski tok vodene pare za razliku od perforacija promjera 5 mm (slika 8.).

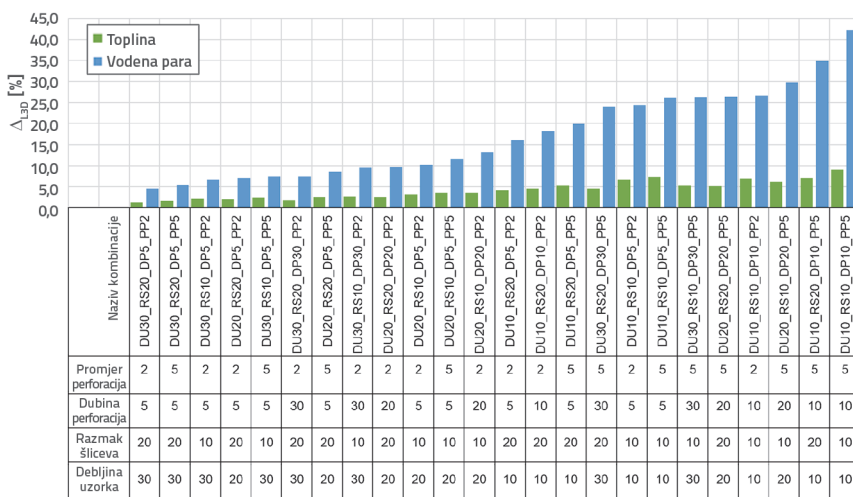
U pogledu povećanja toplinskih gubitaka nije došlo do njihovog značajnog povećanja ako se promatra relativna promjena u odnosu na referentnu vrijednost toplinske vodljivosti EPS-a koja je u ovom radu uzeta s 0,032 W/(m K) (slike 9. i 10.). Naročito to vrijedi za veće



Slika 8. Koeficijenti difuzne veze



Slika 9. Usporedba povećanja toplinskoga toka i toka vodene pare u odnosu na referentne slučajeve



Slika 10. Usporedba povećanja toplinskog toka i toka vodene pare u odnosu na referentne slučajeve (sortirano od najmanjega do najvećega)

debljine uzoraka. Najmanje i najveće povećanje toplinskih gubitaka iznosi:

- 1,35 % za kombinaciju DU30\_RS20\_DP5\_PP2
- 9,02 % za kombinaciju DU10\_RS10\_DP10\_PP5.

S obzirom na rezultate prolaska topline, navedeni minimumi i maksimumi difuzijskog toka vodene pare dogodili su se u očekivanim kombinacijama. Povećanje toka vodene pare se događa u istim kombinacijama i iznosi:

- 4,55 % za kombinaciju DU30\_RS20\_DP5\_PP2
- 42,18 % za kombinaciju DU10\_RS10\_DP10\_PP5.

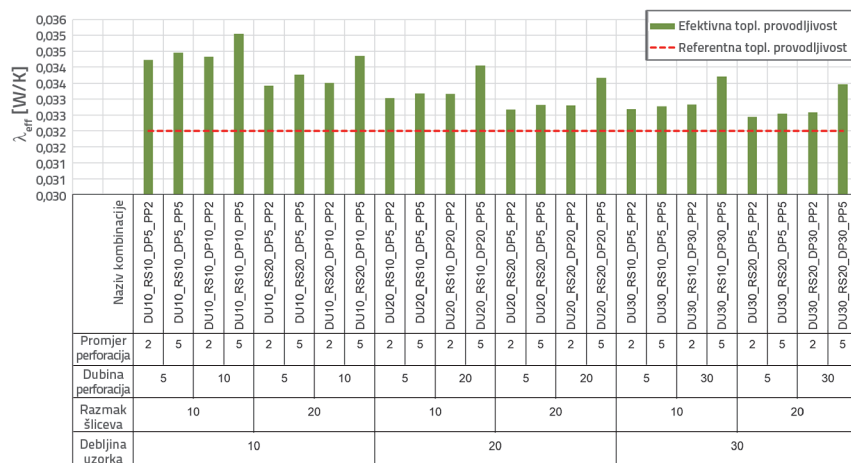
### 7. Efektivna svojstva materijala

Efektivna svojstva materijala izračunavaju se na način da se za izračunani toplinski tok ( $L_{2D, therm.}$ ) i efektivni tok vodene pare ( $L_{2D, diff.}$ ) izračuna efektivna toplinska vodljivost ( $\lambda_{eff}$ ) i efektivni otpor difuziji vodene pare ( $\mu_{eff}$ ) koji za 1D prolazak topline i difuziju vodene pare daju jednake toplinske tokove i tokove difuziji vodene pare kao što je to dobiveno 3D numeričkim proračunom (tablica 6.).

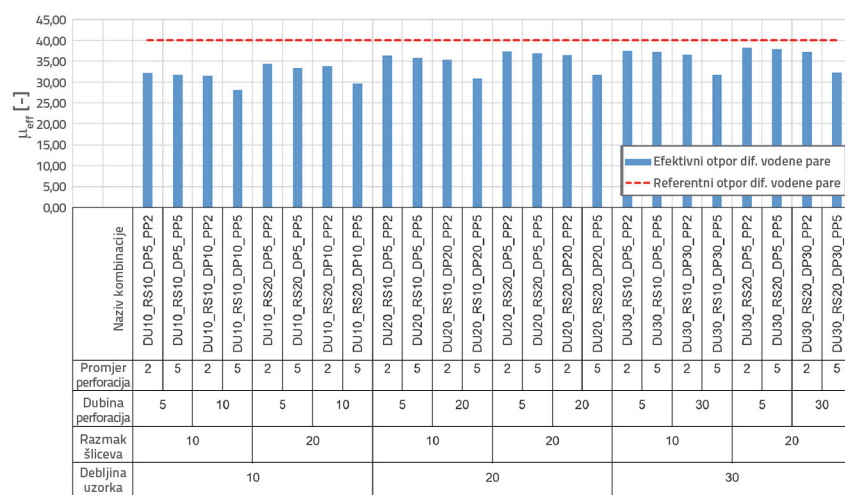
$$\lambda_{eff} = \frac{d}{\frac{1}{2 \cdot L_{2D, therm.}} + \frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{h_{se}}} \tag{18}$$

$$\mu_{eff} = \frac{\delta_o}{2 \cdot L_{2D, diff.} \cdot d}$$

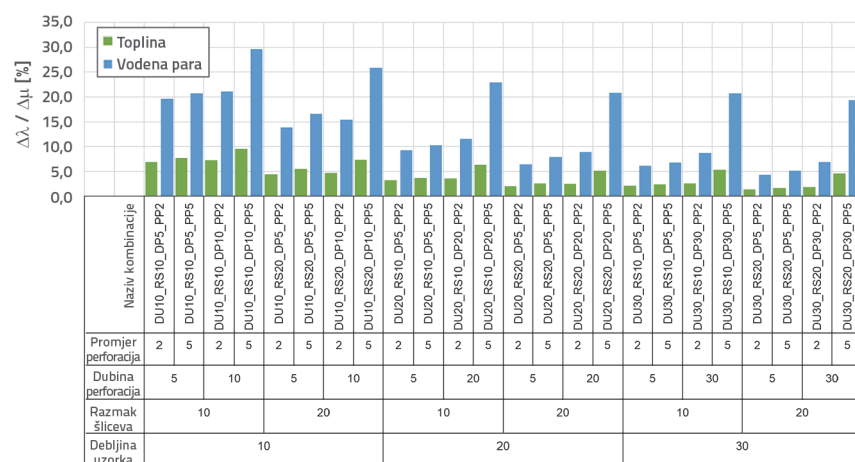
gdje su  $h_{si}$  i  $h_{se}$  plošni koeficijenti prolaska topline preuzeti iz norme HRN EN ISO 6946 [41] (tablica 5.), a  $d$  je debljina uzorka. Referentna toplinska vodljivost iznosi  $\lambda = 0,032$  W/(m K), a referentni otpor difuziji vodene pare iznosi  $\mu = 40$ . Slika 11. prikazuje povećanje toplinske vodljivosti u odnosu na referentnu vrijednost. Slika 12. prikazuje smanjenje otpora difuziji vodene pare u odnosu na referentnu vrijednost, a slika 13. prikazuje relativno povećanje toplinske vodljivosti i smanjenje otpora difuziji vodene pare u odnosu na referentne vrijednosti. Tablica



Slika 11. Efektivna toplinska vodljivost



Slika 12. Efektivni otpor difuziji vodene pare



Slika 13. Povećanje toplinske vodljivosti i smanjenje otpora difuziji vodene pare u odnosu na referentne vrijednosti

8. prikazuje smanjenje otpora difuzije vodene pare s pripadnim povećanjem toplinske vodljivosti za debljine uzorka 10, 20 i 30 cm.

Tablica 8. Efektivne karakteristike materijala za debljine uzorka od 10, 20 i 30 cm

| Debljina uzorka [cm] | $\mu$ [-] | $\lambda$ [W/(m K)] | $\Delta\mu$ [%] | $\Delta\lambda$ [%] |
|----------------------|-----------|---------------------|-----------------|---------------------|
| 10                   | 28,0      | 0,035               | -29,67          | +9,55               |
| 20                   | 31,0      | 0,034               | -22,95          | +6,38               |
| 30                   | 32,0      | 0,034               | -20,74          | +5,37               |

## 8. Zaključak

Cilj je ovog rada bio je istražiti utjecaj perforacija i proreza na promjenu higrotermalnih svojstava toplinske izolacijske ploče od EPS-a, i to najviše u pogledu promjene difuzije vodene pare. Kako bi se navedeno pokazalo, napravljena su 24 različita numerička modela u kojima su se varirali različiti parametri kao što su: debljina uzorka ploče (10, 20 i 30 cm), razmak proreza (šliceva) (10 i 20 cm), dubina perforacija (5 cm i cijela dubina ploče) te promjer perforacija (2 i 5 mm). Perforacijama su se pokušala poboljšati svojstva difuzije vodene pare uz minimalno povećanje toplinske vodljivosti. Numeričkim modelom se pokazalo da je moguće dobiti i do 42,18 % bolju difuzivnost vodene pare u odnosu na EPS ploču bez perforacija uz povećanje gubitaka topline od 9,02 % za ploču debljine 10 cm, razmak proreza (šliceva) 10 cm, dubinu perforacija 10 cm te promjer perforacija 5 mm. Ako se razmatraju ostale debljine ploča, najveće se povećanje difuzivnosti vodene pare kod ploča debljine postiže za:

- 20 cm (DU20\_RS10\_DP20\_PP5): 29,79 % uz povećanje toplinske vodljivosti od 6,20 %.
- 30 cm (DU30\_RS10\_DP30\_PP5): 26,17 % uz povećanje toplinske vodljivosti od 5,27 %.



Primjenom rezultata numeričkog modela moguće je odrediti efektivne karakteristike materijala: efektivnu toplinsku vodljivost i efektivni otpor difuziji vodene pare. Maksimalno smanjenje otpora difuziji vodene pare, uz pripadno povećanje koeficijenta toplinske vodljivosti, za debljine 10, 20 i 30 cm iznosi kako je prikazano u tablici 8.

Rezultati vezani uz povećanje gubitka topline u skladu su s rezultatima istraživanja koja su proveli Molleti i van Reenan [46]. Oni su na primjeru ravnih krovova tijekom 70 eksperimenata zaključili da ovisno o debljini toplinske izolacije i širini te visini razmaka između ploča toplinske izolacije dolazi do povećanja toplinskog toka od 2 do 10 % kroz sustav ravnog krova.

Vidljivo je također iz rezultata ovog istraživanja da efektivni koeficijent difuzije vodene pare ( $\mu_{\text{eff}}$ ) ovisi o debljini uzorka, što je u suprotnosti od uobičajenog pristupa razmatranja ovog svojstva materijala gdje se smatra da on ne ovisi o debljini uzorka. Pri tome se  $\mu_{\text{eff}}$  povećava s debljinom uzorka, što znači da bi za deblje proizvode od EPS-a trebalo progustiti perforacije ili pak povećati promjer rupe, a time bi se s druge strane dodatno povećali gubici topline kroz materijal.

Iako se radi o malom povećanju koeficijenta toplinske vodljivosti: s 0,032 W/(m K) na 0,035 W/(m K), autori smatraju važnim za naglasiti da će to u praktičnom smislu značiti i povećanje debljine toplinske izolacije za nekoliko centimetara. S obzirom na napore proizvođača da raznim dodacima (grafit) i agensima za ekspanziranje polistirena smanjuju toplinsku vodljivost, potreba za smanjenje koeficijenta difuzije vodene pare čini se kao korak unatrag.

Numerički model korišten u ovom istraživanju čini se vrlo korisnim za razumijevanje posljedice stvaranja proreza (šliceva)

i perforacija na provođenje topline i difuzije vodene pare kroz ploče EPS-a te pronalaska optimalnog razmaka perforacija i proreza u smislu difuzije vodene pare i toplinske vodljivosti. Potrebna su daljnja istraživanja i usavršavanje samog modela, ali informacije dobivene na ovaj način omogućuju velike uštede u razvoju proizvoda s obzirom na to da izrada fizičkih uzoraka zahtijeva razvoj skupih proizvodnih alata te trošak samog ispitivanja svake varijante proizvoda. Ograničenja i prostor za poboljšanje numeričkog modela korištenog u ovom istraživanju očituju se u primjenom nestacionarnih metoda proračuna difuzije vodene pare umjesto stacionarnih, kombiniranom modeliranju prijenosa topline i vodene pare umjesto neovisnog proračuna koji je izrađen u ovom radu. Dodatni prostor za poboljšanje moguć je na način da se uzme u obzir ugrađena vlaga materijala; mogućnost pohrane i distribucije vlage unutar materijala, jer vlažnost utječe i na prijenos topline, ali i na prijenos vlage. U daljnjim fazama istraživanja provest će se potvrđivanje rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem pomoću mjerenja brzine prijenosa vodene pare i propusnosti vodene pare koje su specifične za ispitanu debljinu ispitnog uzorka te ispitivanje toplinske vodljivosti primjenom metode zaštićene vruće ploče.

## Zahvala

Rezultati prikazani u ovom radu dio su istraživanja provedenog kroz znanstvenoistraživački projekt "Razvoj i istraživanje PLASTOPOR compact EPS (F) ploče" financiranog iz Europskog fonda za regionalni razvoj (KK.01.2.1.02.0245)

## LITERATURA

- [1] Lakatos, Á., Kalmár, F.: Analysis of Water Sorption and Thermal Conductivity of Expanded Polystyrene Insulation Materials, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, 34 (2013), pp. 407–416, doi:10.1177/0143624412462043.
- [2] Milovanović, B., Bagarić, M.: How to Achieve Nearly Zero-Energy Buildings Standard, *GRADJEVINAR*, 72 (2020) 8, pp. 703–720, <https://doi.org/10.14256/JCE.2923.2020>.
- [3] Bašić, S., Vezilić Strmo, N., Marjanović, S.: Building Envelopes, *GRADJEVINAR*, 71 (2019) 8, pp. 673–680, <https://doi.org/10.14256/JCE.1565.2016>.
- [4] Willems, W.M., Schild, K., Stricker, D.: *Formeln Und Tabellen Bauphysik*, 5. Auflage., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019., ISBN 978-3-658-23945-9.
- [5] MPGI: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Zagreb, NN:128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 2020.
- [6] Buczkowska, K., Pacyniak, T.: The Aging Time Effects of the Pre-Expanded Polystyrene on the Patterns Mechanical Properties, *Arch. Foundry Eng.*, 15 (2015), pp.131–137, doi:10.1515/afe-2015-0024.
- [7] Ramli Sulong, N.H., Mustapa, S.A.S., Abdul Rashid, M.K.: Application of Expanded Polystyrene (EPS) in Buildings and Constructions: A Review, *J. Appl. Polym. Sci.*, 136 (2019), pp. 1–11, doi:10.1002/app.47529.
- [8] Simpson, A., Rattigan, I., Kalavsky, E., Parr, G.: Thermal Conductivity and Conditioning of Grey Expanded Polystyrene Foams, *Cellular Polymers*, 39 (2020), pp. 238–262, doi:10.1177/0262489320934263.
- [9] Schellenberg, J., Wallis, M.: Dependence of Thermal Properties of Expandable Polystyrene Particle Foam on Cell Size and Density, *J. Cell. Plast.*, 46 (2010), pp. 209–222, doi:10.1177/0021955X09350803.
- [10] Meftah, R., Van Stappen, J.; Berger, S., Jacqus, G., Lалуet, J.-Y., Guering, P.-H., Van Hoorebeke, L.; Cnudde, V.: X-Ray Computed Tomography for Characterization of Expanded Polystyrene (EPS) Foam, *Materials*, (2019) 12, pp. 1–13, doi:10.3390/ma12121944.
- [11] Scheirs, J., Priddy, D.B.: *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*, John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [12] National Research Council et al.: *Review of the Styrene Assessment in the National Toxicology Program 12th Report on Carcinogens*, Workshop Summary, Washington (DC), 2014.



- [13] Bjegović, D., Banjad Pečur, I., Milovanović, B., Jelčić Rukavina, M., Alagušić, M.: Usporedba ponašanja različitih ETICS sustava u uvjetima požara ispitivanjem u stvarnoj veličini, *Građevinar*, 68 (2016) 5, pp. 357–369, doi:10.14256/JCE.1347.2015.
- [14] Eder, C.: GEG-Baupraxis, Bauteilen, 2014., pp. 9
- [15] Tatara, J., Ricketts, L.: Impact of Heating and Cooling of Expanded Polystyrene and Stone Wool Insulations on Conventional Roof Performance, Proceedings of the 15th Canadian Conference on Building Science and Technology; British Columbia Building Envelope Council, Vancouver, Canada, 2017., pp. 1–16
- [16] Blazejczyk, A., Jastrzebski, C., Wierzbicki, M.: Change in Conductive–Radiative Heat Transfer Mechanism Forced by Graphite Microfiller in Expanded Polystyrene Thermal Insulation—Experimental and Simulated Investigations, *Materials*, 13 (2020), pp. 2626, doi:10.3390/ma13112626.
- [17] Ademović, Z., Suljagić, J., Zulić, J.: Influence of Physical Properties on Thermal Conductivity of Polystyrene Insulation Materials, *Contemp. Mater.*, 8 (2017), pp. 42–47, doi:10.7251/COMEN1701042A.
- [18] Rockwool North America: Dimensional Stability on the Roof, <https://www.rockwool.com/north-america/advice-and-inspiration/learning/advice/dimensional-stability-on-the-roof/>, 17.1.2021.
- [19] Palmer, J.: Annex 19: Low Slope Roof Systems, Birmingham, 2003.
- [20] Hens, H.: Performance Based Building - Design 1, 2nd Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2012., ISBN 9783433601952.
- [21] Vimark: EPS Sheets with Graphite for Thermal Insulation Systems, [https://www.vimark.com/wp-content/uploads/2015/09/COVER\\_GRAFITE\\_80\\_0116\\_ENG.pdf](https://www.vimark.com/wp-content/uploads/2015/09/COVER_GRAFITE_80_0116_ENG.pdf), 2016.
- [22] BASF: Neopor Professional Brochure, [https://neopor.de/portal/load/1225157/Neopor\\_professional%20brochure.pdf](https://neopor.de/portal/load/1225157/Neopor_professional%20brochure.pdf), 2014.
- [23] Endres, E., Kleser, J.: Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum Herstellung, [https://daemmtbesser.de/fileadmin/user\\_upload/IVPU\\_Fachbroschuere\\_200903\\_Waermedaemstoffe\\_aus\\_PU-Hartschaum.pdf](https://daemmtbesser.de/fileadmin/user_upload/IVPU_Fachbroschuere_200903_Waermedaemstoffe_aus_PU-Hartschaum.pdf), 2008.
- [24] Hrvatski Zavod za norme: HRN EN 12086, Toplinsko-izolacijski proizvodi za graditeljstvo – određivanje paropropusnosti, 2013.
- [25] Mánik, M., Medved, I.: Transmission of Water Vapor through Expanded Polystyrene, Proceedings of the Central European Symposium on Thermophysics 2020 (CEST 2020), AIP Publishing, Olomouc, Czech Republic, 2020., pp. 020020-1-020020–020026
- [26] Koch, M.: Thermal Insulation Panels Made of EPS or PUR Have an Array of Perforations to Increase Their Water Vapor Permeability, <https://patents.google.com/patent/DE10007774A1/en>, 2001.
- [27] Weier, A., Schnelle, R., Kohler, E.: Patent Offenlegungsschrift, 2010, pp. 8
- [28] Lassen, C., Maag, J., Hoibye, L., Verterlykke, M., Lundegaard, T.: Alternatives to the use of flame retarded EPS in buildings, Climate and Pollution Agency, Oslo, 2011.
- [29] WDV: Bauexpert, [https://www.bauexpert.it/fileadmin/user\\_upload/Webbilder\\_Kunde/01\\_bauexpert/03\\_downloads/katalog/de\\_bauexpert\\_wdvs\\_2014.pdf](https://www.bauexpert.it/fileadmin/user_upload/Webbilder_Kunde/01_bauexpert/03_downloads/katalog/de_bauexpert_wdvs_2014.pdf), 2014., pp. 80
- [30] EPS-Industries: Sympor Baustoffhandel, <https://www.eps-industries.at/images/produkte/Baustoffkatalog.pdf>, 2019, pp. 33
- [31] Rofix: EPS-F-031-Relax, Tehnički list, 2021.
- [32] Brucha: Wärmedämmplatte EPS-F Klima, katalog, 2016.
- [33] Baumit: OpenTherm 032 G, katalog, 2020.
- [34] Baumit: Fasadna Ploča Openair, katalog, 2017.
- [35] Landolfi, R., Nicolella, M.: Durability Assessment of ETICS: Comparative Evaluation of Different Insulating Materials, Sustainability, 14 (2022), pp. 1–25, doi:10.3390/su14020980.
- [36] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: RP-1018 Thermal & Moisture Transport, Database For Common BLDG & Insulating Materials, 2002, pp. 229
- [37] Ducoulombier, L.; Lafhaj, Z.: Comparative Study of Hygrothermal Properties of Five Thermal Insulation Materials, *Case Stud. Therm. Eng.*, 10 (2017), pp. 628–640, doi:10.1016/j.csite.2017.11.005.
- [38] Künzel, H., Wieleba, R.: Specific Building-Physical Properties of ETICS on Mineral-Wool Basis, 2009.
- [39] Hrvatski Zavod za norme: HRN EN ISO 10211:2017- Toplinski mostovi u zgradarstvu: toplinski tokovi i površinske temperature - detaljni proračuni, ISO 10211:2017; EN ISO 10211:2017, 2017., pp. 60
- [40] Hrvatski Zavod za norme: HRN EN ISO 13788:2002 - Značajke građevnih dijelova i građevnih dijelova zgrada s obzirom na toplinu i vlagu; temperatura unutarnje površine kojom se izbjegava kritična vlažnost površine i unutarnja kondenzacija; metode proračuna, ISO 13788:2001; EN ISO 13788:2001, 2002., pp. 37
- [41] Hrvatski Zavod za norme: HRN EN ISO 6946:2017: Građevni dijelovi i građevni elementi; toplinski otpor i koeficijent prolaska topline; metode proračuna, ISO 6946:2017; EN ISO 6946:2017, 2017., pp. 45
- [42] Hrvatski Zavod za norme: HRN EN ISO 10077-2:2017: Toplinska svojstva prozora, vrata i zaslona - Proračun koeficijenta prolaska topline, 2. dio: Numerička metoda za okvire, ISO 10077-2:2017; EN ISO 10077-2:2017, 2017., pp. 75
- [43] Kornicki: Dienstleistungen in EDV und Informationstechnologie, AnTherm, Wien, 2020.
- [44] Hens, H.: Building Physics Heat, Air and Moisture Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises, 2nd Edition, Wilhelm Ernst & Sohn, 2012.; ISBN 9783433030271.
- [45] Kreč, K.: Notiz Zu Den von AnTherm Verwendeten Berechnungsgrundlagen Zur Beschreibung Mehrdimensional Ablaufender Wasserdampf-Diffusionsvorgänge, [http://hilfe.antherm.eu/Theory/Notiz\\_Diffusion.pdf](http://hilfe.antherm.eu/Theory/Notiz_Diffusion.pdf), 5.6.2021.
- [46] Molleti, S., van Reenen, D.: Development of Psi Factors for Thermal Bypass Due to Insulation Gaps in Low-Slope Roofing Assemblies, *Buildings*, 12 (2022), pp. 16, doi:10.3390/buildings12010068.