

# Usporedba ponašanja različitih ETICS sustava u uvjetima požara ispitivanjem u stvarnoj veličini

---

**Bjegović, Dubravka; Banjad Pečur, Ivana; Milovanović, Bojan; Jelčić Rukavina, Marija; Bagarić, Marina**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2016, 68, 357 - 369**

**Journal article, Published version**

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

<https://doi.org/10.14256/JCE.1347.2015>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:872334>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



Primljen / Received: 6.5.2015.  
 Ispravljen / Corrected: 25.7.2015.  
 Prihvaćen / Accepted: 27.4.2016.

Dostupno online / Available online: 10.6.2016.

## Usporedba ponašanja različitih ETICS sustava u uvjetima požara ispitivanjem u stvarnoj veličini

### Autori:



Prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**  
[dubravka@grad.hr](mailto:dubravka@grad.hr)



Prof. dr. sc. **Ivana Banjad Pečur**  
[banjadi@grad.hr](mailto:banjadi@grad.hr)



Dr. sc. **Bojan Milovanović**  
[bmilovanovic@grad.hr](mailto:bmilovanovic@grad.hr)



Dr. sc. **Marija Jelčić Rukavina**  
[jmarija@grad.hr](mailto:jmarija@grad.hr)



**Marina Bagarić**, dipl. ing. građ.  
[mbagarić@grad.hr](mailto:mbagarić@grad.hr)

Sveučilište u Zagrebu  
 Građevinski fakultet  
 Zavod za materijale

Izvorni znanstveni rad

**Dubravka Bjegović, Ivana Banjad Pečur, Bojan Milovanović, Marija Jelčić Rukavina, Marina Bagarić**

### Usporedba ponašanja različitih ETICS sustava u uvjetima požara ispitivanjem u stvarnoj veličini

U ovom radu prikazano je ispitivanje fasadnih sustava u stvarnoj veličini. Ispitivanje je provedeno s ciljem usporedbe ponašanja ETICS sustava s različitim toplinsko izolacijskim slojem (goriva izolacija, goriva izolacija s protupožarnom barijerom od negorivog materijala, negoriva izolacija) u uvjetima požara. Uzorci su izrađeni i ispitani u skladu s normom BS 8414-1:2002, a provedena su i dodatna mjerenja kako bi se dobili bitni podaci koji omogućuju bolje razumijevanje ponašanja ETICS sustava u požaru.

#### Ključne riječi:

ETICS, goriva izolacija, negoriva izolacija, protupožarna barijera, ponašanje u požaru

Original scientific paper

**Dubravka Bjegović, Ivana Banjad Pečur, Bojan Milovanović, Marija Jelčić Rukavina, Marina Bagarić**

### Comparative full-scale fire performance testing of ETICS systems

A full-scale test has been performed to determine fire performance of different ETICS systems (combustible insulation, combustible insulation with fire barrier, non-combustible insulation). Test specimens were constructed and tested according to BS 8414-1:2002, while additional measurements were also conducted to obtain valuable information for better understanding of fire performance of systems used.

#### Key words:

ETICS, combustible insulation, non-combustible insulation, fire barrier, fire spread, fire performance

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Dubravka Bjegović, Ivana Banjad Pečur, Bojan Milovanović, Marija Jelčić Rukavina, Marina Bagarić**

### Vergleich des Brandverhaltens von WDVS im Originalmaßstab

In dieser Arbeit werden Versuche an Fassadensystemen im Originalmaßstab dargestellt, die durchgeführt wurden, um das Brandverhalten von WDVS mit verschiedenen Wärmedämmungen (brennbare Dämmung, brennbare Dämmung mit Sturzschutz, nicht brennbare Dämmung) zu vergleichen. Die Versuchsproben wurden gemäß Norm BS-8414-1 erstellt und geprüft. Außerdem wurden zusätzliche Messungen durchgeführt, die aufgrund der wichtigen aufgenommenen Daten ein besseres Verständnis des Brandverhaltens von WDVS ermöglichen.

#### Schlüsselwörter:

WDVS, brennbare Dämmung, nicht brennbare Dämmung, Brandverhalten

### 1. Uvod

Europska unija (EU) definirala je energetska politiku kojom se podržava sveobuhvatna energetska učinkovitost te je uskladila tu politiku s regulativom o uštedi energije i s ostalim zakonskim instrumentima, a sve s ciljem ponovnog oživljavanja europske ekonomije [1]. Sveobuhvatna energetska učinkovitost podrazumijeva smanjenje potrošnje energije u zgradama, budući da u zemljama članicama EU upravo zgrade sudjeluju s 40 % u potrošnji energije i s 36 % u ukupnoj emisiji ugljičnog dioksida, CO<sub>2</sub> [2]. Energetska učinkovitost u zgradama prije svega se može poboljšati izvedbom toplinski izoliranih vanjskih ovojnica zgrada. Od nekoliko mogućih rješenja za toplinsko poboljšanje vanjskih ovojnica zgrada, danas se u Europi najviše koriste povezani sustavi za vanjsku toplinsku izolaciju poznati pod nazivom ETICS (eng. *External Thermal Insulation Composite Systems*), slika 1.

Toplinsko izolacijski materijali koji se koriste u ETICS sustavima mogu biti gorivi ili negorivi. Gorivi toplinsko izolacijski materijali ugrađeni u ovojnicu zgrade, kao što je primjerice ekspanzirani polistiren (EPS), mogu bitno povećati požarno opterećenje i rizik da će se požar proširiti po zgradi, i to zbog svojstava reakcije na požar takvih materijala. Očigledno je da zaštita od požara i energetska učinkovitost ne isključuju jedno drugo pa se stoga stroži zahtjevi glede energetske učinkovitosti zgrada moraju

primijeniti usporedno sa strožim zahtjevima glede ponašanja zgrada u uvjetima požara. Materijali koji se upotrebljavaju za toplinsku izolaciju, kad je riječ o reakciji na požar, dijele se u razrede kako je to prikazano u tablici 1.



1. Ljepilo
2. Toplinsko izolacijski materijal
3. Pričvrsnice
4. Mort za armaturni sloj
5. Armatura, uobičajeno alkalno otporna staklena mrežica
6. Završni sloj: završni sloj s predpremazom i/ili s dekorativnom žbukom

Pribor, npr. izrađeni kutni profil, dilatacijski profili, osnovni profili itd.

Slika 1. Komponente ETICS sustava [3, 4]

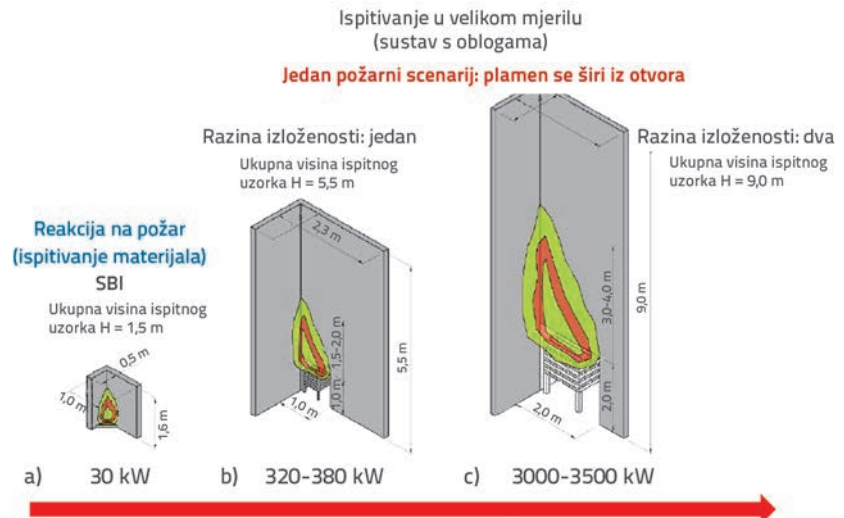
Treba naglasiti da se ponašanje fasadnih obloga zgrada u požaru, kao što su ETICS sustavi, ne može definirati samo na temelju ispitivanja reakcije na požar pojedinih materijala prema tablici 1. Naime, razredba se temelji na uvjetima konačne primjene proizvoda, dok se same metode ispitivanja uglavnom temelje na referentnom scenariju požara u kutovima

Tablica 1. Razredba građevnih proizvoda (izuzev podnih obloga) prema rezultatima ispitivanja reakcije na požar [5, 6]

Razred	Metoda ispitivanja	Dodatna razredba	Primjeri proizvoda
A1	HRN EN ISO 1182 <i>i</i>	-	Proizvodi izrađeni od prirodnog kamena, betona, opeke, keramike, stakla i brojni metalni proizvodi
	HRN EN ISO 1716		
A2	HRN EN ISO 1182 <i>ili</i>	Pojava dima <i>i</i> goruće kapljice / čestice	Proizvodi kao u razredu A1 ali s malim količinama organskog materijala
	HRN EN ISO 1716 <i>i</i>		
	HRN EN 13823 (SBI)		
B	HRN EN 13823 (SBI) <i>i</i>	Pojava dima <i>i</i> goruće kapljice / čestice	Gips-kartonske ploče s raznim (tankim) premazima Usporivači gorenja na bazi drva
	EN ISO 11925-2: <i>Izloženost = 30 s</i>		
C	HRN EN 13823 (SBI) <i>i</i>	Pojava dima <i>i</i> goruće kapljice / čestice	Fenolne pjene, gips-kartonske ploče s raznim premazima (tanje od onih iz razreda B)
	EN ISO 11925-2: <i>Izloženost = 30 s</i>		
D	HRN EN 13823 (SBI) <i>i</i>	Pojava dima <i>i</i> goruće kapljice / čestice	Drvo i drveni proizvodi debljine više od 10 mm i gustoće veće od 400 kg/m <sup>3</sup> (ovisno o krajnjoj namjeni proizvoda)
	EN ISO 11925-2: <i>Izloženost = 30 s</i>		
E	EN ISO 11925-2: <i>Izloženost = 15 s</i>	Goruće kapljice / čestice	Razne vrste vlaknastih ploča, izolacijskih proizvoda i proizvoda od plastike
F	Ponašanje nije definirano		Proizvodi čija svojstva u požaru nisu ispitana (nema zahtjeva glede reakcije na požar)

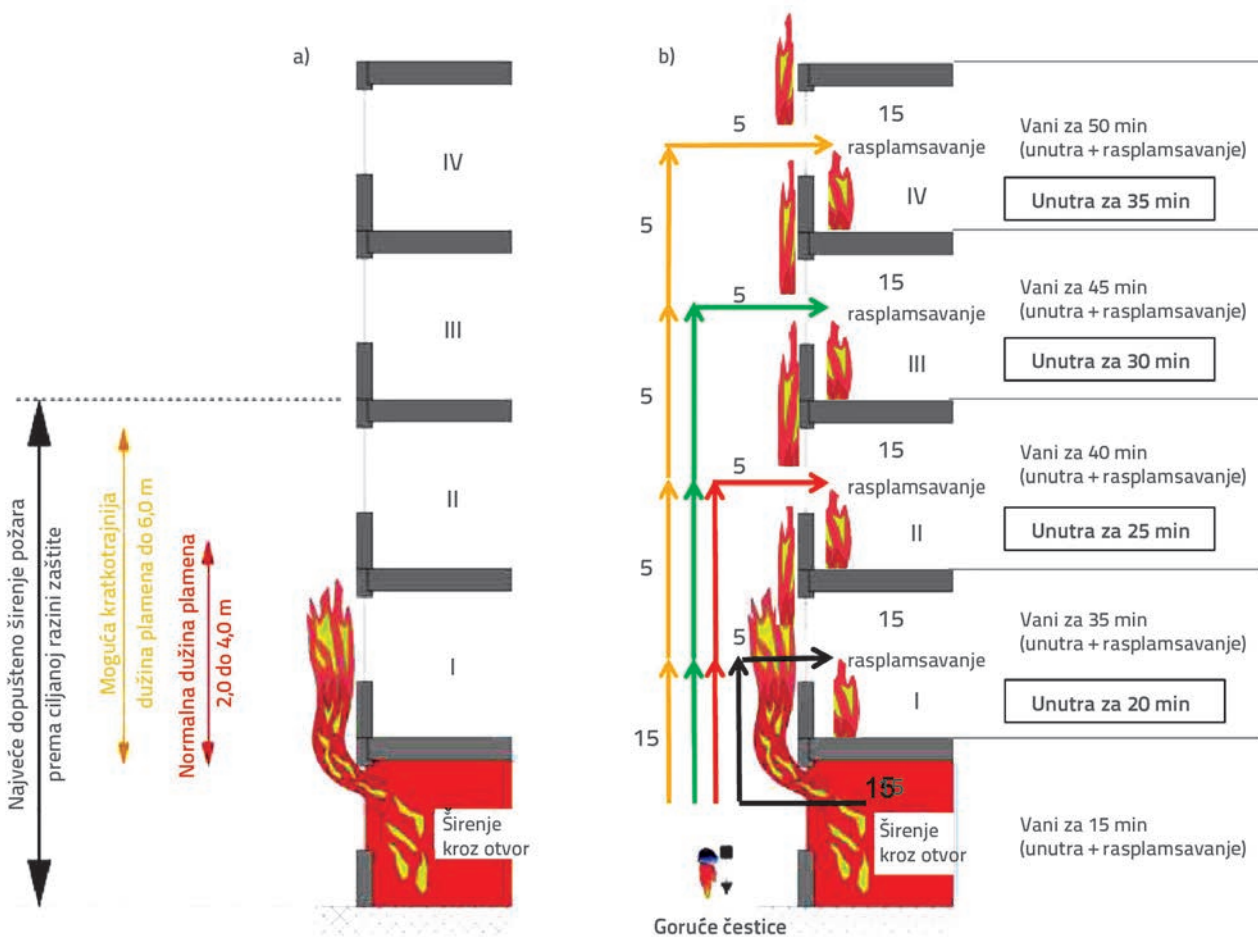
prostorija (eng. *Room Corner test*), tj. za požare u zatvorenim prostorima. Dakle, taj sustav razredbe bitno je različit od scenarija požara koji se događa u stvarnosti na fasadi, pa se stoga i navedene metode ne mogu primijeniti za određivanje ponašanja fasadnih sustava u požaru. Reakcija na požar pojedinačnih materijala unutar fasadnog sustava bitno utječe na ponašanje čitave fasade u požaru. Upravo zbog toga se ponašanje fasada u požaru može ispravno ocijeniti isključivo ispitivanjem u stvarnoj veličini (eng. *Full-scale*), a pritom se u obzir trebaju uzimati detalji kao što su prozori, prodori i svi ostali detalji koji bi mogli znatno utjecati na širenje požara. Ocjena ponašanja fasada u požaru ovisi o nizu parametara koji uključuju širenje požara, doprinos razvoju požara, maksimalno rasprostiranje plamena (najveće dimenzije plamena), razvoj temperature u vremenu, dugotrajno tinjanje i isijavanje, odvajanje gorućih kapljica/čestica, odvajanje fasadnog sustava te oštećenja pojedinih dijelova fasade koja su bila zahvaćena požarom pri ispitivanju. Kako bi se odredili svi navedeni parametri, potrebno je provesti ispitivanja u stvarnoj veličini. Kotthoff [7] smatra da se ispitivanje treba provesti na uzorcima u srednjem mjerilu ili stvarnoj veličini (velikom mjerilu) ovisno o tipu i visini zgrade, kao što je to prikazano na slikama 2.b i 2.c. Kotthoff bazira svoj prijedlog na dvjema normama, DIN E 4102-20 (ispitivanje u srednjem mjerilu, slika 2.b) i BS 8414-1 (ispitivanje u stvarnoj veličini, tj. velikom mjerilu, slika 2.c). Navedene bi se norme mogle primjenjivati kao osnova za razvoj novih ujednačenih metoda ispitivanja ponašanja fasada u požaru. Međutim, one se u svom sadašnjem obliku ipak ne bi trebale primjenjivati kao zadane metode, tj. kao strogo definirane metode za ispitivanja u srednjem i velikom mjerilu (stvarnoj veličini), jer između njih postoji bitna razlika u izloženosti požaru (izloženost požaru gotovo je deset puta veća kod BS 8414-1 u odnosu na DIN E 4102-20) što nije razmjerno njihovoj razlici u visini uzoraka. Metode je potrebno revidirati i ujednačiti što bi omogućilo odabir odgovarajuće metode ispitivanja za određivanje reprezentativnog ponašanja fasadnih sustava u požaru ovisno o tipu zgrade (tj. o namjeni korištenja zgrade), te o njenoj visini i scenariju požara koji se može razviti u pojedinoj zgradi.

Kao što je vidljivo na slici 2., ispitivanje s "pojedinačnim gorućim elementom", tj. SBI (engl. *Single Burning Item*) [8], predlaže se samo na razini materijala i to zato što SBI nije odraz konačnih uvjeta korištenja, pa se stoga niti ne može koristiti za ispitivanje fasada. Za zgradu gledanu u cjelini, Kotthoff predlaže dvije prethodno spomenute metode ispitivanja, jednu za zgrade srednje veličine (razina izloženosti: jedan) te drugu za visoke zgrade (razina izloženosti: dva). Razinu izloženosti



Slika 2. a) način ispitivanja prema metodi SBI (i.e. *Single Burning Item*); b) i c) Kotthoff-ov prijedlog za ispitivanje ponašanja u požaru toplinsko izolacijskih sustava za vanjske zidove, u stvarnoj veličini [7]

dva obilježava jaki potpuno razvijeni požar, a u tu kategoriju ulaze visoke zgrade, tj. zgrade minimalne visine 18 ili 22 m, ovisno o tome kako tehničkim propisima pojedine zemlje definiraju visoke zgrade. Kotthoff je ovaj prijedlog iznio u okviru odgovarajućih aktivnosti Europske organizacije za tehnička dopuštenja – EOTA (eng. *European Organisation for Technical Assessment*), i upravo taj prijedlog prolazi proces razmatranja. Mnoštvo različitih nacionalnih metoda ispitivanja koje se primjenjuju na razini pojedinih europskih država uzrokuje porast troškova za proizvođače fasadnih sustava, a tako se ujedno i ograničava kretanje i prodaja te ugradnja fasadnih sustava po čitavoj Europi čime se guši jedinstveno tržište fasadnih sustava. Osim toga, na interpretaciju rezultata ispitivanja, tj. na određivanje svojstava ponašanja u požaru, utječu i razni tehnički propisi na razini pojedinih država. Oslanjanje na samo jedno zasad ujednačeno europsko ispitivanje reakcije na požar, tj. ispitivanje prema SBI [8] i odgovarajuću razredbenu shemu [5], moglo bi omogućiti primjenu fasadnih sustava koji će se lošije ponašati u uvjetima stvarnog požara, što bi moglo dovesti do povećanja razine opasnosti kako za korisnike zgrada tako i za vatrogasce [9]. Osnovni cilj ovog istraživanja sastoji se u dokazivanju ispravnosti prethodno navedenih postavki. Razvoj i širenje požara na pojedinoj zgradi može proučiti požar iz susjedne zgrade (prijenos gorućim kapljicama ili radijacijom topline), vanjski požar (izvor požara nalazi se u neposrednoj blizini zgrade, a to može biti primjerice zapaljeni kontejner za otpad ili zapaljeno vozilo), ili požar u unutrašnjosti same zgrade (u njenim prostorijama). U ovom je radu težište razmatranja na najčešći uzrok požara, tj. kada požar nastaje unutar zgrade, a plamen se širi po fasadi uslijed ventilacije kroz otvor zgrade, kao što je prikazano na slici 3.a. U analiziranom scenariju požara, u kojem se kao fasadna obloga koristi ETICS sustav, približno vrijeme širenja požara od jednog do drugog kata prikazano je na slici 3.b).



Slika 3. a) Širenje požara preko fasade zgrade kada je izvor požara u samoj zgradi [10]; b) Približno vrijeme širenja požara od jednog do drugog kata kada se kao fasadna obloga koristi ETICS sustav [11]

U ovom se radu razmatraju rezultati dobiveni tijekom ispitivanja tri uzorka u stvarnoj veličini. Fasadne uzorke su činili ETICS sustavi s različitim vrstama toplinsko izolacijskog materijala, tj. s gorivom izolacijom, zatim s gorivom izolacijom i negorivom protupožarnom barijerom i s negorivom protupožarnom barijerom te s negorivom izolacijom. Ispitivanje je provedeno u skladu s britanskom normom BS 8414-1:2002 [12] koja se primjenjuje za visoke zgrade. Jedan od najvećih izazova zaštite od požara u visokim zgradama predstavlja upravo rizik od širenja požara po fasadi [13]. Osim toga, ova je norma jedna od predloženih za buduću ujednačenu europsku metodu ispitivanja ponašanja u požaru fasada na zgradama, te je takav prijedlog i upućen EOTA-i. Osnovni parametar koji se promatrao tijekom ispitivanja bio je razvoj temperature u određenim točkama uzoraka tijekom djelovanja požara. Osim standardnih mjerenja propisanih normom BS 8414-1 [12], provedena su i dodatna mjerenja razvoja temperature, tj. provedeno je praćenje temperature pomoću pločastih termometara, te određivanje intenziteta toplinskog toka i gubitka težine izvora topline tijekom ispitivanja. Ponašanje u požaru tri spomenuta ETICS sustava definirano je na temelju analize postignutih rezultata ispitivanja. Potrebno je naglasiti kako je pregledom literature uočeno da nema dovoljno

dostupnih rezultata o ponašanju ETICS sustava u požaru ispitivanjima u stvarnoj veličini, naročito prema normi koja se primjenjuje u ovom radu [12]. Iako su ispitivanja u stvarnoj veličini zahtjevnija i skuplja od ispitivanja na manjim uzorcima, takvim se ispitivanjima ipak postižu pouzdaniji rezultati o ponašanju fasadnog sustava kao cjeline. Ispitivanje je provedeno u svibnju 2014. u Hrvatskoj i značajan je doprinos u u ovom području istraživanja. Bolje razumijevanje ponašanja vanjskih ovojnica zgrada omogućit će njihovu odgovarajuću primjenu ovisno o tipu i visini zgrade, što će u konačnici svakako pridonijeti povećanju sigurnosti zgrada u slučaju požara.

## 2. Metodologija

U nedostatku odgovarajućih hrvatskih normi, ponašanje u požaru triju različitih tipova ETICS sustava ispitano je, kao što je već prethodno navedeno, prema metodi prikazanoj u normi BS 8414-1:2002 [12]. U toj se normi opisuje postupak za ocjenjivanje ponašanja u požaru nenosivih vanjskih obložnih sustava, kišnih barijera iznad obložnih sustava, te sustava za izolaciju vanjskih zidova izvedenih na pročeljima zidanih zgrada izloženih utjecaju vanjskog požara u kontroliranim uvjetima.

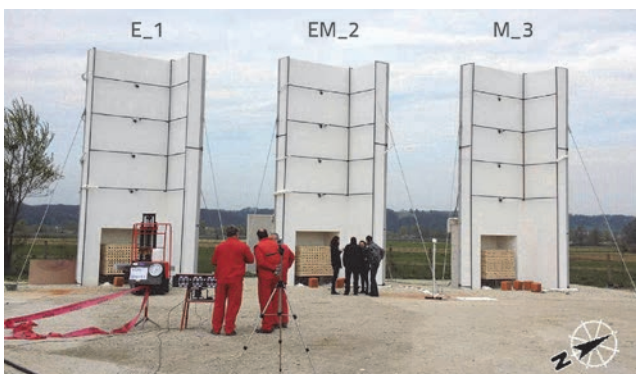
Tablica 2. Opis uzoraka za ispitivanje

Uzorak	Toplinsko izolacijski materijal i njegova debljina	Žbuka	Metoda pričvršćenja	Razredba prema reakciji na požar
E_1	Ekspandirani polistiren (EPS) – 150 mm	Mort za armaturu ojačan staklenom mrežicom i završna organska (akrilna) žbuka – 5 mm	Toplinska izolacija lijepljena i mehanički pričvršćena	B-s2,d0
EM_2	Ekspandirani polistiren (EPS) – 150 mm + protupožarna barijera debljine 150 mm i visine 200 mm; neposredno iznad otvora ložišta			B-s2,d0 (A2-s1,d0 barijera)
M_3	Kamena mineralna vuna (MW) – 150 mm			A2-s1,d0

Izlaganje djelovanju požara je reprezentativno za slučaj vanjskog izvora požara, ili za slučaj potpuno razvijenog požara u prostoriji (nakon rasplamsavanja) koji se širi kroz otvore (npr. prozore) pa tako vanjski plamen izravno djeluje na fasadnu oblogu [12]. Osim analize rezultata dobivenih ispitivanjem pojedinog ETICS sustava, cilj je ispitivanja bio i međusobna usporedba ponašanja različitih ETICS sustava u požaru kada su zahvaćeni požarom na razini zgrade u istom požarnom scenariju, tj. u istim uvjetima požara.

## 2.1. Način i postupak ispitivanja

Visina pojedinog uzorka iznosila je 8 m, a sva tri uzorka su bila izvedena u obliku slova L. Jedan krak uzorka je činio glavni zid za ispitivanje (glavna ploha) dužine 2,6 m, dok je drugi krak činio povratni zid (krilo) dužine 1,5 m, kao što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Uzorci prije ispitivanja

L oblik uzoraka predstavlja kut zgrade. Jedina razlika između pojedinih uzoraka bila je u vrsti toplinsko izolacijskog



Slika 5. Protupožarna barijera: a) postavljena na uzorku EM\_2; b) shema - presjek [14]; c) shema - pogled [14]

materijala korištenog u ETICS sustavu ugrađenom na zid od opeke. Kao toplinska izolacija korišten je gorivi ekspandirani polistiren (EPS) i negoriva mineralna vuna (MW). U tablici 2. prikazan je sastav pojedinog uzorka i razredba prema reakciji na požar koju je dao proizvođač sustava [4, 5].

Treba istaknuti da se deklarirani razred reakcije na požar (B-s2,d0) uzorka EM\_2 odnosi na sloj fasadnog ETICS sustava u kojem se kao toplinska izolacija koristi EPS, pri čemu razred reakcije na požar dijela sustava s protupožarnom barijerom iznosi A2-s1,d0.

U tom uzorku protupožarna barijera postavljena je neposredno iznad ložišta koji je predstavljao otvor u zgradi (slika 5.a). Za uzorak EM\_2 protupožarna barijera je barijera izvedena prema pravilima struke kako to prikazuju slike 5.b i 5.c. Prema radu [11], to je jedno od mogućih rješenja za "pasivnu" zaštitu od širenja požara u zgradama na kojima je ugrađen ETICS sustav s toplinskom izolacijom od EPS-a. Drugo moguće rješenje je postavljanje protupožarne barijere duž čitavog oboda zgrade, i to nakon svakog drugog kata [14]. Kako je već ranije navedeno, protupožarne barijere mogu umanjiti opasnost od prodora i širenja požara u sloj gorive toplinske izolacije.

Izvor topline (požara) tlocrtnih dimenzija 1500 mm x 1000 mm i visine 1000 mm, postavljen je u ložištu u podnožju glavnog vertikalnog zida. Konstrukcija izvora topline sastojala se od složenih letvica od mekog drva čije su dimenzije presjeka bile 50 mm x 50 mm, a dužina 1500 mm ili 1000 mm ovisno o smjeru slaganja. Takav izvor topline generira nominalnu ukupnu toplinu od 4500 MJ u vremenu od 30 min pri vršnoj vrijednosti snage požara od  $(3 \pm 0,5)$  MW. Potrebno je naglasiti da gustoća mekog drva znatno varira te da je stoga masa izvora topline iznosila 445 kg za uzorak E\_1, 437 kg za uzorak EM\_2, te 395 kg za uzorak M\_3.

Ložište predstavlja prostor unutar zgrade u kojem dolazi do zapaljenja i razvoja požara.

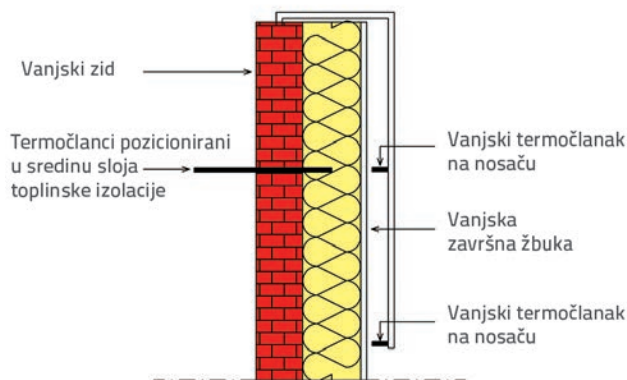
Svi uzorci su izgrađeni u skladu s odgovarajućim pravilima struke te prema uputama proizvođača [15, 16], pri čemu je posebna pažnja posvećena detaljima.

U skladu sa zahtjevima primijenjene norme (BS), za standardna mjerenja temperature korišteni su termočlanaci s izoliranim spojevima tipa K (kromel/alumel) (nominalnog) promjera 1,5 mm. Raspored vanjskih i unutarnjih termočlanaka po presjeku fasadnog zida prikazan je na slici 6. Unutarnji termočlanaci ugrađeni su bušenjem kroz zid od opeke i toplinsko izolacijski sloj, dok su vanjski termočlanaci pričvršćeni na nosač postavljen 10 cm od površine fasade, kako je to prikazano na slikama 4. i 6. Pogled na pozicije termočlanaka prikazan je na slici 7.a.

Standardni vanjski termočlanaci postavljeni su na glavnoj plohi fasade (na pet mjesta) te na krilu (na tri mjesta), i to i na razini 1 i na razini 2 (slika 7.a). Standardni unutarnji termočlanaci postavljeni su samo na razini 2, na glavnoj plohi fasade (na pet mjesta) i na krilu (na tri mjesta).

Prema zahtjevu norme [12], ponašanje uzoraka tijekom samog ispitivanja zabilježeno je pomoću videokamere, a tako prikupljene informacije služile su za potrebe interpretacije rezultata ispitivanja, tj. u određivanju temperaturnih profila i za analizu vremena pojave pojedinih specifičnih promjena na uzorcima.

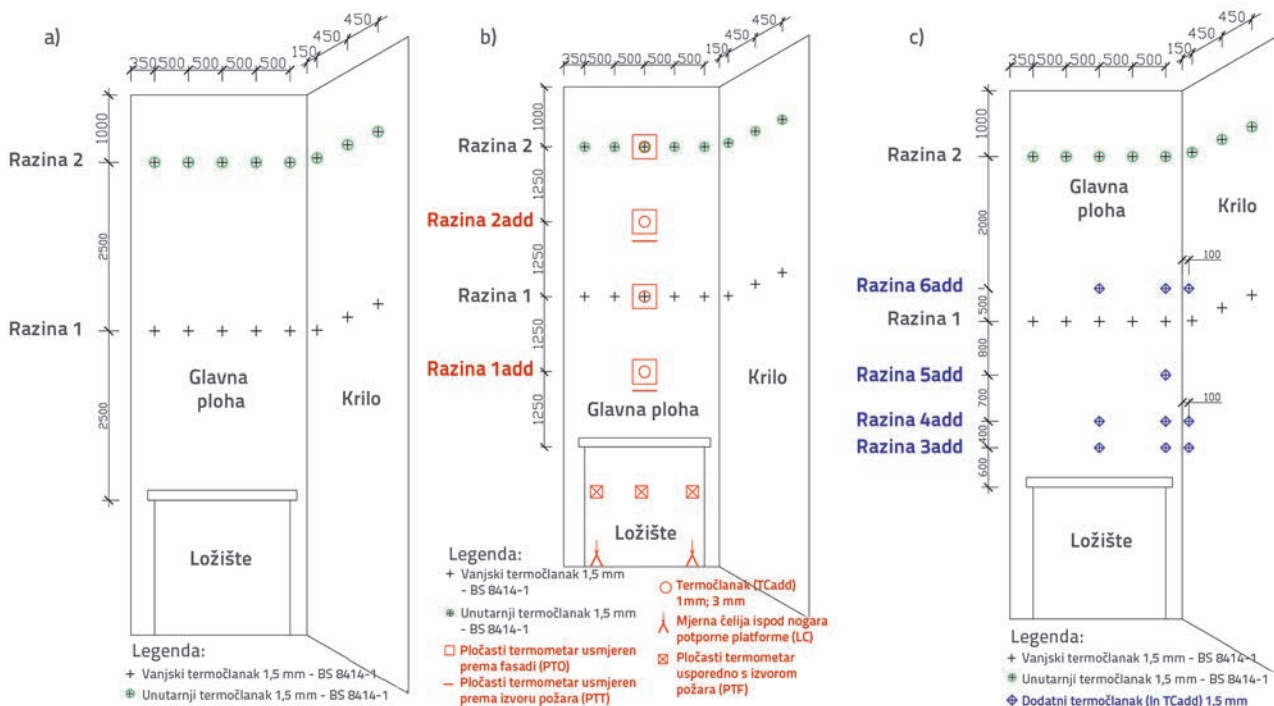
Na uzorke su postavljeni dodatni termočlanaci (nominalnog promjera 1,0, 1,5 i 3,0 mm), pločasti termometri i mjerne ćelije, čije su pozicije na uzorcima označene crvenom i plavom bojom (slike 7.b i 7.c).



Slika 6. Detalj položaja vanjskih i unutarnjih termočlanaka pri vrhu uzorka

Tablica 3. Opis dodatnih mjerenja čiji su rezultati analizirani u ovom radu

Mjerni uređaj	Svrha	Broj i položaj
Dodatni unutarnji termočlanaci (In TCadd) 1,5 mm	Mjerenje raspodjele temperature po toplinsko izolacijskom sloju	10 termočlanaka po uzorku (7 na glavnoj plohi i 3 na krilu)
Mjerna ćelija (LC) ispod oslonaca potporne platforme	Mjerenje gubitka težine izvora topline tijekom ispitivanja, tj. brzina izgaranja izvora požara	Postavlja se ispod svakog oslonca potporne platforme na koju se polaže izvor požara



Slika 7. Pogled: a) termočlanaci prema BS 8414-1:2002 [12]; b) dodatni vanjski termočlanaci, pločasti termometri i mjerne ćelije; c) dodatni unutarnji termočlanaci

Konstrukcija od drvenih letvica je za sva tri uzorka (E\_1, EM\_2 i M\_3) zapaljena u isto vrijeme kako bi se vizualno mogao usporediti razvoj i širenje požara na sva tri uzorka. Vrijeme paljenja konstrukcije od drvenih letvica uzeto je u donjoj analizi rezultata kao vrijeme početka požara.

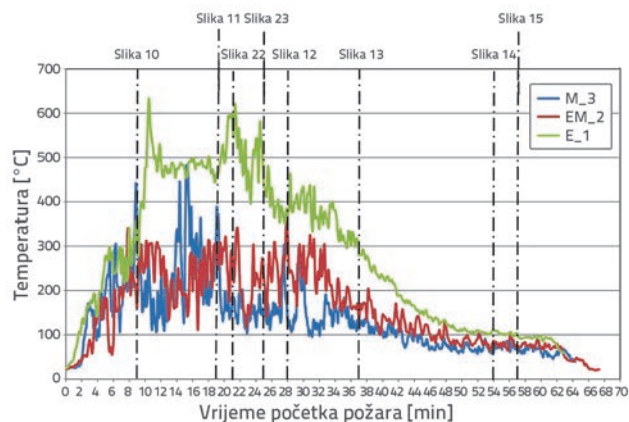
### 3. Eksperimentalni rezultati

U ovom su poglavlju prikazani rezultati standardnih mjerenja prema BS 8414-1:2002 [12] te dodatnih mjerenja prikazanih u tablici 3.

Budući da je ispitivanje provedeno na otvorenom prostoru, tijekom ispitivanja pratili su se i vremenski uvjeti koji bi mogli utjecati na razvoj i širenje požara po uzorcima, a to su brzina vjetra, smjer vjetra i temperatura zraka. Temperatura zraka varirala je u rasponu od 20,5 do 22,2 °C, a brzina vjetra bila je u rasponu od 2,2 do 4,5 m/s (smjer puhanja vjetra: sjever, sjeverozapad). Slika 4. prikazuje orijentaciju uzoraka prema stranama svijeta. Rezultati dobiveni tijekom ispitivanja mogu se podijeliti u tri zasebne grupe: vremenska analiza promjena na uzorcima, temperaturni profili i gubitak mase.

#### 3.1. Vremenska analiza promjena na uzorcima

Vremenski pregled određenih specifičnih promjena na uzorcima u ovisnosti o površinskoj temperaturi uzoraka prikazan je na slici 8. za razinu 1 glavne plohe uzorka. Specifične promjene na uzorcima su prikazane odgovarajućim fotografijama u nastavku.



Slika 8. Vremenski prikaz specifičnih promjena na uzorcima u ovisnosti o površinskim temperaturama zabilježenim za razinu 1 glavne plohe

Slike od 9. do 18. prikazuju razvoj i širenje požara na sva tri uzorka, te ponašanje uzoraka u uvjetima požara. Vizualnim je praćenjem tijekom ispitivanja utvrđeno da je do najbržega širenja vatre, kako u vertikalnom tako i u horizontalnom smjeru, došlo na uzorku E\_1, što je bilo popraćeno i znatno većom količinom dima u usporedbi s ostalim uzorcima (slike 11. i 12.). Protupožarna barijera iznad ložišta uzorka EM\_2 usporila je širenje požara na tom uzorku. Takav utjecaj protupožarnih barijera rezultirao je time i da su prosječne temperature na površini uzorka EM\_2

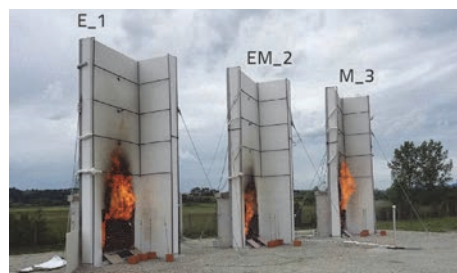
(slika 8.) te prosječne temperature u sloju toplinske izolacije ovog uzorka (slika 21.) bile znatno niže od temperatura zabilježenih na uzorku E\_1. Unatoč nižim razvijenim temperaturama, požar je nakon nekog vremena zahvatio i područje iznad protupožarne barijere i nastavio se širiti po uzorku. Zbog toga su se i dim i goruće kapljice počeli pojavljivati kasnije (kao posljedica topljenja toplinske izolacije) nego kod uzorka E\_1. Glavna je opasnost od gorućih kapljica u tome što one mogu proširiti požar na dijelove zgrade niže od područja zahvaćenog plamenom i po tlu kao i na susjednu zgradu u neposrednoj blizini, a ponajviše mogu ugroziti sigurnost vatrogasaca u slučaju stvarnog požara. Na uzorku EM\_2 zabilježeno je tinjanje požara nakon izgaranja izvora požara, tj. nakon gašenja izvora požara (slika 14.). Istovremeno je pojava dima na uzorku M\_3 bila gotovo zanemariva.

Kako se može vidjeti na slici 8, prosječne površinske temperature na uzorcima EM\_2 i M\_3 imaju slične vrijednosti, iako su nešto niže prosječne temperature na površini zabilježene na uzorku M\_3. Analiza prosječnih temperatura u slojevima toplinske izolacije, prikazanih na slici 21., pokazuje da su temperature u izolaciji uzorka M\_3 znatno niže od temperatura zabilježenih u izolaciji uzorka EM\_2 i E\_1. To će se pobliže analizirati u idućem poglavlju.

Nakon što je prošlo više od šezdeset minuta od početka ispitivanja, vatrogasci su vodom zalili izvore požara i same uzorke zbog sigurnosnih razloga. Kad je požar pogašen, na uzorku E\_1 ostala je samo visjeti staklena mrežica i završna žbuka, a do visine 2,5 m iznad ložišta izgorjela je i žbuka i mrežica. Čitava toplinska izolacija uzorka E\_1 izgorjela je za manje od 40 minuta nakon početka požara. U slučaju uzorka EM\_2, nakon što se požar proširio preko protupožarne barijere iznad ložišta, došlo je do taljenja toplinske izolacije što je popraćeno padanjem gorućih kapljica. Ipak, toplinska se izolacija samo djelomično rastalila na tom uzorku. Na uzorku M\_3 uočeno je samo nekoliko pukotina iznad ložišta, a izgorjela je samo organska završna žbuka. Toplinska izolacija na uzorku M\_3 nije bitno oštećena.

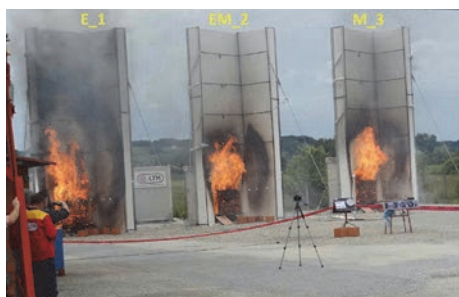


Slika 9. Paljenje konstrukcije od drvenih letvica – početak požara

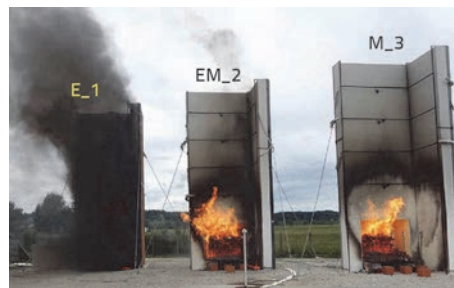


Slika 10. 9 minuta nakon početka

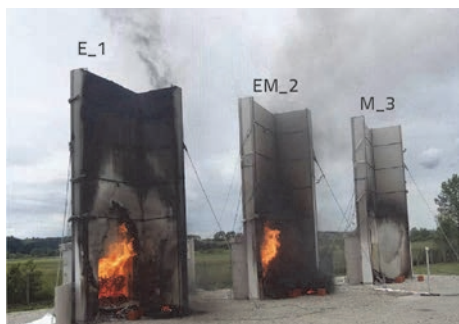




Slika 11. 19 minuta nakon početka



Slika 12. 28 minuta nakon početka



Slika 13. 37 minuta nakon početka



Slika 14. 54 minute nakon početka – tinjanje uzorka EM\_2



Slika 15. 57 minuta nakon početka – izvor topline je izgorio



Slika 16. 64 minute nakon početka – vatrogasci polijevaju M\_3 zbog sigurnosnih razloga



Slika 17. 66 minuta nakon početka – vatrogasci polijevaju EM\_2 zbog sigurnosnih razloga

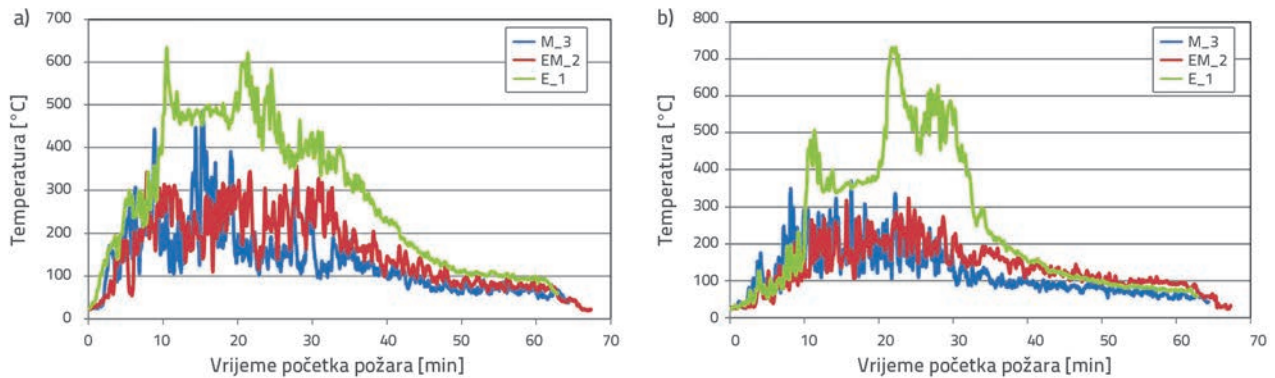


Slika 18. 67 minuta od početka – vatrogasci polijevaju E\_1 zbog sigurnosnih razloga

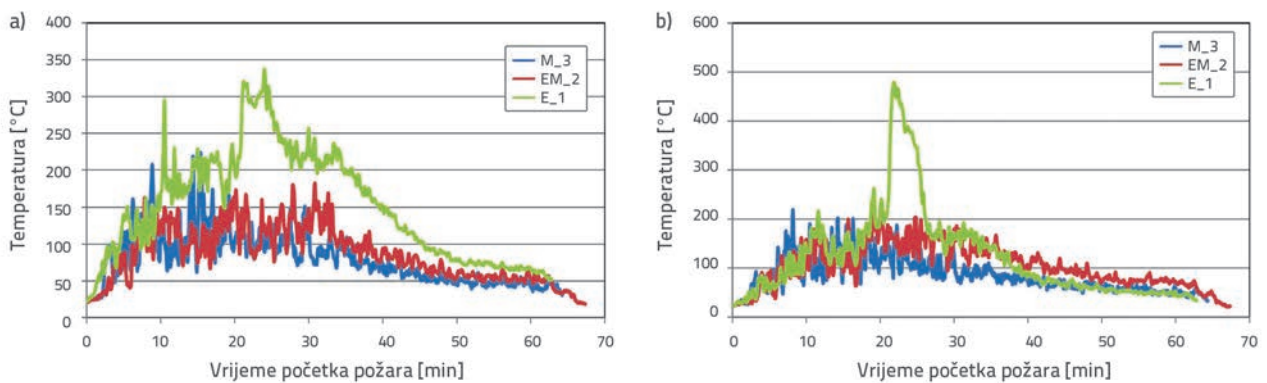
### 3.2. Temperaturni profili

U ovom se potpoglavlju sve izmjerene temperature iskazuju kao prosječne vrijednosti. Prosječna temperatura je prosječna vrijednost temperatura izmjerenih na pripadnim termočlancima

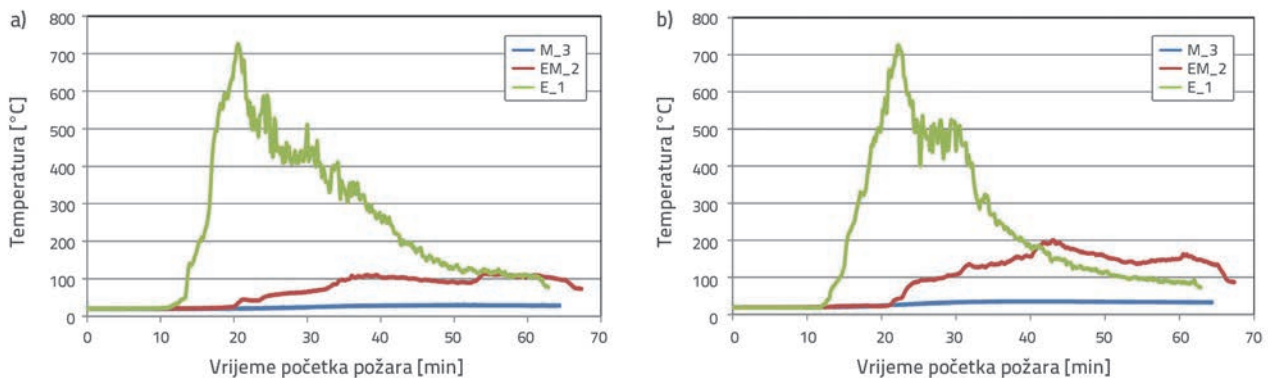
na promatranoj razini i promatranom zidu (glavna ploha ili krilo) uzorka. Prosječne temperature izmjerene vanjskim termočlancima u skladu s odgovarajućom normom na razini 1 i razini 2 uzoraka prikazane su na slikama 19. i 20. Na slici 21. prikazane su prosječne temperature unutar toplinsko



Slika 19. Prosječne površinske temperature na razini 1: a) glavna ploha; b) krilo



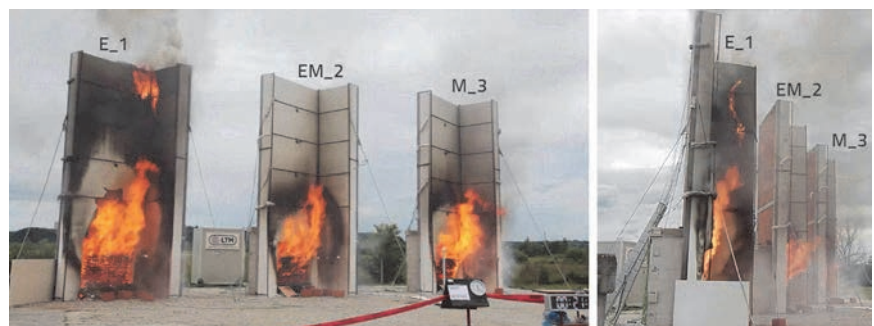
Slika 20. Prosječne površinske temperature na razini 2: a) glavna ploha; b) krilo



Slika 21. Prosječne temperature u sloju toplinske izolacije na razini 2: a) glavna ploha; b) krilo

izolacijskog sloja izmjerene pomoću unutarnjih termočlanaka za sva tri uzorka u skladu s odgovarajućom normom.

Prirast temperature na uzorku E\_1 okarakteriziran je pojavom vršnih vrijednosti. Površinske vršne vrijednosti i unutarnje vršne vrijednosti potaknute su specifičnim pojavama koje su zabilježene na uzorku E\_1. Specifične pojave uočene tijekom ispitivanja, isto kao i njima pripadne vršne vrijednosti temperature, kronološki su prikazane u tablici 4.



Slika 22. Požar izbija na razini 2 (uzorak E\_1): 21 minuta nakon početka

Tablica 4. Kronološki redosljed vršnih vrijednosti u temperaturnom profilu uzorka E\_1

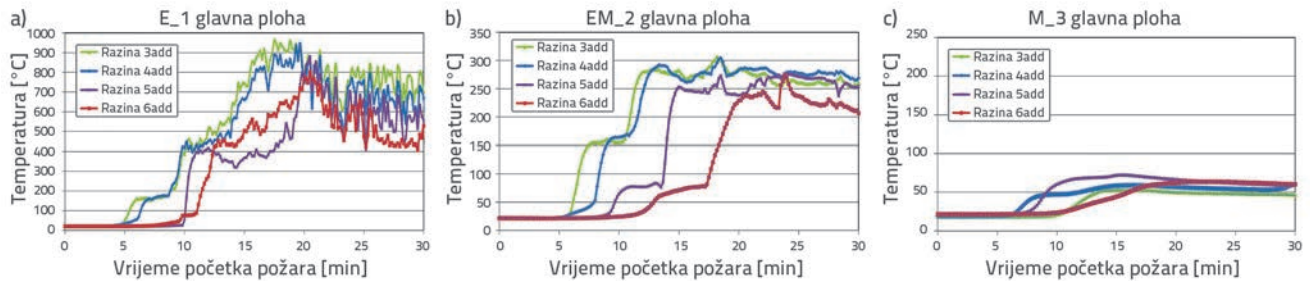
Uzorak E_1 Glavna ploha uzorka					
Vrijeme nakon početka požara	Temperaturni profil	Temperatura	Položaj	Prikazano na slici	Pojave na uzorku koje su uzrokovale vršne vrijednosti u temperaturnom profilu
10 min	Prva vršna vrijednost na površini	Iznad 600 °C	Razina 1	19.a	Žbuka gori – na razini 1 add požar je zahvatio žbuku i počeo se širiti vertikalno prema gore do razine 1. Kao što se vidi na slikama 19.a i 20.a, prosječna temperatura na površini uzorka E_1 viša je od površinske temperature uzoraka EM_2 i M_1, što upućuje na činjenicu da je EPS počeo gorjeti ispod žbuke.
		Gotovo 300 °C	Razina 2	20.a	
10 – 20 min	Plato	Iznad 450 °C	Razina 1	19.a	EPS gori ispod žbuke, što je popraćeno gustim dimom. 15 min nakon početka požara, žbuka se rastvorila i došlo je do pojave efekta dimnjaka zbog dodatne količine zraka. Kroz rastvaranje žbuke i vizualno je potvrđeno da EPS zaista gori.
		Oscilira između 170 i 230 °C	Razina 2	20.a	
Oko 20 min	Prva unutarnja vršna vrijednost	Iznad 700 °C	Razina 2	21.a, 22	Druga vršna vrijednost na površini uzrokovana je probijanjem požara kroz žbuku. Uočava se temperaturni i vremenski pomak kada se uspoređuju pojave prve unutarnje vršne vrijednosti i druge površinske vršne vrijednosti. Značajna temperaturna razlika između sloja toplinske izolacije i vanjske površine završne žbuke na istoj razini uvjerljiva je potvrda da je toplinska izolacija tj. EPS gorio a žbuka ga je odvajala od vanjskog zraka. Dakle, žbuka je uzrokovala znatnu temperaturnu razliku i vremenski pomak vršne temperature na površini u usporedbi s vršnom temperaturom u sloju toplinske izolacije. Može se zaključiti da je EPS koji je gorio ispod žbuke uzrokovao prvu unutarnju vršnu vrijednost, a prodor gorućeg EPS-a kroz žbuku uzrokovao je drugu vršnu vrijednost na površini uzorka.
21 min	Druga vršna vrijednost na površini	Iznad 600 °C	Razina 1	19.a	
		Iznad 300 °C	Razina 2	20.a, 22	
25 min	Treća vršna vrijednost na površini	Iznad 550 °C	Razina 1	19.a, 23	Goruće kapljice na tlu popraćene su pojavom gustog dima.
		Iznad 300 °C	Razina 2	20.a, 23	
25 – 60 min	Krivulja razvoja požara u fazi je gašenja.	Temperature opadaju.	Razina 1	19.a	EPS je u potpunosti izgorio.
			Razina 2	20.a	

Opisane vršne vrijednosti temperature i plato postignuti su također i na krilu uzorka unutar istog vremenskog okvira, slika 19.b, ali pri različitim temperaturama. Kao što se moglo i očekivati, prosječne temperature na površini uzorka više su na razini 1 od onih na razini 2, a razlog leži u činjenici da je razina 1 bliža izvoru požara.

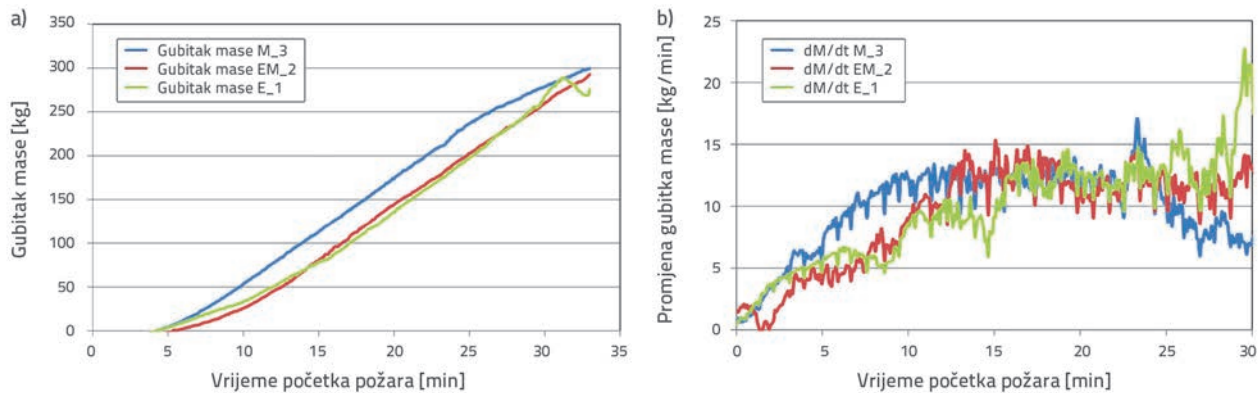
Analizirajući razvoj temperature u sloju toplinske izolacije na razini 2 za uzorke EM\_2 i M\_3 (slika 21.), može se uočiti da je temperatura uzoraka EM\_2 i M\_3 konstantna i gotovo ista u prvih 20 minuta od početka požara. Nakon tih 20 minuta, temperatura u sloju toplinske izolacije na glavnoj plohi uzorka EM\_2 počinje rasti i oscilira oko 100 °C sve do pucanja žbuke iznad protupožarne barijere popraćenog prodorom požara u sloj toplinske izolacije tj. u EPS koji se rastalio. Na uzorku M\_3, temperature u sloju toplinske izolacije ostaju iste na razini 2 glavne plohe te dosežu maksimum od otprilike 30 °C. Na



Slika 23. Razvija se gusti dim i goruće kapljice padaju na tlo (uzorak E\_1): 25 minuta nakon početka



Slika 24. Porast temperature unutar sloja toplinske izolacije: a) uzorak E\_1; b) uzorak EM\_2; c) uzorak M\_3



Slika 25. a) Gubitak mase izvora požara tijekom ispitivanja; b) Promjena gubitka mase izvora požara tijekom ispitivanja

temperaturnim profilima za uzorke EM\_2 i M\_3 nema pojave vršnih vrijednosti. Jedina specifična pojava na uzorku EM\_2 sastoji se u taljenju EPS-a iznad protupožarne barijere, koji počinje gorjeti nakon pada na tlo i u kontaktu s požarom, što je popraćeno gustim dimom. Na uzorku EM\_2 zabilježena je manja emisija dima u odnosu na uzorak E\_1.

Porast temperature, vertikalno po visini uzorka, kroz sloj toplinske izolacije u vremenu prikazan je na slici 24. za svaki uzorak pojedinačno. Prosječna vrijednost temperature je dobivena mjerenjima pomoću dodatnih unutarnjih termočlanaka prikazanih na slici 7.c. Najviši i najbrži prosječni prirast temperature zabilježen je na uzorku E\_1, dok je najniži i najsporiji prosječni prirast temperature zabilježen na uzorku M\_3. Takav najviši i najbrži prosječni prirast temperature, zabilježen na uzorku E\_1, uzrokovan je najvećim porastom brzine širenja požara u usporedbi s ostalim uzorcima. Na uzorku E\_1 na razini 4add prosječna temperatura unutar sloja toplinske izolacije prelazi 400 °C u prvih 10 minuta od početka ispitivanja, te dostiže najveću vrijednost od preko 800 °C u prvih 15 minuta od početka ispitivanja. To je značajan porast jer se, prema podacima iz literature, EPS počinje taliti na temperaturama višim od 80 °C [18], čime se ubrzava širenje požara uslijed efekta dimnjaka. EPS počinje gorjeti pod utjecajem vanjskog plamena pri temperaturi od približno 480 °C, a do samozapaljenja (bez utjecaja vanjskog plamena) dolazi na temperaturama iznad 575 °C [10], što potvrđuje da se EPS u uzorku E\_1 zapalio i izgorio. Što se tiče uzorka EM\_2, tijekom cijelog ispitivanja prosječne

temperature unutar sloja toplinske izolacije nisu iznosile više od 300 °C na razinama 3add i 4add, što ukazuje da se na tom uzorku EPS rastalio ali se nije zapalio. Tijekom trajanja ispitivanja, prosječne temperature unutar sloja toplinske izolacije uzorka M\_3 bile su niže od 100 °C. Takav razvoj temperature pokazuje da je toplinska izolacija na uzorku M\_3 uspjela zadržati svoju cjelovitost tj. svoja mehanička svojstva, a razlog tome je činjenica da se organsko vezivo u mineralnoj vuni tali na temperaturama iznad 200 °C.

### 3.3. Gubitak mase

Tijekom ispitivanja promjena mase izvora požara praćena je pomoću mjernih čelija postavljenih ispod svakog oslonca potporne platforme na kojoj se nalazio izvor topline (požara). Analiza dobivenih rezultata (slika 25.a) pokazuje da se gubitak mase izvora topline uglavnom smanjuje povećanjem stupnja gorivosti fasadnog sustava, odnosno kod fasade s negorivom izolacijom prisutan je najbrži gubitak mase u odnosu na druge ispitane fasade. Najsporiji gubitak mase izvora topline zabilježen je kod fasada s gorivom izolacijom bez protupožarne barijere. Ova specifična zakonitost također je zabilježena i pri probnom ispitivanju (isti uzorci, ista norma) koje je provedeno u ožujku 2014. [17]. Slika 25.b prikazuje promjenu gubitka mase u vremenu koji je u početnoj fazi ispitivanja jednak kod uzoraka M\_3 i E\_1, dok su rezultati za uzorak EM\_2 bitno drugačiji. Pretpostavlja se da bi razlog takve razlike mogao biti utjecaj vjetera tijekom ispitivanja.

#### 4. Zaključak

S obzirom na sve veću brigu za okoliš, od projekatana se danas traži projektiranje zgrada koje svojom formom i karakteristikama ispunjavaju zahtjeve u pogledu energetske učinkovitosti. Istodobno se radi zaštite ljudi - korisnika zgrada, materijalnih dobara u njima, ali i zaštite same konstrukcije zgrade od požara traži usklađenost s nizom normi zadanih u okviru zakonske regulative. U tom se kontekstu trebaju ostvariti temeljne promjene i znatna poboljšanja, tj. sveobuhvatni postupak projektiranja treba uzimati u obzir ne samo zahtjeve u vezi s toplinskom ugodnosti i energetskom učinkovitošću u zgradama nego i zahtjeve koji se odnose na zaštitu od požara. U budućnosti se u oba područja trebaju provesti opsežna istraživanja kako bi se spomenuti pristup usvojio u svakodnevnoj praksi projektiranja.

U ovom su radu prikazani rezultati i zaključci o ponašanju u požaru ETICS sustava u kojima su korištene različite vrste toplinsko izolacijskog materijala, tj. goriva izolacija, goriva izolacija s protupožarnom barijerom i negoriva izolacija. Ispitivanje je provedeno na uzorcima u stvarnoj veličini u svibnju 2014. u Hrvatskoj. Ustanovljeno je da fasade mogu bitno utjecati na širenje požara u zgradama, tj. one mogu ili pridonijeti širenju požara ili ga usporiti. Ponašanje zgrada u slučaju požara ovisi o vrsti fasada, tj. o vrsti ETICS sustava. Ponašanje zgrada u požaru može se definirati kao vremenski slijed složenog ponašanja zgrade u uvjetima izloženosti požaru. Pri određivanju ponašanja fasada zgrada u požaru, u obzir se trebaju uzeti parametri kao što su pojava dima, širenje požara/plamena, tinjanje, mehaničko ponašanje kao što je pojava padajućih dijelova i/ili gorućih kapljica, popuštanje fasadnog sustava (odlamanje dijelova), te područja zahvaćena požarom u svim slojevima koji se analiziraju nakon ispitivanja. Svi ti navedeni parametri trebaju biti obuhvaćeni budućom ujednačenom europskom metodom za ispitivanja u stvarnoj veličini. Podaci dobiveni u sklopu prikazanog ispitivanja provedenim u skladu s normom BS 8414-1 mogli bi pridonijeti razvoju buduće ujednačene metode koja bi trebala postići značajna poboljšanja u odnosu na metode ispitivanja koje se

zasad provode na razini pojedinih država. Prema sadašnjim spoznajama autora, veličina uzoraka u budućoj ujednačenoj metodi ispitivanja najvjerojatnije bi trebala odgovarati veličini uzoraka koja je definirana u normi BS 8414-1.

Osnovni zaključak ispitivanja provedenog u ovom radu jest taj da protupožarna barijera od negorivog materijala (tj. od kamene mineralne vune) može, čak i u relativno maloj visini od samo 20 cm iznad otvora, bitno usporiti širenje požara i porast temperature vertikalno uz fasadu, pa se stoga njeno ponašanje u požaru smatra boljim od ponašanja ETICS sustava koji sadrži samo EPS. Međutim, kod ETICS sustava s EPS-om i protupožarnom barijerom uočena je pojava gorućih kapljica, tinjanje i naknadna pojava dima, što može predstavljati opasnost za vatrogasce i povećati mogućnost širenja požara na susjednu zgradu. Kao što se moglo i očekivati, najpovoljnije sveukupno ponašanje u požaru ostvario je ETICS sustav s mineralnom vunom.

Prema SBI ispitivanju, ETICS sustav s EPS-om i protupožarnom barijerom pripada razredu reakcije na požar B-s2,d0, što podrazumijeva odsutnost pojave gorućih kapljica. Međutim, u ovom je radu pokazano da su se u prethodno spomenutom sustavu pojavile goruće kapljice. To potvrđuje da SBI ispitivanje nije prikladno za sustave koji će u krajnjoj uporabi imati znatno veće dimenzije od onih koje zahtijeva SBI ispitivanje, a tu se svakako ubrajaju fasade zgrada. SBI ispitivanje ne predstavlja niti može u potpunosti opisati stvarno ponašanje u požaru sustava u njihovoj punoj veličini, tj. uzorak za SBI ispitivanje nije reprezentativan uzorak čitave zgrade i njene fasade.

#### Zahvale

Ispitivanje u stvarnoj veličini, prikazano u ovom radu, organizirano je i provedeno na najvišoj znanstvenoj i stručnoj razini zahvaljujući suradnji između Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, SP Tehničkog instituta za istraživanje iz Švedske, Zavoda za gradbeništvo Slovenije ZAG te Laboratorija za toplinska mjerenja (LTM), a sve pod pokroviteljstvom europske udruge *Fire Safe Europe* i Hrvatske udruge za zaštitu od požara HUZOP. Autori također zahvaljuju tvrtkama koje su donirale materijal potreban za provedbu ovog istraživanja.

#### LITERATURA

- [1] European Commission: COM/2010/0639 Communication from the Commission to the European Parliament, the council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions *Energy 2020 A strategy for competitive, sustainable and secure energy*, Brussels, 2010.
- [2] European Parliament, Council of the European Union: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Official Journal of the European Union*, L 153/13, 2010.
- [3] EAE European Association for External Thermal Insulation Composite Systems, <http://www.ea-etics.eu/~run/>, 27.3.2015.
- [4] Šilhard Mihaljević, S., Weigand, I., Jelčić, M.: Potvrđivanje sukladnosti povezanih sustava za vanjsku toplinsku izolaciju (ETICS) za primjenu u zgradarstvu, *Hrvatska normizacija i srodne djelatnosti - tehničko usklađivanje na putu prema Europskoj uniji*, Pлитвиčka jezera, 2005.
- [5] HRN EN 13501-1:2010 Fire classification of construction products and building elements -- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests (EN 13501-1:2007+A1:2009)
- [6] Sundström, B.: *The Development of a European Fire Classification System for Building Products, Test Methods and Mathematical Modelling*, Doctoral Thesis, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, 2007.

- [7] Kotthoff, I.: Large Scale Fire Performance Testing of External Wall Cladding Systems, Draft EOTA TR 073, *Presentation at AG Fire Meeting*, Brussels, 12.03.2015.
- [8] HRN EN 13823:2015 Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item (EN 13823:2010+A1:2014)
- [9] Messerschmidt, B.: We need one harmonized large scale façade fire test, *Web blog Leading thoughts on safe, sustainable and energy efficient buildings*, <http://safeandsustainablebuildings.com/we-need-one-facade-fire-test/>, 26.4.2015.
- [10] Kotthoff, I.: Brandausbreitung an Fassaden, Verwendung von Holz an der Aussenwand aus brandschutztechnischer Sicht, *9. DGfH-Brandschutztagung 2001*, München, 2001.
- [11] Kotthoff, I.: Mechanismen der Brandausbreitung an der Gebäudeaußenwand, Brandverhalten von WDVS unter besonderer Berücksichtigung von Polystyrol-Hartschaum, *9. Hessischer Energieberaterstag am 22. November 2012*, Frankfurt, 2012.
- [12] BS 8414-1:2002 Fire performance of external cladding systems. Test methods for non – loadbearing external cladding systems applied to the face of building
- [13] Bjegovic, D., Banjad Pecur, I., Milovanovic, B.: Energy efficiency and fire safety of high-rise buildings, *International Scientific Conference on Safety Engineering*, Novi Sad, 2014.
- [14] Brillux: *Technische Info 5b04, WDVS Brandschutz Grundlagen und Begriffe, brandschutzrelevante Verarbeitungsdetails*, Münster, 2011.
- [15] Hrvatska udruga proizvođača toplinsko fasadnih sustava HUPFAS: *Smjernice za izradu ETICS sustava*, Zagreb, 2015.
- [16] EAE European Association for External thermal insulation composite systems: *EUROPEAN GUIDELINE for the application of ETICS*, Baden-Baden, 2011.
- [17] Banjad Pečur, I., Bjegović, D., Boström, L., Milovanović, B., Hajduković, M.: ETICS Fire Performance test, *Fifth International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading*, Michigan, pp. 964-971, 2015.
- [18] Hens, H.: *Performance Based Building Design 1, From Below Grade Construction to Cavity Walls*, Ernst & Sohn A Wiley Company, 2012., <http://dx.doi.org/10.1002/9783433601952>