

UTJECAJ POLIURETANSKE PJENE NA PONAŠANJE LAGANIH KOMPOZITNIH PANELA U POŽARNIM UVJETIMA

Ivanović, Antonija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:884475>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**

Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Antonija Ivanović

**UTJECAJ POLIURETANSKE PJENE NA PONAŠANJE
LAGANIH KOMPOZITNIH PANELA U POŽARNIM
UVJETIMA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2023.



FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Antonija Ivanović

**THE INFLUENCE OF POLYURETHENE FOAMS ON THE
BEHAVIOR OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE PANELS IN
FIRE CONDITIONS**

MASTER'S THESIS

Zagreb, 2023.



TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Antonija Čondić**

JMBAG: **0082057595**

Diplomski rad iz predmeta: **Zaštita od požara**

Naslov teme
diplomskog rada:

HR	UTJECAJ POLIURETANSKE PJENE NA PONAŠANJE LAGANIH KOMPOZITNIH PANELA U POŽARNIM UVJETIMA
ENG	THE INFLUENCE OF POLYURETHENE FOAMS ON THE BEHAVIOR OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE PANELS IN FIRE CONDITIONS

Opis teme diplomskog rada:

U radu je potrebno kroz eksperimentalni rad analizirati utjecaj poliuretanske (PUR) pjene kao toplinsko-izolacijskog sloja u sastavu laganih kompozitnih čeličnih panela na njegovo ponašanje u uvjetima standardnog požarnog ispitivanja, prema slijedećim koracima:

1. analizirati stanje područja
2. provesti termogravimetrijsku analizu poliuretanske pjene
3. provesti ispitivanje otpornosti na požar dvaju laganih kompozitnih čeličnih panela obloženih gips-vlaknastim obložnim pločama te bez i sa PUR pjenom kao toplinsko-izolacijskim slojem
4. analizirati dobivene rezultate
5. temeljem dobivenih rezultata, donijeti zaključke

Datum: **10.travanj 2023.**

Komentor: -

(Ime i prezime komentora)

Mentor: **izv.prof.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina**

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

Diplomski rad izradila sam samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i dolje navedenu literaturu, u suradnji s mentoricom izv. prof. dr. sc. Marijom Jelčić Rukavina i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva.

Ovaj rad je dio IRI projekta „Kompozitni lagani panel s integriranom nosivom konstrukcijom, KLIK“ (KK. 01.1.1.07.0060), financiranog od strane Europske Unije operativnog programa Konkurentnost i kohezija

Sažetak:

Osnovni cilj ovog diplomskog rada je, na temelju eksperimentalnog ispitivanja, procijeniti utjecaj poliuretanske pjene na ponašanje laganih kompozitnih panela u požarnim uvjetima. Zbog toga je ispitana otpornost na požar dvaju uzorka laganih kompozitnih panela koji su se sastojali od čeličnog okvira i sa po dva sloja gips-vlaknastih ploča s obje strane. Jedan uzorak je sadržavao poliuretansku pjenu kao toplinsko-izolacijski sloj, dok je drugi (referentni) bio prazan. Kroz ispitivanje je praćen razvoj temperatura kroz presjek panela te parametri kojima se dokazuje nosivost, izolacija i cjelovitost kod standardiziranog ispitivanja otpornosti na požar konstrukcijskih elemenata. Dodatno je provedena termogravimetrijska analiza korištene PUR pjene. Dobiveni rezultati pokazuju da gorivost poliuretanske pjene smanjuje otpornost na požar panela, ali se korištenjem više slojeva gips-vlaknastih ploča može osigurati otpornost panela od najmanje 60 minuta.

Ključne riječi: lagani kompozitni paneli, gips-vlaknaste ploče, poliuretanska pjena, otpornost na požar

Abstract:

The energy efficiency requirements of buildings force an increased use of thermal insulation materials in buildings, which can be of inorganic or organic origin, i.e., non-combustible or combustible.

The main objective of this work is to evaluate, through experimental tests, the influence of polyurethane foam (PUR) on the behavior of lightweight composite panels under conditions of high fire temperatures. For this reason, the fire resistance of two specimens of lightweight composite panels consisting of a steel frame and two layers of gypsum fiberboard was tested. One specimen contained PUR foam as a thermal insulation layer, while the other (reference) was blank. During the test, the temperature evolution in the cross-section of the panel was monitored, as well as the parameters to demonstrate the load-bearing capacity, insulation and integrity of the standardized fire resistance test of building components. In addition, a thermogravimetric analysis of the PUR foam used was performed. The results obtained show that the flammability of the polyurethane foam reduces the fire resistance of the panel, but the use of multiple layers of gypsum fiberboard can ensure the resistance of the panel of at least 60 minutes.

Key words: light weight composite panels, gypsum-fiber boards, polyurethane foam, fire resistance

Sadržaj:

1	UVOD	1
2	STANJE PODRUČJA.....	2
2.1	Općenito.....	2
2.2	Gips-vlaknaste ploče.....	3
2.2.1	Općenito	3
2.2.2	Sastav i vrste.....	4
2.2.3	Ponašanje na povišenim temperaturama - općenito.....	5
2.2.4	Toplinska svojstva u ovisnosti o visokoj temperaturi.....	5
2.3	Poliuretanska pjena.....	9
2.3.1	Općenito	9
2.3.2	Svojstva poliuretana.....	9
2.3.3	Proces gorenja polimera.....	10
2.3.4	Toplinska svojstva	12
2.4	Ispitivanja otpornosti elemenata na požar	13
2.4.1	Postavke ispitivanja	13
2.4.2	Kriteriji otpornosti na požar	15
3	EKSPERIMENTALNI RAD	17
3.1	Termogravimetrijska analiza PUR pjene.....	17
3.1.1	Općenito o TGA	17
3.2	Ispitivanje otpornosti na požar panela.....	18
3.2.1	Provedba ispitivanja.....	21
4	REZULTATI ISPITIVANJA	26
4.1	Rezultati termogravimetrijske analize PUR pjene	26
4.2	Rezultati ispitivanja otpornosti na požar panela	27
4.2.1	Panel 1.....	27
4.2.2	Panel 2.....	38
4.3	Usporedba i diskusija rezultata	48
4.3.1	Usporedba ponašanja gips-vlaknastih ploča kod oba panela	48

4.3.2	Usporedba ponašanja čeličnih profila kod oba panela.....	49
4.3.3	Usporedba deformacija od vertikalnog opterećenja	50
4.4	Zaključak o ispitivanju otpornosti na požar panela.....	52
5	ZAKLJUČAK	53
6	LITERATURA.....	55

Popis slika:

<i>Slika 1 Slojevi LSF panela.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2 Specifični toplinski kapacitet gipsanih ploča [9].....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3 Toplinska vodljivost gips-vlaknaste ploče [10].....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4 Gubitak mase kod gips-vlaknaste ploče [10].....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 5 Toplinska vodljivost PUR-a.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 6 ISO 834 krivulja [22].....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 7 Kriteriji otpornosti na požar.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 8 Pozicije čvorova na konstrukciji.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 9 Preklapanje gips-vlaknastih ploča.....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 10 Čelična konstrukcija analiziranih LSF panela te vertikalni položaj termočlanaka ugrađenih za praćenje temperature kroz poprečni presjek panela.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 11 Prikaz položaja termočlanaka za mjerenje srednje temperature na neizloženoj strani (+ $\Delta 140K$).....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 12 prikaz položaja termočlanaka za mjerenje srednje temperature na neizloženoj strani (+$\Delta 180K$).....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 13 Požarna peć s ugrađenim ispitnim uzorkom i termočlancima na neizloženoj strani.....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 14 Prikaz pozicija unutarnjih termočlanaka po presjeku.....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 15 Prikaz mjernih točaka za vertikalnu deformaciju.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 16 Termogram PUR-a.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 17 Panel 1 neposredno nakon ispitivanja.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 18 Čvorovi 6 i 7 nakon ispitivanja.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 19 Čvor 10 nakon ispitivanja.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 20 Prikaz razvoja temperature na neizloženoj strani elementa.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 21 Prikaz razvoja temperature na izloženoj strani elementa.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 22 Panel 1 – temperature kroz sve pozicije.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 23 Prikaz temperatura kroz ploče na strani izloženoj požaru.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 24 Prikaz temperatura kroz čelični profil.....</i>	<i>34</i>

<i>Slika 25 Prikaz temperatura kroz ploče na neizloženoj strani</i>	35
<i>Slika 26 Prikaz vertikalnih deformacija u vremenu.....</i>	36
<i>Slika 27 Neizložena Panel 2 tijekom ispitivanja.....</i>	39
<i>Slika 28 Izgled Panela 2 nakon ispitivanja</i>	39
<i>Slika 29 Detalj popucalih ploča nakon ispitivanja.....</i>	40
<i>Slika 30 Detalj ostatka PUR-a.....</i>	40
<i>Slika 31 Prikaz razvoja temperature na neizloženoj strani Panela 2.....</i>	41
<i>Slika 32 Prikaz razvoja temperature na izloženoj strani Panela 2</i>	41
<i>Slika 33 Panel 2 sve pozicije</i>	42
<i>Slika 34 Prikaz temperatura kroz ploče na izloženoj strani elementa.....</i>	43
<i>Slika 35 Prikaz razvoja temperature kroz čelični profil</i>	44
<i>Slika 36 Razvoj temperature kroz ploče na neizloženoj strani.....</i>	45
<i>Slika 37 Prikaz vertikalne deformacije u vremenu</i>	46
<i>Slika 38 Usporedba gips-vlaknastih ploča.....</i>	48
<i>Slika 39 Usporedba čeličnih profila</i>	49
<i>Slika 40 Vertikalna deformacija usporedba</i>	51
<i>Slika 41 Brzina vertikalne deformacije - usporedba</i>	51

Popis tablica:

<i>Tablica 1 Toplinska svojstva različitih građevinskih materijala (Drysdale, 1998)</i>	13
<i>Tablica 2 Razlike između Panela 1 i Panela 2</i>	19
<i>Tablica 3 Opažanja tijekom ispitivanja Panela 1.....</i>	27
<i>Tablica 4 Opažanje tijekom ispitivanja Panela 2.....</i>	38

1 UVOD

Procjenjuje se da su stambene i poslovne zgrade današnjice veliki potrošači energije, više od 30% na globalnoj razini, a uzrokuju i približno 10 % emisije CO₂ u atmosferu. [1] Ti podaci ukazuju na važnost razvijanja i napretka materijala i sustava korištenih u svrhu očuvanja energije u gradnji. Zahtjevi za građevine postrožuju se iz dana u dan i obuhvaćaju čitav životni vijek konstrukcije, uključujući i proces gradnje. Iz navedenih razloga, sve popularniji postaju sustavi zidova stropova načinjenih od tankostijenog hladno prešanog čelika (*eng. light gauge steel frame*), odnosno LSF sustavi, koji se oblažu različitim vrstama obložnih ploča (gips-kartonskim, gips-vlaknastim, OSB, magnezij oksidnim itd.) te na taj način postižu cjelovitost. Šupljine između ploča i nosivog sustava ispunjavaju se po potrebi, u ovisnosti o traženim toplinsko-izolacijskim svojstvima.

Popularnost LSF zidnih sustava raste u građevinskoj industriji diljem svijeta zbog njihovih svojstava. Paneli su jednostavni za proizvodnju i sklapanje, imaju malu masu, dobra akustična svojstva, a može se utjecati i na izolacijska svojstva dodavanjem raznovrsnih ispuna u svrhu očuvanja i uštede energije za grijanje i hlađenje.[2]

Ne treba zanemariti ni ponašanje LSF sustava u požarnim uvjetima, što je i glavna tema ovog rada. Svoju otpornost na visoke temperature paneli posjeduju upravo zahvaljujući oblogama. Pregled dosadašnjih istraživanja je pokazao da su gips-kartonske i gips-vlaknaste ploče najoptimalniji izbor za LSF panele u pogledu pružanja otpornosti na visoke požarne temperature. Svojim svojstvima koja osiguravaju dobru otpornost na visoke temperature, odgađaju učinak širenja požara na tanke stijenke čeličnih profila, koje nisu otporne na takvu vrstu opterećenja i vrlo brzo se mogu zagrijati te na taj način izgubiti svoju krutost i stabilnost. [2]

Ovaj rad najprije opisuje stanje područja vezanog uz obloge tankostijenih nosača, odnosno gips-vlaknastih ploča, kao i razradu svojstava toplinsko-izolacijske ispune, odnosno poliuretanske (PUR) pjene. Teoretski pregled potkrijepljen je dosadašnjim znanjima dostupnim iz literature i prijašnjih ispitivanja, a naknadno je provedeno i vlastito eksperimentalno ispitivanje. Eksperimentalni dio rada sastoji se u termogravimetrijskoj analizi PUR pjene, kao i analizi otpornosti LSF panela na požarne uvjete. Kao referentni uzorak ispitivan je prazni LSF panel s dvostrukom gips-vlaknastom oblogom te jedan uzorak panela ispunjen PUR pjenom, iste obloge

kao i referentni. Cilj je zaključiti kakav utjecaj poliuretanska pjena ima na ponašanje i otpornost panela u požarnim uvjetima koji su simulirani standardnom požarnom krivuljom.

2 STANJE PODRUČJA

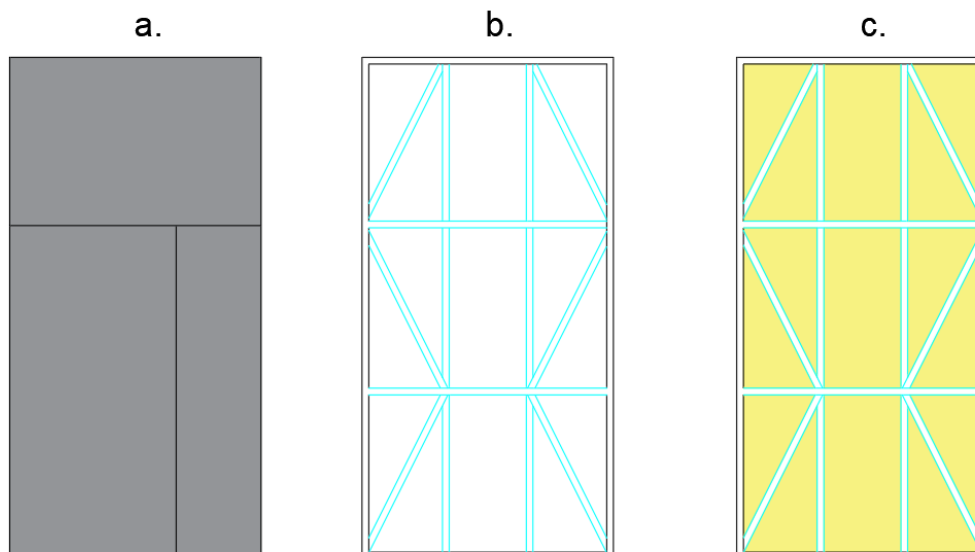
2.1 Općenito

Svaka građevina mora zadovoljiti temeljne zahtjeve, a jedan od glavnih zahtjeva su sigurnost i zaštita u slučaju požara, ali i gospodarenje energijom i očuvanje topline. [3] Kako bi se svi temeljni zahtjevi mogli uskladiti, a međusobno ne poništavati, kako je napomenuto i u uvodnom dijelu, u građevinskoj industriji na popularnosti dobivaju sustavi laganih kompozitnih panela.

Obično se ovakva vrsta panela koristi za stambene i poslovne zgrade zbog svojih svojstava i prednosti u usporedbi s drugim materijalima i sustavima tipično korištenim u gradnji. Svojstva poput mehaničke otpornosti i stabilnosti, smanjene težine, mogućnost recikliranja i ponovne uporabe čine ih konkurentnima na tržištu. [4] Upravo zbog korištenja panela u zgradama korištenim u stambeno-poslovne svrhe, veliku pozornost treba obratiti na njihovo ponašanje u požaru.

Osim u Uvodu spomenutog utjecaja obložnih ploča na sprječavanje širenja požara kroz LSF panele, velik utjecaj na ponašanje panela u požaru također ima njegova ispuna, odnosno vrsta izolacije. Prilikom odabira toplinsko-izolacijskog materijala u obzir se uzimaju temeljni zahtjevi za građevinu. Osobito je važno zadovoljiti zahtjev za gospodarenjem i očuvanjem energije, odnosno smanjiti upotrebu energije koristeći materijal koji će biti u mogućnosti izolirati unutrašnji od vanjskog prostora. U obzir se također mora uzeti utjecaj tog materijala na okoliš, zdravlje ljudi, akustična svojstva i ponašanje u slučaju požara. Jedan od izolacijskih materijala koji se koristi u tu svrhu je poliuretanska (PUR) pjena. [5]

Izazov u povezivanju ova dva materijala u funkcionalnu cjelinu dolazi do izražaja kad promatramo njihove temperature paljenja. PUR pjena ima relativno nisku točku paljenja, negdje oko 300 °C, dok gips-kartonske ploče mogu izdržati i temperature do 800 °C bez većih strukturalnih promjena. [6]



Slika 1 Slojevi LSF panela

Na Slici 1 prikazani su slojevi laganokompozitnih panela, počevši od gips-vlakanaste obloge (a), okvira i konstrukcije od tankostijenog čelika (b) do prikaza panela ispunjenog poliuretanskim pjenu u svrhu izolacijskog materijala (c).

2.2 Gips-vlakanaste ploče

2.2.1 Općenito

Gips-vlakanaste ploče su vrsta građevinskog materijala najčešće korišten u svrhu oblaganja. Koriste se većinom kod laganih konstrukcija, bilo da je okvir konstrukcije načinjen od čelika, drveta ili nekog drugog materijala. Gips-vlakanaste ploče igraju značajnu ulogu u pasivnoj zaštiti od požara. Pasivna zaštita od požara sastoji se u biranju materijala i elemenata konstrukcije koji su u manjoj ili većoj mjeri otporni na požar, kako bi se spriječilo širenje požara unutar zgrade u kojoj je nastao ili na susjedne zgrade. Ovakve ploče postižu svoju otpornost na požar zahvaljujući kombinaciji sastojaka, ali većinom zahvaljujući vodi koja je u element vezana kemijski ili je slobodna. Na povišenim temperaturama gips prolazi kroz kemijske reakcije u kojima dolazi do

oslobođanja oba oblika vode, što ima utjecaja na toplinsku vodljivost gipsanih ploča te na njihov specifični toplinski kapacitet. Razne studije i ispitivanja provode se kako bi se razjasnilo ponašanje ploča prije i nakon isparavanja vode te njihova otpornost na požar nakon fizikalno – kemijskih promjena kojima su izložene.[7]

2.2.2 Sastav i vrste

Sastav gipsane jezgre u gips-vlaknastim pločama varira od proizvođača do proizvođača, ali glavni sastojci su čisti gips, odnosno $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ te kalcijev karbonat (CaCO_3). Dodaci poput vermikulita, staklenih vlakana i punila, poboljšavaju svojstva ploča, odnosno kontroliraju skupljanje, održavaju cjelovitost te osiguravaju nisku toplinsku vodljivost proizvoda. Ulogu u vatrootpornosti gips-vlaknastih ploča imaju kemijske reakcije dehidracije gipsa (otpuštanje vode) te razgradnja kalcijevog karbonata, svojim apsorpiranjem topline. [3]

Gipsane ploče klasificirane su u tipove prema normi HRN EN 520:2010. [8] Podjela ploča sastoji se od 8 razreda (A, H, E, F, P, D, R, I), ovisno o svojstvima pojedine ploče, a u slučaju da jedna ploča obuhvaća više svojstava, prilikom njezine klasifikacije navode se slova uz odgovarajuća svojstva ploče. Ploče korištene za zaštitu od požara pripadaju razredu F – gipsanim pločama s poboljšanom adhezijom jezgre na visokim temperaturama. To su ploče koje sadrže mineralna vlakna, uz moguće neke druge dodatke u svojoj gipsanoj jezgri koji će povećati njezinu koheziju pri visokim temperaturama.

Prema razredu reakcije na požar postoji klasifikacija od 7 razreda (A1,A2,B,C,D,E i F), a gipsane ploče mogu pripadati razredima od A1 sve do A2-s1-d0, ovisno o debljini njihove obloge, dodatnim sastojcima u vidu vlakana ili pigmentata koji će poboljšati svojstva otpornosti na visoke temperature. Ako gips-vlaknasta ploča pripada razredima A1 ili A2, pripada negorivim materijalima sa ili bez organskih sastojaka, dok su razredi B ili C gorivi materijali koji ne doprinose uopće ili u velikoj mjeri širenju požara. [6]

2.2.3 Ponašanje na povišenim temperaturama - općenito

Kao što je u uvodnom dijelu o gips-vlaknastim pločama napomenuto, osnova otpornosti na visoke temperature navedenih ploča sadrži se u činjenici da sadrže slobodnu i kemijski vezanu vodu. Samo čisti gips sadrži oko 20,9 % kemijski vezane vode, a u porama gipsane jezgre nalazi se još 3-4 % slobodne vode, u ovisnosti o temperaturi okoline i relativnoj vlažnosti.[7] Kad se ploče nađu na povišenim temperaturama, prisutna energija troši se na isparavanje vode iz elementa te se na taj način usporava prijenos energije – topline po samom elementu. Reakcija isparavanja vode iz elementa zove se dehidracija te se odvija u dvije faze. U prvoj fazi materijal gubi oko 75% kemijski vezane vode te gips prelazi, odnosno dehidrira u kalcijev sulfat hemihidrat. Prva faza se odvija na temperaturama između 80 i 140 °C, ovisno o brzini zagrijavanja. Daljim povećanjem temperature isparava i ostalih 25 % kemijski vezane vode te je produkt te reakcije anhidrit kalcijevog sulfata.

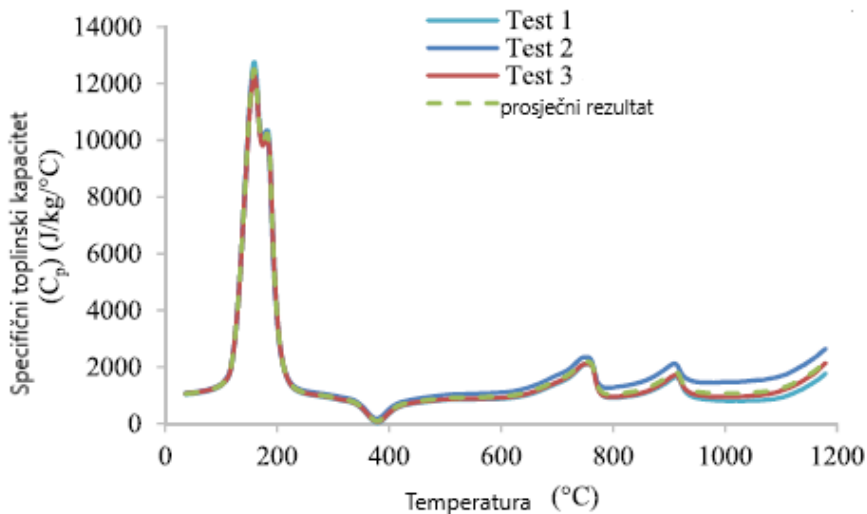
Kad se radi o nastanku pukotina na pločama, nema određene temperature na kojoj dolazi do nastanka istih, kao ni za opadanje dijelova ploča [7], ali poznata nam je informacija da se kalcijev karbonat raspada na temperaturama od 670 °C [2], što možemo povezati s pojavom pukotina. Međutim, ispitivanja pokazuju da su temperature odlamanja gips-vlaknastih ploča niže kod neizoliranih panela, nego kod onih kod kojih je prisutan i izolacijski materijal, tako da samo odlamanje ne ovisi samo o postignutoj temperaturi već i izolaciji panela. [7]

2.2.4 Toplinska svojstva u ovisnosti o visokoj temperaturi

Protok energije uslijed razlika u temperaturi naziva se toplina. Toplina se prenosi na tri moguća načina, mehanizma prijenosa – vođenjem (kondukcijom), zračenjem (radijacijom) i strujanjem (konvekcijom), pri čemu jedino prijenos topline radijacijom nije vezan za materiju. Vođenje odnosno kondukcija nameće se kao vodeći način prijenosa topline u eksperimentalnim ispitivanjima pa ga tako поближе objašnjavamo svojstvima poput toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti. Znanje o toplinskoj provodljivosti je raširenije zbog lakoće intuitivnog shvaćanja funkcije provodljivosti dok je difuzivnost često zanemarena. Usprkos tome, toplinska difuzivnost važna je karakteristika u pogledu razmišljanja o požarima.

Osnovne karakteristike materijala u vidu razumijevanja njihovih termo-fizikalnih svojstava uz toplinsku vodljivost i toplinska difuzivnost su specifični toplinski kapacitet te gubitak mase.

Svako od navedenih svojstava govori nam pobliže o ponašanju materijala na sobnim i povišenim temperaturama što je važna informacija pri projektiranju otpornosti na požar.



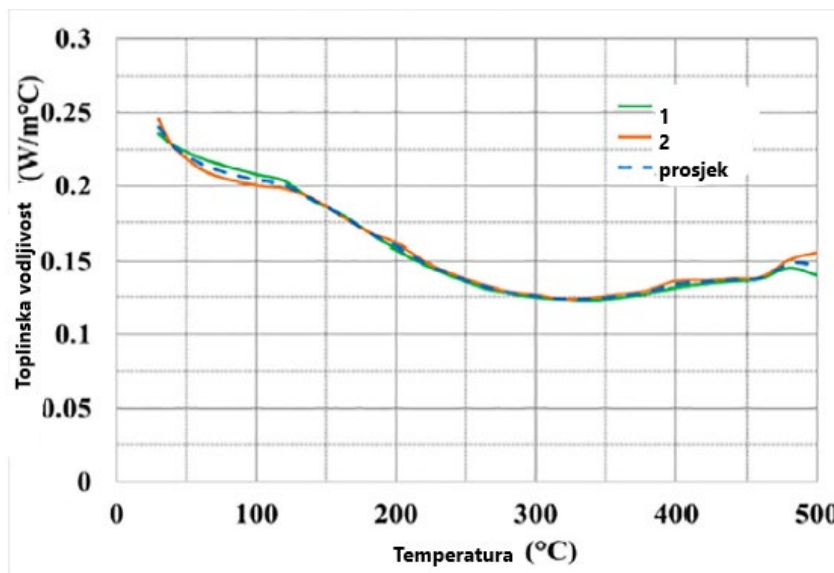
Slika 2 Specifični toplinski kapacitet gipsanih ploča [9]

Najznačajnije svojstvo gips-vlaknastih ploča u vidu njihove požarne otpornosti je specifični toplinski kapacitet. Na Slici 2 prikazan je graf promjene specifičnog toplinskog kapaciteta gips-vlaknastih ploča u uvjetima porasta temperature i konstantnog tlaka. Steau i Mahendran (2021.) [9] u svom radu navode kako su vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta gipsanih ploča na početku ispitivanja iznosile u prosjeku 1072 J/kg $^{\circ}$ C. Specifični kapacitet je nakon postignute temperature od 116 $^{\circ}$ C porastao za sve ispitivane ploče, a prva endotermna reakcija svoj vrhunac doživjela je na 156 $^{\circ}$ C, 160 $^{\circ}$ C, i na 158 $^{\circ}$ C. Na spomenutim temperaturama, specifični toplinski kapacitet iznosio je u prosjeku 12 185 J/kg $^{\circ}$ C. Ubrzo nakon prve endotermne reakcije slijedi i druga, a nakon čega se specifični toplinski kapacitet smanjuje s porastom temperature. Zadnja reakcija u dekompoziciji gipsanih ploča događa se pri temperaturama višim od 1180 $^{\circ}$ C. [9]

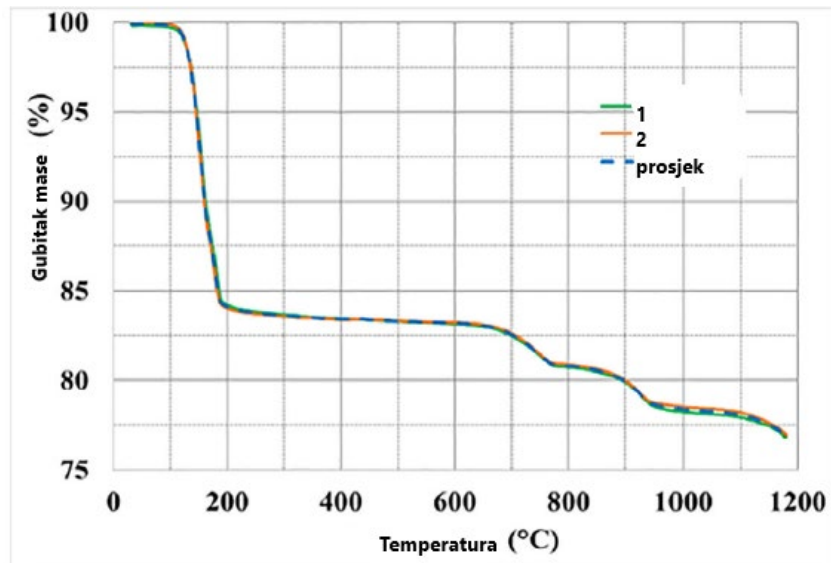
Toplinska difuzivnost (α) također je bitno svojstvo pri razmatranju toplinskih reakcija materijala. Definiramo ga kao mjeru prijenosa topline s jedne strane materijala na drugu. Materijali s većom vrijednosti termalne difuzivnosti brže provode toplinu kroz materijal što nije pogodno kod toplinsko – izolacijskih materijala poput gips-vlaknastih ploča koje teže manjoj vrijednosti toplinske difuzivnosti. Mjera toplinske difuzivnosti dobiva se korištenjem *LFA* uređaja pri visokim

temperaturama. Alternativni način dobivanja toplinske difuzivnosti je preko formule koja povezuje toplinsku vodljivost (λ), gustoću materijala(ρ) te specifični toplinski kapacitet (c_p).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} [mm^2/s][3](1)$$



Navedena formula (1) spominje i toplinsku vodljivost materijala (λ) koja se također može mjeriti *LFA* uređajima, ili ako su nam poznate ostale vrijednosti, izračunati preko formule. Steau i Mahendran (2021.) [9] u svom radu donose zaključke o padu toplinske vodljivosti u fazama rasta temperature od 30 do 500 °C, u vrijednostima od 0,269 do 0,129 W/m/°C.



Gubitak mase materijala pri razlikama u temperaturi opisuje svojstvo gustoće kao funkciju temperature. Za mjerenje gubitka mase koristi se tehnika termogravimetrijske analize (TGA) koja mjeri promjene u masi materijala izloženoj konstantnoj promjeni temperature, odnosno konstantnom zagrijavanju. Smatra se da manji postotak izgubljene mase materijala označava njegovu bolju reakciju na visoke temperature, odnosno veću otpornost na požarno opterećenje. Prema Gnanachelvamu i dr.(2020.) [10] gips-vlaknaste ploče pokazale su se kao najbolja opcija u ispitivanju gubitka mase u odnosu na magnezij-sulfatne ploče, ploče od cementa s dodatkom vlakana te pločama s dodatkom PCM. [10]

2.3 Poliuretanska pjena

2.3.1 Općenito

Poliuretanska pjena pripada kategoriji organskih polimera, prema njegovoj kemijskoj strukturi na bazi ugljika, C. Reakcija polimerizacije koja je potrebna za dobivanje poliuretana uključuje kondenzaciju poliizocijanata i poliola (polialkohol). Postoje različite metode dobivanja poliuretanskih pjena. Uobičajene metode su korištenje otapala s niskom točkom vrelišta, koji će isparavati tijekom procesa polimerizacije, korištenje ugljikovog dioksida koji se ubrizgava u kalupe ili pak dodavanje vode u samu formulaciju. [11]

Poliuretanska (PUR) pjena u svom čvrstom stanju pokazala se kao odličan toplinski izolator, zbog izvrsne toplinske vodljivosti, odnosno niskog koeficijenta $\lambda \approx 0,020 \text{ W/mK}$, što ju izdvaja od drugih tipično korištenih izolacijskih materijala poput ekspaniranog polistirena (EPS) ili mineralne vune (MW) čiji su koeficijenti toplinske vodljivosti i do 50% veći. Uz odličnu toplinsku vodljivost, PUR pjena također je stabilan materijal koji odolijeva vremenu te ima nisku propusnost na vodu. Unatoč navedenim svojstvima, PUR pjena se ne koristi često zbog svoje niske otpornosti na požar.[6]

Prema razredu reakcije na požar materijala, PUR pjene se najčešće svrstavaju kao C-s2-d0 do E. prema normi HRN EN 13501-1:2010 [12] i označava da je raspon različitih PUR pjena prema vremenskom razdoblju izgaranja u okviru od 20 do 2 minute, s ograničenom proizvodnjom dima, koja može biti u porastu te bez gorući kapljica odnosno čestica. [13]

S tim na umu, kod LSF panela, PUR pjena se kombinira s pločama od gipsanih vlakana kako bi se postigla potrebna otpornost na visoke temperature, jer je razred reakcije na požar gips-kartonskih ploča od A1 do A2-s1-d0, dakle spada u negorive materijale. [6]

2.3.2 Svojstva poliuretana

Polimeri su velike molekule sastavljene od manjih molekula koje zovemo monomerima, vezani međusobno kovalentnom vezom, uglavnom u duge lance. Većina polimera je organskog podrijetla, uključujući i poliuretanske pjene, a postoje u krutom i tekućem obliku. Na žalost, uz papir, drvo i tkanine, polimerni materijali predstavljaju glavno gorivo u većini neželjenih požara.

Plameno sagorijevanje je proces plinske faze u kojem se veliki polimerni lanci raspadaju na manje, nestabilne čestice, poznatije kao piroliza. Toplinska dekompozicija, odnosno gubitak mase je proces u kojem dolazi do značajnih promjena na materijalu, uzrokovanih toplineom te može doći do gubitka čitave mase materijala. [14]

Kod izlaganja polimernih lanaca visokim temperaturama postoji više mehanizama raspadanja. Ukoliko ne dođe do raspadanja lanca na nestabilne manje molekule, može doći do procesa karbonatizacije, odnosno stvaranja ugljena – pougljenjivanja. Kod većine polimera, **pri** izlaganju temperaturi doći će i do procesa gubitka mase, ali i do pougljenjivanja, ovisno o uvjetima gorenja.

2.3.3 Proces gorenja polimera

Proces gorenja polimera može se promatrati na više razina, na molekularnoj ili makro razini. Molekularnu razinu čine tri faze. Prva faza je zagrijavanje - vanjski izvor topline uzrokuje rast temperature u samom polimeru. Moguće su fizikalne, mehaničke i promjene toplinskih svojstava koje uključuju omekšavanje, **topljenje** te isparavanje odnosno nestabilnost polimera. Nadalje, slijedi druga faza, faza dekompozicije, raspadanja, prilikom koje zbog sve viših temperatura dolazi do pucanja većine veza među molekulama. Pucanje molekula uzrokuje otpuštanje plinova koji se razlikuju, ovisno o vrsti polimera, u slučaju poliuretanskih pjena, radi se, između ostalih, i o otrovnom cijanovodiku. Treća i završna faza na molekularnoj razini je oksidacija. U prisutnosti kisika na visokim temperaturama, oksidacija nastupa vrlo brzo, oslobađajući toplinu i produkte izgaranja.

Makro razina gorenja polimera podijeljena je u pet faza. Prva faza – zagrijavanja, uzrokuje rast temperature proporcionalno toplinskoj inerciji pojedinog materijala. Nakon nje slijedi druga faza – pirolize. Dolazi do raspadanja goriva, praćenog pirolizom goriva do plinovitog stanja. Treća faza je zapaljenje. Gorivo se akumuliralo na površini te reagira s kisikom i u trenutku kad je dosegnuta kritična količina slobodnih radikala, dolazi do rasplamsavanja. Do zapaljenja će doći kad ukupni toplinski tok uspije proizvesti dovoljno gorivog materijala, brzina reakcije će se povećati a produkti su ugljični dioksid i voda. Četvrta faza je širenje plamena, uzrokovano povećanim toplinskim tokom i zračenjem već gorive površine, dolazi do ponovnog zapaljenja i širenja požara. Posljednja, peta faza – razvoj požara, požar postaje veći i ponestaje mu kisika. Dolaziti će do nepotpunog izgaranja i stvaranja produkata poput ugljičnog monoksida i čađe koji

povećavaju radijacijske komponente prijenosa topline. [14]Konkretno ponašanje poliuretana, kao vrste polimera ovisi o spojevima izocijanata i poliola od kojih su nastali, odnosno o samom procesu polimerizacije te o uvjetima okoliša. [14]

Gorenje poliuretanskih spojeva u početku se odvija prilično brzo. Zapaljivi plinovi brzo reagiraju s dostupnim kisikom te proizvode veće količine topline i zapaljive produkte degradacije. Prvi stupanj raspadanja poliuretana svodi se na odvajanje poliola i izocijanata, u drugom dolazi do formacija zapaljivih alkena i ugljikovog dioksida, a treći stupanj karakterizira proizvodnja sekundarnih amina te ponovno ugljikovog dioksida. Svaki stupanj popraćen je otpuštanjem topline, postepenom degradacijom poliuretana dok ne dođe do posljednjeg produkta gorenja, čađe. Generalni konsenzus o temperaturama pri kojima se odvija gorenje poliuretana u navedenim fazama je između 200 i 300 °C. [15]

Količina i vrsta toksičnih produkata u požarima ovisi o brojnim faktorima poput same temperature požara, koncentracije kisika prilikom gorenja, sastavu materijala koji gore itd. Najproblematičniji segmenti požara u vidu zdravlja ljudi koji se u tom trenutku nalaze u blizini su opasnost od visokih temperatura, dima i otrovnih produkata izgaranja. Otrovnih produkata u slučaju izgaranja poliuretanskih pjena su uz tipični produkt izgaranja, ugljični dioksid (CO₂), još i ugljični monoksid (CO), aldehidi, halogenidi poput klorovodika (HCl) i bromovodika (HBr), cijanovodik (HCN). [16]

Ustanovljeno je da kad temperature dosegnu točku iznad 600 °C, dolazi do proizvodnje spojeva s cijanidima, koji proizvode tzv. žute plinove, koji su iznimno otrovni produkti gorenja.[15]

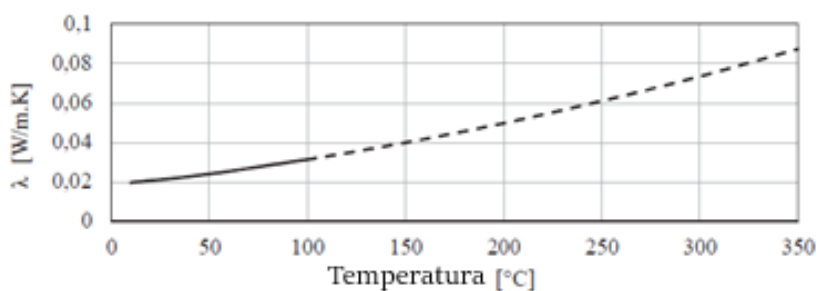
Podjela produkata izgaranja, odnosno otrovnih plinova može se granati na dvije kategorije; plinovi koji uzrokuju gušenje te na nadražujuće plinove. Plinovi koji uzrokuju gušenje spriječit će dotok kisika do stanica što rezultira nesvjesticom ili u najgorem slučaju smrću. Nadražujući plinovi imaju mehanizam djelovanja na gornje dišne puteve, u krajnjem slučaju i pluća, i utjecaj na oči, čime onesposobljavaju kretanje i eventualnu evakuaciju i to ih čini opasnima.

Točan način djelovanja otrovnih plinova uvelike ovisi o njihovoj koncentraciji, na što se može utjecati pri proračunima građevina i projektima zaštite od požara. [16]

2.3.4 Toplinska svojstva

Toplinska provodljivost, λ , fizikalna je veličina koja opisuje prijenos topline kroz tvari, u ovisnosti o njihovoj gustoći, vlažnosti, temperaturi te strukturi promatranog objekta. Određuje se eksperimentalno - PUR pjene su izrazito niskog koeficijenta $\lambda \approx 0,020$ W/mK što ih čini dobrim toplinskim izolatorima.[17]

Prema istraživanju prikazanom u [6] provedenom prema normi EN 12524 [18], promatrana je promjena toplinske provodljivosti u rasponima temperatura od 20 do 350 °C. Kruta poliuretanska pjena može izdržati temperature i do 250 C, a temperatura paljenja je na približno 300 C. Kliknite ili dodirnite ovdje da biste unijeli tekst.



Slika 5 Toplinska vodljivost PUR-a

Toplinska difuzivnost, α , definirana je kao mjera prijenosa topline s jedne strane materijala na drugu u jedinici vremena. [17]

Odnos između toplinske provodljivosti i difuzivnosti može se iskazati sljedećom formulom (2):

$$\lambda = \alpha \cdot q \cdot c ; (2)$$

pri čemu je q gustoća materijala, a c je specifični toplinski kapacitet. [19]

Toplinska vodljivost i specifični toplinski kapacitet pripadaju najvažnijim svojstvima za toplinsku analizu materijala. Ta svojstva su podložna promjenama kad su izložena temperaturnim promjenama a. [20]

Zbog nedostataka rezultata ispitivanja, u literaturnim navodima kao što je [6], vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta prema normi HRN EN 12524 [18], uzima u obzir toplinski

kapacitet kao konstantu koja iznosi 1400 J/kgK. [6] Tako je navedeno i u Tablici 1, koja prikazuje toplinska svojstva različitih građevinskih materijala.

Tablica 1 Toplinska svojstva različitih građevinskih materijala (Drysdale, 1998)

Materijal	Toplinska provodljivost λ [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet, c_p [J/ kgK]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska inercija $\lambda\rho c_p$ [W ² s/m ⁴ K]
čelik (mekani)	45,8	460	7850	1,6 x10 ⁹
beton	0,8-1,4	880	1900-2300	2x10 ⁶
izolacijske ploče na bazi vlakana	0,041	2090	229	2,0x10 ⁴
poliuretanska pjena	0,034	1400	20	9,5x10 ²
gipsana žbuka	0,48	840	1440	5,8x10 ⁵
opeka	0,69	840	1600	9,3x10 ⁵
zrak	0,026	1040	1,1	-

Gubitak mase jedno je od svojstava koje nam govore поближе o ponašanju materijala u požaru. Termogravimetrijska analiza najčešće je korištena metoda u istraživanju procesa gubitka mase kod gorenja polimernih materijala. [14]

Detaljnije o termogravimetrijskoj analizi poliuretanskih pjena napisano je u poglavljima 3.1.1. te u 3.5.1. [14]

2.4 Ispitivanja otpornosti elemenata na požar

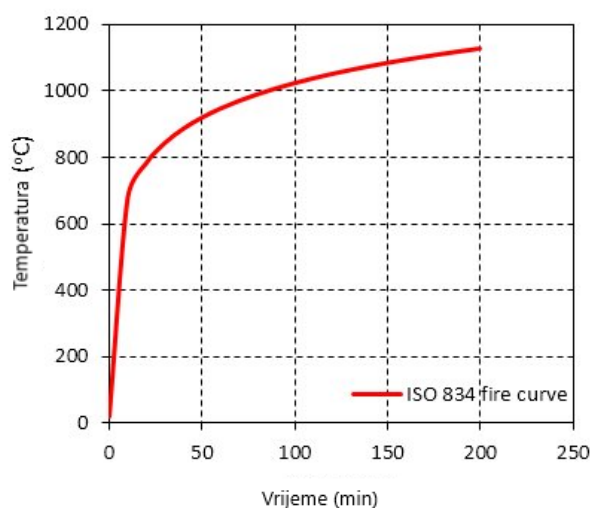
2.4.1 Postavke ispitivanja

Prema Eurokodu 1991-1-2 [21], otpornost na požar je sposobnost konstrukcije, dijela konstrukcije ili njezinog elementa da zadrži zahtijevana svojstva za određeno opterećenje, izloženost požaru određeni vremenski period.[21] Požar se u suvremenoj regulativi tretira kao izvanredno djelovanje na nosivu konstrukciju te je osnovni koncept projektiranja da otpornost

konstrukcije na požar bude veća od jačine samog požara. Jačinu požara možemo opisati kao mjeru destruktivnog učinka požara. Kako bismo pojednostavili pojam jačine požara, uvodimo nazivne krivulje.

Jedna od osnovnih krivulja za dokazivanje požarne otpornosti je tzv. krivulja standardnog požara, odnosno ISO – krivulja (3). Ona predstavlja potpuno razvijeni požar u nekom požarnom odjeljku. Krivulja standardnog požara prikazuje se na grafu temperatura – vrijeme, a određena je izrazom:

$$\theta_g = 20 + 345 \log (8t + 1). \quad (3)$$



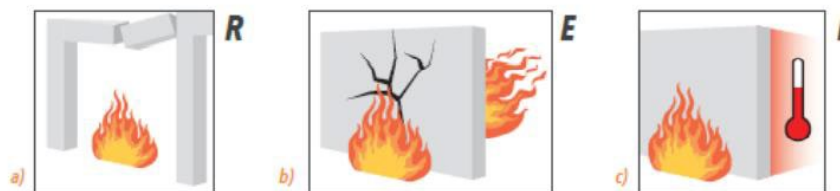
Slika 6 ISO 834 krivulja [22]

Ispitivanje ispitnih uzoraka, u našem slučaju panela odvija se u požarnoj peći u koju je ugrađen ispitni uzorak. Element je učvršćen na donjem horizontalnom dijelu, a prostor između vertikalnih rubova uzorka i okvira ispitne peći ispunjen je keramičkom vunom te na taj način predstavlja slobodne krajeve elementa. Kako bismo mogli promatrati razvoj ispitivanja vizualno, u na bočnim stranama peći na polovici visine ugrađeni su ostakljeni prozorčići. Na taj način možemo pratiti razvoj ispitivanja na strani elementa koja je izložena požaru, kao i na vanjskoj, neizloženoj strani.

2.4.2 Kriteriji otpornosti na požar

Kriteriji koji se prate prilikom ispitivanja otpornosti na požar pojedinih konstruktivnih elemenata su njihova;

- Nosivost (R) - svojstvo elementa da zadrži svoju projektiranu nosivost i u slučaju požarnog opterećenja;
- Cjelovitost (E) - svojstvo elementa da održi svoju funkciju odvajanja pri sprječavanju širenja plamena;
- Izolacija (I) - svojstvo elementa da spriječi razvoj visokih temperatura na strani koja nije izložena direktnom gorenju.



Slika 7 Kriteriji otpornosti na požar

Nosivost označava sposobnost konstruktivnog elementa da pod mehaničkim djelovanjima može izdržati izloženost požaru, s jedne ili više strana, određeni vremenski period, bez gubitka konstrukcijske stabilnosti. Kao kriterij otkaza nosivosti propisuje se prekoračenje ganičnog progiba ($L^2/400d$ [mm]), kod elemenata izloženih savijanju, ili pak granično vertikalno skraćenje ($h/100$ [mm]) kod vertikalno opterećenih elemenata.

Svojstvo cjelovitosti, E, sposobnost je razdjelnog elementa konstrukcije da izdrži izloženost požaru samo s jedne strane te spriječi prijenos na stranu koja nije izložena. Takav element mora spriječiti prolazak plamena i vrućih plinova jer oni mogu uzrokovati paljenje površine elementa koja nije izložena. Kao kriterij otkaza uzimaju se pukotine ili otvori koji se javljaju na neizloženoj strani te mogu uzrokovati zapaljenje. Provjera se provodi na način da se na primjećenu pukotinu prisloni komadić vate koji se može i ne mora zapaliti i prema tome se donosi zaključak o cjelovitosti elementa.

Posljednji kriterij, izolacije, I, govori o sposobnosti elementa da izdrži izloženost požaru samo s jedne strane i spriječi prijenos istog zbog značajnog prijenosa topline na neizloženu stranu.

Kriterij otkaza je promjena prosječne temperature površine elementa. Ako prosječna temperatura na neizloženoj strani elementa poraste za $\Delta T = 140 \text{ K } (^{\circ}\text{C})$, ili pak lokalna vrijednost na izloženoj strani elementa dosegne vrijednost $\Delta T = 180 \text{ K } (^{\circ}\text{C})$, može se reći da je kriterij izolacije podbacio.

Svaki od navedenih kriterija iskazuje se u minutama, promatramo vrijeme koje je proteklo a da su svi ili neki od zahtijevanih kriterija uspjeli očuvati svoja svojstva i funkciju.

Također, ispitivanje se može prekinuti zbog očuvanja sigurnosti osoblje ili kako bi se spriječilo moguće oštećenje ispitne opreme ili kada smo već dobili tražene rezultate.

Na temelju navedenih kriterija, materijali se svrstavaju u razrede otpornosti na požar. Oznaka razreda otpornosti na požar sadržava slovnu oznaku uz koju stoji brojana vrijednost. Slovna oznaka označava koliko kriterija pojedini element sadrži, nosivost (R), cjelovitost (E), izolaciju (I), a brojana vrijednost – 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 je minimalno vremensko razdoblje u kojem element ostaje otporan na požarno opterećenje.

Primjerice, oznaku R nosit će nosivi elementi bez funkcije odvajanja, EI – nenosivi elementi s funkcijom odvajanja dok će oznaka REI značiti da je u pitanju nosivi element s funkcijom odvajanja.

3 EKSPERIMENTALNI RAD

Kao što je prethodno navedeno, cilj rada je analizirati utjecaj PUR pjene kao gorivog polimernog toplinsko-izolacijskog sloja na otpornost na požar LSF panela u uvjetima standardiziranog požara. Oba panela su bila obložena sa po dva sloja gips-vlaknastih ploča razreda reakcije na požar A1 te opterećena istim opterećenjem od 22,5 kN/m'. Zbog toga je u diplomskom radu provedeno eksperimentalno istraživanje podijeljeno u dva dijela kako slijedi:

1. termogravimetrijska analiza PUR pjene koja se koristila u sustavima LSF panela
2. ispitivanje otpornosti na požar dvaju LSF panela
 - a. LSF panel bez ispune
 - b. LSF panel s PUR toplinsko-izolacijskim slojem kao ispunom

3.1 Termogravimetrijska analiza PUR pjene

3.1.1 Općenito o TGA

Termogravimetrijska analiza je vrsta ispitivanja u kojoj se masa tvari mjeri kao funkcija temperature. Tvar ili predmet koji se ispituje podvrgnut je kontroliranom izlaganju temperature koja raste prema određenom tempu. Termogravimetrijska analiza koristi se za procjenu materijala koji pri promjeni temperature reagiraju promjenom mase, odnosno razgrađuju se, reduciraju te oksidiraju. Rezultati su prikazani kao graf u ovisnosti promjene mase, u postocima i temperature u stupnjevima Celzija odnosno Kelvina, odnosno krivuljom – termogramom. Dodatni podatak na grafu čini brzina promjene mase ispitivanog uzorka koja se izražava u postotku po minuti.[24]

Postoji više vrsta termogravimetrijskih analiza, poput izotermne, dinamičke i kvazistatičke analize. Ipak, najkorištenija vrsta TGA je dinamička, tako da je uvriježeno nazivanje dinamičke TGA, samo TGA. [14]

Ispitivanja se provode u posebno opremljenim pećima koje su konstruirane tako da imaju konstantnu temperaturu u samom središtu peći, koriste plin za pročišćavanje umjesto običnog zraka kako bi on imao što manji utjecaj na gorenje, a kad je to potrebno, ispitivanja se provode i u vakuumu. Rast temperature po minuti povećava se ili smanjuje ovisno o dostignutoj fazi požara,

kad se približavamo fazi koja može donijeti nova saznanja, požar se usporava na način da se temperatura diže sporije, kako bismo mogli preciznije proučiti ponašanje materijala. [14]

Razlike u provedbi ispitivanja su brojne, počevši od plina koji se koristi kao atmosfera za gorenje, koncentracije tih plinova, do dodatnih analiza koje se pridodaju termogravimetrijskoj. Zasad se pretežno koriste dušične atmosfere, kao i uvjeti običnog atmosferskog zraka, dok su ispitivanja s prisustvom dodatnog kisika rijetka.

Mikulčić i dr. (2019.) [25] provode ispitivanje s TG analizom u sedam različitih vrsta atmosfera, povećavajući temperature za 20 K po minuti sve do finalne temperature od 1073 K, odnosno približno 800 °C. Dolaze do zaključka da se promatrana poliuretanska pjena raspada većom brzinom u uvjetima inertne atmosfere (100% N₂), ali u uvjetima oksidativne atmosfere krajnji rezultat daje manju masu, što je bitno za napomenuti jer se eksperimentalno ispitivanje u ovom radu provodilo u atmosferi s 40% N₂ a preostali postotak od 60 % je bio običan zrak.

Jiao i dr. [26] su u svom radu provodili ispitivanje TG analize i u običnom zraku i u struji dušika te zaključili da se proces razlikuje po postojanju više faza degradacije PUR-a pri struji običnog zraka. Također, postojanje kisika u običnom zraku, vremenski je ubrzalo proces degradacije. Ipak, kao što je navedeno u 3.1.1., Mikulčić i dr. (2019.) [25] iznose da krajnja masa ostala pri završetku ispitivanja također ovisi o atmosferi u kojoj je ispitivana i tako u atmosferi običnog zraka preostaje manji postotak mase nakon gorenja.

Termogravimetrijska analiza PUR pjene gustoće $\rho = 45 \text{ kg/m}^3$ provedena je uređajem naziva Q500 proizvođača TA Instruments. Ispitivanje je provedeno s konstantnim zagrijavanjem od 20°C po minuti, počevši od sobne temperature, do 600 °C. Pri ispitivanju nije korišten plin za pročišćavanje već se koristio običan atmosferski zrak, kako bi dobili uvid u ponašanje u realnim uvjetima.

3.2 Ispitivanje otpornosti na požar panela

Eksperimentalni dio rada sadrži analizu otpornosti LSF panela na standardno požarno opterećenje simulirano ISO 834 krivuljom a prema normi HRN EN 1363-1.[27] Kao što je već rečeno. Analizirane su dvije kompozicije LSF panela:

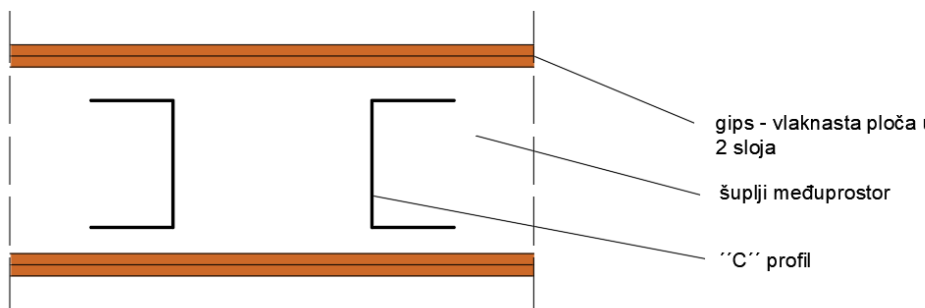

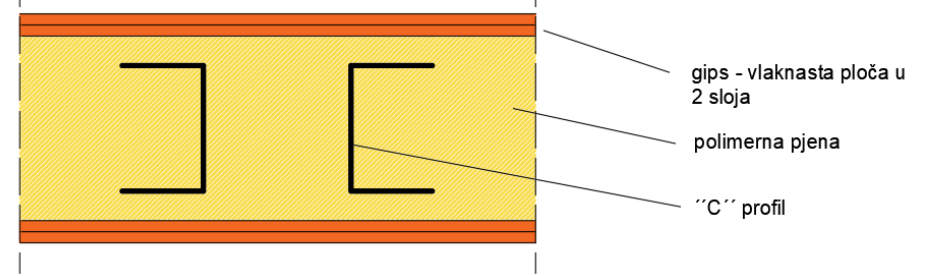
1. LSF panel bez ispune
2. LSF panel s PUR toplinsko-izolacijskim slojem kao ispunom

Laboratorijsko ispitivanje lagano kompozitnih panela provodilo se u skladu ili djelomično u skladu sa sljedećim normama:

- HRN EN 1363-1:2020 - Ispitivanje otpornosti na požar [27]
- HRN EN 1365-1:2012 Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata – 1. dio: Zidovi (EN 1365-1:2012). [23]

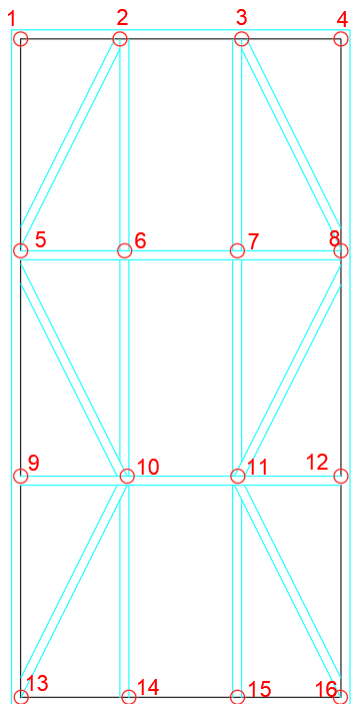
Uzorci ispitanih nosivih pregradnih zidova sastavljeni su od čeličnih tankostijenih profila koji su obostrano obloženi s dva sloja gips-vlaknastih ploča. Uzorci su dimenzija 1550 mm x 3000 mm x 185 mm. Jedan od uzoraka, Panel 2 ispunjen je poliuretanskom pjenom koja služi kao toplinska izolacija, dok je Panel 1 prazan. U Tablici 2 prikazane su kompozicije analiziranih panela.

Tablica 2 Razlike između Panela 1 i Panela 2

Naziv uzorka	Sastav uzorka	Naneseno opterećenje
Panel 1		 22,5 kN/m'
Panel 2		

Nosiva konstrukcija izrađena je od rešetkasto postavljanih „C“ profila dimenzija presjeka 89x42 mm, koji su dobiveni savijanjem iz traka pocinčanog lima debljine 0,95 mm, kvalitete S 550 GD + Z275. Uzorci sadrže ukupno 4 vertikalna, 4 horizontalna profila i 6 dijagonalno postavljanih

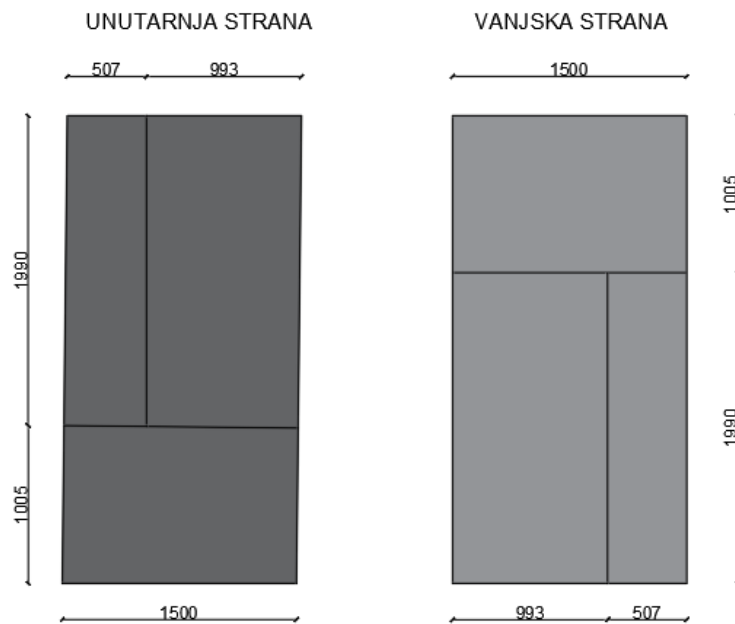
profila. Vertikalni nosivi profili postavljeni su na međusobnom osnom razmaku od 486 mm, a horizontalni na 985 mm. Između horizontalnih i vertikalnih profila, na 6 mjesta su postavljene dijagonalne ukrute izrađene iz istovjetnih „C“ profila, a kod Panela 2 postoji i ispuna poliuretanskom pjenu.



Slika 8 Pozicije čvorova na konstrukciji

Po obodu nosive konstrukcije sa jedne i druge strane u dva sloja pričvršćene su trake od gips-vlknaste ploče širine 40 mm i debljine 12,5 mm.

Na tako pripremljenu nosivu konstrukciju obostrano su postavljene ploče tipa Firepanel A1, debljine 12,5 mm, proizvođača James Hardie (Fermacell) [28], u dva sloja. Slojevi su izrađeni od ploča maksimalnih dimenzija 1250x2000 mm. Vanjski sloj ploča je ugrađen na način da sadrži horizontalne i vertikalne spojeve (Slika 6). Ploče su postavljene na način da je izbjegnuto preklapanje spojeva ploča između slojeva. Unutarnja strana panela izložena je požarnom opterećenju proizvedenom u peći, dok je vanjska strana neizložena.



Slika 9 Preklapanje gips-vlaknastih ploča



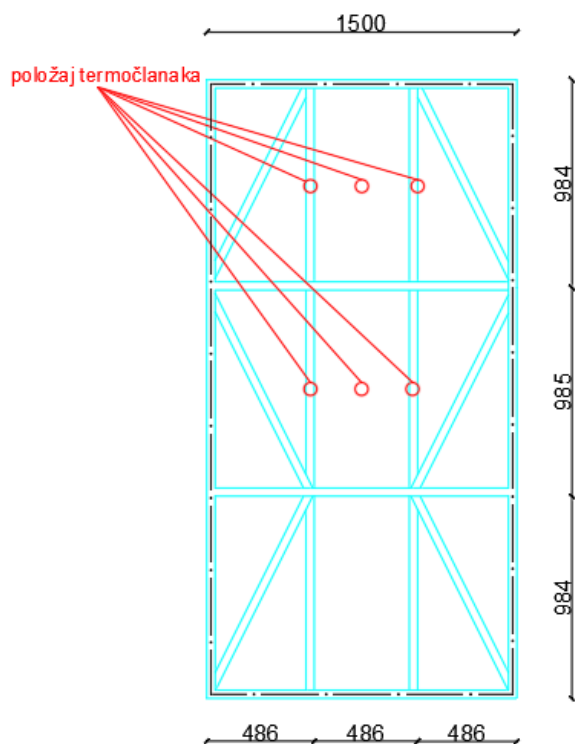
Unutarnji šuplji prostor između ploča panela, konkretnije Panela 2, ispunjan je dvokomponentnom PUR pjenuom sljedećih svojstava; gustoće 45 kg/m^3 s odstupanjem $\pm 5 \%$. Toplinska vodljivost je u rasponu $0,02 - 0,023 \text{ W/mK}$, a razred reakcije na požar je E, prema specifikacijama dobivenim od strane proizvođača. Injektiranje PUR pjene u panele provedeno je niskotlačnom pumpom, pritiskom od 5-10 bara i cijeli je panel ispunjen u vremenskom razdoblju od sat vremena.

3.2.1 Provedba ispitivanja

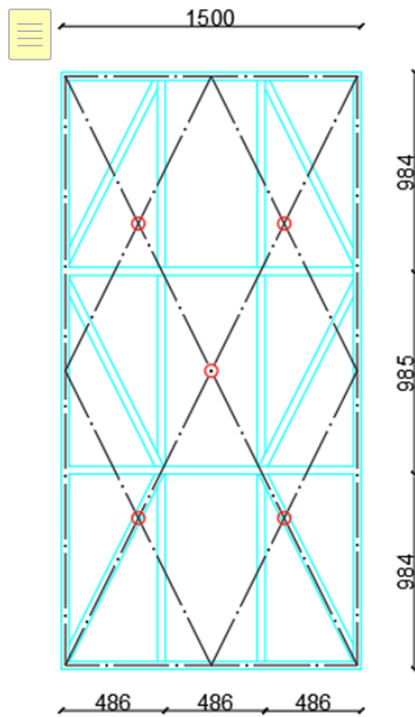
Zagrijavanje u peći određeno je po standardnoj temperaturnoj krivulji, u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020.[27]

Požarna peć omogućava standardnu izloženost ispitnih uzoraka požaru s obzirom na toplinsku izloženost i tlak, a temperatura se u požarnom prostoru peći ostvaruje pomoću šest plamenika na tekuće gorivo (lož ulje), u skladu sa normom HRN EN 1363-1:2020.[27] Temperatura zraka u ispitnom prostoru 24 sata prije požarnog ispitivanja održavana je na temperaturi od $20 (\pm 5)^\circ\text{C}$. Temperatura u peći mjerena je sa šest ravnomjerno raspoređenih termoelemenata tipa K (NiCr-Ni), čiji je vrući spoj učvršćen u geometrijskom centru ploče u

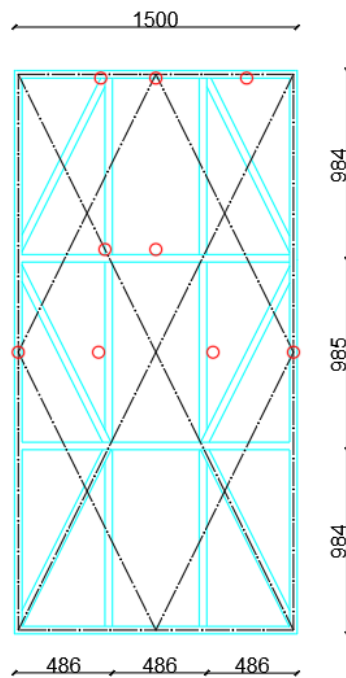
skladu s normom HRN EN 1363-1:2020.[27] Termoelementi su bili pozicionirani na način da nisu u kontaktu s otvorenim plamenom iz plamenika te da su 100 mm udaljeni od vatrom izložene strane ispitivanog uzorka, prikaz na Slici 6. Osim navedenih termoelemenata, postavljeni su i članci za mjerenje promjene temperatura na neizloženoj strani uzorka, prikazani na Slikama 7, 8 i 9.



Slika 10 Čelična konstrukcija analiziranih LSF panela te vertikalni položaj termočlanaka ugrađenih za praćenje temperature kroz poprečni presjek panela



Slika 11 Prikaz položaja termočlanaka za mjerenje srednje temperature na neizloženoj strani (+ $\Delta 140K$)

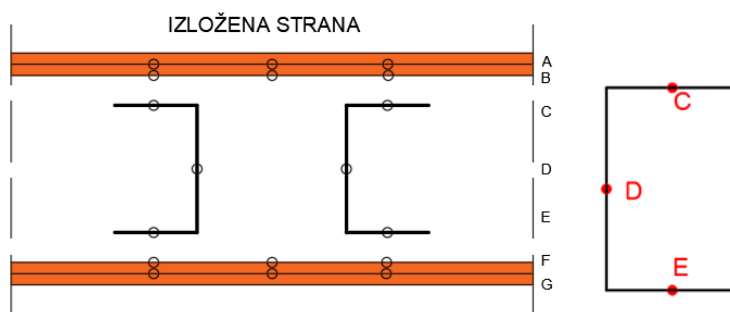


Slika 12 prikaz položaja termočlanaka za mjerenje srednje temperature na neizloženoj strani (+ $\Delta 180K$)



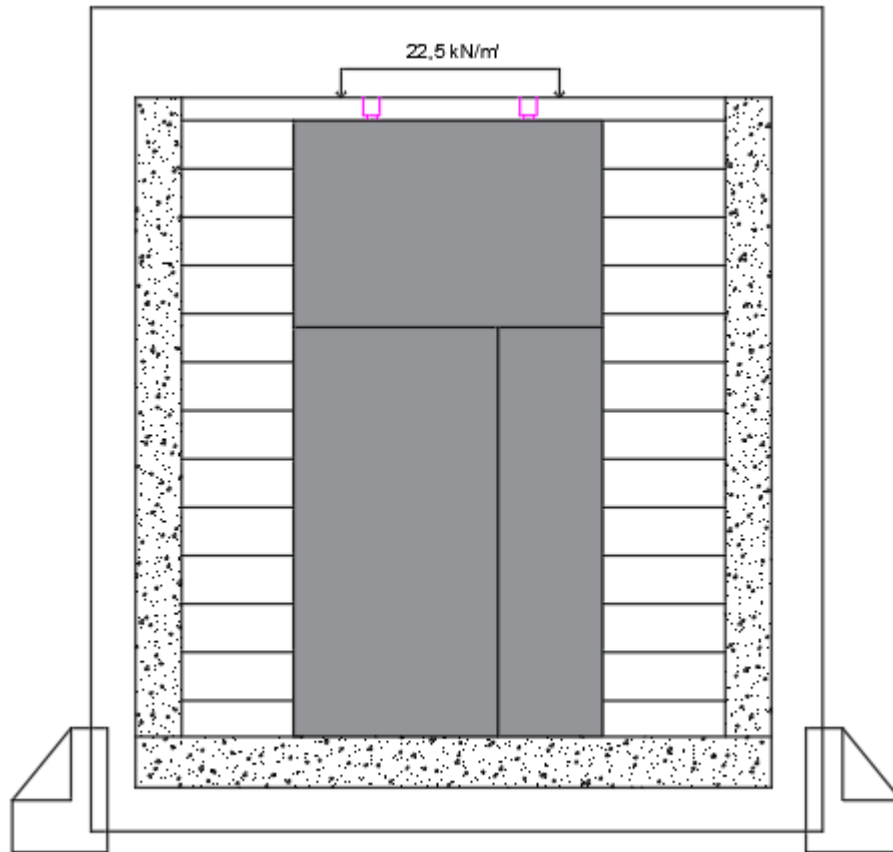
Slika 13 Požarna peć s ugrađenim ispitnim uzorkom i termočlancima na neizloženoj strani

Također, osim na izloženoj i neizloženoj strani uzorka, kako bismo pratili porast temperature kroz sve komponente panela, termočlanci su postavljeni i unutar uzorka, na čelične profile nosive konstrukcije te između ploča obloge uzorka, Slika 10. Postavljeni su u funkciji mjerenja temperature unutar konstrukcije, kako bismo dobili više informacija o ponašanju izoliranog i neizoliranog uzorka.



Slika 14 Prikaz pozicija unutarnjih termočlanaka po presjeku

Uzorak je postupno opterećen prije početka ispitivanja. Potrebno opterećenje od 22,5 kN postignuto je 20 minuta prije početka te je održavano cijelim tokom ispitivanja



Slika 15 Prikaz mjernih točaka za vertikalnu deformaciju



Mjerene su i vertikalne deformacije. Dvije mjerne točke postavljene su uz slobodne krajeve uzorka (Slika 15) te je praćen vertikalni pomak horizontalne grede za raspodjelu opterećenja uzorka. Ispitivanje je trajalo do naglog porasta vertikalne deformacije koja bi upućivala na brzi slom i urušavanje konstrukcije.

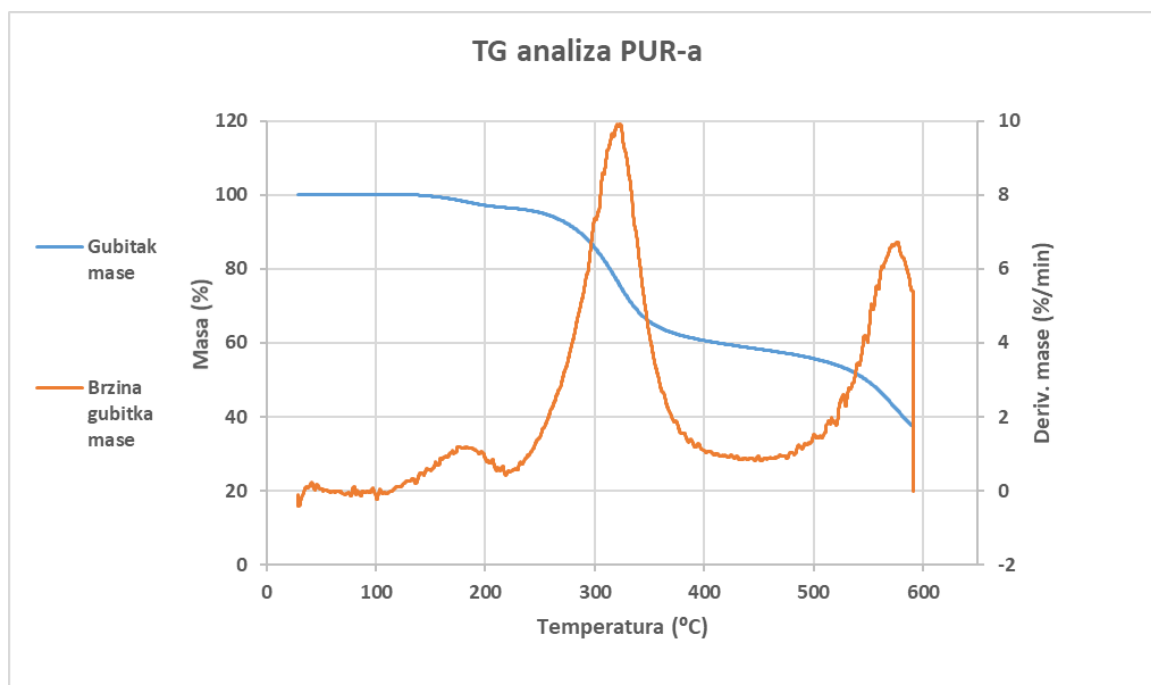
Pri ispitivanju panela u svrhu ovog rada, deformacije i temperature ispitnih uzoraka bilježene su u intervalima od 1 minute. Ispitivanja su zaustavljena u trenucima u kojima je bilo koji od navedenih kriterija otpornosti zadovoljen.

Ugrađeni uzorak u okviru ispitne peći je prije ispitivanja bio u laboratoriju gdje su uvjeti okoline održavani na približno 50% relativne vlažnosti i 20°C.

4 REZULTATI ISPITIVANJA

4.1 Rezultati termogravimetrijske analize PUR pjene

Slika 16 prikazuje gubitak mase PUR-a pri termogravimetrijskoj analizi, prikazan plavom krivuljom, a narančasta krivulja je diferencijalni prikaz gubitka mase, odnosno brzina gubitka mase. [26][25]



Slika 16 Termogram PUR-a

Krivulja prikazuje karakterističan izgled za ispitivanje provedeno u atmosferi koja sadrži kisik, već primijećen kod autora Mikulčić i dr. (2019.) [25]. Vidljiva su dva vrhunca koji predstavljaju dvije faze gorenja poliuretana. Te faze su raspad poliuretana na hlapljive tvari i talog te naknadni raspad tog taloga na još hlapljivih plinova i čađu. Dvije faze se u ovom slučaju odvijaju pri temperaturama od približno 325 °C i 580 °C.

Gubitak mase, odnosno plava krivulja na grafu na Slici 12 na kraju ispitivanja doseže vrijednost od 37,3%. Ta vrijednost označava da je nakon gorenja kao ostatak od ukupne, 100-postotne mase, ostalo samo 37,3 %. Značajniji gubitak mase događa se na temperaturama višim od 300°C, gdje PUR pjena gubi većinu svoje mase, dok je pri temperaturama do približno 150 °C ona

stabilna. Možemo zaključiti da iako svojim gubitkom mase PUR pjena ne pokazuje zavidnu toplinska stabilnost, gubitak mase je endotermna reakcija, što znači da se za njezino odvijanje mora utrošiti određena energija. Energija koja se za to troši u požaru je određena količina topline, koja je u tim trenucima spriječena od širenja dalje po elementu i na taj način kontrolira gorenje.

4.2 Rezultati ispitivanja otpornosti na požar panela

4.2.1 Panel 1

4.2.1.1 Vizualna opažanja

Panel 1, laganokompozitni panel bez ispune ispitivan je prvi, a ukupno trajanje ispitivanja je u trajanju od 94 minute i 20 sekundi. Nakon 4 min 30 s od početka ispitivanja, kroz ostakljeni prozorčić opažaju se prve promjene na izloženoj strani elementa, potamnili su spojevi te površina uzorka, premaz na spojevima ploča ekspandira. U 7. minuti ispitivanja izložena je površina ploče u potpunosti potamnila, a u 21. minuti ista je pobijelila. Do 51. minute nema značajnijih promjena, a onda mjestimično otpada prvi sloj ploča, a unutarnji tamni. U 82. minuti se otvara i djelomično otpada drugi sloj ploča, kroz čije otvore je vidljiva nosiva čelična konstrukcija. Opterećenje od 22,5 kN je održavano do kraja 92. minute. Ispitivanje je nastavljeno do 95. minute održavanjem standardne krivulje požara bez održavanja početne sile.

Detaljniji opis tijeka ispitivanja nalazi se u Tablici 3.

Tablica 3 Opažanja tijekom ispitivanja Panela 1

Vrijeme (min:s)	Strana*	OPAŽANJE
00:00		Početak ispitivanja.
04:30	PI	Potamnili spojevi te površina uzorka. Izlazi ekspandirajući materijal na spojevima ploča (premaz na spojevima ploča).
06:10	PI	Površina ploča potpuno potamnila.
20:10	PI	Površina ploča ponovo potpuno pobijelila. Ekspandirani premaz mjestimično pobijelio.
30:20	PI, PN	Nema značajnih promjena na uzorku.
35:10	PI	Povećavaju se zazori na spojevima ploča prvog sloja.
44:20	PI	Odvajaju se ploče prvog sloja na spojevima na sredini uzorka.

50:20	PI	Mjestimično otpada prvi sloj ploča – počinje tamniti unutarnji sloj ploča na tom dijelu.
77:10	PI	Otvara se spoj na pločama drugog sloja.
81:10	PI	Otvara se te djelomično otpada drugi sloj ploča, kroz otvore je vidljiva čelična nosiva konstrukcija.
93:10	PN	Prekid dodavanja opterećenja na uzorku. Zbog brze vertikalne deformacije uzorka i otežanog namještanja potrebne sile opterećenja.
94:20		Prekid ispitivanja.

*PI je oznaka za stranu panela izloženu požaru, a PN neizloženu.

Iz opisanog u tablici vizualnih opažanja može se zaključiti da je element tijekom ispitivanja zadovoljio kriterije integriteta, može se klasificirati kao E90.

Na Slikama 13-15 prikazan je izgled Panela 1 i njegovih dijelova nakon ispitivanja i uklanjanja iz požarne peći. Općenito najoštećenijim dijelom konstrukcije možemo smatrati sredinu uzorka. Na strani izloženoj požaru preklap između spojenih ploča nalazio se na donjoj trećini visine. Napredovanjem požarnog opterećenja, mjesto preklopa bilo je prvo mjesto popuštanja te prolaska topline prema drugoj ploči. Zahvaljujući najvećoj koncentraciji energije upravo na tom mjestu, srednja trećina uzorka je pretrpjela najveću štetu.

Osim popucalih gips-vlaknastih ploča, vidljiva su oštećenja i na čeličnoj konstrukciji, odnosno na čvorovima konstrukcije. Najoštećeniji elementi su vertikalni stupovi u sredini uzorka koji su osim požarnog opterećenja na sebe preuzeli i vertikalno opterećenje od 22,5 kN te srednji spojevi vertikalnih elemenata s horizontalnim – čvorovi 6,7,10,11, prema pozicijama na Slici 5. Poznato je da čelik omekšava na povišenim temperaturama te svojim omekšavanjem gubi čvrstoću, osobito na temperaturama višim od 600 °C, gdje je granica popuštanja čelika smanjena za 50%. Zbog dostizanja takvih temperatura u ovom ispitivanju, dolazi i do izvijanja i deformacija. [29]



Slika 17 Panel 1 neposredno nakon ispitivanja



Slika 18 Čvorovi 6 i 7 nakon ispitivanja



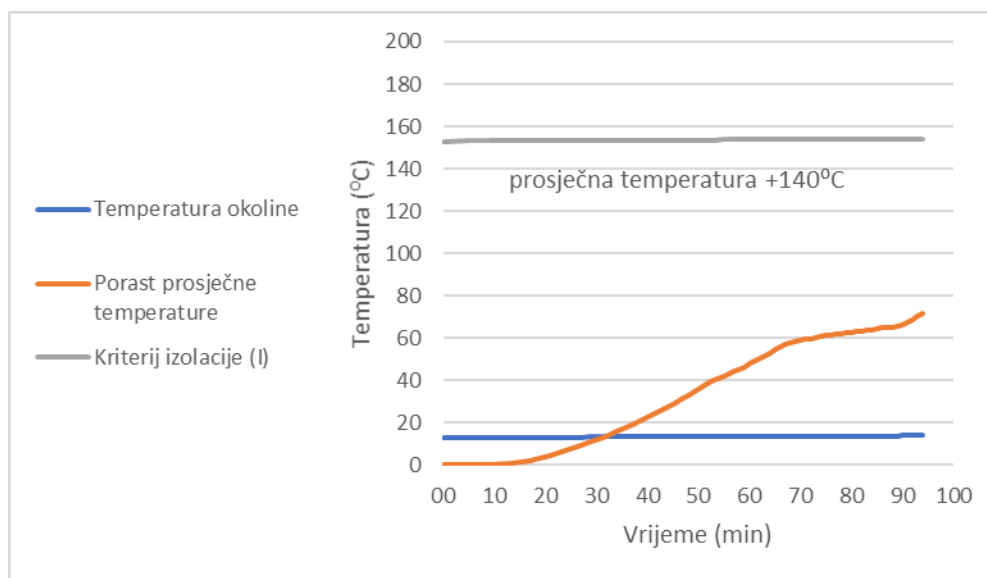
Slika 19 Čvor 10 nakon ispitivanja



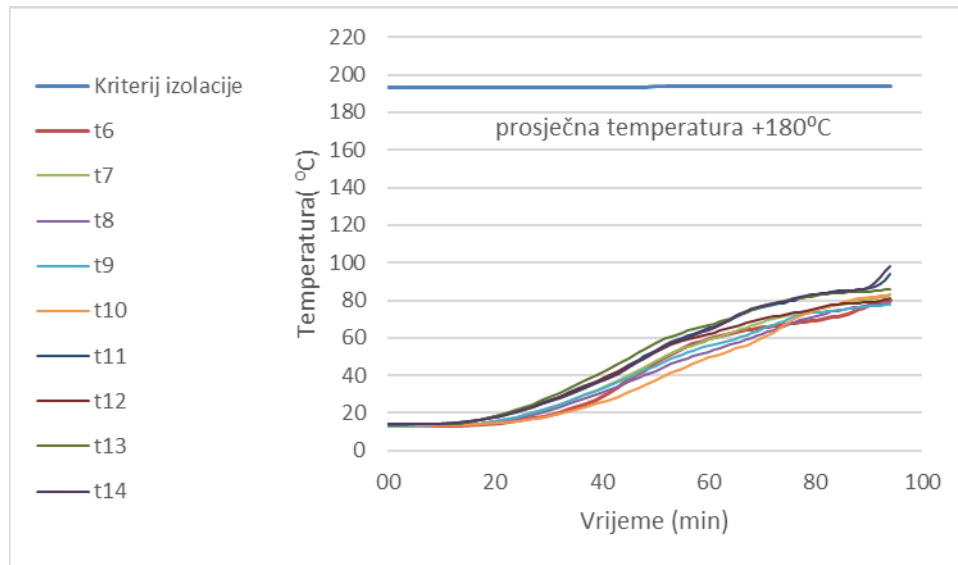
4.2.1.2 Razvijene temperature

Na neizloženoj strani uzorka

Kod ispitivanja kriterija izolacije (I) ispituje se razvoj temperature na neizloženoj strani elementa. Graf na Slici 20 prikazuje porast prosječne temperature zabilježene na termočlancima postavljenim na neizloženu stranu uzorka, prema Slici 11, u usporedbi s temperaturom okoline. Kriterij otkaza za ispitivanje izolacije, kod porasta prosječne temperature iznosi $\Delta T = 140\text{ K}$. U slučaju Panela 1 postignute temperature su znatno manje, što panel čini sigurnim po pitanju izolacije, odnosno kriterij je zadovoljen. Prilikom ispitivanja kriterija izolacije, osim kriterija porasta srednje temperature za 140 K, postoji i kriterij po kojem se temperatura na izloženoj strani uzorka ne smije povisiti za vrijednost veću od 180 K. Analiza je prikazana na Slici 21, gdje je vidljivo da nijedan od izdvojenih termočlanaka ne prelazi graničnu vrijednost temperature i stoga zadovoljava oba ispitana kriterija izolacije, odnosno može se klasificirati kao I 90.



Slika 20 Prikaz razvoja temperature na neizloženoj strani elementa

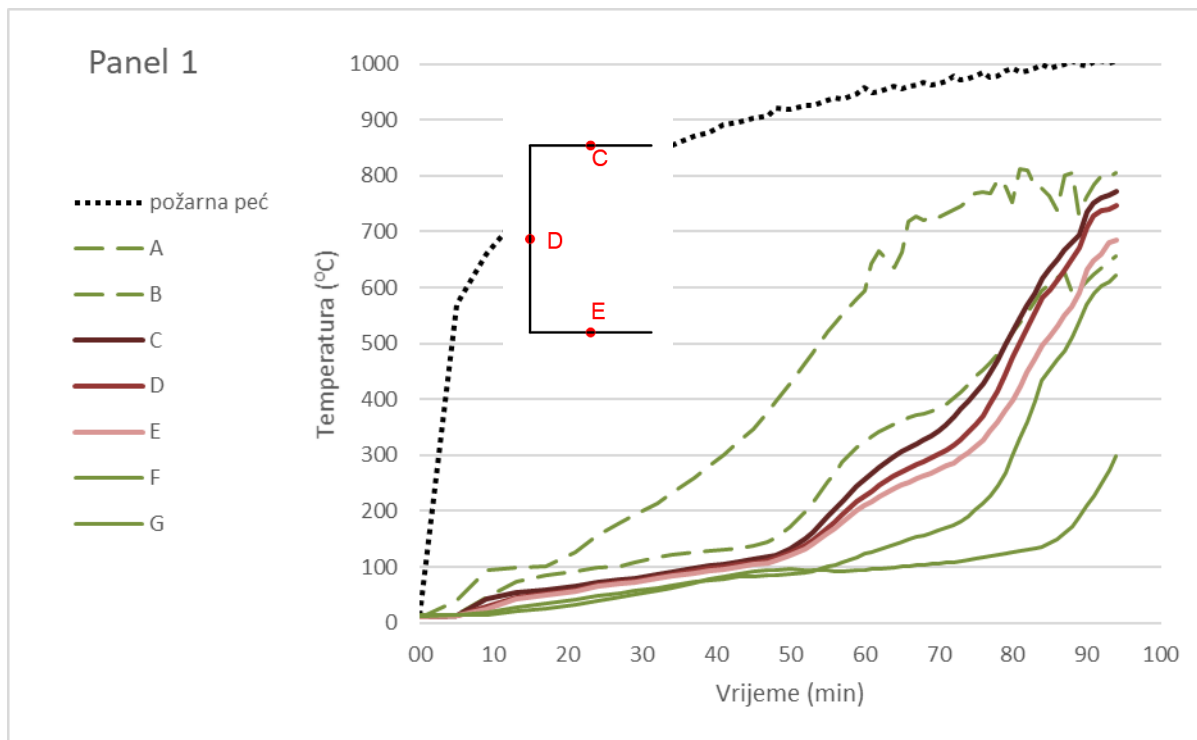


Slika 21 Prikaz razvoja temperature na izloženoj strani elementa


Kroz uzorak

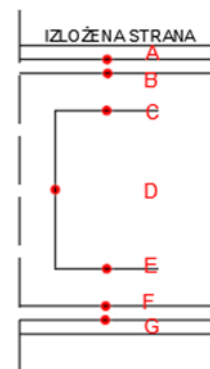
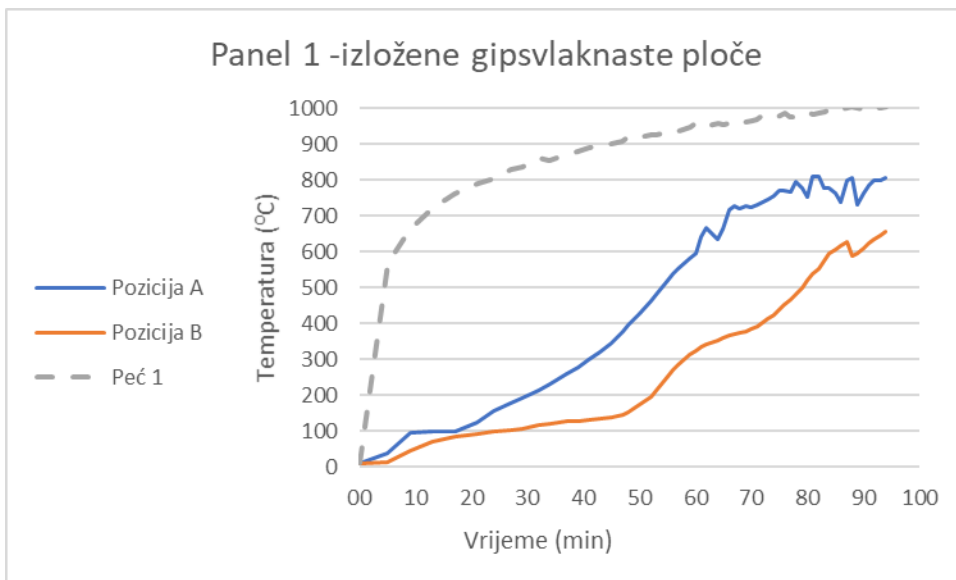
Slika 22 prikazuje temperature na termočlancima u svim pozicijama koje su postavljene na Panelu 1. Krivulja na pojedinoj poziciji predstavlja srednju vrijednost temperature. To je graf ovisnosti temperature o vremenu koji za usporedbu sadrži i temperature postignute u peći, koje simuliraju standardnu požarnu krivulju. Zelene pune i crtkane linije predstavljaju pozicije na gips-vlaknastim pločama ispitivanog uzorka, dok crvene linije, prema gradaciji intenziteta boje pokazuju temperature na čeličnom C profilu. Takav profil sastoji se od hrpta i dvaju pojasnica, prikazano unutar grafa.

Budući da je čelik dobar vodič topline, razlike u temperaturama na pojasnicama i hrptu istog profila relativno su male, ali svejedno možemo govoriti o višoj temperaturi na poziciji C, koja predstavlja vruću pojasnicu, pozicija E hladnu, a pozicija D, odnosno hrbat profila je veza između njih.



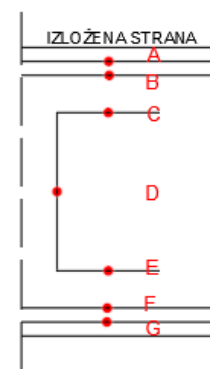
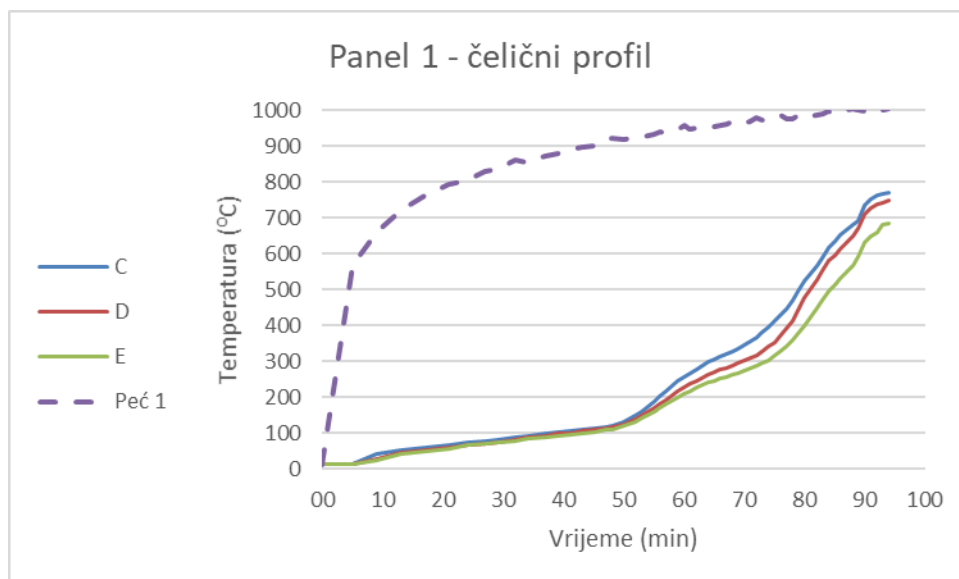
Slika 22 Panel 1 – temperature kroz sve pozicije


 razvoj temperatura prikazan na Slici 23 pokazuje ponašanje tipično za gips-vlaknaste ploče. Termočlanak na poziciji A pokazuje veće vrijednosti temperature, jer je na manjoj udaljenosti od požara, ali razvoj temperature do otprilike 100 °C sličan je za obje ploče. Konkretno, u 15. minuti termočlanak A mjeri približno 100 °C, dok članak B mjeri 85 °C. Razlog sličnom razvoju temperature do te točke je to što ona odgovara početku isparavanja kemijski vezane vode u gipsu. Isparavanje vode usporava rast temperature na neko vrijeme jer se energija troši na taj proces. Nakon isparavanja, dolazi do reakcija dehidracije gipsa, ali i raspadanja vlakana, što u krajnjem slučaju dovodi i do raspadanja ploča. U trenutku pucanja prve gips-vlaknaste ploče, u 50. minuti ispitivanja, dolazi do prodora topline i u drugi sloj te se dižu i temperature na poziciji B. Usprkos tome, gotovo kroz cijelo ispitivanje, a osobito do 50. minute razlike u temperaturama ploča i temperature postignute u peći su velike. To nam ukazuje na činjenicu da su gips-vlaknaste ploče uspješno apsorbirale toplinu proizvedenu u požaru i pokazale se kao dobar toplinski izolator.



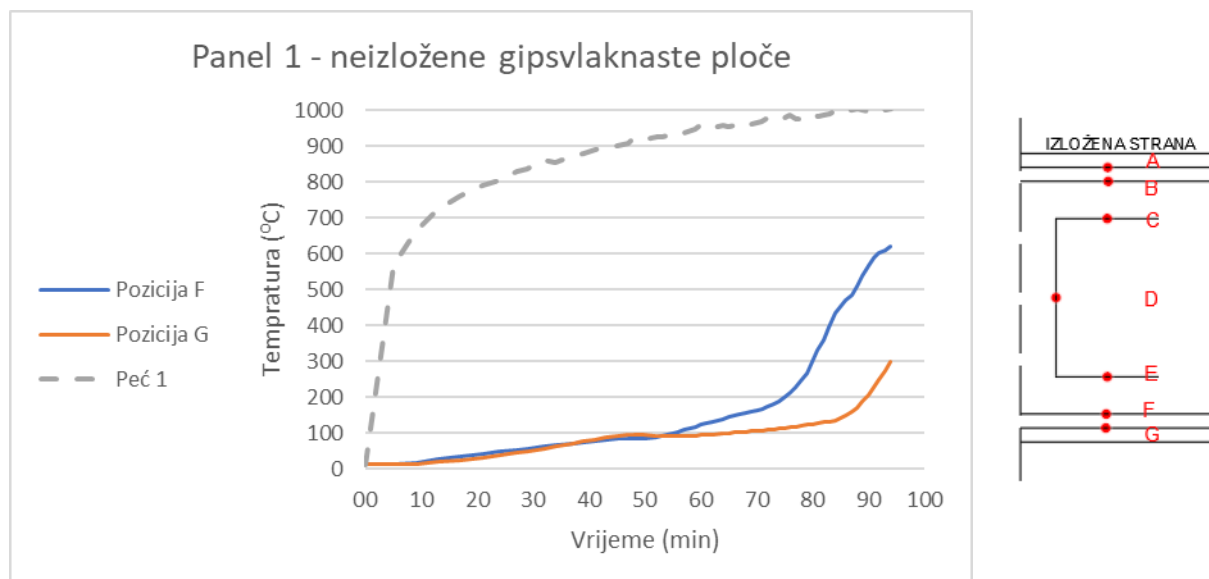
Slika 23 Prikaz temperatura kroz ploče na strani izloženoj požaru

Slika 24 prikazuje razvoj topline kroz čelični C profil, u usporedbi s temperaturom postignutom u peći. Do znatnijeg porasta temperature dolazi nakon 50. minute, nakon spomenutog pucanja prve gips-vlaknaste ploče, nakon čega temperatura postiže vrijednosti više od 100 °C i u čeličnom profilu. Razvoj temperature u čeličnom profilu sličan je razvoju na poziciji B u gips-vlaknastoj ploči. Pozicije C, D i E nalaze se na čeličnom profilu, na jednakim razmacima.. Svojstva toplinske vodljivosti čelika omogućavaju širenje topline po cijelom profilu, u relativno sličnim vremenskim razmacima i vrijednostima temperature. Na dijagramu je vidljivo da su razlike u temperaturama između točaka, odnosno pozicija C (685 °C) i E (750 °C), na samom kraju ispitivanja u intervalu do 100 °C



Slika 24 Prikaz temperatura kroz čelični profil

Na Slici 25 prikazan je razvoj temperature na pozicijama F i G, odnosno u gips-vlknastim pločama koje su najudaljenije od požarnog opterećenja. Kao i u slučaju izloženih ploča, prema ovim podacima možemo zaključiti da su se pokazale kao dobri izolatori. Plato na kojem nema promjena u temperaturi traje do otprilike 60. minute, nakon čega temperatura brže raste na poziciji F, dok se rast na poziciji G javlja tek nakon 85. minute. Odmak od 5 minuta od karakteristične točke, 50. minute na prijašnjim pozicijama označava udaljeniju poziciju od samog izvora plamena, ali odgovara trenutku prodora topline u unutrašnjost panela. Pri samom kraju ispitivanja vidljiva je velika razlika u temperaturama između prikazanih pozicija, konkretno, više od 300 °C.

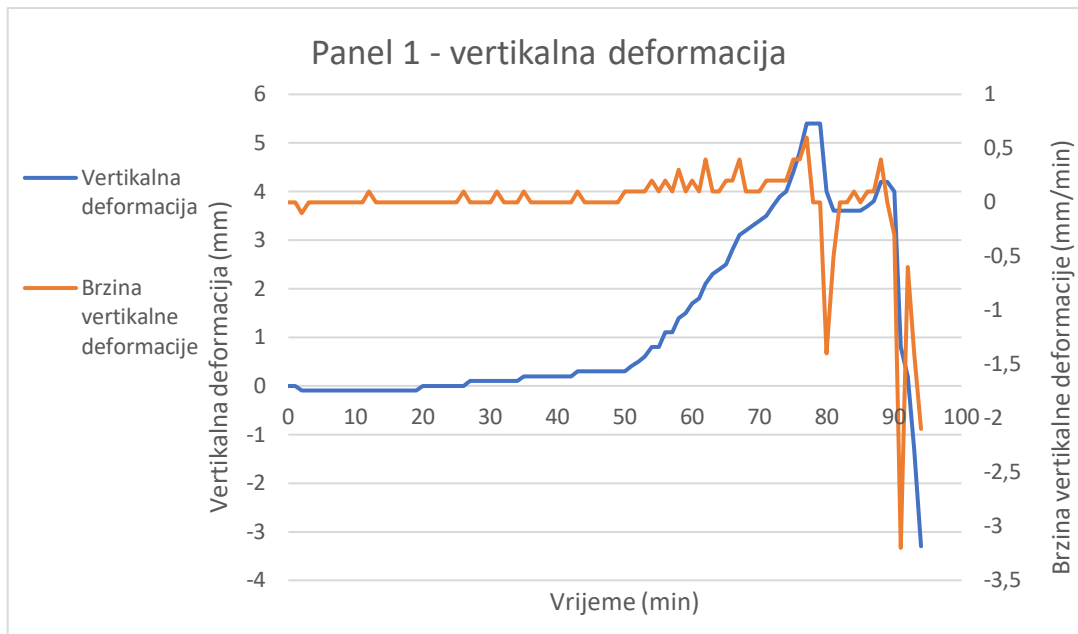


Slika 25 Prikaz temperatura kroz ploče na neizloženoj strani

Vertikalna deformacija

Kao što je spomenuto u točki 3.2., uzorci panela su osim na požar ispitivani i vertikalnim opterećenjem, kako bismo došli do zaključka o kriteriju nosivosti (R).

Pozitivne vrijednosti deformacija predstavljaju povećanje visine uzorka, dok negativne predstavljaju smanjenje istog u odnosu na početnu visinu. Prikaz deformacija dan je na Slici 26.



Slika 26 Prikaz vertikalnih deformacija u vremenu

Graf prikazuje vertikalnu deformaciju elementa izraženu u milimetrima i samu brzinu prirasta deformacija u odnosu na minute. Vidljivo je da se Panel 1 počinje ozbiljnije deformirati oko 50. minute ispitivanja, i to u pozitivnom smjeru grafa. Pozitivan predznak deformacije, odnosno povišenje uzorka u odnosu na početnu visinu. Takvo ponašanje može se objasniti širenjem čelika uzrokovano zagrijavanjem, što posljedično dovodi i do promjene dimenzija gips-vlknaste ploče, a time i cijelog panela. Kad bismo promatrali brzinu deformacija, ključni trenutak u ispitivanju bio bi oko 80. minute. Rapidno povećanje brzine deformacija ukazuje na potencijalni slom elementa. Da bi se spriječio potpuni lom elementa, u 93. minuti uklonjena je sila kojom je element bio opterećen kako bi se izbjegao potpuni slom. Kriterij za doseganje nosivosti kod vertikalno opterećenog elementa je njegovo skraćenje od $h/100$ mm (h -početna visina elementa), što bi u slučaju Panela 1 iznosilo gotovo 30 mm, a najveća dostignuta deformacija tijekom ispitivanja je 3,3 mm., što znači da do 90 minute panel zadovoljava kriterije nosivosti. Uz spomenuti kriterij vertikalnog skraćenja, postoji i kriterij procjene otpornosti prema brzini skraćenja koji iznosi $3h/1000$ mm/min, koji je također zadovoljen. Prema tome, panel se sa sigurnošću može klasificirati kao R90, a pitanje je, obzirom na brzi porast deformacije bi li mogao doseći 120 minuta.

4.2.1.4 Opći komentar na ponašanje Panela 1 tijekom ispitivanja otpornosti na požar

Negdje nakon 44. minute primijećeno je odvajanje na spojevima gips-vlaknastih ploča, a one su negdje nakon 50. minute počele pokazivati prve znakove otkazivanja – mjestimično otpadanje najizloženijeg sloja ploča. Temperatura u peći u tom trenutku dosegla je približno 920 °C, dok je temperatura na najizloženijoj gips-vlaknastoj ploči iznosila približno 460 °C. Istodobno dolazi i do utjecaja naprezanja od vertikalne sile te Panel 1 počinje pokazivati rast u vertikalnim deformacijama. Nakon prodora topline u uzorak, zbog pucanja ploče, temperature rastu u cijelom poprečnom presjeku, odnosno utjecaj topline je vidljiv na svakom elementu panela. Uzorak se linearno deformirao sve do približno 80. minute. U tom vremenskom razdoblju vizualno je opaženo otpadanje i drugog sloja ploča na izloženoj strani uzorka, te je čelična konstrukcija izložena direktnom plamenu. Nakon toga brzina vertikalnih deformacija raste i prijeti urušavanje konstrukcije.

Prema dobivenim rezultatima ispitivanja otpornosti na požar, uzorak Panela 1 može se klasificirati u razred REI 90, zbog svoje sposobnosti da u vremenu od 90 minuta očuva svojstva nosivosti, cjelovitosti te izolacije. Ovdje je potrebno naglasiti da je ispitivanje rađeno na manjem uzorku u odnosu na dimenzije zahtijevane normom HRN 1363-1 i HRN 1365-1 [23], [27], pa je za konačnu klasifikaciju potrebno provesti ispitivanje i na uzorku većih dimenzija (3000 x 3000 mm).

4.2.2 Panel 2

4.2.2.1 Vizualna opažanja

Ukupno trajanje ispitivanja panela ispunjenog poliuretanskom pjenom, Panela 2, je 90 minuta i 20 sekundi, ali je zbog naglog povećanja vertikalne deformacije mehaničko opterećenje uklonjeno u 50. minuti. U 4. minuti potamnili su spojevi i površina uzorka, a u 20. minuti površina je ponovno pobijelila. Do prvog pucanja i raslojavanja po horizontalnom spoju ploča dolazi u 27. minuti. Mjestimično otpadanje ploča događa se u 42. minuti, a par minuta kasnije, u 46. plamen izlazi iz svih spojeva i pukotina na pločama te dolazi i do gorenja polimerne pjene. Sve navedene promjene događaju se na izloženoj strani uzorka, u ispitnoj peći. Promjene su praćene kroz stakleni prozorčić smješten na bočnoj strani peći.

Opterećenje od 22,5 kN je održavano do 50 minute. Ispitivanje je nastavljeno održavanjem standardne krivulje požara bez održavanja početne sile. Plamenici peći su ugašeni u 68. minuti i nakon toga se ne održava standardna požarna krivulja, već se samo mjere temperature na uzorku. U 91. minuti se prekida mjerenje temperatura na uzorku. Detaljniji opis ispitivanja nalazi se u Tablici 4.

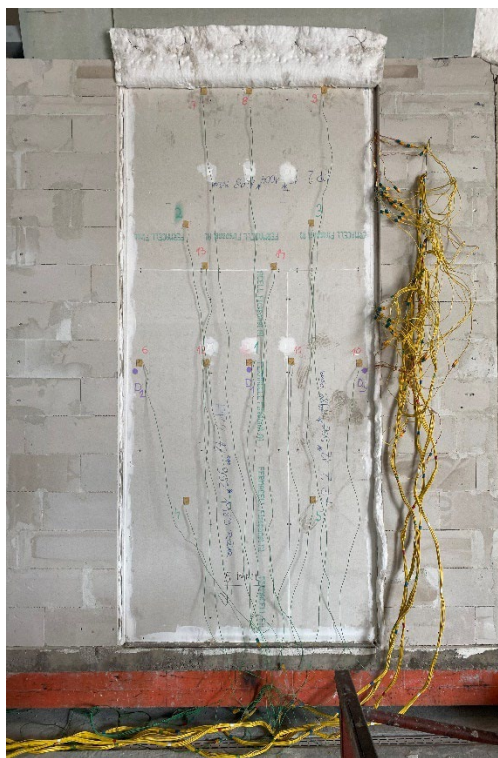
Tablica 4 Opažanje tijekom ispitivanja Panela 2

Vrijeme (min:s)	Strana*	OPAŽANJE
00:00		Početak ispitivanja.
03:10	PI	Potamnili spojevi te površina uzorka.
10:30	PI	Izlazi ekspandirajući materijal na spojevima ploča (premaz na spojevima ploča).
19:40	PI	Površina ploča ponovo potpuno pobijelila.
23:20	PI	Blaga deformacija površina ploča prema peći.
26:50	PI	Uslijed deformacija dolazi do pucanja i raslojavanja na sredini uzorka, horizontalnom spoju ploča.
33:40	PI	Povećavaju se zazorci na spojevima ploča prvog sloja.
40:20	PI	Odvajaju se kutovi ploča prvog sloja i vidljiv je drugi sloj ploča.
41:40	PI	Mjestimično otpada prvi sloj ploča – počinje tamniti unutarnji sloj ploča na tom dijelu.

45:20	PI	Izlazi plamen iz svih spojeva i pukotina na pločama, gori ispunjena od polimerne pjene.
53:20	PI	Otvora se te djelomično otpada drugi sloj ploča na sredini uzorka te je vidljiva nosiva konstrukcija i ispunjena uzorka.
54:10	PI	Otpao veći dio drugog sloja ploča, gori izolacije uzorka. Požarna krivulja peći je blago porasla (zbog gorenja uzorka).
60:10	PN	Na vanjskoj površini uzorka nisu vidljive nikakve promjene.
67:10	PI	Plamenici u peći su ugašeni. Nastavak mjerenja temperatura.
90:20		Prekid mjerenja temperatura. Prekid ispitivanja.

*PI je oznaka za stranu panela izloženu požaru, a PN neizloženu.

Iz opisanog proizlazi da je ispitivani Panel 2 zadovoljio kriterij integriteta tj. cjelovitosti, odnosno da se može karakterizirati kao E90.



Slika 27 Neizložena Panel 2 tijekom ispitivanja



Slika 288 Izgled Panela 2 nakon ispitivanja



Slika 29 Detalj popucalih ploča nakon ispitivanja



Slika 30 Detalj ostatka PUR-a

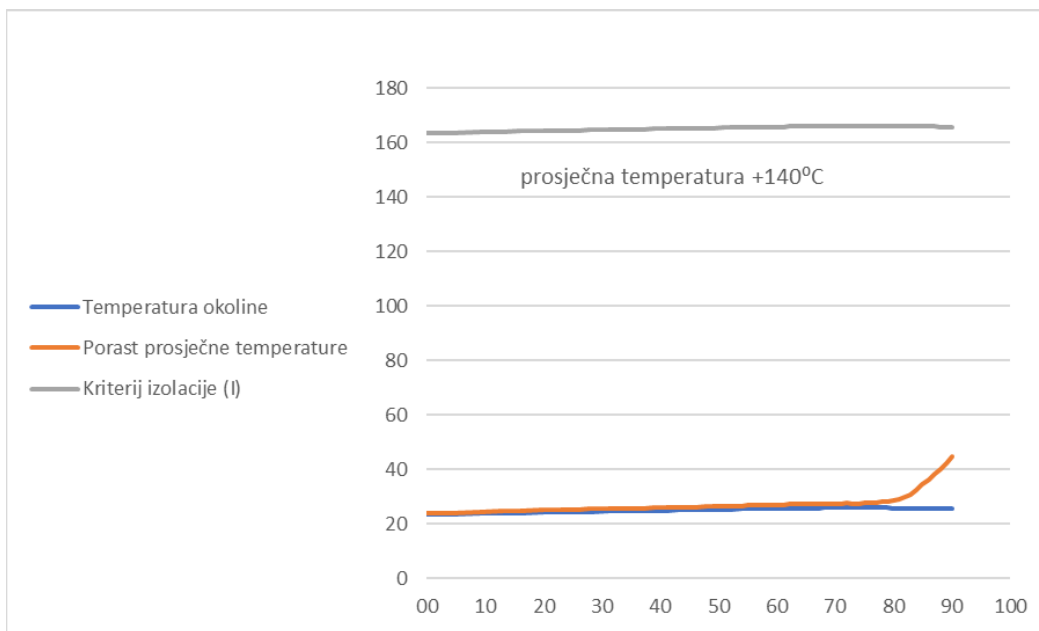
Slike 28-30 prikazuju i vizualno vidljivu degradaciju Panela 2 nakon ispitivanja. Gips-vlaknaste ploče su popucale i razlomile se na sitne komade, PUR pjena je izgubila velik postotak svoje mase, a ostatak mase zapravo čini čađa – nusprodukt gorenja. Čelična konstrukcija je također pretrpjela deformacije, a najviše dijelovi bočnih ukruta i čvorova vertikalnih stupova u spoju s ukrutama. Teško je govoriti od najoštećenijem dijelu panela, prema njegovu izgledu i boji jer je po cijeloj površini prisutan ostatak izgorjene PUR pjene, odnosno crna čađa.

4.2.2.2 Razvijene temperature

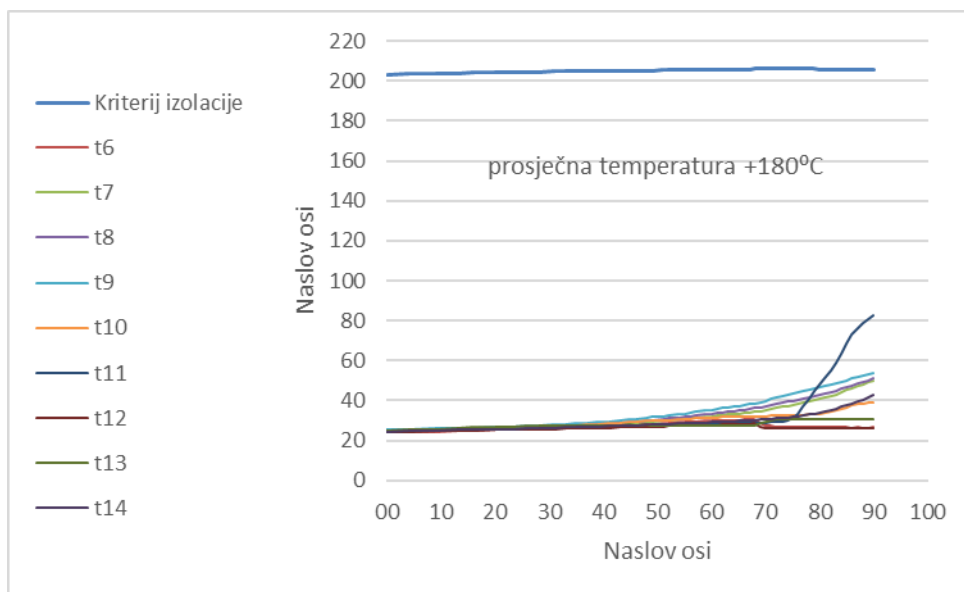
Na neizloženoj strani

Graf na Slici 31 prikazuje porast prosječne temperature na neizloženoj strani u usporedbi s temperaturom okoline. Kriterij otkaza za ispitivanje izolacije, kod porasta prosječne temperature iznosi $\Delta T=140$ K. U slučaju Panela 2 postignute temperature su znatno manje, što panel čini sigurnim po pitanju izolacije, odnosno kriterij je zadovoljen. Drugi aspekt kriterija izolacije je

porast temperature na izloženoj strani uzorka, koji ne smije biti viši od 180 K. Kriterij je također zadovoljen, a prikazan je na Slici 32.



Slika 31 Prikaz razvoja temperature na neizloženoj strani Panela 2



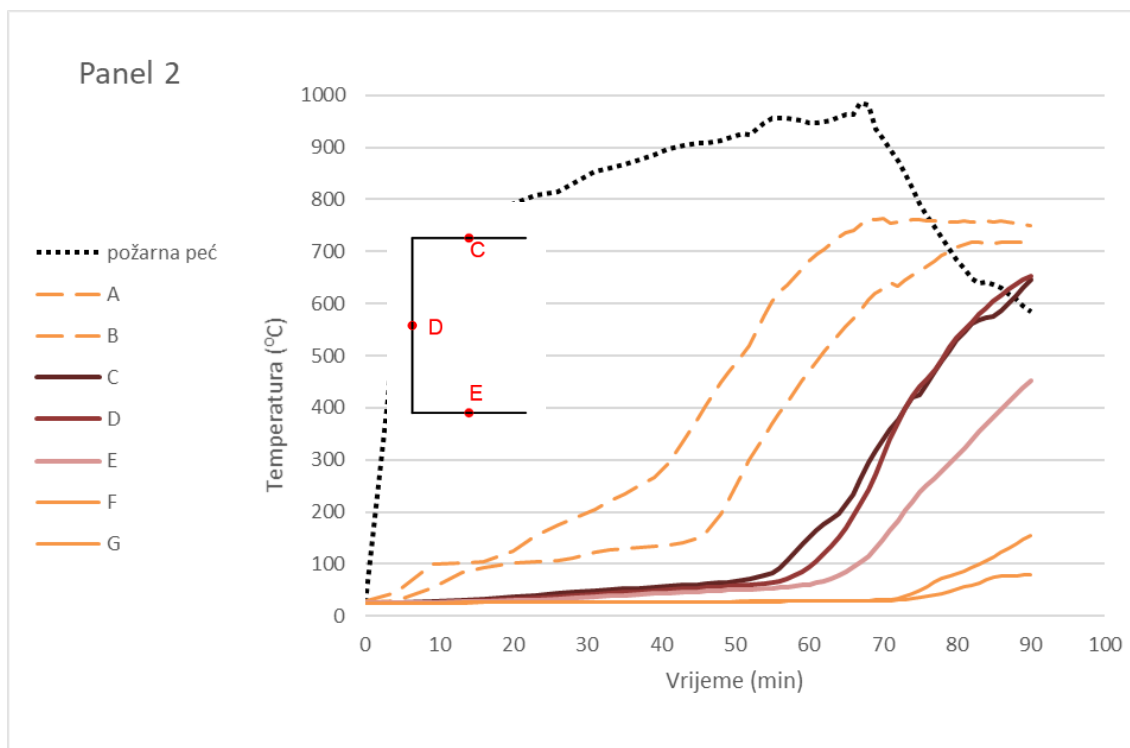
Slika 32 Prikaz razvoja temperature na izloženoj strani Panela 2

Rezultati sa Slika 31 i 32 pokazuju da prema kriteriju izolacije (I), ispitani Panel 2 može zadovoljiti uvjet od 90 minuta otpornosti na požar, odnosno da se može klasificirati kao I 90.

Kroz uzorak

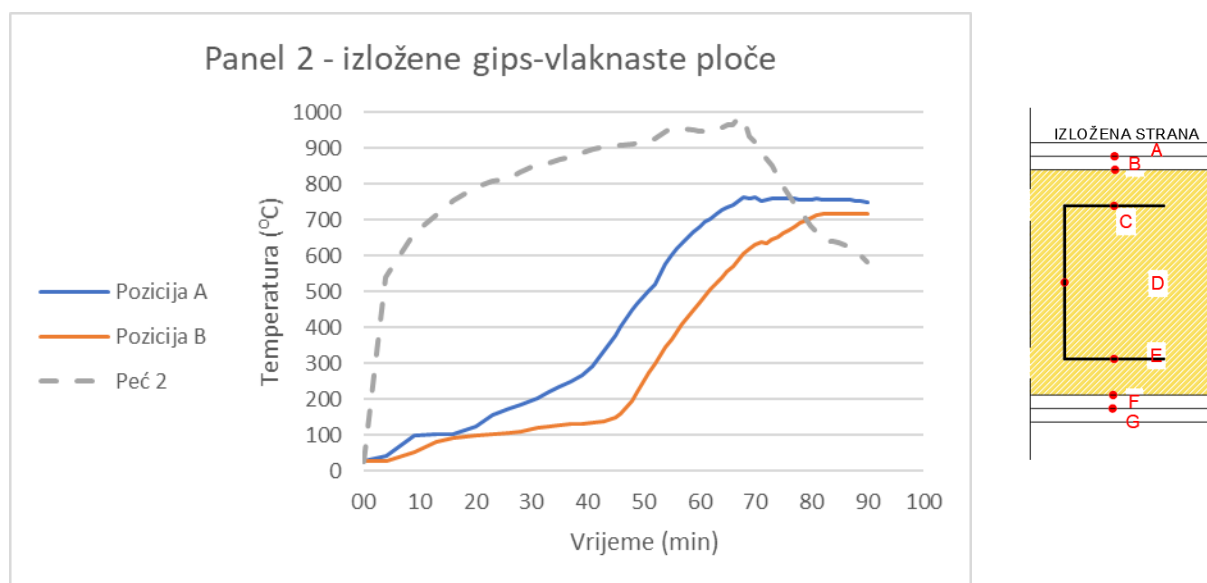
Slika 33 prikazuje temperature na termočlancima svih 7 mjernih pozicija kroz presjek elementa, u vremenskom razdoblju trajanja ispitivanja, odnosno 90 minuta. Svaka od krivulja koja predstavlja pojedinu poziciju zapravo je srednja vrijednost temperatura mjerenih na više termočlanaka na panelu, ali na istoj poziciji. Linije crtkane žutom bojom kao i puna žuta linija označavaju pozicije kroz gips-vlknaste ploče, A, B, F i G.

Čelični C profil sastoji se od svoga hrpta i dvije pojasnice. Pozicija D smještena je na hrptu, a C i E na pojasnicama. Pozicija C pokazala je najviše temperature i stoga ju možemo nazvati vrućom pojasnicom, dok je pozicija E hladna pojasnica, a pozicija D je veza između njih. Navedene pozicije označene su nijansama crvene boje, ovisno o toplini odnosno hladnoći pojasnica.



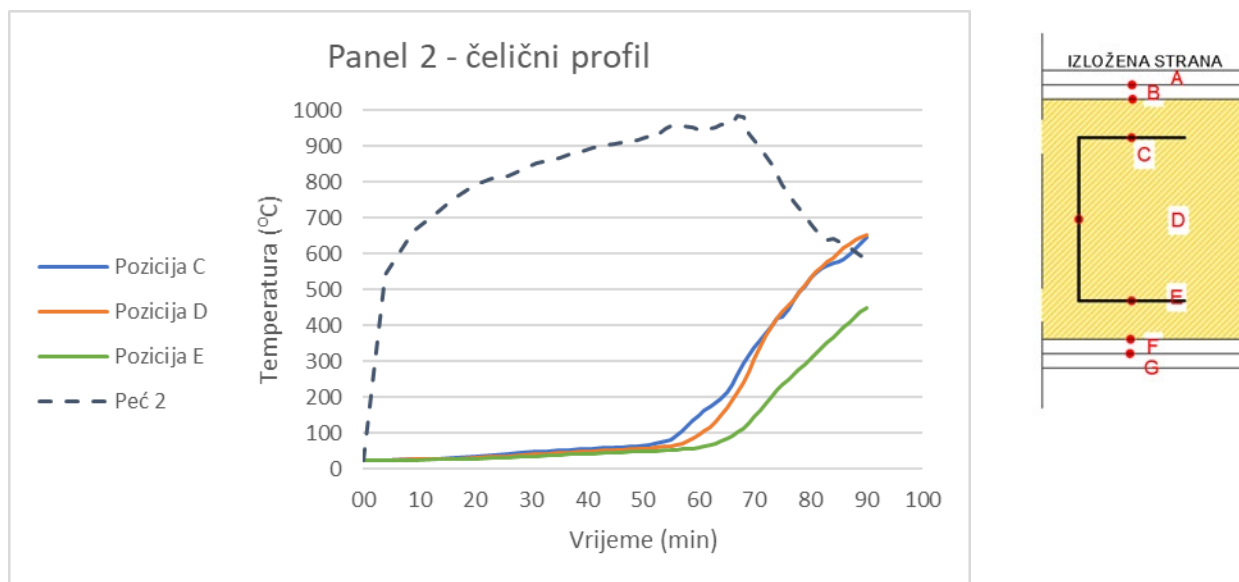
Slika 33 Panel 2 sve pozicije

Razvoj temperatura prikazan na Slici 34 pokazuje ponašanje tipično za gips-vlaknaste ploče. Oko 15. minute ispitivanja, ploče na pozicijama A i B počinju se temperaturno razdvajati. Termočlanak na poziciji A pokazuje veće vrijednosti temperature, jer je na manjoj udaljenosti od požara. Usprkos bržem rastu temperature na poziciji A, gips-vlaknasta ploča s termočlankom na poziciji B uspijeva održati plato od približno 140 °C do 45. minute. Nakon isparavanja vode iz ploča, dolazi do porasta temperature te ona na kraju ispitivanja doseže približno 700 °C kod obje ploče.



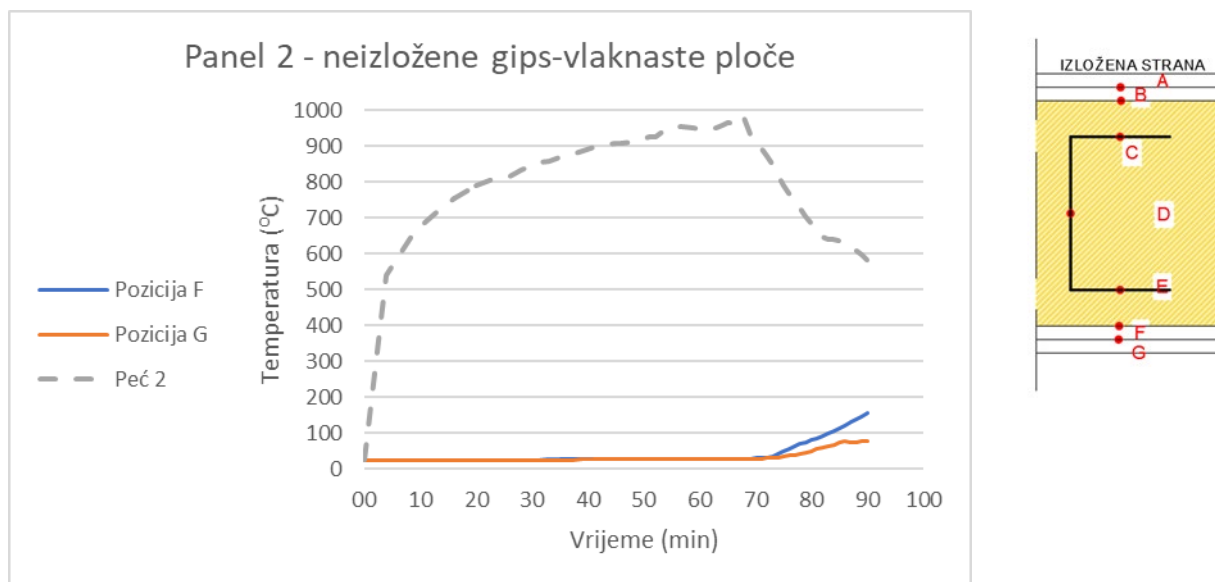
Slika 344 Prikaz temperatura kroz ploče na izloženoj strani elementa

Slika 35 prikazuje razvoj topline kroz čelični C profil u Panelu 2, ispunjenom poliuretanskom (PUR) pjenom, u usporedbi s temperaturom postignutom u peći. Temperatura u slučaju Panela 2 na čeličnom profilu doseže 100 °C tek oko približno 55 minuta od početka ispitivanja. Pozicije C i D pokazuju gotovo iste vrijednosti temperature, dok se pozicija E izdvaja od njih pokazujući manji temperaturni rast, odnosno manji utjecaj topline na tu poziciju. Na kraju ispitivanja vidljiva je razlika između pozicija C i D te pozicije E od približno 200 °C.



Slika 35 Prikaz razvoja temperature kroz čelični profil

Slika 36 prikazuje razvoj temperature na pozicijama F i G, odnosno u gips-vlaknastim pločama, koje su najudaljenije od požarnog djelovanja. U slučaju Panela 2, termočlanak na poziciji G, najudaljenijoj od požarnog opterećenja, tijekom cijelog ispitivanja nije dostigao temperaturu od 100 °C, dok je temperatura na termočlanku F prešla temperaturu od 100 °C tek pri kraju ispitivanja, odnosno oko 80. minute.

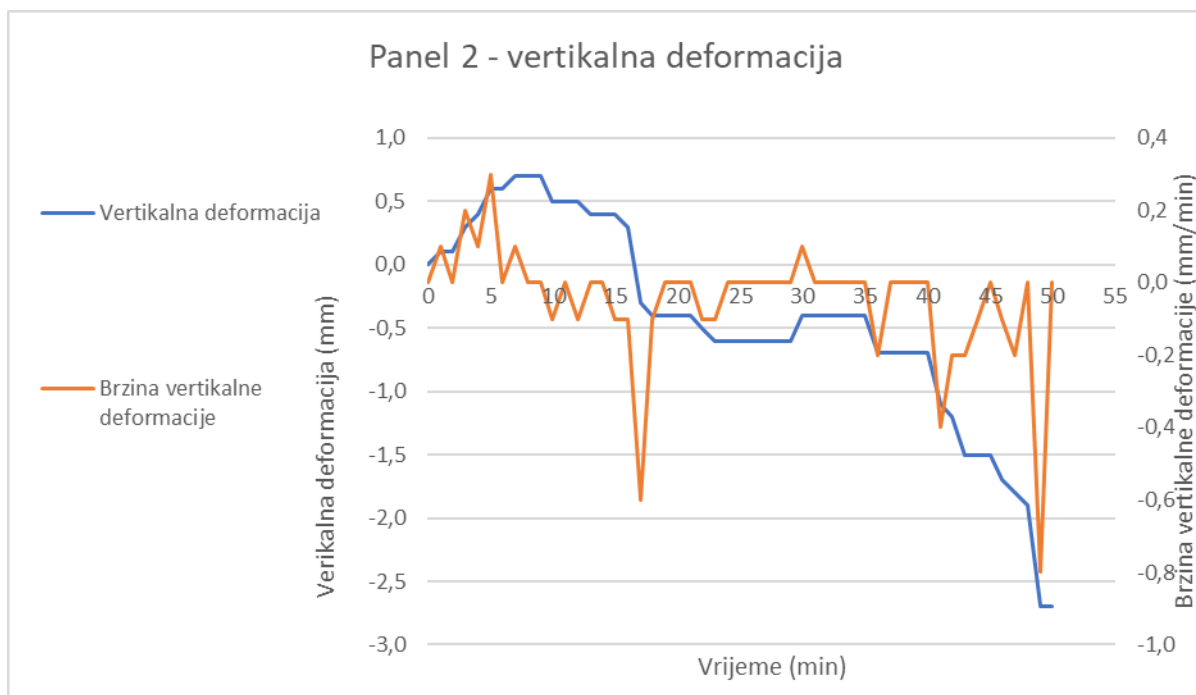


Slika 36 Razvoj temperature kroz ploče na neizloženoj strani

4.2.2.3 Vertikalna deformacija

Panel 2 je poput Panela 1 opterećen silom od 22,5 kN kako bismo mogli promatrati utjecaj opterećenja na vertikalnu deformaciju u požarnom opterećenju i procijenili vremensko razdoblje za koje je kriterij nosivosti (R) zadovoljen. Potrebno opterećenje postignuto je 20 minuta prije početka ispitivanja a održavano je do postizanja unaprijed dogovorenog progiba, između 3 i 4 milimetra, zbog očuvanja laboratorija i njegovih zaposlenika od potencijalne opasnosti.

Prema prikazu deformacija na Slici 37 vidimo da se uzorak, Panel 2 deformirao u kontinuitetu u smjeru primijenjenog opterećenja, osim između 5. i 15. minute u kojoj je prikazano širenje elementa, uzrokovano termalnim širenjem čeličnih profila. Brzina nastajanja vertikalnih deformacija počela je naglo rasti neposredno prije 50. minute, a tada je dostignuta i maksimalna deformacija od -2,7 milimetara te je ispitivanje prekinuto. Budući da je ispitivanje za doseganje kriterija nosivosti prekinuto oko 50. minute, Panel 2 se prema kriteriju R može klasificirati kao R45, odnosno element koji zadržava svojstva nosivosti u razdoblju od minimalno 45 minuta.



Slika 37 Prikaz vertikalne deformacije u vremenu

4.2.2.4 Opći komentar na ponašanje Panela 2 prilikom ispitivanja otpornosti na požar

Panel 2, ispunjen PUR pjenom pokazuje nešto drugačiji odgovor na utjecaj požarnog i vertikalnog opterećenja od ponašanja Panela 1.

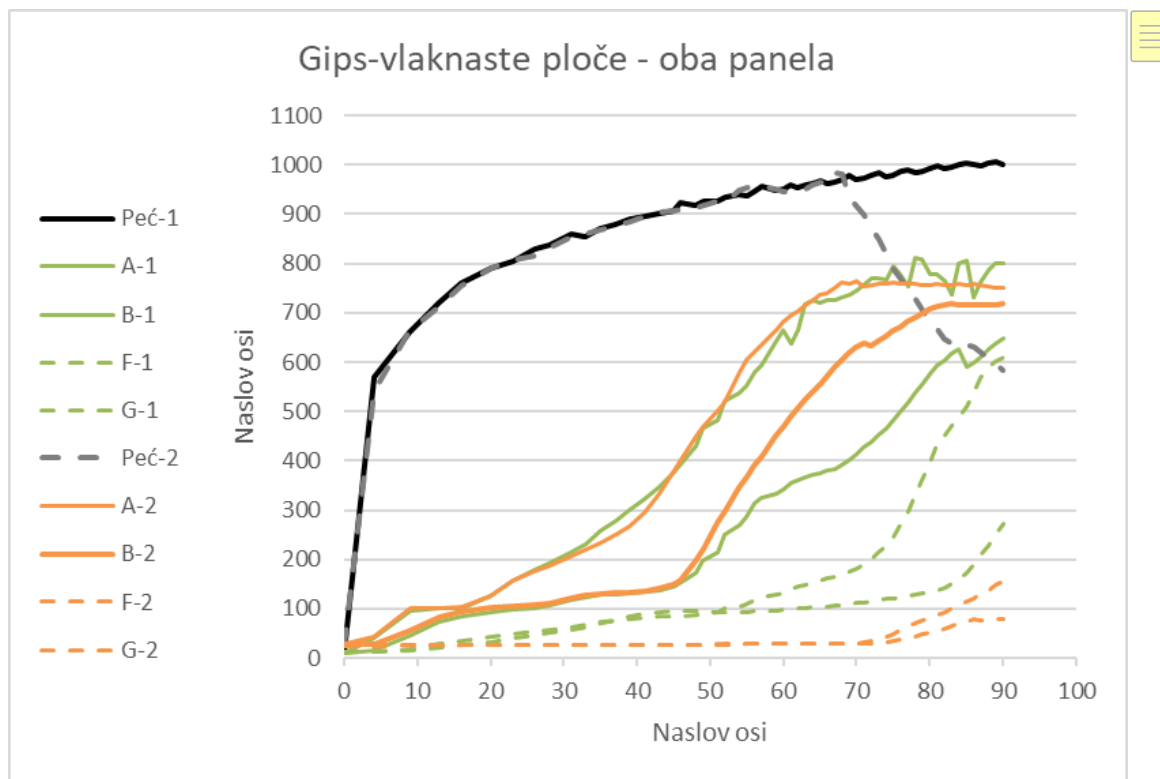
Uzimajući u obzir vertikalnu deformaciju, Panel 2 od početka pokazuje nešto drugačije ponašanje, jer prvih 15-ak minuta ispitivanja, pokazuje pozitivnu deformaciju, odnosno pomak mjernih elemenata prema gore, usprkos pritisku sile u suprotnom smjeru. Vizualno je također opaženo, u 24. minuti da se uzorak deformira blago prema peći. Uslijed deformacija dolazi do pucanja i raslojavanja na horizontalnom spoju uzorka već u 27. minuti. To omogućuje izravniji pristup plamena prema gips-vlaknastim pločama te ubrzo nakon toga počinje i rast temperatura u izloženim pločama. Do prvog otpadanja dolazi u 42. minuti, a drugi sloj ploča otpada 10-ak minuta kasnije. Vertikalna deformacija u tom vremenu raste i ubrzava se. Već oko 50. minute dosegnuta je maksimalna vertikalna deformacija dopuštena za taj uzorak te se opterećenje prekida. Nakon prodora plamena u unutrašnjost panela, te vrijeme prolazi na gorenje izolacijskog materijala, PUR pjene. Temperatura u peći je porasla zbog dostupnog goriva – PUR-a, ali na vanjskoj površini uzorka nisu zamijećene nikakve promjene.

Prema dobivenim rezultatima ispitivanja otpornosti na požar, uzorak Panela 2 može se klasificirati u razred EI 90, zbog svoje sposobnosti da u vremenu od 90 minuta očuva svojstva cjelovitosti i izolacije. Svojstvo nosivosti može se klasificirati kao R45 zbog uklanjanja vertikalne sile u 50. minuti, pa ne možemo znati kakvo bi bilo ponašanje panela za 90 minuta. Ovdje je potrebno naglasiti da je ispitivanje rađeno na manjem uzorku u odnosu na dimenzije zahtijevane normom HRN 1363-1 i HRN 1365-1, pa je za konačnu klasifikaciju potrebno provesti ispitivanje i na uzorku većih dimenzija (3000 x 3000 mm).

4.3 Usporedba i diskusija rezultata

4.3.1 Usporedba ponašanja gips-vlaknastih ploča kod oba panela

Na Slici 38 prikazana je usporedba temperatura mjerenih na gips-vlaknastim pločama za slučajeve oba panela te temperature u pećima pri pojedinom ispitivanju.



Slika 38 Usporedba gips-vlaknastih ploča

Uspoređujući ponašanje gips-vlaknastih ploča u uzorcima Panel 1 i Panel 2 možemo primijetiti određene sličnosti i razlike. Iznosi mjerenja termočlanaka na Panelu 1 gips-vlaknastih ploča izloženih požaru prikazani su zelenom bojom i punom linijom, dok su temperature Panela 2 prikazane žutim punim linijama. Temperature na neizloženoj strani Panela 1 prikazane su zelenom crtkanom linijom, dok su za Panel 2 linije žute i crtkane.

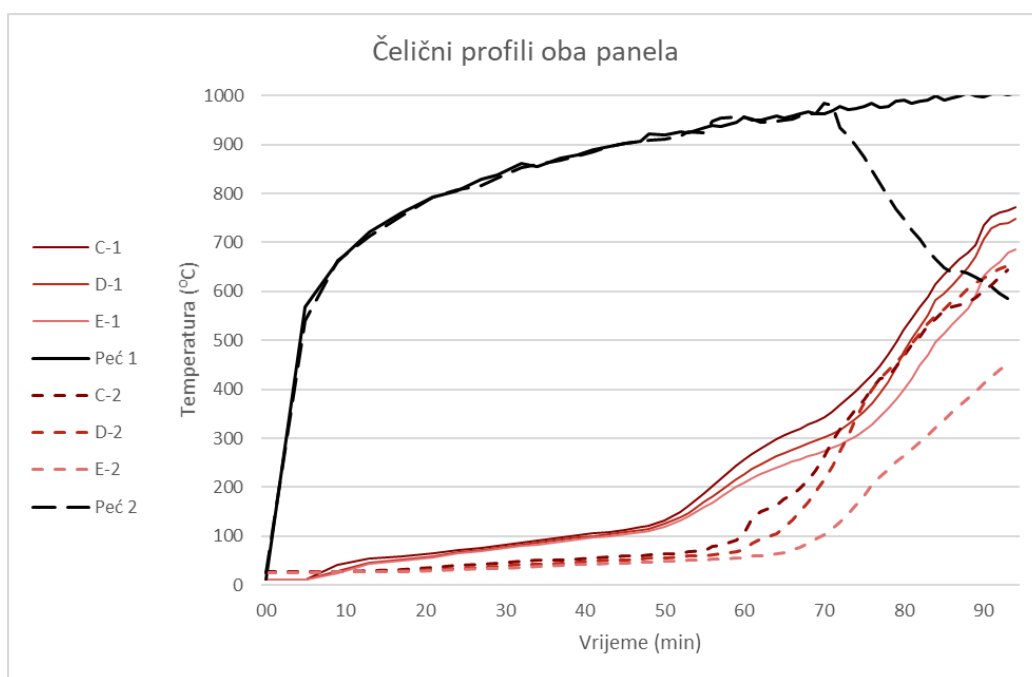
Jasno je vidljiv plato koji je dosegnut oko temperature od 100 °C na kojem počinje proces dehidracije. Kod pozicija koje su najbliže požarnom opterećenju temperature, sve do približno 50. minute ne pokazuju nikakve razlike, dok se nakon tog trenutka, Panel 1, odnosno neispunjeni panel pokazao nešto otpornijim, postižući niže temperature. Također, kad se prisjetimo vizualnih opažanja navedenih u točkama 3.5.3.1. i 3.5.4.1. i zaključaka iz literature navedenih u točki 2.2.3.

o ponašanju gips-vlaknastih ploča na povišenim temperaturama možemo zaključiti da izolacijski materijal ne djeluje povoljno na razvijanje pukotina, a samim time i rast temperature na spojevima gips-vlaknastih ploča i izolacijskog materijala.

Ipak, gledajući razvoj situacije na neizloženim gips-vlaknastim pločama, Panel 2 pokazuje bolje rezultate, što je posljedica izolacijskog svojstva PUR pjene i čađe koja je nastala njegovim gorenjem. Temperature na termočlancima ugrađenim na neizloženim pločama prelaze 100 °C tek nakon 80. minute, ili ju uopće ne prelaze, dok se kod neizoliranog Panela 1 prijelaz iznad 100 stupnjeva događa već oko 55. minute.

4.3.2 Usporedba ponašanja čeličnih profila kod oba panela

Na Slici 39 prikazane su temperature mjerene na pozicijama na čeličnim profilima u slučaju oba panela te vrijednosti temperatura postignutih u pećima za to vrijeme.



Slika 39 Usporedba čeličnih profila

Graf na Slici 39 daje usporedbu ponašanja C profila od hladno prešanog čelika u uvjetima požara, u okolišu ispunjenim PUR pjenom, a obloženim gips-vlaknastim pločama. Ponašanje

Panela 1 iskazano je punom linijom u nijansama crvene, dok je Panel 2 prikazan istim bojama, ali crtkanim linijama.

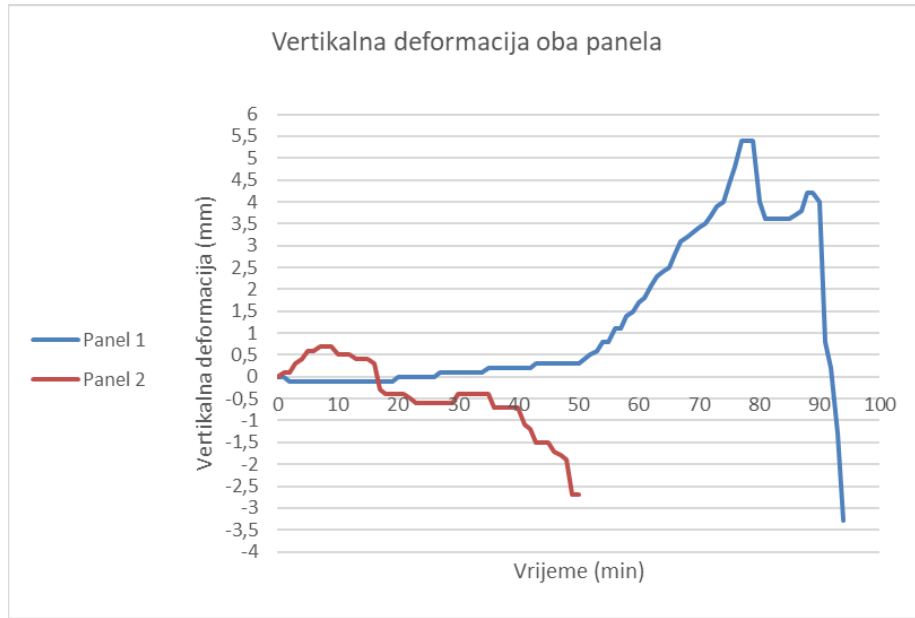
Na Panelu 1, nakon 50. minute, odnosno pucanja gips-vlaknastih ploča i prodiranja topline kroz uzorak, vidljiv je i utjecaj iste na temperaturu izmjerenu na čeličnim profilima. Temperature na sva tri mjerna mjesta rastu približno istim tempom te su i na kraju ispitivanja razlike u temperaturama unutar 90-ak stupnjeva.

Situacija kod Panela 2 nešto je drugačija, rast temperature kasni za približno 10 minuta od onog kod Panela 1, tako da se prelazak temperature od 100 stupnjeva događa oko 60. minute, a njega slijedi i kontinuirani rast temperature. U ovom elementu primijetit ćemo razliku u razvoju temperatura na mjernim mjestima na samom profilu, odnosno veću razliku u temperaturama vruće i hladne pojasnice, odnosno mjernih mjesta na pozicijama C i E. Izolacijska svojstva PUR pjene umanjila su svojstva toplinske provodljivosti čeličnog profila te je prijenos topline kroz čelični profil napredovao sporije.

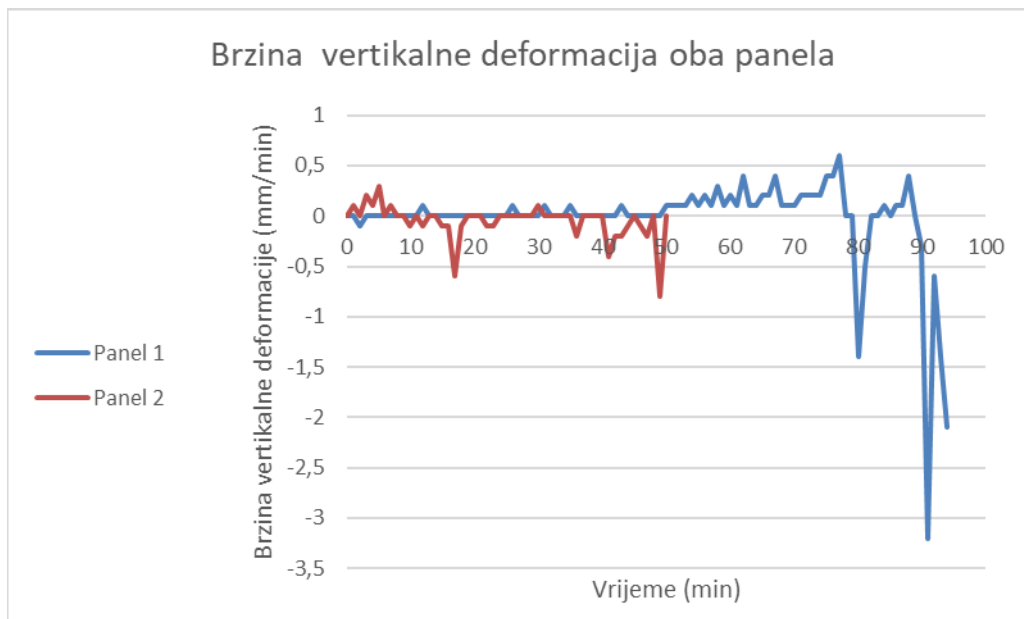
4.3.3 Usporedba deformacija od vertikalnog opterećenja

Na Slikama 40 i 41 prikazani su usporedno rezultati vertikalnih deformacija Panela 1 i Panela 2 te usporedba brzina tih istih deformacija. Podaci za Panel 1 prikazani su plavom, a za Panel 2 crvenom bojom.

Uspoređujući ponašanja oba panela mogu se uočiti određene sličnosti, iako je ispitivanje Panela 2 trajalo gotovo upola kraće. Krivulje deformacija kod oba panela pokazuju trend početnog rasta, a pad je karakterističan za duže vrijeme opterećenja. Preciznije, oba panela se najprije deformiraju pozitivnom deformacijom, izdužuju se zbog izloženosti visokim temperaturama, a nakon određenog vremena i procesa koji pridonose degradaciji panela, deformacije postaju negativne i uzorak se skraćuje. Naglu promjenu dimenzija uzorka pokazuju krivulje brzine deformacije, koje uz vertikalno skraćivanje također kriterij za određivanje požarne otpornosti. Tako je ispitivanje Panela 2 prekinuto već u 50. minuti zbog naglog porasta brzine deformacije, kakav se kod Panela 1 događa tek između približno 80. i 90. minute. Panel 2 (s PUR ispunom) tako je postigao svoju maksimalnu deformaciju od -2,7 mm za 50-ak minuta, dok je za tu istu deformaciju Panelu 1 (bez ispune) trebalo nešto iznad 90 minuta.



Slika 40 Vertikalna deformacija usporedba



Slika 41 Brzina vertikalne deformacije – usporedba

4.4 Zaključak o ispitivanju otpornosti na požar panela

Eksperimentalno ispitivanje otpornosti na požar provedeno je na referentnom, praznom Panelu 1 i Panelu 2, čija jedina razlika u konfiguraciji od referentnog panela jest ispunjenost polimernom pjenom. Paneli su obloženi gips-vlaknastim pločama a njihova konstrukcija je od tankostijenog čelika.

Pokazalo se da se važnost gips-vlaknastih ploča ipak ne može zanemariti niti umanjiti u pitanju otpornosti na požar s obzirom na njihovo ponašanje odnosno dobru vatrootpornost pokazanu u ovom eksperimentu. Ipak, kad je došlo do otkazivanja gips-vlaknastih ploča i prodiranja plamena u unutrašnjost panela, izolacijska svojstva poliuretanske pjene usporila su širenje topline po čeličnim nosačima i na taj način spriječila prijenos energije dalje, prema pločama koje su bile neizložene požaru. Dodatna energija je utrošena na gorenje poliuretanske ispune, što je odložilo širenje požara. S druge strane, prema izmjerenim temperaturama u peći, gorenje PUR pjene nije uzrokovalo oslobađanje topline u mjeri u kojoj bi se povećala temperatura u peći. Krajnje temperature neizloženih gips-vlaknastih ploča niže su kod Panela 2 za više od 200 °C što je u slučaju požara vrlo značajan rezultat.

U pogledu dosezanja kriterija nosivosti, cjelovitosti i izolacije, oba panela zadovoljavaju kriterij izolacije i cjelovitosti za minimalno 90 minuta, koliko je trajalo ispitivanje. Kriterij nosivosti Panela 1 također zadovoljava minimalno 90 minuta, dok se kod Panela 2 ispitivanje nije provodilo dovoljno dugo za taj zaključak. Treba napomenuti i da se uobičajeno, prema normi HRN EN 1363-1:2020 - Ispitivanje otpornosti na požar, ispituju elementi dimenzija 3 x 3 metra.[27] Uzorci navedeni u ovom radu manjih su dimenzija kako bi se osigurala sigurnost osoblja i mjerne opreme u ispitnom laboratoriju, ali i paneli ispitnih dimenzija mogu donijeti značajna saznanja po pitanju ispitivanja otpornosti na požar.

Usprkos tome, temperature postignute unutar profila bile su dovoljne da omekšaju čelične nosače i potencijalno ugroze konstruktivnu stabilnost samog elementa. Isto tako, tijekom gorenja PUR pjene dolazi do kemijskih reakcija i otpuštanja plinova, koji su potencijalno opasni za okoliš i zdravlje ljudi. U ovom radu aspekt toksičnosti dimnih plinova razvijenih tijekom ispitivanja nije uzet u obzir, ali pri konačnoj ocjeni uporabljivosti panela s PUR pjenom u konstrukcijama s rizikom izloženosti požaru, potrebno je i to uzeti u obzir..

5 ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je usporediti ponašanje nosivih laganih kompozitnih panela sa okvirom od hladno prešanog čelika (tzv. LSF paneli) i oblogom od gips-vlaknastih ploča, u slučaju požarnog opterećenja u uvjetima kad je unutrašnjost panela prazna ili ispunjena izolacijskim gorivim materijalom. Materijal koji je korišten za izolaciju je poliuretanska pjena, netipičan materijal za ispitivanje otpornosti na požar s obzirom na njenu gorivost te svojstva na visokim temperaturama. Rad daje pregled teoretskog i eksperimentalnog istraživanja provedenog na temelju dostupne literature i konkretnog eksperimentalnog ispitivanja provedenog u svrhu ovog rada. Prvi, odnosno teoretski dio istraživanja pokriva općenite informacije o LSF panelima, gips-vlaknastim oblogama, konstrukcijama od laganog čelika te ispuni od poliuretanske pjene. Također daje uvid o svojstvima pojedinih komponenata, osobito u vidu toplinske stabilnosti i otpornosti na visoke temperature. Eksperimentalni rad se sastoji od dva dijela: termogravimetrijske analize poliuretanske pjene, koja se koristila za izradu LSF panela te ispitivanje standardiziranog ispitivanja otpornosti na požar panela sa i bez poliuretanske pjene. Dodatno je praćen razvoj temperature kroz karakteristične točke poprečnog presjeka (granice pojedinih komponenata) kako bi se odredio doprinos pojedine komponente panela na razvoj temperature.


Provedena termogravimetrijska analiza PUR pjene daje rezultate o toplinskoj dekompoziciji materijala tijekom zagrijavanja mjerenjem gubitka mase u ovisnosti o temperaturi do 600°C. Gubitak mase poliuretana se odvijao kroz dvije faze, od kojih prema literaturi, prva faza predstavlja dekompoziciju poliuretana, a druga faza odgovara oksidacijskom procesu ostataka nastalih u prvoj fazi. Gubitak mase korištenog poliuretana bio je manji od 20 % sve dok temperatura nije postigla 300 °C. Tada počinje značajniji pad mase. Na temperaturama od približno 580 °C počinje drugi karakterističan vrhunac u kojem se gubi veći dio mase te gubitak sad iznosi oko 50%. Gubitak mase na krajnjoj temperaturi od 600 °C veći je od 60%, odnosno masa preostalog materijala iznosi 37,3% . Preostali postotak mase nakon prelaska 600 °C (čada) ponaša se kao svojevrsni izolator.


Pri ispitivanju otpornosti na požar, uspoređeni su rezultati dvaju panela, od kojih se Panel 1 sastoji od tankostijene čelične konstrukcije obložene s dva sloja gips-vlaknastih ploča, dok je Panel 2 iste kompozicije uz dodatak poliuretanske pjene kao izolacijske ispune. Ispitivanje je trajalo dok se nisu pojavili uvjeti koji su upućivali na pad jednog od kriterija otpornosti na požar, a to su bili

cjelovitost, izolacija i nosivost. Slijedom toga, ispitivanje praznog panela (Panel 1) je trajalo 94 minute, dok je ispitivanje panela s PUR ispunom trajalo 90 minuta.

Tijekom ispitivanja nije bilo pojave pukotina te plamena na neizloženoj strani panela, tako da kriteriji pada cjelovitosti nisu bili dosegnuti za oba panela. Također, temperature na neizloženoj strani uzorka nisu dosegnule kritične temperature koje upućuju na pad kriterija izolacije. Kriteriji pada nosivosti, koji se u konkretnom slučaju odnosio na veličinu skraćanja i brzinu prirasta skraćanja, također nije bio dosegnut u vremenu ispitivanja. Međutim u spomenutom vremenu ispitivanja, brzina prirasta skraćanja se naglo povećala te je bilo izvjesno da će u skorom vremenu doći do potpunog sloma konstrukcije, što bi moglo oštetiti i peć i mjernu opremu te je stoga ispitivanje prekinuto.

Obzirom na činjenicu da ispitivanje nije trajalo do dosezanja nekog od kriterija otpornosti na požar te da su ispitivani nestandardni uzorci, ispitanim panelima se ne može odrediti točan razred otpornosti na požar, međutim prema dobivenim rezultatima može se tvrditi da će prazni panel zadovoljiti minimalno 90 minuta otpornosti na požar, a panel s gorivom polimernom pjenu 45 minuta.

Mjerenja temperature kroz uzorak pokazala su razlike u temperaturama na završetku mjerenja između panela ispunjenog PUR pjenu i onog praznog, kako na gips-vlaknastim pločama, tako i na neizloženim stranama panela, ali i po čeličnom profilu. Također, izolacijska svojstva ostatka PUR pjene omogućila su pojavu različitih temperatura po dijelovima čeličnog profila i nakon gubitka velikog postotka mase. 

Kao konačni zaključak, može se reći da se uporabom gorive toplinske izolacije u sustavima LSF panela, očekivano, otpornost na požar smanjuje, međutim povećanjem broja gips-vlaknastih ploča svakako bi se dobila bolja otpornost panela koji su ujedno i energetski učinkoviti. Za to su potrebna dodatna ispitivanja,  treba uzeti u obzir njegov utjecaj na zdravlje i okoliš u kojem se on nalazi, te provesti ispitivanje plinova i ostalih produkata gorenja do kojih dolazi prilikom gorenja spomenutih panela.

6 LITERATURA

- [1] N. Soares, i sur. Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [2] S. Kesawan i M. Mahendran, A Review of Parameters Influencing the Fire Performance of Light Gauge Steel Frame Walls, *Fire Technology*, 2018.
- [3] M. T. Dodangoda i sur. Developing a performance factor for fire rated boards used in LSF wall systems, *Fire Saf J*, 2019.
- [4] A. D. Ariyanayagam, S. Kesawan, i M. Mahendran, Detrimental effects of plasterboard joints on the fire resistance of light gauge steel frame walls, *Thin-Walled Structures*, 2016.
- [5] Jelčić Rukavina M., Ščapec T. Review of thermal performance of LSF walls used for nZEB: Influence of components, Simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2021.
- [6] J. Le Dréau, R. L. Jensen, i K. Kolding, Thermal Behaviour of a Gypsum Fibre Board Associated with Rigid Polyurethane Foam Under Standard Fire Conditions, *Energy Procedia*, 2015.
- [7] Rahmninian I. Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based systems, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 2011.
- [8] *HRN EN 520:2010 - Gipsane ploče - Definicije, zahtjevi i metode ispitivanja*.
- [9] E. Steau i M. Mahendran, Elevated temperature thermal properties of fire protective boards and insulation materials for light steel frame systems, *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [10] S. Gnanachelvam, M. Mahendran ,i A. Ariyanayagam, Elevated temperature thermal properties of advanced materials used in LSF systems, *Fire Mater*, 2022.
- [11] M. L. Pinto, Formulation, preparation, and characterization of polyurethane foams, *J Chem Educ*, 2010.
- [12] “HRN EN 13501-1:2010 Razredba građevnih proizvoda i građevnih elemenata prema ponašanju u požaru -1. dio: Razredba prema rezultatima ispitivanja reakcije na požar”.
- [13] M. J. Rukavina, M. Carević, i I. B. Pečur, Zaštita pročelja zgrada od požara/priručnik za projektiranje i izvođenje zaštita pročelja zgrada od , *Priručnik za projektiranje i izvođenje*, 2017.

- [14] M. J. Hurley, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Editor-in-Chief Fifth Edition. 2016.
- [15] J. Carlos i Q. Amado, Thermal Resistance Properties of Polyurethanes and Its Composites. [Online]
- [16] S. T. McKenna i T. R. Hull, The fire toxicity of polyurethane foams, *Fire Sci Rev*, 2016.
- [17] A. Salazar, On thermal diffusivity, *Eur J Phys*, 2003.
- [18] “HRN EN 12524:2002 Građevni materijali i proizvodi -Svojstva s obzirom na toplinu i vlagu -Tablice projektnih vrijednosti”.
- [19] A. Prociak, J. Pielichowski, i T. Sterzynski, Thermal diffusivity of rigid polyurethane foams blown with different hydrocarbons, 2000.
- [20] Y. Yousefi i F. Tariku, Thermal conductivity and specific heat capacity of insulation materials at different mean temperatures, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021.
- [21] “HRN EN 1991-1-2:2012 Eurokod 1: Djelovanje na konstrukcije - Dio 1-2: Opća djelovanja -Djelovanja na konstrukcije izložene požaru”.
- [22] V.-L. Tran i sur. Finite Element Simulation of Steel Beam under Fire Composite columns View project Stability of Beams, Frames, and Trusses View project. [Online]
- [23] “HRN EN 1365-1:2012 Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata -1. dio: Zidovi”
- [24] R. K. Akash M. S. H., . Essentials of pharmaceutical analysis, 2020.
- [25] H. Mikulčić i sur., Thermogravimetric analysis investigation of polyurethane plastic thermal properties under different atmospheric conditions, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2019.
- [26] L. Jiao i sur. Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS, *Polym Degrad Stab*, 2013.
- [27] “HRN EN 1363-1:2020 Ispitivanja otpornosti na požar - 1. dio: Opći zahtjevi”.
- [28] <https://www.fermacell.com/en/products/fibre-gypsum/firepanel-a1>.
(Pristupljeno 21. rujna 2023.)
- [29] Jelčić Rukavina M. Djelovanje požara na građevinske materijale i konstrukcije – razradba; kolegij: Zaštita od požara, predavanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2022.