

# UTJECAJ SVOJSTVA OBLOŽNIH PLOČA NA PRIJENOST TOPLINE U TANKOSTIJENIM KOMPOZITNIM ČELIČNIM PANELIMA

---

**Antunović, Ana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*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:237:944669>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Antunović

**UTJECAJ SVOJSTAVA OBLOŽNIH PLOČA NA  
PRIJENOS TOPLINE U TANKOSTIJENIM  
KOMPOZITNIM ČELIČNIM PANELIMA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Antunović

**UTJECAJ SVOJSTAVA OBLOŽNIH PLOČA NA  
PRIJENOS TOPLINE U TANKOSTIJENIM  
KOMPOZITNIM ČELIČNIM PANELIMA**

DIPLOMSKI RAD

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

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ana Antunović

**EFFECT OF CLADDING BOARD PROPERTIES  
ON HEAT TRANSFER IN THIN-WALLED  
COMPOSITE STEEL PANELS**

MASTER THESIS

Supervisor: izv. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2025.

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad istražuje utjecaj obložnih ploča na prijenos topline u tankostijenim kompozitnim čeličnim panelima (LSF sustavima). LSF paneli, sve popularniji u građevinarstvu, odlikuju se brzinom izgradnje i dobrim toplinskim svojstvima, ali su osjetljivi na toplinske mostove i na djelovanje visokih temperatura uzrokovanih požarom. Rad se temelji na eksperimentalnim i numeričkim analizama. U laboratorijskim uvjetima ispitana su dva uzorka LSF panela - jedan s dva sloja gips vlaknastih ploča i bez toplinske izolacije, te drugi panel s tri sloja istih ploča i s dodanom poliuretanskom pjenom kao toplinskom izolacijom, te su oba panela izložena požaru prema standardnoj krivulji. Mjerene su temperature unutar različitih slojeva panela, a rezultati su uspoređeni s numeričkim simulacijama u softveru Tasef. Analiza je pokazala da dodavanje treće ploče i toplinske izolacije smanjuje prijenos topline na neizloženu stranu panela, pa i u slučaju kad je ploča goriva. Nedostatak toplinske izolacije je uzrokovao zadržavanje topline, koja se akumulira na pozicijama čeličnih profila panela. Dodatno gorenje poliuretanske izolacije povećava rizik od razvoja visokih temperatura na čeličnim nosačima zbog čega oni gube svoju nosivost. Gips-vlaknaste ploče su se pokazale kao ključni faktor u usporavanju širenja topline i zaštiti čelika. Od ostalih ploča za koje je provedena simulacija na praznom panelu, gips kartonske su se pokazale kao najbolja opcija, jer se na njima sporije razvija temperatura nego na ostalim pločama, a i nisu sklone pucanju.

**Ključne riječi:** LSF paneli, prijenos topline, otpornost na požar, toplinska izolacija, eksperimentalna analiza, numeričko modeliranje

## SUMMARY

This paper investigates the influence of cladding panels on heat transfer in thin-walled steel composite panels (LSF systems). LSF panels, which are becoming increasingly popular in construction, are characterized by fast construction and good thermal properties, but are sensitive to thermal bridging and the effects of high temperatures caused by fire. The work is based on experimental and numerical analysis. Two samples of LSF panels were tested under laboratory conditions - one with two layers of gypsum fiberboard and without thermal insulation and the other with three layers of the same panels and with additional polyurethane foam as thermal insulation. The temperatures in the different layers of the panels were measured and the results compared with numerical simulations in the Tasef software. The analysis showed that the addition of a third panel and thermal insulation reduces the heat transfer to the non-exposed side of the panel, even if the thermal insulation is combustible. The absence of thermal insulation affects the heat that accumulates at the positions of the steel profiles of the panels and their additional combustion, which increases the risk of developing high temperatures on the steel elements, causing them to lose their load-bearing capacity. Gypsum fiber boards have proven to be a key factor in slowing the spread of heat and protecting the steel. Of the other boards, for which the simulation was carried out on, gypsum boards proved to be the most suitable, as the temperature develops more slowly on them than on other boards and they are not prone to cracking.

**Key words:** LSF panels, heat transfer, fire resistance, thermal insulation, experimental analysis, numerical modeling

---

## SADRŽAJ

SAŽETAK.....	iv
SUMMARY.....	v
SADRŽAJ.....	vi
1. UVOD.....	7
2. STANJE PODRUČJA.....	8
3. CILJ DIPLOMSKOG RADA.....	15
4. OPIS KOMPOZITNOG TANKOSTIJENOG ČELIČNOG PANELA.....	16
5. EKSPERIMENTALNA ANALIZA.....	22
5.1. Ispitivanje panela 1.....	30
5.2. Ispitivanje panela 2.....	37
5.3. Usporedba dvaju panela nakon ispitivanja.....	46
6. NUMERIČKA ANALIZA.....	52
6.1. Usporedba eksperimentalne i numeričke analize Panela 1.....	60
6.2. Numerička analiza ponašanja Panela 1 s različitim vrstama ploča.....	67
6.3. Usporedba svih vrsta ploča.....	75
7. ZAKLJUČAK.....	78
POPIS LITERATURE.....	80
POPIS SLIKA.....	82
POPIS TABLICA.....	85
PRILOG A – IZJAVA O SVOJSTVIMA ZA PROMASTOP-I.....	86
PRILOG B – TEHNIČKI LIST ZA PROMASTOP-I.....	88
PRILOG C – IZJAVA O SVOJSTVIMA GIPS VLAKNASTE PLOČE FIREPANEL A1.....	89

## 1. UVOD

Suvremena gradnja sve se više oslanja na sustave koji omogućuju bržu izvedbu, veću fleksibilnost pri gradnji i bolja toplinska svojstva objekata. Jedan od takvih sustava je i sustav laganih čeličnih okvira (engl. *light steel framing* – LSF) koji se sve češće koristi u izgradnji stambenih, poslovnih i industrijskih objekata.

LSF sustavi temelje se na uporabi tankostijenih čeličnih profila koji su nosivi dio konstrukcije, dok se ispuna takvog zida sastoji od različitih slojeva kao što su toplinska izolacija, zračni slojevi, te vanjska i unutarnja obloga od raznih vrsta ploča. Ovi zidovi nude brojne prednosti kao što su fleksibilnost pri građenju, mogućnost reciklaže i ponovne upotrebe, manja vlastita težina u odnosu na npr. beton ili opeku, smanjena količina rada, bolja kontrola kvalitete u tvornici, a uza sve to pružaju stabilnost i nosivost. Međutim, unatoč mnogim prednostima, LSF sustavi imaju i svoje nedostatke, poput osjetljivosti na toplinske mostove, potrebe za preciznom izvedbom i probleme sa zvučnom i toplinskom izolacijom, transport elemenata od mjesta proizvodnje, korozija čelika, veći troškovi održavanja, ograničen broj etaža građevina te velika zapaljivost ovisno o vrsti toplinske izolacije koja je korištena [1]. Glavni problem ovih elemenata je toplinska učinkovitost i nastajanje toplinskih mostova na mjestima čeličnih profila, što predstavlja izazov za sve strože zahtjeve energetske učinkovitosti u građevinarstvu.

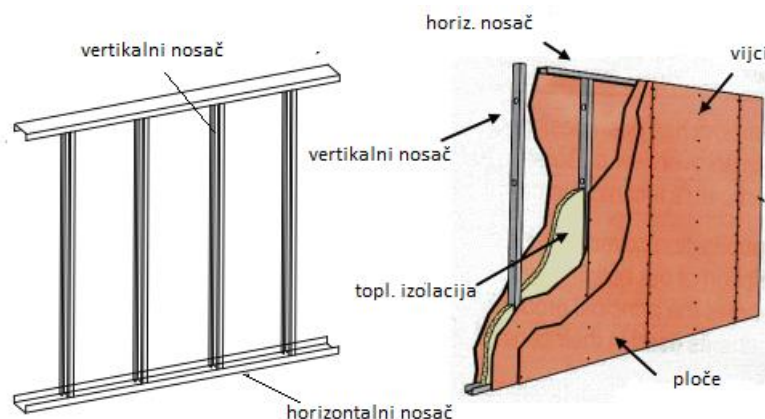
U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj požara na uzorke LSF zidnih panela sa i bez toplinske izolacije - prvo u laboratoriju, a zatim su ti rezultati uspoređeni s rezultatima dobivenim putem računalnog softvera TASEF. Na kraju je napravljena numerička analiza u kojoj su varirane različite vrste ploča. Cilj rada je analizirati i usporediti stvarno ponašanje panela s numeričkim modelima, te ukazati na mogućnosti poboljšanja njihovih toplinskih svojstava i nosivosti pri požaru.

Rad je podijeljen na 7 poglavlja. U prvom dijelu rada opisana je ukratko predgotovljena gradnja, sastav i primjena tankostijenih čeličnih panela. Zatim su opisani uzorci panela korišteni tijekom eksperimentalnog ispitivanja u laboratoriju, kao i sam proces ispitivanja. Ti rezultati su zatim uspoređeni s rezultatima dobivenima u softveru za numeričko modeliranje Tasef. Nakon što je utvrđeno poklapanje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričkog modeliranja, dane su razne varijacije sastava panela kako bi se usporedio utjecaj svojstava obložnih ploča na njegovo ponašanje pod utjecajem požara.



## 2. STANJE PODRUČJA

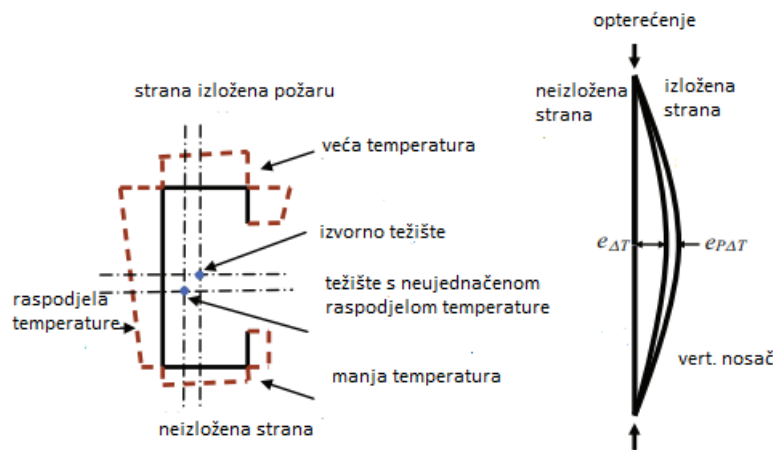
LSF paneli često se koriste kao nosivi ili pregradni elementi. Upotreba im raste najprije u modernim industrijskim, komercijalnim i stambenim zgradama s manjim brojem etaža [2]. Osnova su im horizontalni i vertikalni čelični nosači, čelične dijagonalne ukrute i obložne ploče (Slika 1). Može se dodati sloj izolacije koji poboljšava toplinska i akustična svojstva elementa. Izolacija može biti postavljena između ploča, s negrijane strane, ili kombinirano. Prema sadašnjim spoznajama, upotreba izolacije dovodi do smanjenja mehaničke otpornosti i stabilnosti čelika i cijelog panela, ali poboljšava toplinska svojstva panela, a samim tim i njegovu raznolikiju mogućnost upotrebe [2]. Tu su i neki dodatni materijali, kao što su vijci, čavli, zrakonepropusne i vodonepropusne membrane [3]. Napravljena su mnoga istraživanja o LSF panelima s raznim varijacijama kao što su drugačije vrste ploča, čeličnih nosača, vrste toplinske izolacije i njenog položaja, kao i utjecaja na ponašanje panela.



Slika 1: LSF panel (Izvor: [4])

Mogu se koristiti za izradu stropnih konstrukcija ili zidova. Mogu se koristiti samo u obliku panela, ili se mogu spojiti u module tako da čine predgotovljene prostorije, koje se na gradilištu međusobno spajaju u cjelinu [5].

Budući da su često izloženi požaru samo s jedne strane, čelični nosači su izloženi nejednolikoj raspodjeli temperature koja uzrokuje komplicirano ponašanje elementa (Slika 2) kao što su toplinsko izvijanje, nejednolika raspodjela čvrstoće i krutosti čelika i pomak osi nosača. To uzrokuje kombinaciju uzdužnog tlačnog opterećenja i savijanja [4].



Slika 2: a) Pomak neutralne osi b) Toplinsko izvijanje (Izvor: [4])

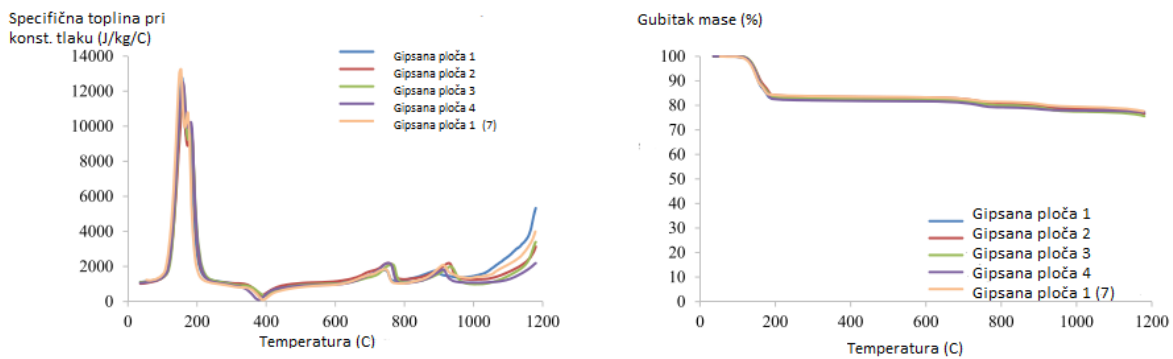
Nosiva konstrukcija LSF sustava napravljena je od hladno prešanog čelika i pruža stabilnost i krutost, a ploče ju štite od vanjskih utjecaja. Formira se procesom hladnog oblikovanja. Elementi proizvedeni ovim procesom su obično u obliku C-presjeka, Z-presjeka, I-presjeka, T-presjek, kutni i cijevni presjek. C-presjek se najčešće koristi za LSF panele. Ovakav oblik čelika je obično tanak u odnosu na svoju širinu i može se savijati pri naprezanjima ispod granice tečenja. U ovakvim zidovima izloženi su uzdužnom tlačnom opterećenju [4]. Takvi elementi ne moraju nužno otkazati kada se dosegne njihovo naprezanje na izvijanje i često nastavljaju nositi opterećenje [3]. Budući da su poprečni presjeci relativno tanki i da se u nekim dijelovima težište i središte ne podudaraju, izvijanje pri savijanju može biti kritičan čimbenik za tlačne elemente [4]. Glavni nedostatak čelika je njegova visoka toplinska vodljivost, pa je potrebno spriječiti nastanak toplinskih mostova na kritičnim dijelovima presjeka. To je moguće postići na više načina: kontinuirani sloj toplinske izolacije oko čelika, nepostojanje otvora na sloju izolacije, spajanje čelika na sloj vanjske toplinske izolacije materijalima s niskom vodljivošću [3]. U Tablici 1 prikazana su neka mehanička i toplinska svojstva čelika.

Tablica 1: Mehanička i toplinska svojstva raznih vrsta čelika (Izvor: [3])

Materijal	$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	E [GPa]	$\nu$ [-]	$\alpha$ [ $^{\circ}C \times 10^{-6}$ ]	$\lambda$ [W/mK]
Meki čelik (nisko-uglični čelik)	7800	206	0,29	13	46
Hladno valjani čelik	7800	206	0,30	11	46
Nehrđajući čelik	7700-7900	196	0,29	11-18	14

Ploče za oblogu panela mogu biti metalne i nemetalne. Metalne ploče koriste se za nestambene industrijske zgrade zbog velike krutosti i čvrstoće, završne obrade površine i otpornosti na udarce. Nemetalne ploče se koriste za niske stambene zgrade - OSB ploče (engl. *oriented strand boards*), šperploče i gipsane ploče [3]. U slučaju nastanka požara gipsane ploče štite konstrukciju od izravne vatre i usporavaju razvoj topline čineći cijeli panel otpornijim na požar. Također služe kao bočna pridržanja čeličnim nosačima [4]. Gips je prirodni materijal, nezapaljiv, kombinacija vode i kristalnog oblika kalcijevog sulfata, koji daju kalcijev sulfat dihidrat ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Postoje različite kristalne strukture gipsa. Kada se gips zagrije, gubi vodu i prelazi u druge oblike. Prvi oblik je hemihidrat ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ) koji nastaje kad je gips izgubio dio vode i poznat je kao „Pariški gips“ i kao takav se koristi u građevini jer se pomiješan s vodom može oblikovati u razne oblike [6]. Daljnjom dehidracijom dobiva se anhidrit koji je potpuno dehidriran. Osim gipsa, ovakve ploče se sastoje od recikliranih papirnih vlakana i dodatnih negorivih vlakana kojima su ojačane. Sadrže oko 20,9% kemijski vezane vode i 3-4% slobodne vlage [7]. Steau i Mahendran [7] su proveli istraživanje o toplinskim svojstvima gipsanih ploča i njihovom ponašanju pri visokim temperaturama i dobili su rezultate prikazane na Slici 3. Ispitivane su 4 ploče od različitih proizvođača, najprije se svaka ploča ispitala tri puta, a na slikama su prikazani samo prosjeci tih rezultata. Ispitivane su specifična toplina pri konstantnom tlaku (Slika 3a) i gubitak mase tijekom zagrijavanja (Slika 3b). Ove promjene su povezane s isparavanjem vode iz gipsane ploče. Mjerenje je započelo na 25°C, a zatim je temperatura povećana do 1200°C brzinom od 20°C/min. Na početnoj temperaturi, specifična toplina ploča (Slika 3a) iznosila je 1108, 1018, 1102 i 1059 J/kg°C za ploče 1 do 4. Nakon što je temperatura dostigla 116°C, zabilježen je brzi porast specifične topline s prvim endotermnim vrhom pri 156°C, 160°C, 158°C i 158°C, kada su vrijednosti dosegnule 12 772, 11 123, 12 346 i 12 493 J/kg°C. Drugi endotermni vrh se pojavio pri temperaturama od 178°C do 184°C, s vrijednostima specifične topline između 9511 i 10,230 J/kg°C. Gubitak mase (Slika 3b)

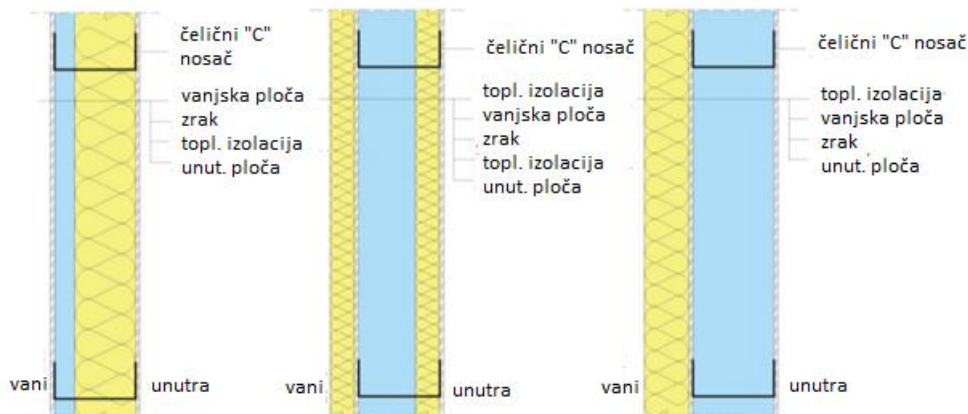
pratio se tijekom zagrijavanja, a najveći pad mase dogodio se u temperaturnom rasponu od 118 °C do 202 °C, uz gubitak između 16% i 18%. Daljnji gubitak mase nastavio se do 1180 °C, dosegivši vrijednosti od 23% do 24%.



Slika 3: a) Specifična toplina pri konstantnim tlaku b) Gubitak mase gipsanih ploča (Izvor: [7])

Endotermne reakcije rezultat su razgradnje kalcijevog sulfata dihidrata ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) u kalcijev sulfat hemihidrat ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ), a kasnije i u kalcijev sulfat anhidrit ( $CaSO_4$ ), pri višim temperaturama. Endotermna reakcija znači da se troši energija koja bi inače povećala temperaturu materijala, zato se ploče smatraju pasivnom zaštitom od požara čeličnih konstrukcija [7]. U istraživanju Steau i Mahendran [7] uspoređene su gipsane ploče, kalcij-silikatne ploče, magnezij-oksidge ploče i perlitne ploče i zaključeno je da gipsane ploče, kalcij-silikatne ploče i magnezij-oksidge ploče imaju veću specifičnu toplinu od perlitnih ploča, što ih čini pogodnima za usporavanje prijenosa topline na čeličnu konstrukciju. Međutim, magnezij-oksidge ploče pokazuju najveći gubitak mase (42% i 44%), što ih čini sklonima pucanju kada su pričvršćene za čelične okvire. Kalcij-silikatne ploče imaju visoku specifičnu toplinu, ali se razgrađuju na višim temperaturama (800 °C), dok se gipsane ploče razgrađuju na nižim temperaturama (110–220 °C). Kodur i Sultan [8] utvrdili su da sloj od 15,9 mm debele gipsane ploče na neizoliranom nosivom zidu pruža otpornost na požar od 35 minuta, dok dva sloja od 12,5 mm daju otpornost na požar od 100 minuta. Ovo pokazuje da se otpornost na požar može znatno povećati dodavanjem više slojeva ploča, umjesto samo povećanjem debljine jedne ploče. Pri tome treba paziti da spojevi u pojedinoj ploči ne budu na istom mjestu jer su spojevi najslabija točka kod otkazivanja u slučaju požara. Kada se prvi spoj na izloženom sloju otvori, ispod se obično nalazi neprekinuti sloj koji pruža zaštitu kroz određeno vrijeme [1].

Kako bi se ovakvi paneli mogli koristiti u zgradama gotovo nulte energije (nZEB) potrebna im je toplinska izolacija. Toplinska izolacija u ovakvim panelima može se postaviti između ploča (engl. *cold framed*), na vanjski dio panela (engl. *warm framed*) ili na oba navedena mjesta (engl. *hybrid*) [3], kao što je prikazano na Slici 4.



Slika 4: Položaj toplinske izolacije a) izolacija između čeličnih nosača b) hibridni način postavljanja izolacije c) izolacija izvana (Izvor: [3])

Ako se izolacija postavi između ploča, tj. oko čelične konstrukcije (slučaj 1), u slučaju požara ona zbog niske toplinske provodljivosti zadržava toplinu i dovodi do nejednolike zagrijanosti izložene i neizložene strane panela. Zato ni čelik nije jednoliko zagrijan i dolazi do sloma konstrukcije [4]. Stoga bi bilo bolje da se toplinsko-izolacijski materijal ugrađuje s vanjske strane panela (Slika 4c) kako bi se da se čelik jednoliko zagrijavao, ali u tom slučaju se povećava širina zida i konstrukcija zauzima više veću površinu [2].

Za slučaj na Slici 4c kad je izolacija s vanjske strane, obično se koristi ETICS sustav, a kao izolacija se koriste ekspanzirani polistiren (EPS) ili ekstrudirani polistiren (XPS) [3]. Nedostatak tih materijala je njihova zapaljivost.

Osim EPS-a i XPS-a postoje još mnoge vrste materijala koje se mogu koristiti kao izolacija: mineralna vuna, poliuretani, aerogel... Izbor materijala ovisi o više faktora, kao npr. potrebna toplinska vodljivost materijala, zvučna izolacija, otpornost na požar, propusnost, utjecaj na zdravlje ljudi, potrebna debljina elementa [9]...

Mineralna vuna je anorganski vlaknasti materijal, a obuhvaća staklenu vunu i kamenu vunu. Staklena vuna se proizvodi od borosilikatnog stakla pri temperaturi od 1400°C, a kamena vuna se proizvodi taljenjem kamena (dijabaz, dolerit) pri 1500°C. Iznimno je otporna na požar i pripada razredu A1, što je čini jednom od boljih opcija [9]. Nedostatak kamene vune

je velika vlastita težina i mogućnost stvaranja plijesni i gljivica unutar panela u slučaju vlage, kao i korozija čelika.

EPS i XPS su organski materijali koji se dobivaju kao petrokemijski derivati [9]. Najčešće se koriste za izolacije, pogotovo u ETICS sustavu, zbog svoje male vlastite težine i niske cijene, a nude dobra izolacijska svojstva. Razlika XPS i EPS je u većoj tlačnoj čvrstoći XPS-a, upija manje vlage i skuplji je [9]. Koristi se za stropne konstrukcije i izoliranje ukopanih elemenata. Jako su zapaljivi materijali.

Poliuretani koji se mogu koristiti kao toplinska izolacija u ovakvim sustavima, nastaju reakcijom između diizocijanata ili poliizocijanata s diolima ili poliolima. S obzirom na količinu poliola i izocijanata mogu nastati fleksibilne pjene, krute pjene, elastomeri, premazi, ljepila... [10] Nedostatak ovog materijala je laka zapaljivost i brzo gorenje uz veliku brzinu oslobađanja topline, dima i otrovnih plinova koji se zapale u kombinaciji s kisikom i ometaju vidljivost. Najlošiji otrovni plinovi su ugljikov monoksid i vodikov cijanid [1]. Pjena je zapaljiva zbog otvorene strukture i male gustoće, pa kisik lako prolazi kroz nju što ubrzava gorenje [10]. U slučaju požara najprije omekša, zatim se kemijske veze se razgrađuju i ostaje samo ugljen. Ovisno o korištenoj metodi ispitivanja, brzini zagrijavanja uzorka, protoku zraka i gubitku težine, temperature paljenja i razgradnje za poliuretanske pjene su između 260°C i 500°C odnosno između 400 i 650°C [1]. Bolje ponašanje u požaru može se postići korištenjem usporivača gorenja ili pomoću promjena u strukturi polimera [10]. PUR pjena ima malu težinu, malu toplinsku vodljivost, visoku žilavost i duktilnost, jeftina je i ima veliku otpornost na udarce. PUR pjene su obično male gustoće i variraju između 30 i 500 kg/m<sup>3</sup>, a toplinska vodljivost im je 0,022-0,035 W/mK. Osim PUR pjene postoji i PIR pjena koja ima još bolje ponašanje u požaru i malo nižu toplinsku provodljivost u rasponu 0,020-0,035 W/mK [3].

Naravno da bi za potrebe zaštite od požara najbolja toplinska izolacija bila negoriva mineralna vuna, ali zbog bolje toplinske vodljivosti, manje ukupne debljine zida, a samim time i više korisne površine, kao i bolje krutosti i manje vlastite težine panela, češće se koriste poliuretani. Mnogim istraživanjima se nastoji pronaći način kako iskoristiti tu vrstu izolacije, a da se konstrukcija dobro ponaša u slučaju požara.

Otpornost na požar ovakvih panela može se odrediti ispitivanjem požara ili modeliranjem, u većini slučajeva utvrđuje se ispitivanjem požara u kojem se uzorak podvrgava standardiziranom požarnom opterećenju, obično predstavljenom ISO standardnom krivuljom. Prema tim rezultatima ispitivanja, uzorku se dodjeljuje razred otpornosti na požar (engl. *Fire resistance rating - FRR*) na temelju vremena otkazivanja uzorka procijenjenog prema tri kriterija stabilnosti konstrukcije, izolacije i cjelovitosti. Do sloma čelika dolazi zbog

smanjenja njegovih mehaničkih svojstava, gdje se na temperaturi od 550°C održava samo oko 60% izvorne granice razvlačenja čelika. Na to koliko će uzorak izdržati pod utjecajem požarnog opterećenja utječu vrsta ploča, broj ploča, njihov raspored i spojevi, vrsta toplinske izolacije i njen položaj, geometrija nosive konstrukcije [1].

### 3. CILJ DIPLOMSKOG RADA

Za potrebe ovog istraživanja izrađena su dva uzorka LSF panela, oba sastavljena od čelične konstrukcije obložene slojevima gips-vlaknastih ploča. Prvi uzorak, nazvan Panel 1, sastoji se od dva sloja ploča, između kojih je sloj zraka. Drugi uzorak, nazvan Panel 2, koristi istu čeličnu konstrukciju, ali je oko nje postavljeno tri sloja ploča, te je prostor oko čeličnih nosača popunjen polimernom pjenom koja služi kao izolacijski materijal.

Oba uzorka izložena su požaru u laboratorijskim uvjetima definiran ISO 834 krivuljom, te je analiziran razvoj temperature kroz poprečni presjek.

Uzorak Panela 1 je zatim podvrgnut numeričkoj analizi korištenjem softvera TASEF, gdje je napravljen poprečni presjek panela, a rezultati analize uključuju raspodjelu temperature unutar presjeka.

Dobiveni laboratorijski rezultati i rezultati numeričke analize bit će uspoređeni kako bi se procijenila učinkovitost softvera za potrebe predviđanja ponašanja konstrukcija pod utjecajem požara. Na kraju će biti dane razne alternative sastava panela kako bi se vidjelo njihovo ponašanje u požaru, te će biti dane preporuke za poboljšanje dizajna panela, uključujući moguće alternativne materijale koji mogu poboljšati toplinska svojstva panela, njegovu otpornost na požar i mehaničku otpornost i stabilnost. Ovaj rad može pružiti smjernice za daljnja istraživanja i razvoj LSF tehnologije.



#### 4. OPIS KOMPOZITNOG TANKOSTIJENOG ČELIČNOG PANELA

Oba uzorka panela sastoje se od nosive čelične konstrukcije (Slika 5) izrađene od rešetkasto postavljenih "C" profila dimenzija 89x42 mm; ukupno 4 vertikalna, 4 horizontalna i 6 dijagonalnih profila. Razmaci vertikalnih i horizontalnih profila prikazani su u Tablici 2.

Ukupne dimenzije uzoraka:

- panel 1: 1550x3000x185 mm
- panel 2: 1550x3000x210 mm

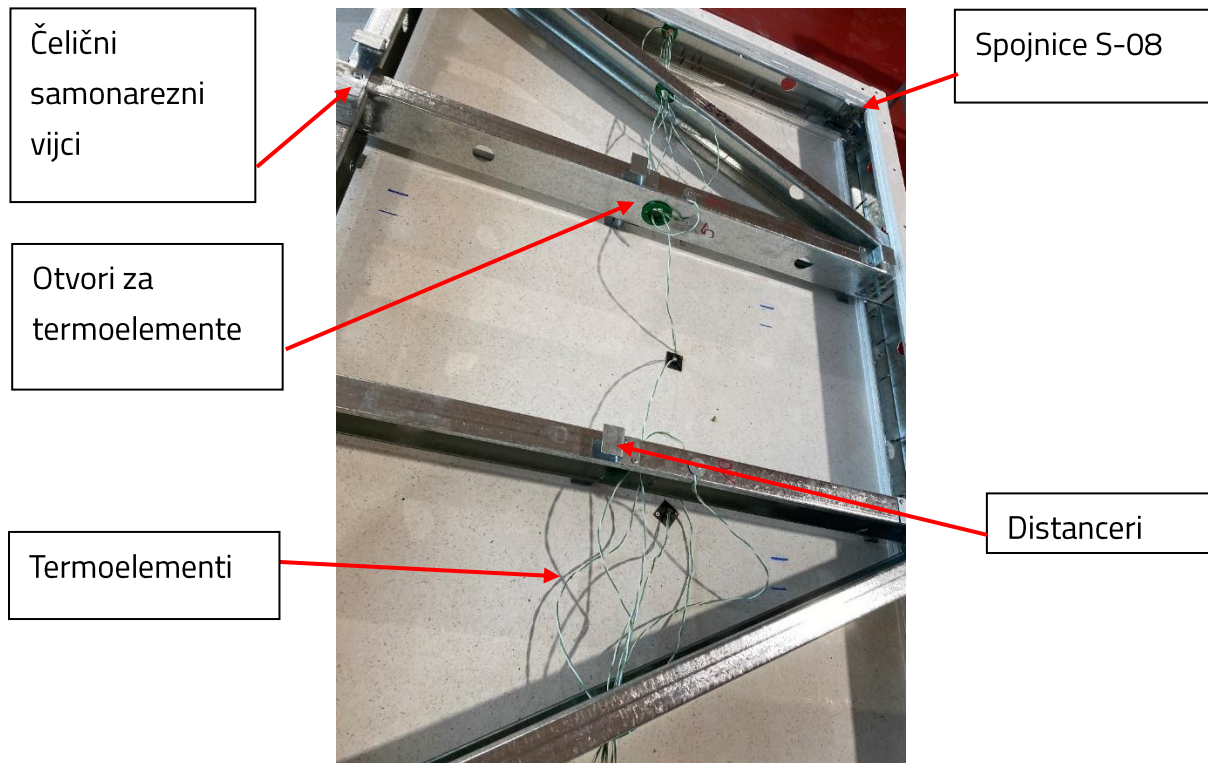


Slika 5: Nosiva čelična konstrukcija

Tablica 2: Osni razmaci čeličnih profila na uzorcima

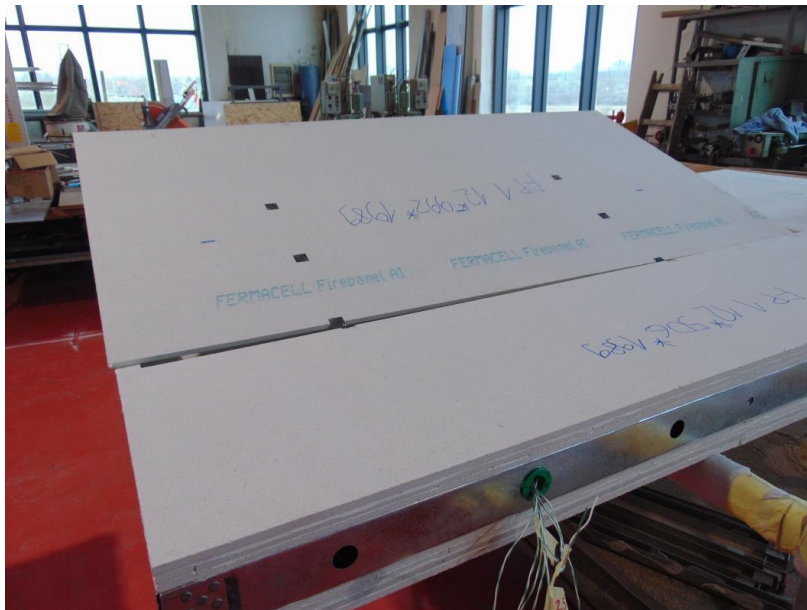
	Osni razmak vertikalnih profila	Osni razmak horizontalnih profila
Panel 1	486 mm	985 mm
Panel 2	500 mm	1200 mm

Profili su dobiveni savijanjem iz traka pocinčanog lima debljine 0,95 mm. Čelik je kvalitete S 550 GD + Z275. Na horizontalnim profilima su izrađeni otvori za prolazak vertikalnih profila.



Slika 6: Unutrašnjost panela

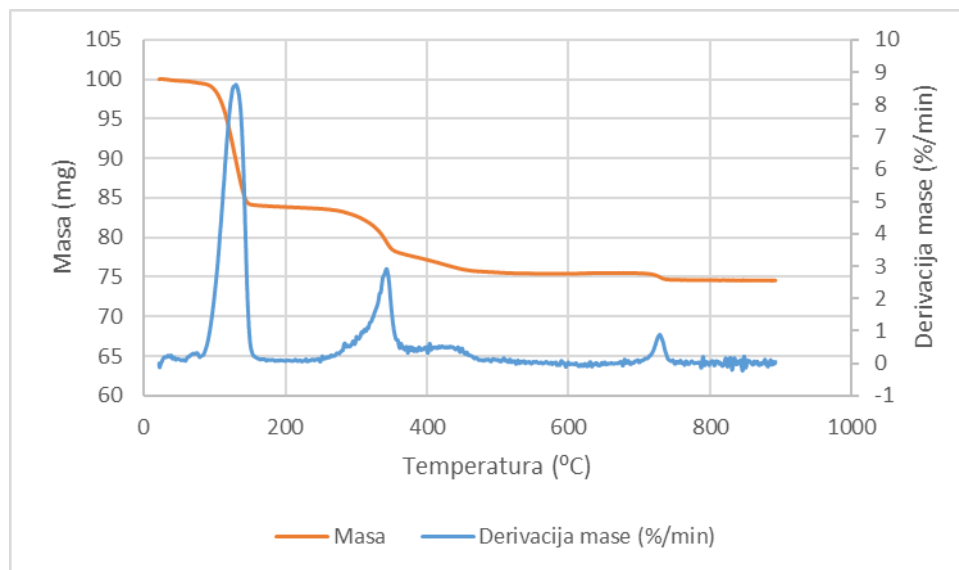
Spojevi rubnih horizontalnih i vertikalnih profila uzorka ojačani su čeličnim spojnicaama tipa S-08 izrađenim u obliku kutnika dimenzija 75x70x33 mm (Slika 6). Profili su međusobno povezani s čeličnim samonareznim vijcima proizvođača Framacad dimenzija 6x19 mm na Panelu 1, te dimenzija 6x17 mm na Panelu 2 (Slika 6). Na obje strane nosive konstrukcije pričvršćeni su distanceri dimenzija 30x25x30 mm koji sprečavaju direktno nalijeganje ploče na čeličnu konstrukciju i stvaranje toplinskih mostova (Slika 6). Na određenim profilima su napravljene prodori promjera  $\Phi$  34mm za potrebe postavljanja termoelemenata (Slika 6).



Slika 7: Gips-vlknaste ploče

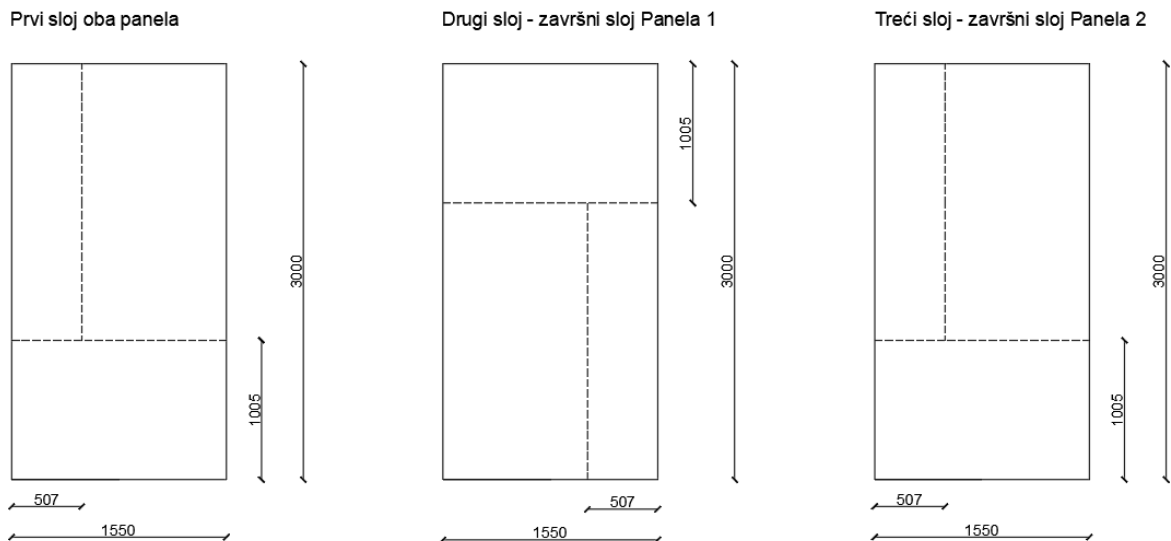
Na nosivu konstrukciju su obostrano postavljene gips-vlknaste ploče tipa Firepanel A1 (Slika 7), debljine 12,5 mm, proizvođača James Hardie (Fermacell). Na Panel 1 postavljene su u dva sloja, a na Panel 2 u tri sloja. Ploče su protupožarne, vezane gipsom, pojačane s papirnim i dodatnim negorivim vlaknima i koriste se za preventivnu zaštitu od požara u unutarnjim prostorima [11], [12]. Po obodu nosive konstrukcije s jedne i druge strane u dva sloja pričvršćene su trake od gips-vlknaste ploče širine 40 mm i debljine 12,5 mm. Ploče su maksimalnih dimenzija 1250x2000 mm.

Na gips vlknastim pločama je provedeno ispitivanje termogravimetrijskom analizom. To je tehnika u kojoj se uzorak određenog materijala zagrijava, prilikom čega mu se masa smanjuje ili povećava [13]. Promjena mase i njena derivacija (brzina) prikazane su u funkciji temperature. Uzorak se postupno zagrijavao od sobne temperature brzinom od 10°C/min do maksimalne temperature od 900 °C. U fazi 0-200°C zabilježen je pad mase od 15% (Slika 8) zbog procesa dehidracije ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  u  $CaSO_4$ ). U fazi 200-600°C masa je pala za dodatnih 10%. U fazi 600-800°C na derivaciji brzine vidljiv je još jedan manji pad, a do kraja ispitivanja masa uzorka ostaje konstantna.



Slika 8: Promjena mase gips vlaknastih ploča i njena derivacija

Na vanjskom dijelu zida ploče su postavljene tako da imaju horizontalne i vertikalne spojeve. Postavljene su na način da se izbjegne preklapanje spojeva (Slika 9) na svim slojevima.



Slika 9: Načini postavljanja ploča za pojedini sloj

Podaci o karakteristikama korištenih ploča preuzeti su iz tehničkog lista proizvođača te su prikazani u Tablici 3. Odnose se na uvjete sobne temperature.

Tablica 3: Svojstva gips-vlaknastih ploča (Izvor: [12])

Gustoća [kg/ m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća na savijanje	Ravnotežna vlaga na 65% relativne vlažnosti i 20°C temperature zraka	Koeficijent otpora difuziji vodene pare	Toplinska provodljivost	Širenje/skupljanje u slučaju promjene relativne vlažnosti od 30 % (20°C)	pH vrijednost
1200 ± 50 kg/m <sup>3</sup>	> 5.8 N/mm <sup>2</sup>	1.3 %	$\mu = 16$	$\lambda_{10, tr} = 0,38$ W/mK	0.25 mm/m	7-8

Unutarnji slojevi ploča pričvršćeni su čeličnim vijcima s upuštenom glavom dimenzija  $\emptyset 3,5 \times 45$  mm, tip TB, proizvođača Knauf na maksimalnim razmacima od 600 mm. Vanjski slojevi ploča pričvršćeni su čeličnim vijcima s upuštenom glavom, dimenzija  $\emptyset 3,5 \times 60$  mm, tip TB, proizvođača Knauf na maksimalnim razmacima od 300 mm. Za popunjavanje spojeva između ploča i zaglađivanje upuštenih glava vijaka koristi se intumescentni materijal tipa PROMASTOP -I (Promat) (Slika 10). PROMASTOP-I je premaz na vodenoj bazi koji na visokim temperaturama pjeni i stvara izolacijski sloj [14] bez ugrožavanja protupožarnih svojstava uslijed stvaranja malih pukotina na površini [15]. On igra ključnu ulogu u sprječavanju širenja plamena i topline kroz spojeve tijekom početnih faza izloženosti požaru.


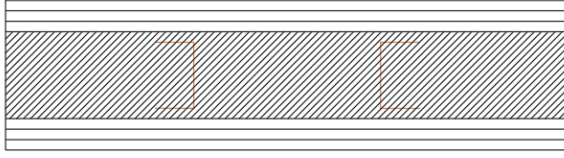


Slika 10: Intumescentni materijal za spojeve ploča

Prostor oko čeličnih profila Panela 2 popunjen je polimernom pjenom tip Ecofoam proizvođača Foam Supplisee koja se koristi kao toplinska izolacija panela.

U Tablici 4 prikazani su poprečni presjeci oba uzorka i njihov sastav.

**Tablica 4:** Poprečni presjek uzoraka, sastav i debljina

	Poprečni presjek	Sastav	Ukupna debljina
Panel 1		2GP – zrak - 2GP	185 mm
Panel 2		3GP – PUR - 3GP	210 mm

## 5. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

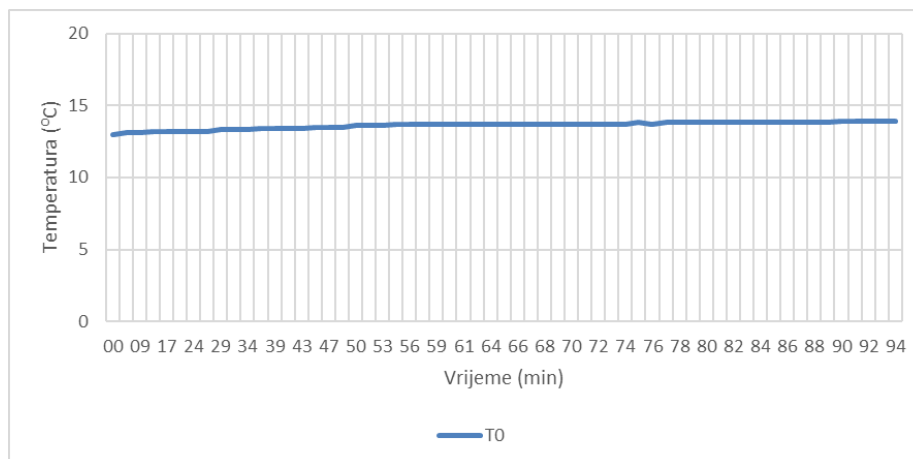
Ispitivanje otpornosti oba panela na požar provedeno je na jednom simetričnom uzorku koji je izložen požaru s jedne strane (Slika 11). Uzorak ne odgovara u potpunosti zahtjevima norme koja se koristila za ispitivanje (HRN EN 1365-1:2012 + Ispr.1:2013) jer su mu dimenzije manje od propisanih i termoelementi su postavljeni unutar uzorka.



Slika 11: Oznaka izložene strane uzorka panela

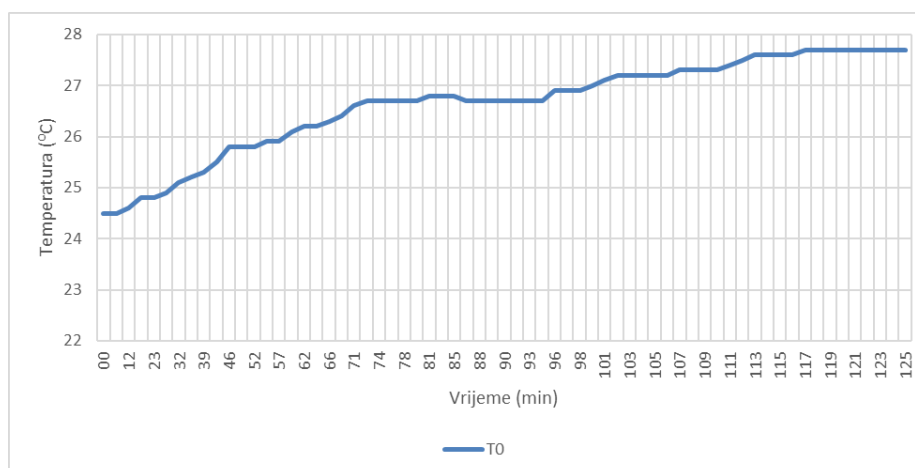
Prije provedbe ispitivanja uzorci su bili u laboratoriju gdje je relativna vlažnost bila 50%, a temperatura zraka održavana je na  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  24 sata prije ispitivanja.

Tijekom ispitivanja Panela 1 temperatura okoline bila je oko  $13^\circ\text{C}$  (Slika 12), a relativna vlažnost zraka 28,3%.



Slika 12: Dijagram temperature okoline tijekom ispitivanja panela 1

Na dan ispitivanja Panela 2 temperatura okoline kretala se od 24,5°C do 27,7°C (Slika 13), a relativna vlažnost zraka 52,1%.

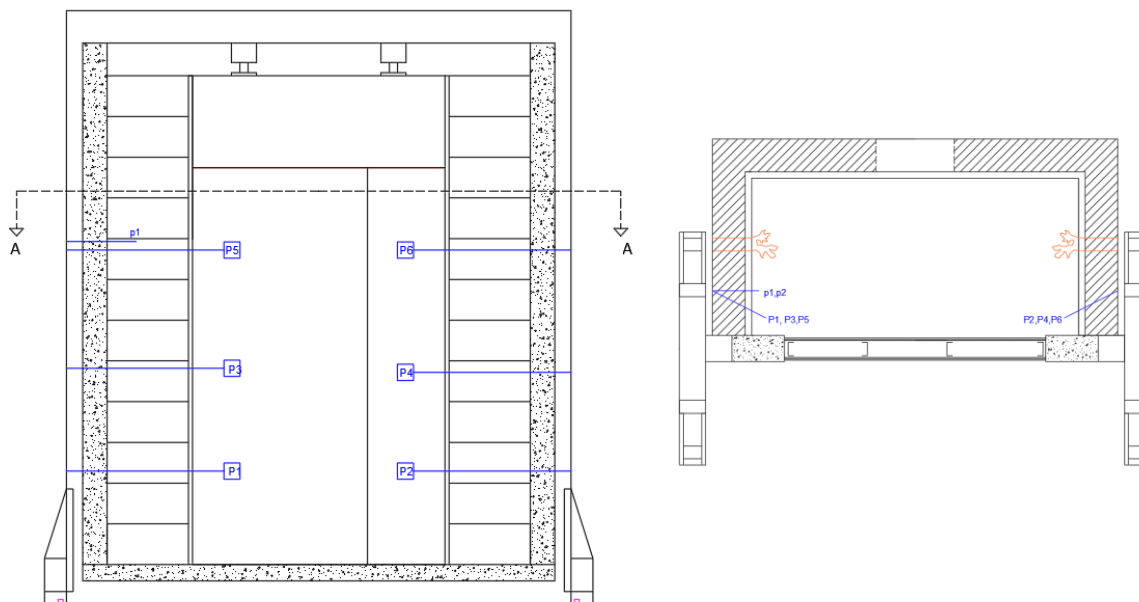


Slika 13: Dijagram temperature okoline tijekom ispitivanja Panela 2

Ispitna požarna peć omogućava standardnu izloženost ispitnih uzoraka vatri s obzirom na toplinsku izloženost i tlak. Visoka požarna temperatura se u peći ostvaruje pomoću šest plamenika (Slika 14) na tekuće gorivo – lož ulje, u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 4.1 i 4.2. [16] Zagrijavanje u peći određeno je po standardnoj temperaturnoj krivulji, u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 5.1 [16], koja je definirana prema formuli  $T = 345 \log(8t + 1) + 20$ , gdje je  $T$ - prosječna temperatura u peći (°C), a  $t$  - vrijeme (min). Temperatura u peći mjerena je sa šest ravnomjerno raspoređenih termoelemenata tipa K, čiji je vrhući spoj učvršćen u centru ploče u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka

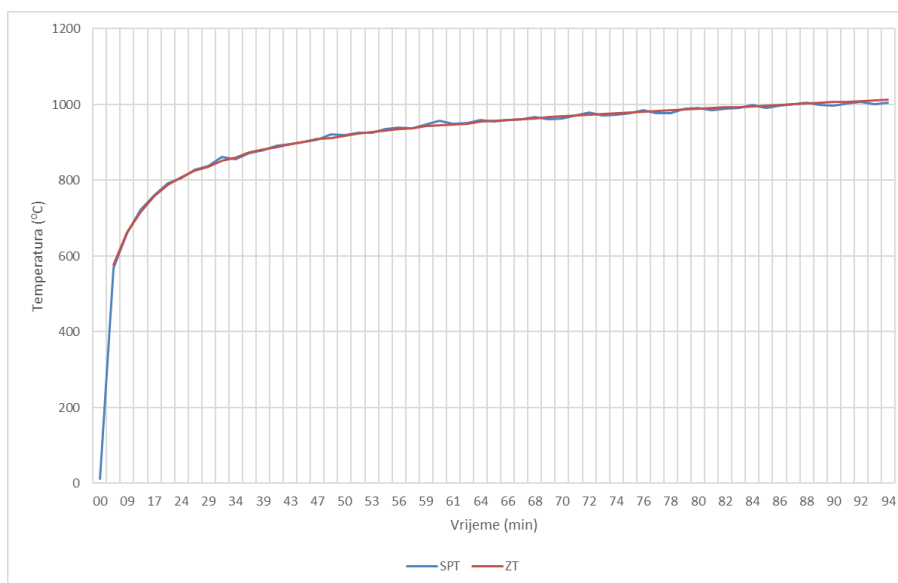


4.5.1.1. [16]. Postavljeni su tako da nisu u kontaktu s otvorenim plamenom i udaljeni su 100 mm od izložene strane uzorka panela.



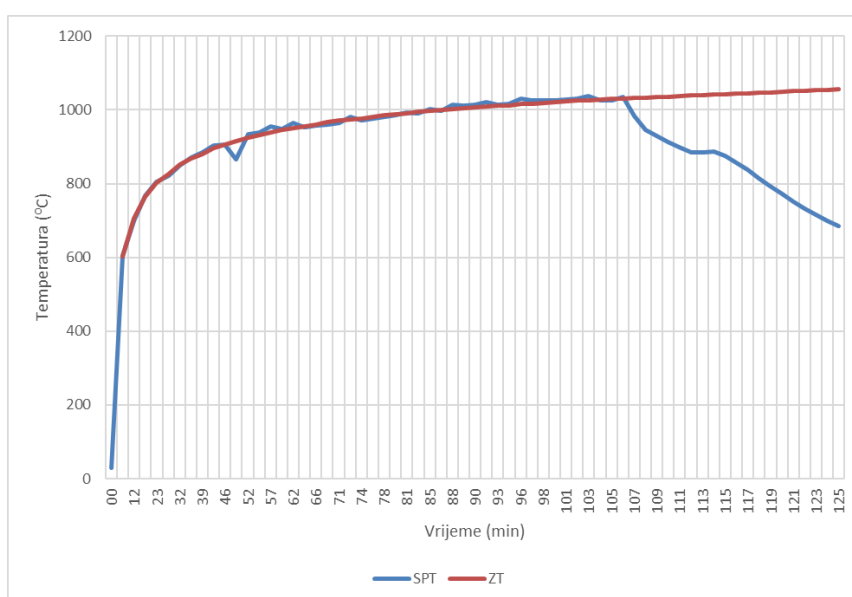
Slika 14: a) Mjerna mjesta temperature u peći b) Poprečni presjek peći

Na Slici 15 prikazana je srednja postignuta temperatura u peći (SPT) i zadana temperatura (ZT) prema standardnoj krivulji požara tijekom ispitivanja Panela 1. Srednja postignuta temperatura je izračunata kao prosjek izmjerenih temperatura na 6 termoelemenata u peći. U prvih 5 minuta od početka ispitivanja razlika je oko  $7^{\circ}\text{C}$ , a nakon toga se može vidjeti da se one većim dijelom poklapaju, s nekim manjim odstupanjima. Temperatura raste sve do 95. minute do kada se vrši ispitivanje i održava se standardna krivulja požara. U 94. minuti temperaturna krivulja doživljava vrhunac od oko  $1004,9^{\circ}\text{C}$ .



Slika 15: Dijagram zadane temperature i srednje postignute temperature u peći tijekom ispitivanja Panela 1

Srednja postignuta temperatura u peći i zadana temperatura prema standardnoj krivulji požara tijekom ispitivanja Panela 2 prikazane su na Slici 16. Poklapaju se na svim dijelovima, osim na 49. minuti kad je zabilježen pad temperature na plamenicima P2 i P5, te u trenutku gašenja plamenika. Plamenici peći su ugašeni u 108. minuti i nakon toga se ne održava standardna požarna krivulja, već se samo mjere temperature na uzorku.



Slika 16: Dijagram zadane temperature i srednje postignute temperature u peći tijekom ispitivanja Panela 2

Unutar uzorka i na njegovu požaru neizloženu površinu postavljeni su termoelementi kojima će se tijekom ispitivanja mjeriti temperature na pojedinim dijelovima uzorka (Slika 17). Temperatura je mjerena s termoelementima NiCr-Ni, (tip K) žice  $\varnothing$  0,5 mm, zavarenim na bakrenim diskovima  $\varnothing$ 12,0 mm debljine 0,2 mm, djelomično u skladu s normom HRN EN 1363-1:2020, točka 4.5.1.2 [16]. Prekriveni su s anorganskim izolirajućim materijalom dimenzija 30x30x2 mm i pričvršćeni lijepljenjem anorganskim ljepilom. Termoelementi su postavljeni na pozicije djelomično u skladu s normom HRN EN 1365-1:2012 + Ispr.1:2013, točka 9.1.2 [17].

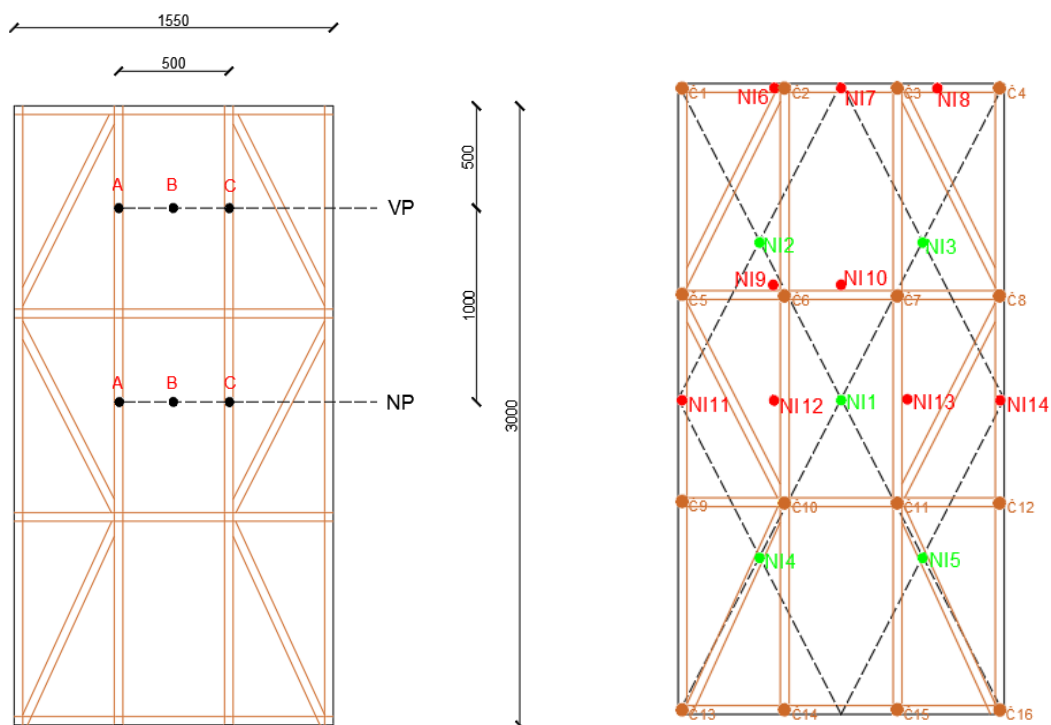
Termoelementi unutar uzorka postavljeni su između slojeva ploča, na granici ploča i šupljine, te na čeličnoj konstrukciji (Slika 17a). Svi termoelementi unutar uzorka postavljeni su na dvije visine: više pozicije su udaljene 500 mm od gornjeg ruba uzorka, a niže pozicije su udaljene 1500 mm od gornjeg ruba uzorka. Na Slici 17a više pozicije označene su s VP, a niže pozicije s NP.

Oznake i pozicije termoelemenata za mjerenje promjene temperature na neizloženoj strani prikazane su na Slici 17b. Termoelementi s oznakama 1-5 mjere promjenu prosječne temperature na požaru neizloženoj strani (zelene pozicije na Slici 17b), dok termoelementi s oznakama 6-14 mjere promjenu maksimalne temperature na požaru neizloženoj strani uzorka (crvene pozicije na Slici 17b).

Lokacije termoelemenata su sljedeće:

- Mjerno mjesto broj NI1 nalazi se na sredini uzorka
- Mjerna mjesta broj NI2, NI3, NI4, NI5 su na sredini svake četvrtine uzorka
- Mjerna mjesta broj NI6, NI7, NI8 su 20 mm udaljena od gornjeg ruba uzorka
- Mjerna mjesta broj NI11, NI14 su 20 mm od slobodnog ruba uzorka, na sredini visine uzorka
- Mjerna mjesta broj NI9, NI10 su 985 mm od gornjeg ruba uzorka (20 mm iznad horizontalnog spoja ploča na Panelu 1)
- Mjerna mjesta broj NI12, NI13 nalaze se na sredini visine uzorka

Na slici 17b) su uz termoelemente označeni i čvorovi čelične rešetke.

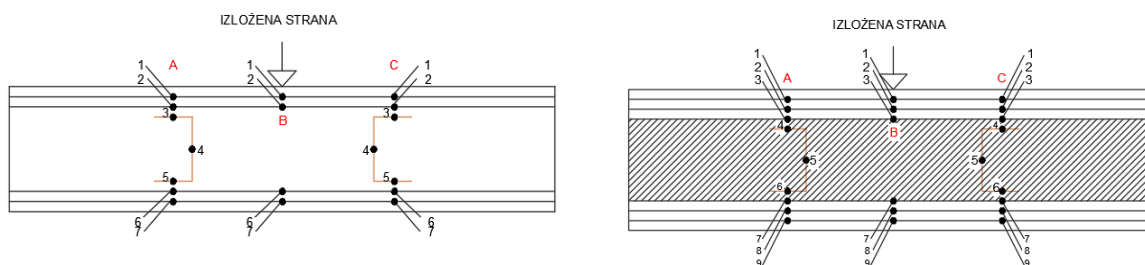


Slika 17: a) Raspored termoelemenata na višim i nižim pozicijama b) Raspored termoelemenata na neizloženoj strani

Na Slici 18a u presjeku Panela 1 mjerna mjesta 1, 2, 6 i 7 nalaze se između slojeva obložnih ploča, a mjerna mjesta 3, 4, 5 nalaze se na vertikalnim čeličnim profilima.

Na Slici 18b u presjeku Panela 2 mjerna mjesta 1, 2, 3, 7, 8 i 9 nalaze se između slojeva obložnih ploča, a mjerna mjesta 4, 5, 6 nalaze se na vertikalnim čeličnim profilima.

Izložena strana označava stranu uzorka s koje je bio izložen požaru tijekom ispitivanja.



Slika 18: a) Položaj termoelemenata u presjeku Panela 1 b) Položaj termoelemenata u presjeku Panela 2

Rezultati mjerenja promjene temperature na pojedinim termoelementima prikazani su u nastavku u obliku dijagrama, uključujući više i niže pozicije. Za svaku poziciju i visinu izračunava se aritmetička sredina, koja se uzima kao relevantna promjena temperature za tu poziciju. Primjerice, za poziciju između prvog i drugog sloja ploča na visini od 500mm od gornjeg ruba uzorka (VP) relevantna promjena temperature je izračunata kao  $(1A-VP+1B-VP+1C-VP)/3$ . Ta temperatura označena je s Pozicija 1-VP. Tim postupkom izračunat je prosjek svih zabilježenih promjena temperature u vremenskom intervalu od 1 minute.

Uzorak je ugrađen (Slika 19) u okvir ispitne peći kojoj su svijetle dimenzije otvora 1600x3020 mm. Okvir je prilagođen za ispitivanje nosivih građevinskih elemenata i izveden je prema slici 1 norme HRN EN 1365- 1:2012 + Ispr.1:2013 [17]. Uzorak je učvršćen samo na donji horizontalni dio okvira ispitne peći koji je izveden od armiranog betona gustoće oko  $1600 \text{ kg/m}^3$ , u 4 točke preko čeličnog lima dimenzija 1500x220x6 mm (Slika 20a). Učvršćenje je izvedeno pomoću čeličnih sidrenih vijaka i matica M12, na međusobnom razmaku od 500 mm.



Slika 19: Uzorak panela ugrađen u okvir ispitne peći na početku ispitivanja

Dodatna širina otvora peći ispunjena je negorivim blokovima od autoklaviranog porobetona (AAC) i keramičkom vunom (gustoće 130 kg/m<sup>3</sup> i debljine 25,4 mm) s obje strane ispitnog uzorka i smatra se slobodnim krajevima uzorka (Slika 20b).



Slika 20: a) Učvršćenje uzorka panela na betonski prag peći b) Keramička vuna, blokovi od autoklaviranog porobetona i termoelementi na slobodnim krajevima praznog panela

Opterećenje nanoseno na uzorke je ostvareno pomoću hidrauličkog sustava koji preko dvije točke prenosi silu na horizontalnu krutu gredu, pa se preko nje prenosi opterećenje kontinuirano na uzorak. Uvjeti opterećenja odgovaraju primjeru d) prikazanom na slici 1 norme HRN EN 1365-1:2012 + Ispr.1:2013 [17], gdje je prikazan sustav za prijenos opterećenja te primijenjeno opterećenje s gornje strane ispitnog uzorka.

Panel 1 je prije početka ispitivanja postupno opterećen kontinuiranim opterećenjem od 15 kN/m, što je jednako ukupnom kontinuiranom opterećenju od 22,5 kN. Opterećenje je postignuto 20 minuta prije početka ispitivanja, te je održavano tijekom cijelog ispitivanja, sve do kraja 92. minute (2 minute prije kraja ispitivanja).

## 5.1. Ispitivanje panela 1

U nastavku su dani rezultati mjerenja temperature na Panelu 1. Na svakom dijagramu promjene temperature u vremenu prikazan je odgovarajući poprečni presjek uzorka s oznakama pozicija mjerenja temperature. Crtkane linije dijagrama pripadaju termoelementima pozicioniranim na čeličnim nosačima.

Na Slici 22 prikazana je promjena temperature zabilježena na svim termoelementima koji se nalaze na višim pozicijama (VP) Panela 1 (prema Slici 17). Crvenom vertikalnom linijom označeno je vrijeme u kojem je došlo do prekida nanošenja opterećenja - 93. minuta.

Kroz mali prozorčić na bočnoj strani peći, uočeno je da u prvih 5 minuta od početka ispitivanja požaru izložena površina uzorka već je potamnila, a ekspandirajući materijal na spojevima ploča počinje već izlaziti.

Nakon toga temperature na svim pozicijama počinju rasti, a najveći porast zabilježen je između ploča na izloženoj strani uzorka, jer je to sloj najbliži peći (pozicija 1). Na toj poziciji nakon 17. minute temperatura kreće značajnije rasti, a ploče s izložene strane su tada već počele ponovno bijeliti. U 9. minuti se na prvom izloženoj ploči primijeti plato na 100°C, na toj temperaturi dolazi do isparavanja vode iz gips vlaknastih ploča i njihovog gubitka mase (oko 15%). Površina izloženih ploča je tada ponovo potpuno pobijelila, a ekspandirani premaz na spojevima je mjestimično pobijelio (Slika 21). Dalje temperatura raste jednoliko sve do kraja ispitivanja kada doseže vrijednost od 773°C.

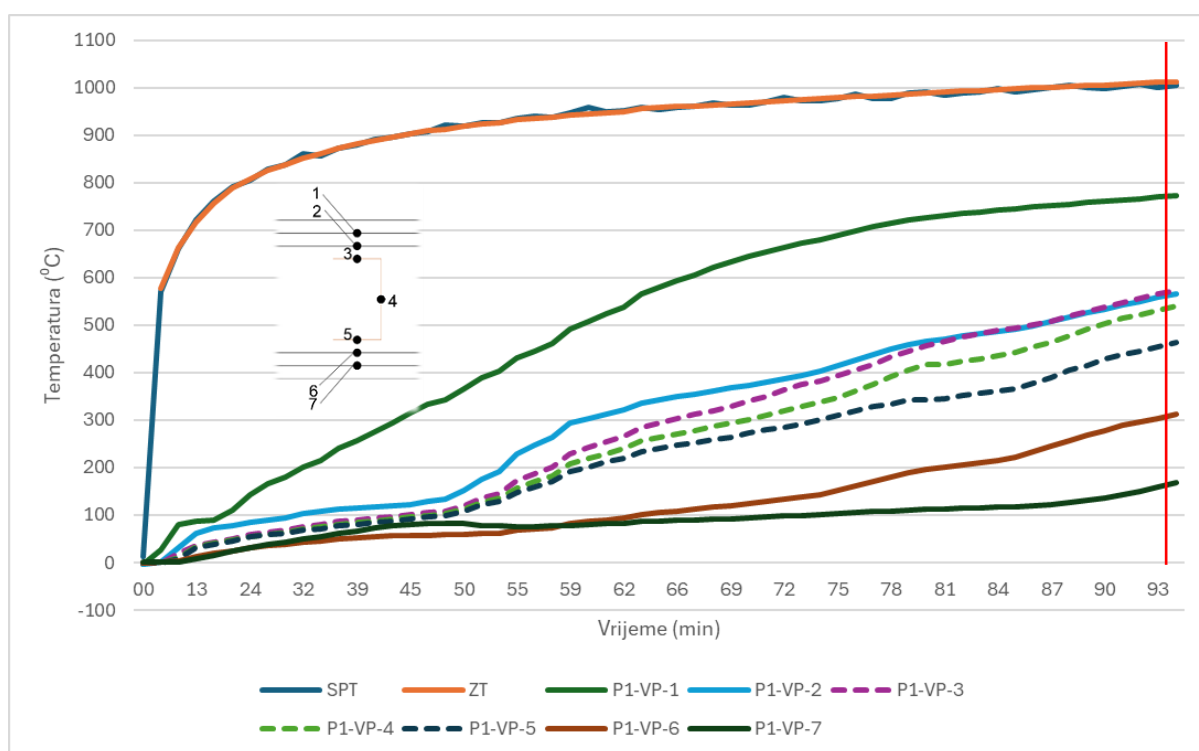


Slika 21: Detalj spoja ploča Panela 1

Na pozicijama iza druge ploče na izloženoj strani (pozicija 2) i na čeličnim nosačima (pozicije 3,4,5) temperature rastu sličnim tempom. Najvidljiviji porast temperature na toj dubini

kreće od 48. minute. Prema Slici 8, u gips vlaknastim pločama prva endotermna reakcija se odvija pri 160°C. Ta temperatura postignuta je oko 51. minute i tada bi trebalo doći do najvećeg porasta specifične topline. U intervalu 100-200°C zabilježen je i najveći pad mase ploča zbog isparavanja vode (Slika 8). U 59. minuti temperatura doseže 300°C, kada je zabilježen drugi pad mase ploča i tada je zabilježen sljedeći porast temperature iza druge ploče.

Ispred prve ploče na neizloženoj strani i između ploča na neizloženoj strani (pozicije 6 i 7) su izmjerene najmanje promjene temperature jer su udaljenije od peći. Na poziciji 7 najveća izmjerena promjena temperature između slojeva ploča iznosi tek 167°C. To znači da je ukupna razlika u temperaturi između pozicija 1 i 7 - 606°C. Toj razlici pridonijele su samo ploče koje su sprečavale prijenos topline.



Slika 22: Promjene temperature unutar uzorka na višim pozicijama Panela 1

Na Slici 25 prikazani su porasti temperature zabilježeni na svim termoelementima koji se nalaze na nižim pozicijama (NP) Panela 1. Crvenom vertikalnom linijom označeno je vrijeme u kojem je došlo do prekida nanošenja opterećenja - 93. minuta

Na prvi pogled se može primijetiti da su promjene temperature na donjim pozicijama puno veće nego na gornjim. Dok je na gornjim pozicijama između sloja ploča na izloženoj strani



(pozicija 1) najveća temperatura iznosila 773°C u 94. minuti ispitivanja, na donjim pozicijama na istoj dubini presjeka je ta temperatura postignuta 30 minuta ranije. Jednako kao i na gornjim pozicijama, temperatura dostiže plato zbog isparavanja vode na 100°C, i onda počinje rasti nakon 17. minute. Nakon malo više od sat vremena od početka ispitivanja dostiže vrijednosti oko 800°C, te je na toj vrijednosti do kraja 94. minute.

Na čeličnim profilima (pozicije 3, 4, 5), te na granici ploča i šupljine (pozicije 2, 6), zabilježen je manji rast temperatura nego na poziciji 1. Prva značajnija promjena temperature dogodila se u približno isto vrijeme kao i na visokim pozicijama – oko 50. minute. Tada dolazi do endotermne reakcije povezane s gubitkom vode iz gips vlaknastih ploča. Na gornjoj lijevoj strani uzorka uz vertikalni rub dolazi do pojave dima. Na sredini uzorka tada mjestimično otpada prvi sloj ploča i počinje tamniti drugi sloj ploča. Sat vremena od početka ispitivanja iza druge ploče je izmjereno 300°C (drugi gubitak mase), pa temperaturna krivulja mijenja nagib. Sljedeći temperaturni skok kreće u 70. minuti, kada se čelik zagrijava preko 400°C i počinje gubiti svoju nosivost. Sedam minuta kasnije otvara se horizontalni spoj na pločama drugog sloja. U 81. minuti djelomično otpada drugi sloj ploča na tom mjestu i čelična konstrukcija postaje izložena. Oko 90. minute na čeličnom nosaču (pozicije 3, 4) dolazi do posljednjeg skoka u temperaturi koja se penje na 942°C. Pri ovim temperaturama čeliku se mijenja kristalna struktura, postaje izrazito plastičan i sklon deformaciji pod opterećenjem i može doći do sloma konstrukcije. Na kraju 92. minute se iz tog razloga opterećenje uklanja. Čelik je bio većim dijelom ispitivanja zaštićen gips-vlaknastim pločama, ali nakon pucanja drugog sloja ploča ostaje izložen sve do kraja ispitivanja (Slika 23a), ukupno 14 minuta. Tada je u ispitnoj peći bilo 1000°C. Na Slici 23b vidi se da su ploče otpale samo na donjem dijelu uzorka, ispod horizontalnog spoja, jer su na tom dijelu uzorka razvijene veće temperature, pa takva vrsta oštećenja se i očekuje.



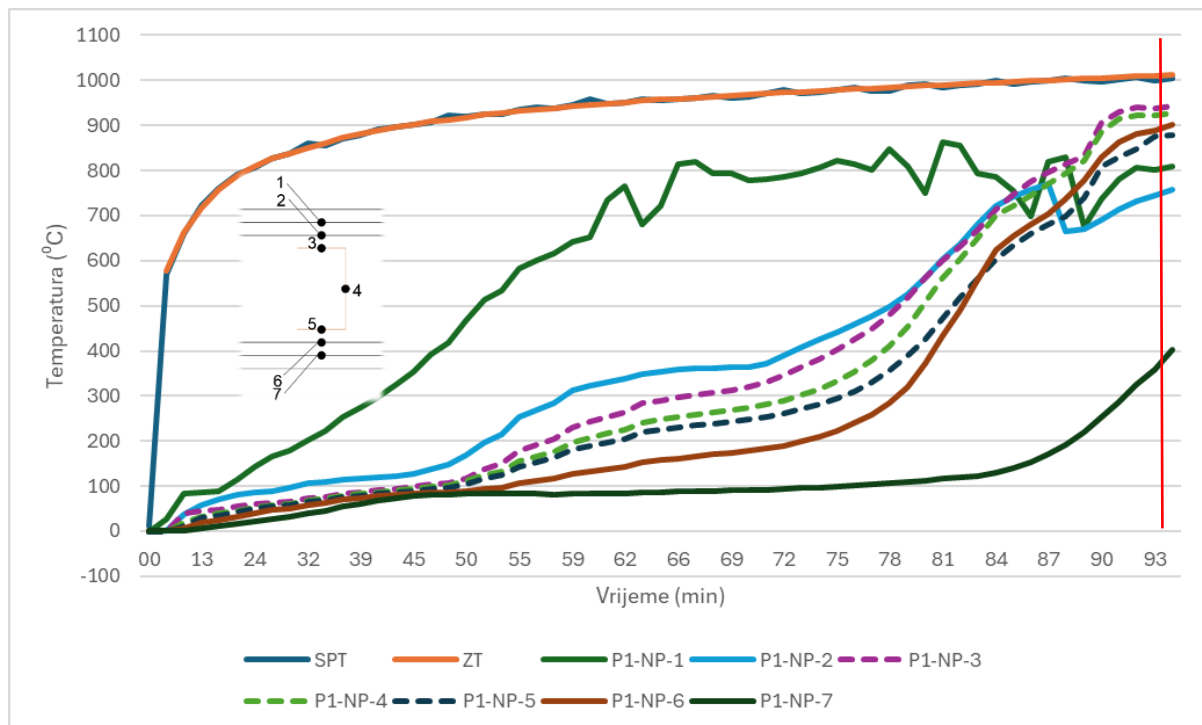
Slika 23: a) Izložena čelična konstrukcija Panela 1 nakon ispitivanja b) Gornji dio uzorka na izloženoj strani

Na Slici 24 vide se izbliza čvorovi rešetke 10 i 6 nakon ispitivanja. Na njima je uslijed djelovanja topline došlo do lokaliziranog izvijanja. Može se vidjeti i promjena boje čelika, od žućkaste do smeđe. Pošto je čvor 10 u donjem dijelu uzorka i bio je izložen višim temperaturama, na njemu je značajno veće oštećenje. Na Slici 24c vidljivo je globalno izvijanje dijagonale.



Slika 24: a) Čvor 6 nakon ispitivanja b) Čvor 10 nakon ispitivanja c) Čelična dijagonala između čvorova 8 i 11 nakon ispitivanja Panela 1

Ispred prve ploče na neizloženoj strani (pozicija 6) je na donjim pozicijama dostignuta puno veća temperatura nego na gornjima, čak  $902^{\circ}\text{C}$ . Na istoj poziciji gore iznosila je  $311^{\circ}\text{C}$ . Između ploča na neizloženoj strani (pozicija 7) je i na ovoj visini najmanja temperatura, doseže samo  $403^{\circ}\text{C}$ .



Slika 25: Promjene temperature unutar uzorka na nižim pozicijama Panela 1

Na svim pozicijama na neizloženoj strani izmjerene su promjene temperature, pa su tim promjenama dodane temperature okoline sa Slike 12 kako bi se dobile ukupne temperature koje su bile na neizloženoj strani uzorka u danom vremenu. Te temperature prikazane su na Slici 26.

Pri ispitivanju otpornosti konstrukcije na požar prema HRN EN 1365-1:2012+Ispr.1:2013 [17] ona se ocjenjuje prema tri osnovna kriterija [2]:

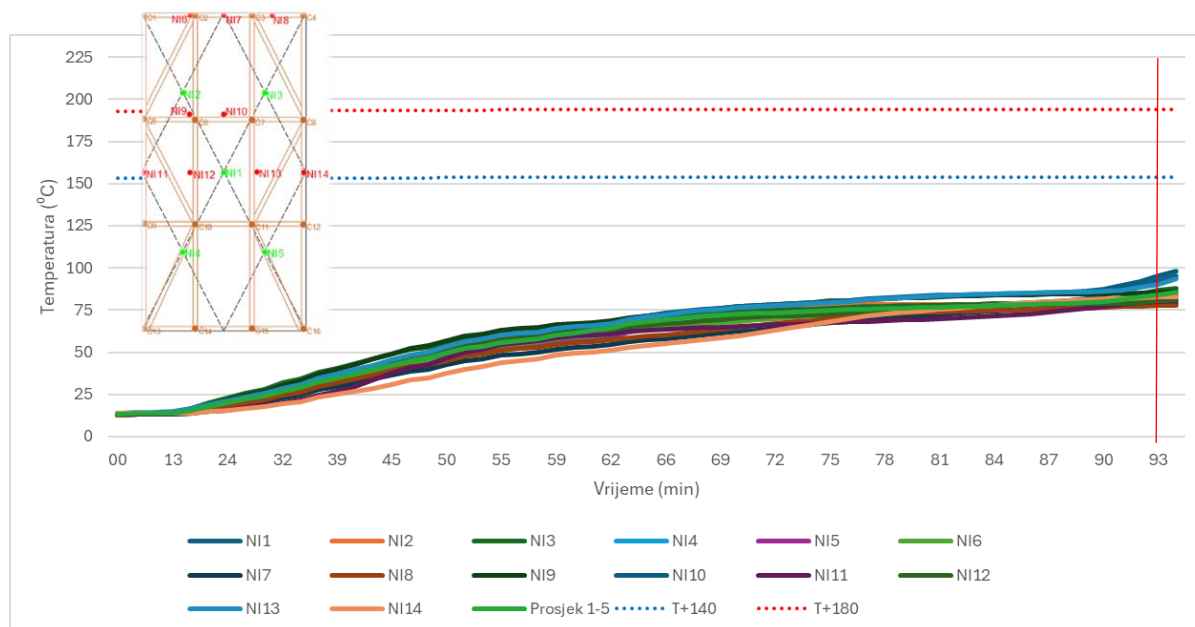
1. **Nosivost (R):** Sposobnost konstrukcije da zadrži nosivost pod utjecajem požara.
2. **Cjelovitost (E):** Sposobnost konstrukcije da spriječi prolazak plamena i toplih plinova na neizloženu stranu.
3. **Izolacijska sposobnost (I):** Sposobnost konstrukcije da ograniči porast temperature na neizloženoj strani (ovdje se koriste kriteriji  $T + 140^{\circ}\text{C}$  i  $T + 180^{\circ}\text{C}$ )

U ovom diplomskom radu nije analizirana nosivost panela, nego isključivo dva ostala kriterija, cjelovitost i izolacijska sposobnost. Prema 3. kriteriju, rezultati ispitivanja neizložene strane uspoređeni su s dopuštenim porastima temperature.

Plavom linijom označen je kriterij „T+140“ koji označava prosječan porast temperature na neizloženoj strani zida. Za taj kriterij koriste se temperature s pozicija NI1-NI5 jer oni mjere prosječne temperature. Za svaki vremenski inkrement izračunat je prosjek tih pet temperatura i prikazan na Slici 26. „T“ u formuli „T+140“ označava temperaturu zraka (Slika26). Prosjek NI1-NI5 ne smije preći liniju „T+140“, tj. prosječna temperatura ne smije porasti za više od 140°C.

Crvenom linijom označen je kriterij „T+180“ koji se odnosi na maksimalni porast temperature na neizloženoj strani zida. Za taj kriterij koriste se temperature s pozicija NI6-NI14 koje mjere maksimalne temperature. „T“ opet označava temperaturu okoline (Slika 26). Maksimalna temperatura izmjerena na bilo kojoj od tih pozicija ne smije preći liniju za ovaj kriterij.

Na Slici 26 se može vidjeti da nijedna od prosječnih ni maksimalnih temperatura na neizloženoj strani Panela 1 nije prešla dopuštene vrijednosti, što znači da je uzorak zadovoljio kriterij za izolacijsku sposobnost. Najveća temperatura od 98,3°C izmjerena je na poziciji NI10, smještenoj 20 mm od horizontalnog spoja ploča na sredini uzorka, koja predstavlja rizično mjesto.



Slika 26: Razvijene temperature na neizloženoj strani Panela 1

Uzorak se na sredini, s izložene strane, deformirao u smjeru peći. S neizložene strane se deformirao u suprotnom smjeru (Slika 27a). Na Slici 27b prikazan je detalj spoja vertikalnog ruba zida i ispitne peći, a između je keramička vuna. Može se vidjeti kako se vanjska ploča s neizložene strane odvojila od unutarnje ploče i gips-vlaknastih traka na obodu uzorka. Na neizloženoj strani uzorka na kraju 94. minute nije bilo promjene boje ploča, niti je bilo kakvih pukotina.



**Slika 27:** a) Deformacije neizložene strane Panela 1 nakon ispitivanja b) Detalj slobodnih rubova zida

Nakon završetka ispitivanja došlo je do daljnjeg odlamanja komadića gips-vlaknastih ploča (Slika 28a). Uzorak je uklonjen iz peći, te su se u transportu odlomili još neki komadići ploča (Slika 28b). Gipsane ploče također su izgubile na masi tijekom ispitivanja. Ispitivanjima je utvrđeno da bez obzira na sastav i proizvođača, sve gipsane ploče se relativno slično ponašaju u požaru. Zbog kemijskih reakcija koje se događaju tijekom požara ploče gube na masi u dva intervala, prvi je 80-140°C, a drugi interval 270-500°C. Ukupan gubitak u prvom intervalu je 15% mase, a u drugom 10%.



Slika 28: a) Komadići gips-vlaknastih ploča u peći nakon ispitivanja b) Uzorak izvađen iz peći

## 5.2. Ispitivanje panela 2

Na Slici 29 prikazana je promjena temperature zabilježena na svim termoelementima koji se nalaze na višim pozicijama (VP) Panela 2. Crvenom vertikalnom linijom označeno je vrijeme u kojem je došlo do prekida nanošenja opterećenja - 106. minuta. Plavom vertikalnom linijom označeno je vrijeme gašenja peći - 107. minuta. Nakon toga se samo mjere promjene temperature do kraja 125. minute.

Na višim pozicijama Panela 2 na sloju najbližem peći termoelement P2-VP-1A nije bio u funkciji, a na termoelementu P2-VP-1B su zabilježene temperature koje odstupaju od ostatka, te su zanemarene. Tako je za poziciju 1-VP uzeta promjena temperature zabilježena samo na termoelementu P2-VP-1C. Termoelementi P2-VP-1A, P2-VP-2A, P2-VP-3A, P2-VP-5A i P2-VP-9A nisu bili u funkciji

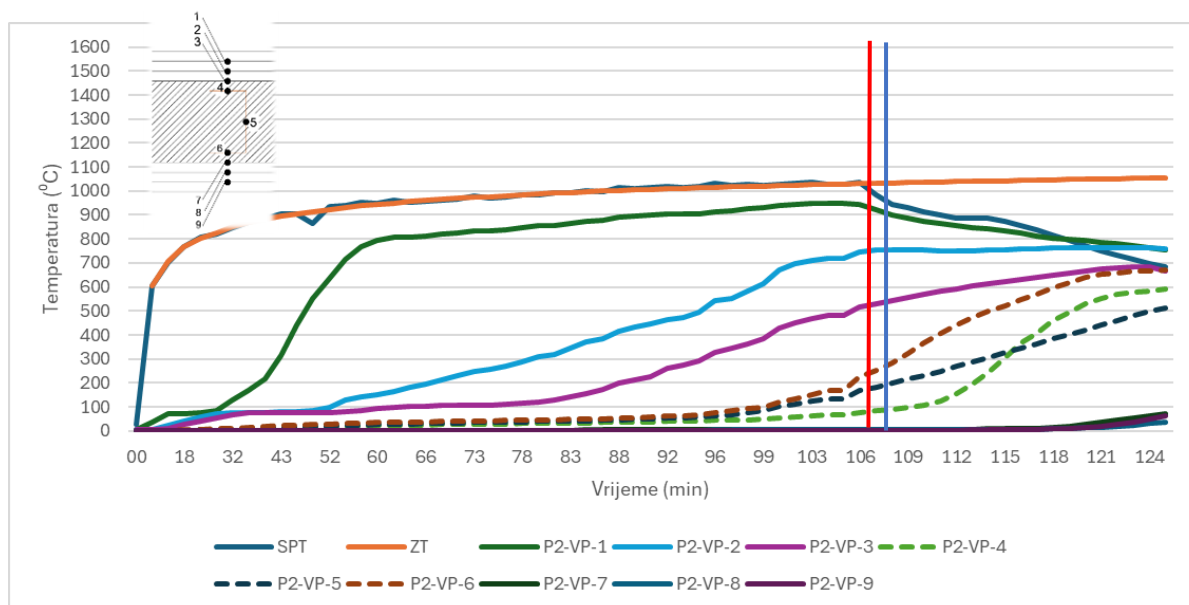
Jednako kao i na Panelu 1, u prvih 5 minuta od početka ispitivanja su potamnili spojevi i površina uzorka, te izlazi ekspandirajući materijal na spojevima ploča na izloženoj strani uzorka. Deset minuta kasnije ploče su ponovno pobijelile. U 28. minuti prvi izloženi sloj ploča se blago deformira prema peći. Tada dolazi do pucanja i raslojavanja na donjem dijelu uzorka. Na poziciji 1 temperature su za to vrijeme još uvijek ispod  $100^{\circ}\text{C}$  zbog isparavanja slobodne

i vezane vode iz ploča. Na toj poziciji izmjerene su najveće promjene temperature zbog njene izloženosti. Temperature na poziciji 1 naglo rastu između 30. i 60. minute jer je u tom intervalu zabilježen drugi gubitak mase ploča zbog raspada organskih dijelova - odvajaju se ploče prvog sloja, izlaze plamenovi kroz pukotine, i u konačnici mjestimično otpada prvi izloženi sloj ploča i počinje tamniti površina drugog sloja ploča.

Iza drugog sloja ploča (pozicija 2) je značajno manji porast temperature. Kreće značajniji rast temperature u 52. minuti (isparavanje vode), te nedugo nakon toga otpada prvi sloj ploča. Jednakom brzinom raste sve do trenutka kada se gasi peć u 107. minuti (plava vertikalna linija). Na kraju mjerenja u 125. minuti temperatura na toj poziciji iznosi 755°C.

U 83. minuti izlazi plamen iz spojeva i pukotina na drugom sloju ploča, toplina dolazi do treće ploče i tada počinje nagli rast temperature na spoju ploče i polimerne pjene (pozicija 3). U 90. minuti otpada drugi sloj ploča. Iza treće ploče, na granici s pjenom (pozicija 3), temperatura se u tom trenutku penje do 260°C, što je početna temperatura paljenja polimernih pjena, te pjena počinje gorjeti. Temperatura na tim pozicijama ne pada čak ni nakon gašenja plamenika peći.

Temperatura na čeličnim profilima (pozicije 4, 5, 6) raste tek oko 90. minute jer tada počinje gorjeti pjena koja se nalazi oko profila. U tom trenutku se temperatura na čeliku lagano podiže, a najveći porast zabilježen je 15 minuta kasnije, nakon gašenja peći (vertikalna plava linija). PUR pjena ima veliku brzinu oslobađanja topline tijekom gorenja zbog čega i jesu na kraju ispitivanja zabilježene visoke temperature na čeliku i na plohi ploče koja graniči s pjenom na požaru izloženoj strani. Također, PUR pjena ima nisku toplinsku vodljivost i služi kao toplinska barijera, tj. zaustavlja prolazak topline na neizloženu stranu. Iz tog razloga je velik temperaturni gradijent na pozicijama koje graniče s PUR pjenom s izložene i neizložene strane (pozicije 3 i 7) – oko 600°C.



Slika 29: Promjene temperature unutar uzorka na višim pozicijama Panela 2

Na Slici 31 prikazana je promjena temperature zabilježena na svim termoelementima koji se nalaze na nižim pozicijama (VP) Panela 2.

Termoelement P2-NP-1B nije bio u funkciji, pa se na poziciji 1 koristio prosjek temperature zabilježene na preostala dva termoelementa. Na poziciji 8 na termoelementima P2-NP-8A i P2-NP-8B su zabilježene temperature koje odstupaju od ostatka, te su zanemarene, pa je korištena promjena temperature zabilježena samo na termoelementu P2-NP-8C. Termoelement P2-NP-5A nije bio u funkciji.

Kao i na Panelu 1, temperature iza prve izložene ploče (pozicija 1) na donjim termoelementima su više nego na gornjim. Temperatura znatnije raste od 18. minute (nakon evaporacije vode), a u 28. minuti se uzorak deformira prema peći i dolazi do raslojavanja u donjem dijelu uzorka, na horizontalnom spoju ploča (Slika 30a). U 40. minuti se odvajaju ploče prvog sloja i kroz pukotine izlaze plamenovi (Slika 30b). Na toj poziciji veće oscilacije se događaju od 81. minute, kada izlazi plamen iz spojeva i pukotina na drugom sloju ploča (Slika 30c). Najveća temperatura dosegnuta je u trenu kad počinje gorjeti pjena, nakon čega opada.





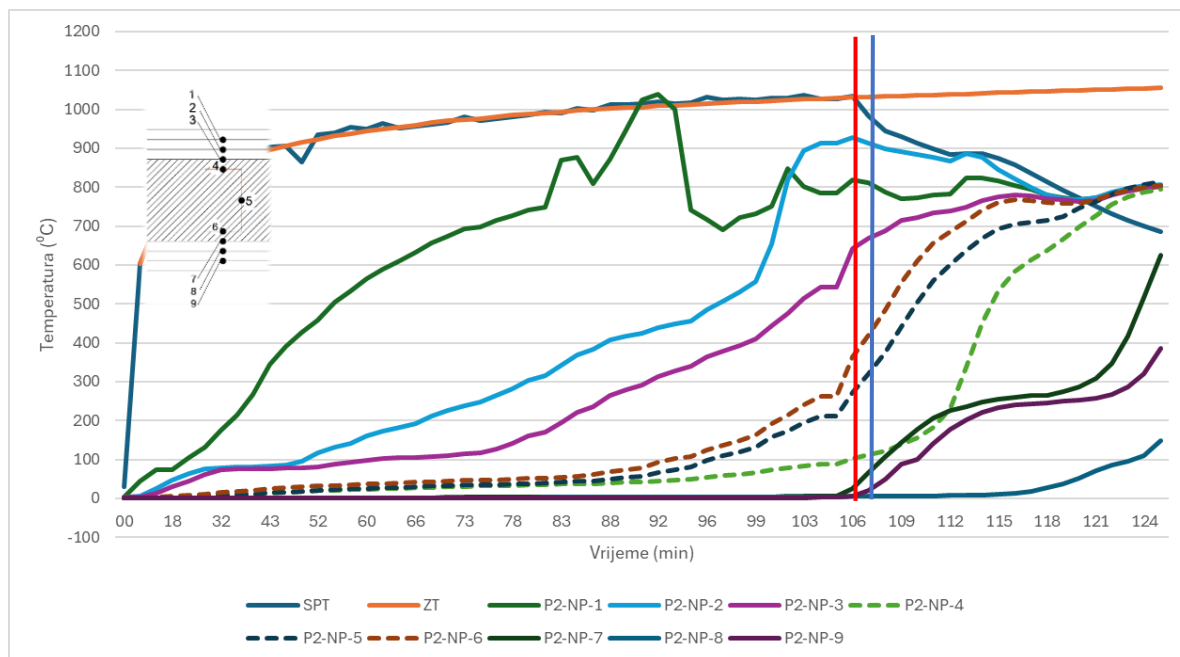
**Slika 30:** a) Početak odvajanja gips-vlaknastih ploča b) Odvajanje prvog sloja ploča c) Izlazak plamena iz spojeva i pukotina na drugom sloju ploča

Iza druge ploče (pozicija 2) temperatura kreće rasti u 50. minuti nakon evaporacije vode. Drugi sloj ploča otpada oko 90. minute. Najveći skok na ovoj poziciji je u 100. minuti, kada pjena već gori. Najveća zabilježena promjena bila je u trenutku gašenja peći (plava vertikalna linija) i iznosila je  $926^{\circ}\text{C}$ , nakon čega opada.

Iza treće ploče (pozicija 3) temperatura je krenula rasti par minuta ranije nego na gornjim pozicijama na istoj dubini. Počinje se zagrijavati otprilike 30 minuta nakon prethodnog sloja. Nakon gašenja plamenika peći (plava vertikalna linija) na prethodne dvije pozicije temperatura opada, dok na ovoj dubini ona nastavlja rasti i najveću vrijednost doseže u 125. minuti -  $800^{\circ}\text{C}$ .

Na čeličnim nosačima (pozicije 4, 5, 6) na donjim pozicijama temperature krenu rasti nakon što počne gorjeti PUR pjena u 90. minuti, te jednako kao i na gornjim pozicijama, rastu sve do kraja ispitivanja, čak i nakon gašenja plamenika. Najviša izmjerena promjena temperature na čeliku iznosila je  $815^{\circ}\text{C}$ .

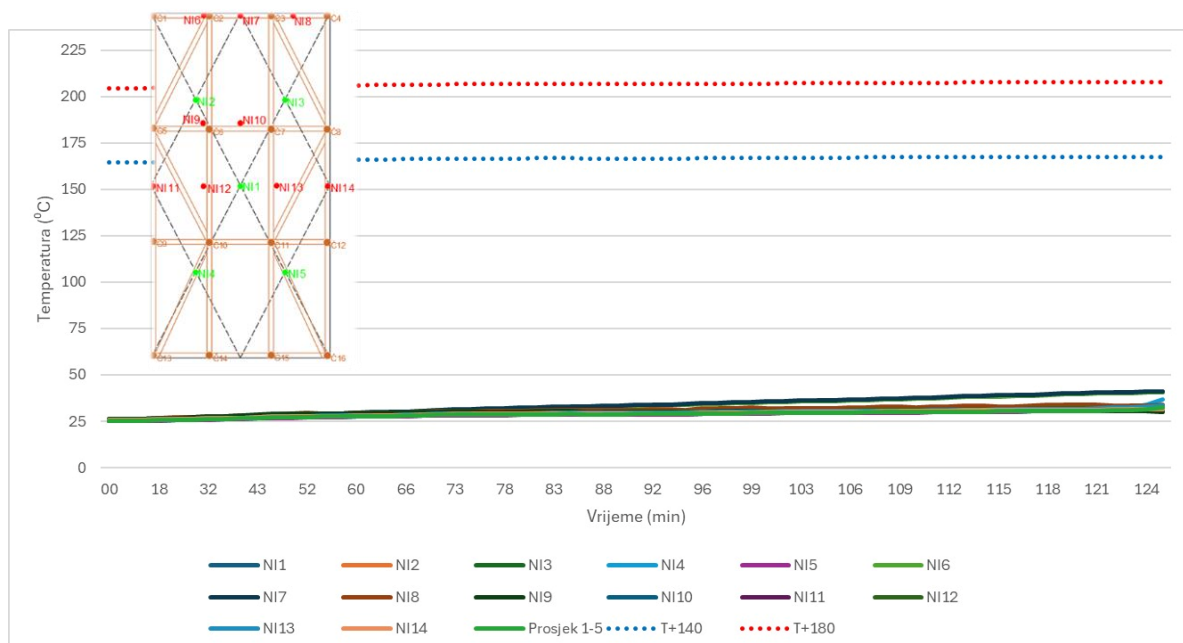
Na neizloženoj strani uzorka (pozicije 7, 8, 9) temperatura raste nakon gašenja peći u 107. minuti. Tada je prošlo 17 minuta od početka gorenja PUR pjene nakon čega se ona pretvorila u ugljen i toplina može slobodno prolaziti na neizloženu stranu. Na termoelementu P2-NP-8B iza prvog sloja ploča na neizloženoj strani već je na početku ispitivanja zabilježena visoka temperatura i pretpostavljeno je da je došlo do kvara.



Slika 31: Promjene temperature unutar uzorka na nižim pozicijama Panela 2

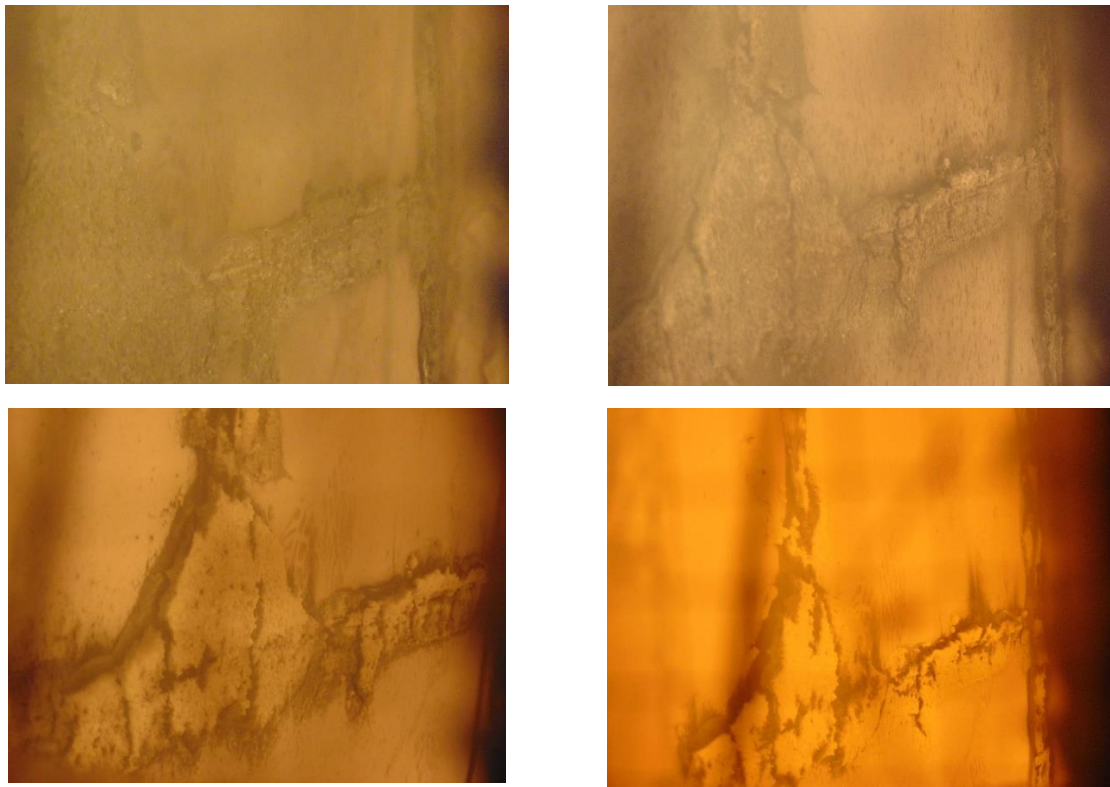
Na svim pozicijama na neizloženoj strani Panela 2 izmjerene su promjene temperature, pa su tim promjenama dodane temperature okoline sa Slike 13 kako bi se dobile ukupne temperature koje su bile na neizloženoj strani uzorka u danom vremenu.

Nijedna od prosječnih ni maksimalnih temperatura na neizloženoj strani nije prešla temperaturu definiranu kriterijem izolacije (prosječni porast temperature od  $140^{\circ}\text{C}$ , te pojedinačno  $180^{\circ}\text{C}$ ), što znači da je uzorak zadovoljio kriterij za izolacijsku sposobnost (Slika 32). Najveća temperatura od  $41^{\circ}\text{C}$  izmjerena je na poziciji NI7, smještenoj 20 mm od gornjeg ruba uzorka. Za usporedbu, na Panelu 1 najveća temperatura na neizloženoj strani iznosila je oko  $100^{\circ}\text{C}$ . To znači da je korištenje toplinske izolacije snizilo temperaturu na neizloženoj strani za  $60^{\circ}\text{C}$ .



Slika 32: Razvijene temperature na neizloženoj strani Panela 2

Na Slici 33 prikazan je intumescentni premaz u različitim fazama ispitivanja Panela 2. U ranim fazama premaz je počeo ekspanzirati, još uvijek pružajući potrebnu zaštitu. Kako ispitivanje napreduje, vidljive su promjene na spojevima ploča, gdje premaz počinje gubiti svoju učinkovitost uslijed visokih temperatura. Na posljednjoj slici vidljiva je značajna degradacija premaza, što pokazuje smanjenje njegove sposobnosti da spriječi prijenos topline i širenje požara. Pojavile su se značajne pukotine na premazu.



**Slika 33:** a) Početak ispitivanja - premaz Promastop-I na spojevima ploča izložene strane Panela 2 b) Srednja faza ispitivanja - djelomične promjene na premazu c) Napredna faza ispitivanja - veće degradacije premaza d) Završna faza ispitivanja - kritične promjene na premazu

Svi slojevi gips vlaknastih ploča na izloženoj strani, kao i prva ploča s neizložene strane koja je graničila s PUR pjenom, pretrpjeli su ozbiljna oštećenja uslijed izloženosti visokim temperaturama (Slika 34). Pjena se u potpunosti pretvorila u ugljen (Slika 34). Čelični nosači postali su izloženi direktnoj vatri nakon što su zaštitni slojevi ploča i pjene popustili, što može dovesti do bržeg popuštanja konstrukcije pod opterećenjem. Iako čelik ima visoku otpornost na požar u početnim fazama izloženosti vatri, dugotrajna izloženost ekstremnim temperaturama uzrokuje gubitak čvrstoće i nosivosti. Na temperaturama iznad 500°C čelik postaje plastičan i gubi sposobnost nošenja opterećenja. Na donjim pozicijama na čeličnim nosačima ta je temperatura zabilježena oko 110. minute. Na čeliku je u konačnici došlo do korozije (Slika 34).



Slika 34: Panel 2 nakon ispitivanja

Na čvoru 11 (Slika 35a) vidljivo je lokalno izvijanje na dijagonalama. Došlo je do korozije na čeličnim distancerima (Slika 35a). Čelični vijci s upuštenom glavom korišteni za pričvršćenje ploča na nosače su korodirali i izvili se (Slika 35b).



Slika 35: a) Izvijanje dijagonala na čvoru 11 nakon ispitivanja Panela 2 b) Čelični vijci nakon ispitivanja

Toplinsko širenje čelika pod visokim temperaturama dovelo je do deformacija i savijanja elemenata. Uzorak se nije mogao deformirati u vertikalnom smjeru (s donje strane bio je upet, a s gornje se nanosilo opterećenje), ali se mogao deformirati u horizontalnom smjeru. Na Slici 36 vidljiva su izvijanja čeličnih dijagonala.



Slika 36: a) Dijagonala između čvorova 2 i 5 b) Dijagonala između čvorova 3 i 8

Horizontalni dio čeličnog nosača između čvorova 5 i 8, kao i dijelovi vertikalnih nosača iznad, imali su najveće deformacije jer su bliže mjestu na kojem se nanosilo opterećenje, pa su naprezanja u tim elementima bila veća (Slika 37).



Slika 37: Horizontalni dio čeličnog nosača između čvorova 5 i 8

### 5.3. Usporedba dvaju panela nakon ispitivanja

Oba panela proizvedena su od istih čeličnih profila i gips-vlaknastih ploča. Panel 1 obložen je s dva sloja ploča, a Panel 2 tri sloja ploča, te je šupljina popunjena polimernom pjenu. Oba su ispitana su u istom laboratoriju, ugrađena u istu peć na jednak način. Oba uzorka su prije ispitivanja bila u laboratoriju pri istim uvjetima okoline. Pri ispitivanju Panela 1 temperatura okoline iznosila je 13°C, a relativna vlažnost zraka 28,3%. Pri ispitivanju Panela 2 temperatura okoline bila je 24,5°C, a relativna vlažnost zraka 52,1%. Termoelementi su jednaki na oba panela i postavljeni su na iste lokacije. Kontinuirano opterećenje nanoseno na Panel 1 iznosilo je 15 kN/m, a na Panelu 2 je iznosilo 25 kN/m. Na Panelu 1 opterećenje je održavano do kraja 92. minute, ispitivanje je nastavljeno do 95. minute održavanjem standardne krivulje požara bez održavanja početne sile. Na Panelu 2 opterećenje je održavano do 107. minute (15 minuta dulje), a ispitivanje je nastavljeno održavanjem standardne krivulje požara bez održavanja početne sile. Plamenici peći su ugašeni u 108. minuti (13 minuta dulje) i nakon toga se ne održava standardna požarna krivulja, već se samo mjere temperature na uzorku. U 126. minuti se prekida mjerenje temperatura na Panelu 2.

Za očekivati je da će na Panelu 2 biti potrebno više vremena da toplina dođe do čeličnih nosača jer je na njemu jedan sloj ploča više nego na Panelu 1. Na Panelu 1 je bilo potrebno 50 minuta da toplina dođe do šupljine i čelika, dok je na Panelu 2 toplina dopirala do pjene ukupno 75 minuta. To znači da je dodatni sloj ploča na Panelu 2 produljio vrijeme prolaska topline do čelika za 30 min. U Panelu 2, kada je temperatura u šupljini dosegla temperaturu paljenja PUR pjene oko 90. minute, nastala dodatna toplina od izgaranja pridonijela je porastu temperature na čeličnim nosačima. Zbog toga su bile visoke temperature na čeliku čak i nakon što su plamenici u peći isključeni.

Na Panelu 1 oko 43. minute na gornjoj lijevoj strani uzorka uz vertikalni rub došlo je do pojave dima. Na Panelu 2 PUR pjena se u potpunosti pretvorila u ugljen (Slika 38b), ali ni jedan uzorak nije podbacio na kriterijima za porast prosječne i maksimalne temperature na neizloženoj strani.



Slika 38: Paneli nakon ispitivanja a) Panel 1 b) Panel 2

Na oba uzorka zagrijavanje je bilo izraženije u donjem dijelu uzorka, nego u gornjem. Na Panelu 1 su na donjim pozicijama bile zabilježene veće temperature i na čeliku i između slojeva ploča, nego u Panelu 2 (Tablica 5). Na Panelu 2 na poziciji iza prve ploče zabilježena je visoka temperatura, i to značajno veća nego na praznom panelu. To može biti rezultat toga što je zagrijavanje veće na donjem dijelu panela, a na Panelu 2 je u tom dijelu horizontalni spoj ploča koji je kritična točka. Tome su također mogle pridonijeti veće početne temperature tijekom ispitivanja panela s pjenom. Panelu 1 temperatura okoline kretala se oko  $13^{\circ}\text{C}$ , a Panelu 2 bila je skoro  $28^{\circ}\text{C}$  pred kraj ispitivanja. Prema prethodnim studijama na LSF zidovima izloženim požaru, strukturni slom obično se javlja zbog nejednolikog zagrijavanja čeličnih elemenata [4]. To je bilo primjetno i u ovom ispitivanju, gdje su deformacije čelika i učinci požara varirali između gornjeg i donjeg dijela panela. Ploče s izložene strane su popucale na donjem dijelu oba panela, a na Panelu 2 najviše su otpadale oko spoja ploča.

Panel 1 se puno više horizontalno deformirao prema peći. Pošto se materijali pri zagrijavanju deformiraju prema izvoru topline, to znači da je došla značajna količina topline do neizložene strane jer nije bilo toplinske izolacije koja bi to spriječila. Najveća temperatura izmjerena na neizloženoj strani iznosila je  $98,3^{\circ}\text{C}$  (Tablica 5). Na Panelu 2 s neizložene strane ploče su se deformirale od peći jer je PUR pjena gotovo 90 min sprečavala toplinu da prođe do njih, pa je najveća ostvarena temperatura tako bila samo  $41,2^{\circ}\text{C}$  (Tablica 5). To znači da je na neizloženim stranama dva panela bilo skoro  $60^{\circ}\text{C}$  razlike.

Panel 1 je imao dvije ploče koje su štatile čelik tijekom izlaganja požaru i nije bilo toplinske izolacije oko njega, što znači da je ranije izložen većim temperaturama i došlo je do

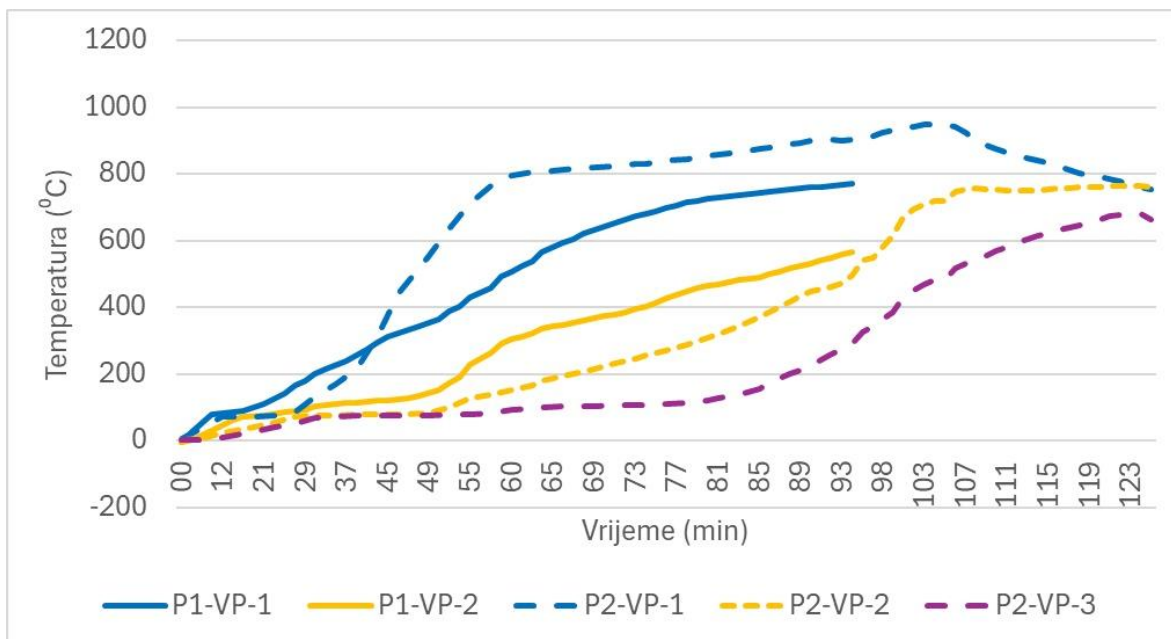


toplinskog širenja čelika. Temperature oko čelika su počele rasti oko 50. minute, a peć je ukupno grijala 95 minuta, što znači da je čelik proveo 45 minuta izložen visokim temperaturama. Čeliku u Panelu 2 temperature su počele rasti tek oko 90. minute zbog dodatnog sloja ploča, a peć je grijala 108 minuta, što znači da je bio na visokim temperaturama 18 minuta, što je značajno manje nego u prethodnom slučaju. Na Panelu 1 čelik je najviše korodirao u donjem dijelu uzorka (Slika 38a) što se poklapa s izmjerenim temperaturama. Na Panelu 2 (Slika 38b) također je najviše korodirao po sredini, ali u gornjem dijelu je najprimjetnije savijanje elemenata, gdje se nanosilo opterećenje na uzorak.

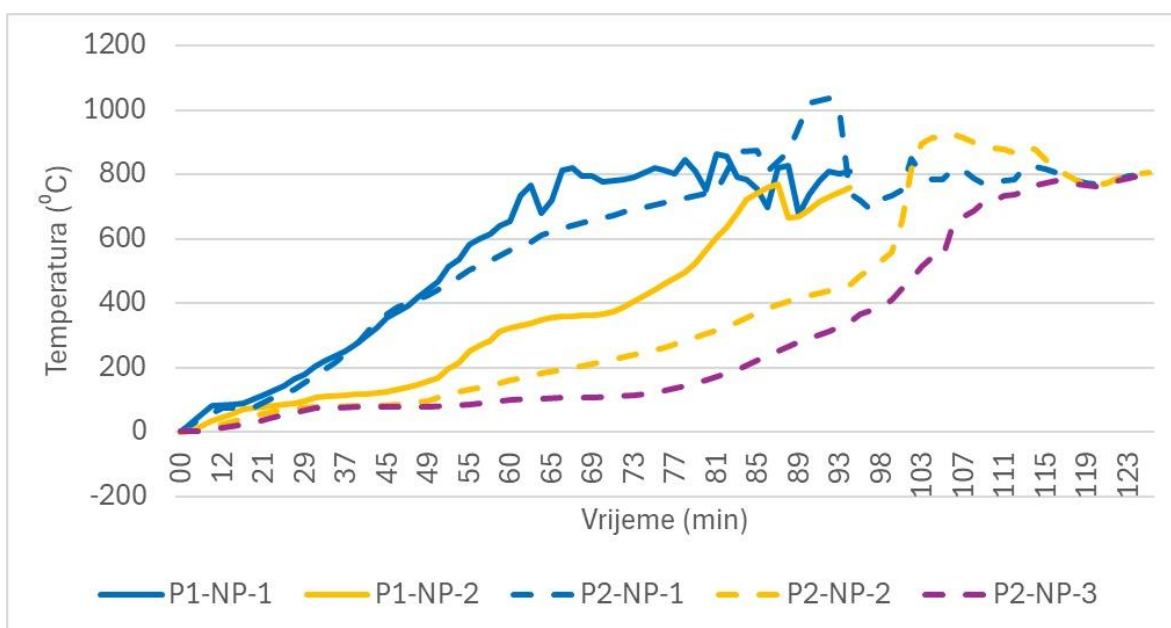
**Tablica 5:** Maksimalne vrijednosti ostvarene na panelima nakon ispitivanja

	Max. promjena temperature na višim pozicijama	Max. promjena temperature na nižim pozicijama	Max. temperatura na neizloženoj strani
<b>Panel 1</b>	Iza prve ploče 773,2°C	Iza prve ploče 864,3°C	98,3°C
	Na čeliku 573,3°C	Na čeliku 942°C	
<b>Panel 2</b>	Iza prve ploče 1529,05°C	Iza prve ploče 1099,5°C	41,2°C
	Na čeliku 669,6°C	Na čeliku 815,1°C	

Na Slikama 39-44 prikazane su usporedbe Panela 1 i Panela 2, podijeljene na više i niže pozicije. Promjene temperature mjerene na Panelu 1 označene su punim linijama, dok su promjene temperature mjerene na Panelu 2 označene crtkanim linijama. Jednake boje linija označavaju istu poziciju na panelima. Gledajući Slike 39 i 40 može se zaključiti da su na Panelu 2 na svim izloženim pozicijama niže temperature nego na Panelu 1, osim na poziciji 1. Otprilike u svakom sloju ploča temperatura kreće rasti nakon 20-30 minuta. To znači da su u Panelu 1 čelični nosači zaštićeni oko 45 minuta, a u Panelu 2 74 minute, a tom dodatnom vremenu pridonosi izričito treći sloj ploče.



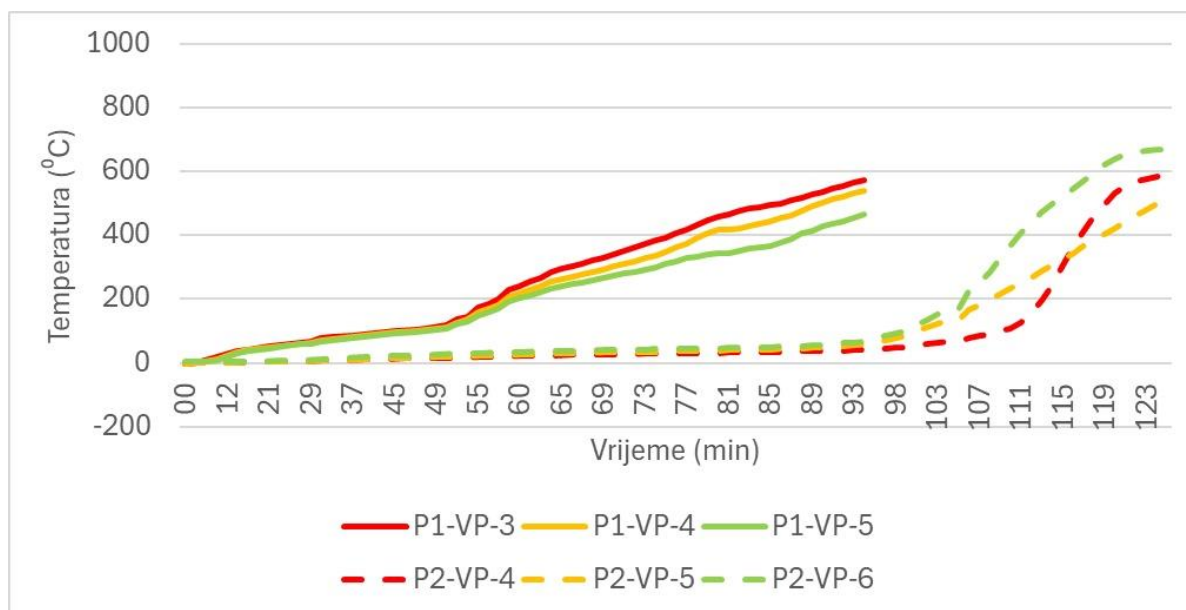
Slika 39: Usporedba temperature na izloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 – VP



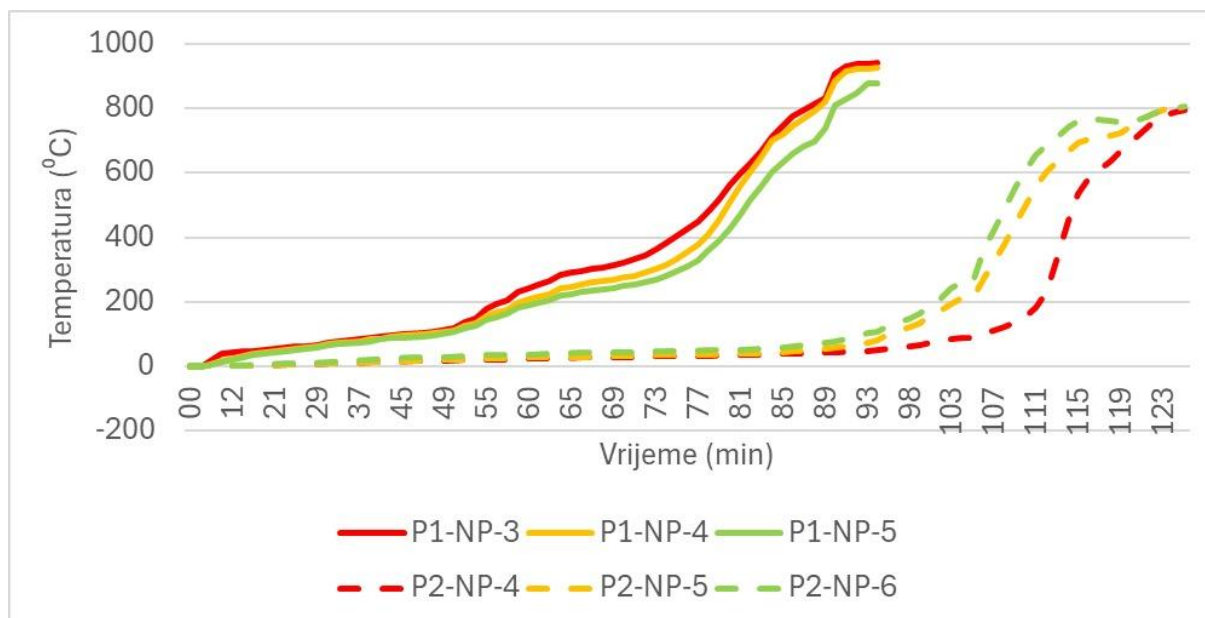
Slika 40: Usporedba temperature na izloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 – NP

Na Slikama 41 i 42 prikazane su promjene temperature izmjerene na čeličnim nosačima. Očit je utjecaj dodatne ploče i sloja toplinske izolacije, jer temperature na ovim pozicijama u Panelu 2 rastu lagano od 34. minute, a skaču u 90. kada gori polimerna pjena. Za usporedbu, na Panelu 1 čelični nosači zagrijavaju se već u 6. minuti i puno većom brzinom nego na

Panelu 2, da bi temperatura još više skočila u 50. minuti i u konačnici dosegla veće vrijednosti nego na Panelu 2.



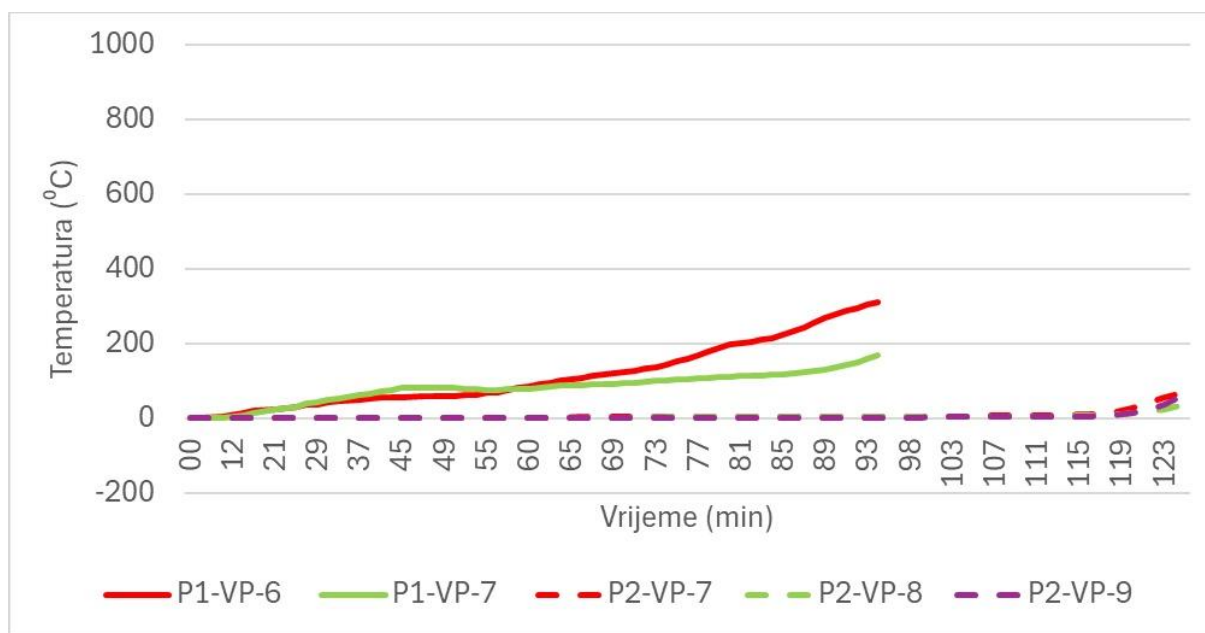
Slika 41. Usporedba temperature na čeličnim nosačima na Panelu 1 i Panelu 2 - VP



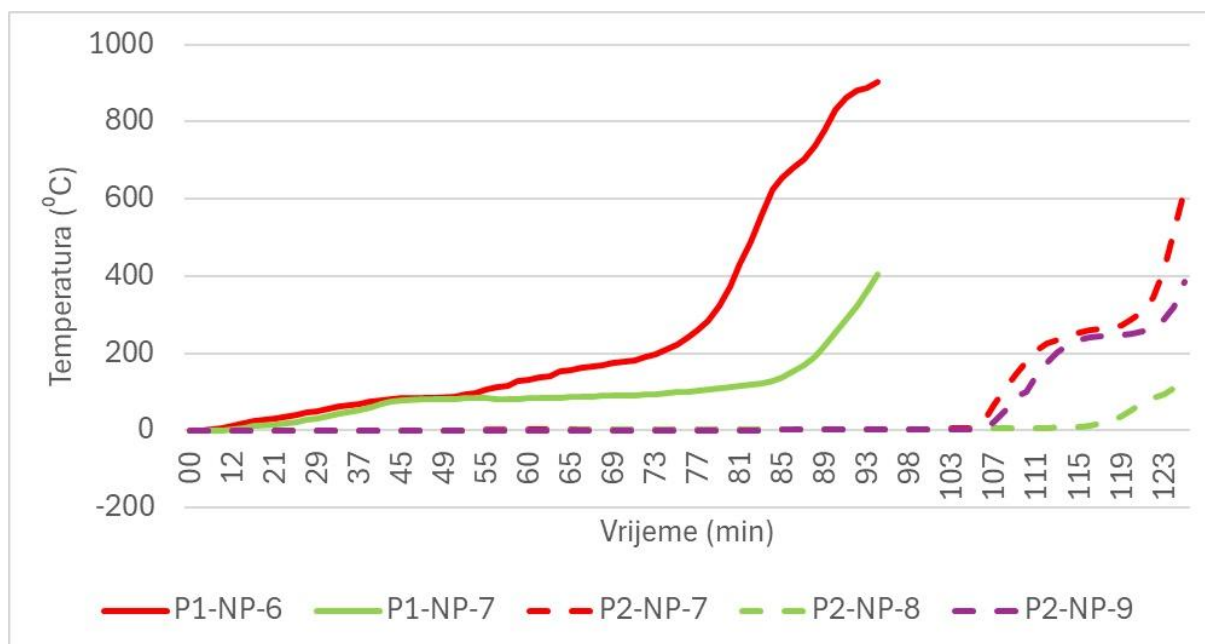
Slika 42: Usporedba temperature na čeličnim nosačima na Panelu 1 i Panelu 2 – NP

Na Slikama 43 i 44 također se vidi utjecaj toplinske izolacije i treće ploče na neizložanim pozicijama unutar panela. Na pozicijama 6 i 7 u Panelu 1, te pozicijama 7, 8 i 9 na Panelu 2

velike su razlike u temperaturi. Na Panelu 1 temperatura raste lagano već od 17. minute jer nema toplinske izolacije koja bi spriječila njen prolazak, te na kraju doseže 900°C na poziciji NP-6. Na Panelu 2 temperature rastu tek nakon 106. minute, a najveća izmjerena iznosi 600°C. Do 106. minute temperature se gotovo ni ne mijenjaju, što je dobar pokazatelj učinkovitosti toplinske izolacije.



Slika 43: Usporedba temperature na neizloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 - VP



Slika 44: Usporedba temperature na neizloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 - NP

## 6. NUMERIČKA ANALIZA

Za potrebe numeričkog modeliranja oba panela korišten je softver TASEF Plus, koji omogućuje analizu raspodjele temperature u presjeku izloženom požaru primjenom metode konačnih elemenata. Ovaj alat obrađuje samo ravne ili osno simetrične presjeke u dvije dimenzije [18].

Kod analiziranja prijenosa topline od požara do konstruktivnog elementa, problem se opisuje pomoću toplinskog toka. Temperatura čvrstog materijala (konstruktivnog elementa) dobiva se rješavanjem jednadžbi očuvanja energije. Ako je koeficijent prijenosa topline konstantan u vremenu i prostoru, veza između temperature i toplinskog toka je linearna. Pritom treba pravilno definirati granične uvjete na površini elementa (kasnije u softveru nazvani *boundary conditions*). Definiraju se sljedećom jednadžbom (jednadžba 1):

$$q_{uk} = -\lambda * \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1)$$

$\lambda$  -toplinska vodljivost materijala elementa [19]

Ukupan toplinski tok (jednadžba 2) sastoji se od toplinskog toka uzrokovanog zračenjem i vođenjem, te se tim procesima toplina prenosi s plina na čvrsto tijelo (konstruktivni element):

$$q_{uk} = q_{rad} + q_{kon} \quad (2)$$

$q_{rad}$  -prijenos topline radijacijom

$q_{kon}$  - prijenos topline konvekcijom[19]

Radi jednostavnosti, toplinski tok će se promatrati kao jednodimenzionalan. Rubni uvjeti konstruktivnog elementa definiraju se kao i u prethodnoj jednadžbi (jednadžba 1), a promjena temperature uzeta je na površini elementa (jednadžba 3):

$$q_{uk} = -\lambda_i * \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (3)$$

$\lambda_i$  - toplinska vodljivost čvrstog materijala [19]

U slučaju da se konstruktivni element sastoji od više slojeva (jednadžba 4), na granici svakog treba se primijeniti sljedeći rubni uvjet:

$$-\lambda_i * \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_s * \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

gdje „i“ i „s“ označavaju različite slojeve [19].

Nakon postavljanja rubnih uvjeta, rješavaju se sljedeće jednadžbe energije:

$$\rho_i * Cp_i * \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i * \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\rho_s * Cp_s * \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_s * \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6)$$

gdje „i“ (jednadžba 5) i „s“ (jednadžba 6) označavaju različite slojeve elementa

$\rho_i, \rho_s$  – gustoća materijala

$Cp_i, Cp_s$  – specifični toplinski kapacitet

$\lambda_i, \lambda_s$  – toplinska vodljivost [19]

Rješenje ovih jednadžbi (5,6) daje razvoj temperature materijala u prostoru i vremenu. Mogu se ponoviti za onoliko slojeva koliko je potrebno. Ako je geometrija elementa ili izloženost požaru složena, onda problem treba rješavati u dvije ili tri dimenzije. Treba pripaziti i na činjenicu da se neka svojstva materijala mijenjaju s porastom temperature [19].

Neto toplinski tok za čvrsti materijal (jednadžba 7) okružen gustim plinom s jednolikom temperaturom (npr. element u peći):

$$q_{uk} = \varepsilon * \sigma * (\overline{T_p^4} - T_e^4) + h * (T_p - T_e) \quad (7)$$

$\varepsilon$  – emisivnost površine elementa

$\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

$h$  – konvekcijski koeficijent prijenosa topline

$T_p$  – temperatura plina

$T_e$  – temperatura površine elementa

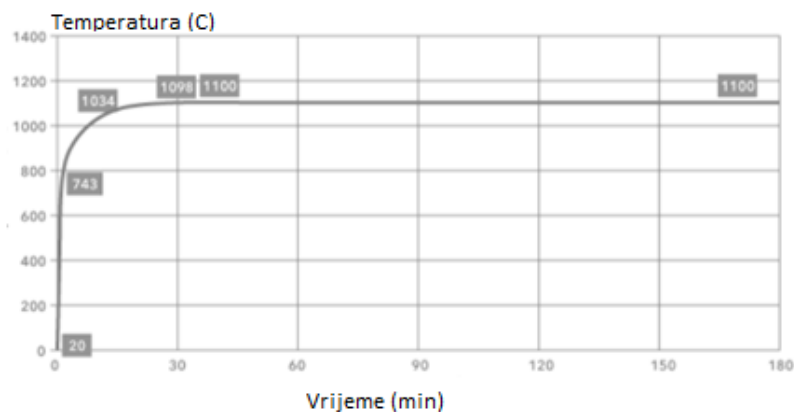
$\overline{T_p}, \overline{T_e}$  – temperature potrebne za toplinski tok zračenja (K)

$T_p, T_e$  – temperature za konvektivni toplinski tok ( $^{\circ}\text{C}$ ) [19]

Za predstavljanje prijenosa topline na elemente pri standardnoj izloženosti požaru najčešće se koristi krivulja ISO 834 (Slika 45). To je standardna vremensko-temperaturna krivulja požara definirana u međunarodnoj normi. Koristi se za simulaciju učinaka požara na građevinske elemente u standardiziranim uvjetima ispitivanja otpornosti na požar. Zasnovana je na brzini gorenja materijala koji se nalaze u općim građevinskim materijalima[20]. Razvoj temperature krivulje požara (jednadžba 8) opisan je sljedećom jednadžbom:

$$T(t) = 20 + 345 \cdot \log\left(\frac{8t}{60} + 1\right) \quad (8)$$

gdje je  $t$  izraženo u sekundama, a dobivena temperatura je u °C [19]



Slika 45: krivulja ISO 834 (Izvor:[20])

Kod modeliranja požara u građevinskim materijalima treba uzeti u obzir da voda koja se nalazi u materijalima isparava pri 100°C (agregatno stanje joj se pretvara iz tekućeg u plinovito), a za to je potrebna latentna toplota. To može značajno utjecati na raspodjelu temperature u materijalu tijekom požara. U slučajevima kad je potrebno uzeti u obzir latentnu toplinu u proračunima temperature, koristi se jednadžba specifične volumetrijske entalpije (jednadžba 9) izražena u  $\text{Wh/m}^3$ :

$$e(t) = \int_0^T \rho * c dT + \sum_i l_i \quad (9)$$

$\rho$  – gustoća materijala

$c$  – specifični toplinski kapacitet [21]

Specifična volumetrijska entalpija je količina topline sadržana u materijalu zbog temperature više od nule. Prvi član ove jednadžbe  $\int_0^T \rho * c dT$  predstavlja toplinu koja je

potrebna za povećanje temperature materijala (engl. *sensitive heat* - osjetna toplina), dok drugi član  $\sum_i l_i$  predstavlja latentnu toplinu (toplina potrebnu za promjenu faze materijala) [21].

Ako je materijal suh i inertan, a njegova gustoća i specifični topl. kapacitet se ne mijenjaju porastom temperature, prvi član jednadžbe entalpije (jednadžba 9) (osjetna toplina) postaje (jednadžba 10):

$$e = c_{suh} * \rho_{suh} * T \quad (10)$$

$c_{suh}$  - specifični toplinski kapacitet suhog materijala

$\rho_{suh}$  - gustoća suhog materijala

T - temperatura [21]

Ako je u materijalu prisutna voda, prvo je potrebna osjetna toplina za zagrijavanje vode, zatim latentna toplina za isparavanje vode na temperaturama iznad 100°C. Pri računanju entalpije u ovisnosti o temperaturi, obje te komponente se dodaju entalpiji suhog materijala iz prethodne jednadžbe. Osjetna toplina suhog materijala je uvijek prisutna, osjetna toplina vode je prisutna dok ima vode u materijalu, a latentna toplina vode je prisutna samo kad voda isparava [21].

Vlažnost materijala (jednadžba 11) se računa kao:

$$u = 100 * \frac{\rho_{orig} - \rho_{suh}}{\rho_{suh}} \quad (11)$$

$\rho_{orig}$  - originalna gustoća vlažnog materijala

$\rho_{suh}$  - gustoća suhog materijala [21]

Ako se pretpostavi da vlaga ispari uslijed promjene temperature, latentna toplina zbog isparavanja vode  $l_w$  dodaje se entalpiji na višoj temperaturi. Latentna toplina vode (jednadžba 12) tada se izračunava kao:

$$l_w = \frac{u}{100} * \rho_{suh} * a_w \quad (12)$$

u - vlažnost materijala

$\rho_{suh}$  - gustoća suhog materijala

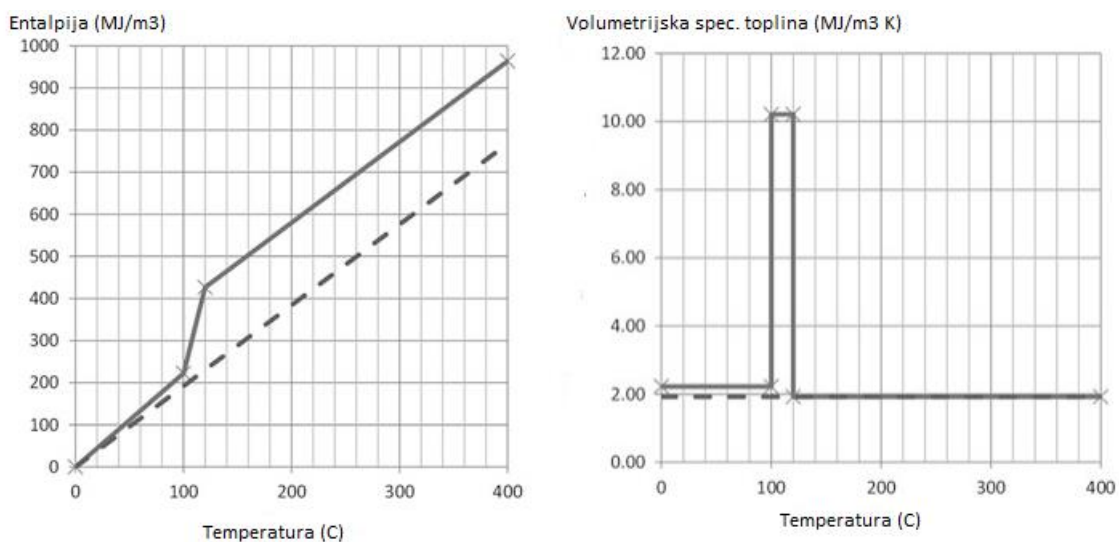


$a_w = 2,26 \text{ MJ/kg}$  - toplina isparavanja vode [21]

Kao primjer je dan beton s različitim razinama [21]– jedan suhe gustoće  $2400 \text{ kg/m}^3$ , specifične topline od  $800 \text{ J/kg K}$ , s vlažnošću od  $u=3\%$ , te beton s vlažnošću od  $u=0\%$  (Slika 46). Vidi se da suhi beton pokazuje linearan porast entalpije s temperaturom, dok vlažni beton ima dodatni skok entalpije u rasponu između  $100 - 120^\circ\text{C}$  zbog procesa isparavanja vode (Slika 46a). Nakon što sva voda ispari, entalpija ponovno raste istom brzinom kao kod suhog betona.

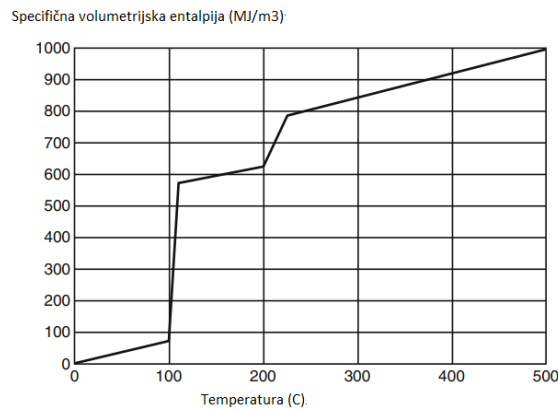
Na specifičnom volumetrijskom toplinskom kapacitetu (Slika 46b) koji se dobiva derivacijom entalpije (Slika 46a), također se vidi nagli porast u temperaturnom intervalu isparavanja vode.

Takvi nagli skokovi mogu uzrokovati probleme u računalnim simulacijama prijenosa topline.



Slika 46: a) Specifična volumetrijska entalpija b) Specifični volumetrijski toplinski kapacitet ( $c \cdot \rho$ ) (Izvor: [21])

Sličan efekt uočen je i kod gipsa, koji osim slobodne vode (5%) sadrži i kristalno vezanu vodu (21%). Na primjeru specifične volumetrijske entalpije gipsa (Slika 47) vidljivo je da isparavanje slobodne vode i dehidracija kristalne vode zahtijevaju znatnu količinu topline. Zbog toga gips može apsorbirati velike količine energije tijekom požara, zbog čega se većinom i koristi za zaštitu čeličnih konstrukcija (u obliku gipsanih ploča) [21].



Slika 47: Specifična volumetrijska entalpija gipsa (Izvor: [21])

Najbolji su softveri u koje se može unijeti specifična volumetrijska entalpija, jer može biti teško derivirati krivulju entalpije kako bi se dobio spec. volumetrijski kapacitet. Također, vrijednosti toplinske vodljivosti gipsa teško je pronaći u literaturi, jer razvoj temperature u gipsu ovisi o nelinearnoj krivulji entalpije [21]. Stoga se preporuča koristiti vrijednosti iz Tablica 6 i 7.

Tablica 6: Vrijednosti toplinske provodljivosti u ovisnosti o temperaturi (Izvor: [21])

Temperatura (°C)	Toplinska vodljivost (W/mK)
20	0,19
100	0,15
500	0,17
1000	0,35
2000	0,35

Tablica 7: Vrijednosti specifične volumetrijske entalpije u ovisnosti o temperaturi (Izvor: [21])

Temperatura (°C)	Specifična volumetrijska entalpija (MJ/m <sup>3</sup> )
0	0
100	73,5
110	571
200	625
220	784
2000	2123

U softveru Tasef na kartici *Material thermal properties* može se samostalno zadati materijal ili se može odabrati gotovi materijal iz knjižnice softvera (engl. *pre-defined*). Može se zadati više materijala. Materijalima koji su već u softveru mogu se naknadno mijenjati svojstva. Ulazni podaci materijala se sastoje od krivulje temperatura-provodljivost, temperatura-specifična volumetrijska entalpija, vlažnost i debljina materijala. Provodljivost u fazi hlađenja se može ostaviti konstantnom, jer je to slučaj za beton izložen požaru[22].

Na kartici *Fire curves* zadaje se krivulja požara. Unutar jedne analize moguće je koristiti više krivulja požara. Krivulje koje se nalaze u softveru: Fire 2, Hydro carbon, HSQ-fire, ASTM E119, 30 kW, ISO 834min i ISO834. ISO 834 je standardna krivulja.

Na kartici *Geometry and boundary conditions* potrebno je definirati glavnu regiju (engl. *main region*), podregije (engl. *subregion*) i linije mreže konačnih elemenata (engl. *grid lines*). Svaki čvor u softveru ima svoju oznaku i koordinate (x,y). U softver je moguće unijeti pravokutan element s četiri čvora, ili trokutast s tri čvora [22]. Glavnoj regiji pridružuje se materijal. Unose se maksimalne dimenzije presjeka u obliku koordinata  $x_{max}$  i  $y_{max}$ . Podregije se definiraju svojim maksimalnim i minimalnim x i y koordinatama, te se „oduzimaju“ od glavne regije koja je prethodno definirana[22]. Svako podregiji može biti pridružen materijal ili ona može biti isječak (engl. *cut-out*). Mreža konačnih elemenata je automatski postavljena na rubove elemenata, isječaka i šupljina, te se može dodati još proizvoljnih linija mreže ovisno o elementu [22]. Više linija mreže znači precizniji rezultat raspodjele temperature.

U prozoru *Boundaries* definiraju se granice elementa s vanjskim zrakom i okolo šupljina, a zadaju se kao grupa čvorova. Za svaku grupu čvorova može se definirati temperatura, uvjeti prijenosa topline i toplinski tok. Uvjeti prijenosa topline se računaju kao zbroj radijacije i

konvekcije[22]. U slučaju da se definira granica s izložene strane pod toplinski tok (engl. *heat flux*) se piše 1, a ako je s neizložene strane onda se piše 0. Ako se definira granica oko šupljine (*voida*) onda je potrebno kliknuti na kućicu „*void*“. Potrebno je za svaku grupu čvorova upisati sljedeće koeficijente [22]:

$\varepsilon$  - emisivnost (-)

$\beta$  –konvekcijski koeficijent prijenosa topline ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$\gamma$  –konvektivna snaga prijenosa topline (-)

Iznosi koeficijenata prikazani su u Tablicama 8 i 9. U slučaju da se granica nalazi oko šupljine  $\gamma=1$ .

**Tablica 8:** Iznosi koeficijenata  $\beta$  i  $\gamma$  (Izvor: [22])

	$\beta$ ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )	$\gamma$ (-)
Izložena strana	1	1,33
Neizložena strana	2,2	1,25

**Tablica 9:** Iznos koeficijenta  $\varepsilon$

	$\varepsilon$ (-)
Beton - zrak	0,8
Čelik - zrak	0,6
Gips - zrak	0,9

Temperatura na granicama se definira kao konstantna temperatura zraka na neizloženoj strani ili temperatura požarne krivulje na izloženoj strani [22].

U prozoru *VOIDS* definiraju se šupljine pomoću okolnih čvorova. Izmjena topline između površina opisana je svojstvima dodijeljenim grupama čvorova. Mogu se promatrati samo polovine ili četvrtine šupljine ako su simetrične oko x ili y osi. Dopuštene su šupljine samo s konkavnim oblikom. Čvorovi koji se nalaze na rubovima ne mogu se koristiti u ovu svrhu [22].

U prozoru *TRIANGULAR ELEMENTS* definiraju se trokutasti oblici. Trokutasti elementi mogu se dodati u vrhove šupljina i isječaka [22]. Svaki element definiran je grupom od tri čvora koji

je povezan s glavnom regijom ili podregijom. Ako je povezan s glavnom regijom pod Region ID se piše 0, a ako je povezan s nekom podregijom, pod Region ID piše se broj podregije. Prvo se mora upisati čvorove dijagonale, a potom čvor koji je nasuprot dijagonale [22].

Klikom na prozor *Draw section* može se vidjeti slika poprečnog presjeka elementa. Klikom na *Show nodes* vide se oznake čvorova. Klikom na *Show boundaries* vide se zadane granice.

Čvorovi koji su blizu jedan drugome ili su odvojeni materijalom s visokom toplinskom difuzijom uzrokuju vrlo kratko povećanje kritičnog vremena. Njihove temperature moraju biti jednake, pa se takvi čvorovi upisuju u prozoru *Coupled nodes* [22]. Time se uneseni čvorovi povezuju i na slici što se može vidjeti klikom na *Show coupled nodes*.

Klikom na prozor *Time control* otvara se prozor u kojem se definira vrijeme ispitivanja. Unosi se maksimalno vrijeme trajanja analize. Ukupno vrijeme se može podijeliti na inkremente za precizniju analizu.

U kartici *Physical constants* unosi se početna temperatura elementa i temperatura zraka.

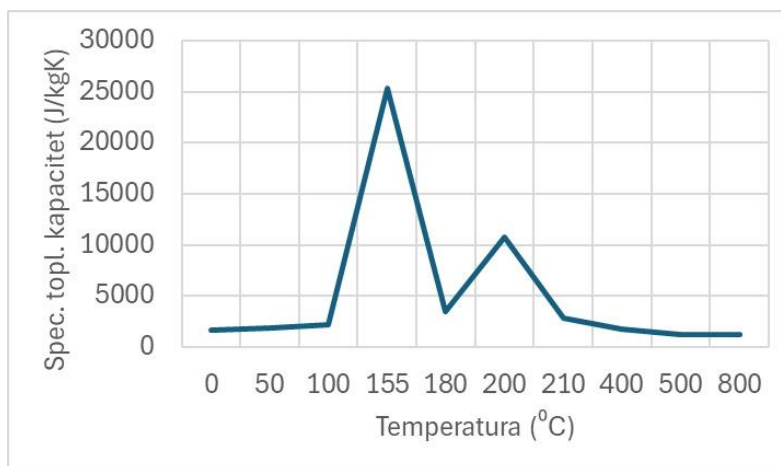
Nakon unosa svih podataka provodi se numerička simulacija prijenosa topline. Rezultati uključuju raspodjelu temperature unutar konstrukcije. Dobiveni podaci mogu se prikazati u obliku grafova ili vizualnog prikaza raspodjele temperature kroz poprečni presjek elementa.

## 6.1. Usporedba eksperimentalne i numeričke analize Panela 1

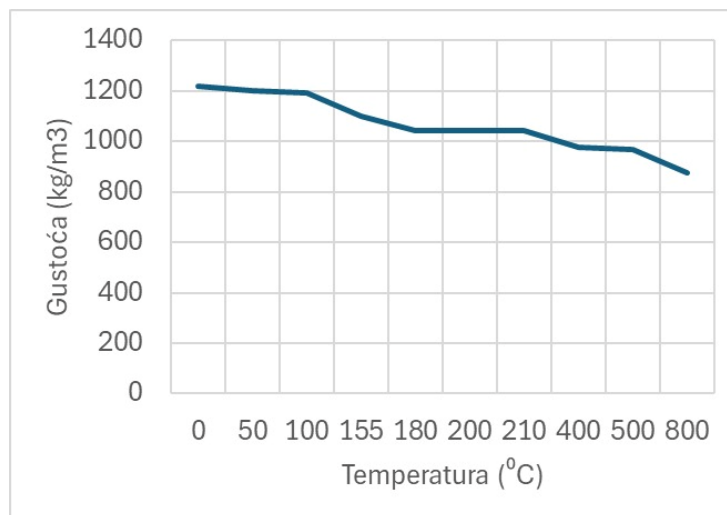
Svojstva gips vlaknastih Firepanel A1 ploča dobivena prethodnim ispitivanjem ili od proizvođača unesena su u softver (Tablica 10) u karticu *Material and thermal properties*, te su vizualno prikazana na Slikama 48, 49 i 50. Temperature su odabrane proizvoljno, tako da se obuhvate promjene u svojstvima materijala. Pri računanju specifične volumetrijske entalpije uzeto je u obzir isparavanje vode iz materijala pri 100°C.

Tablica 10: Svojstva gips vlaknastih ploča unesena u softver

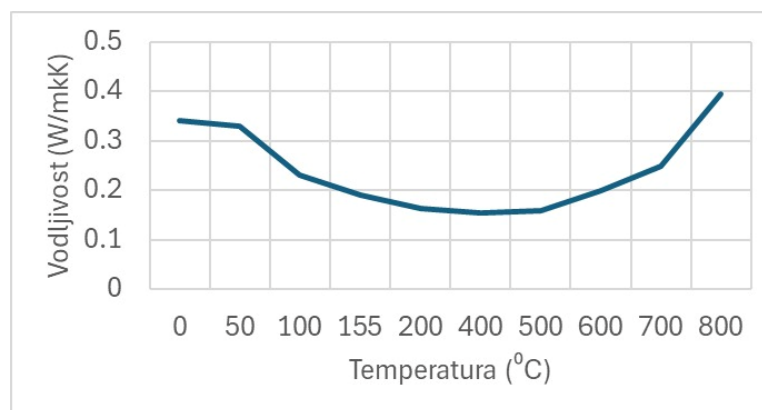
Temperatura (°C)	Vodljivost (W/mK)	Temperatura (°C)	Specifični toplinski kapacitet (J/kgK)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpija (Wh/m <sup>3</sup> )
<b>0</b>	0.34	<b>0</b>	1600	1220	0
<b>50</b>	0.33	<b>50</b>	1800	1200	30002.4
<b>100</b>	0.23	<b>100</b>	2200	1190	66366.42
<b>155</b>	0.19	<b>155</b>	25323	1100	491967.5
<b>200</b>	0.164	<b>180</b>	3500	1040	517247.3
<b>400</b>	0.155	<b>200</b>	10806	1040	579687
<b>500</b>	0.159	<b>210</b>	2800	1040	587776.5
<b>600</b>	0.199	<b>400</b>	1750	975	677835.8
<b>700</b>	0.248	<b>500</b>	1200	969	710138.4
<b>800</b>	0.395	<b>800</b>	1200	875	797645.4



Slika 48: Specifični toplinski kapacitet gips vlaknastih ploča



Slika 49: Gustoća gips vlaknastih ploča



Slika 50: Vodljivost gips vlaknastih ploča

Na kartici *Fire curves* kao krivulja požara odabrana je ISO 834.

Na kartici *Geometry and boundary conditions* (Slika 51) prikazan je način na koji je definirana geometrija panela. Mreža (eng. *grid lines*) je horizontalno postavljena između dviju ploča, na sredinu svake ploče i na četvrtine šupljine. Vertikalno je postavljena na proizvoljnim razmacima od 0,01.

Geometry and Boundary Conditions

**(1) Main Region**

Plane problem

Axisymmetric about y-axis

Inner Radius: Axisymmetric problem

Material number of Main Region

Maximum X-coordinate

Maximum Y-coordinate

**(2) Sub Regions**

Number of Sub Regions

	Xmin	Ymin	Xmax	Ymax	Material Number	Cutout
1	0	0.025	0.102	0.164		<input checked="" type="checkbox"/>
2						<input type="checkbox"/>
3						<input type="checkbox"/>
4						<input type="checkbox"/>
5						<input type="checkbox"/>
6						<input type="checkbox"/>
7						<input type="checkbox"/>
8						<input type="checkbox"/>
9						<input type="checkbox"/>
10						<input type="checkbox"/>

**(3) Grid Lines**

Number of X-Lines

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Number of Y-Lines

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
.006	.0125	.018	.0597E	.0945	.1292E	.171	.1765	.183	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

**Geometry Plotting**

Horizontal Scale

Vertical Scale

Horizontal Pan

Vertical Pan

(5) Boundary Conditions

(6) Define Internal Voids

Tube/No Tube

Triangular Elements

Draw Section

Show Nodes

Show Boundaries

(7) Define Coupled Nodes

Show Coupled Nodes

Close Section Window

Slika 51: Geometrija Panela 1 u softveru

Na prozoru *Boundary conditions* (Slika 52) definiraju se granični uvjeti presjeka. S gornje strane uzorak je izložen požaru (FireID=1) i ta je granica prikazana žutom bojom na Slici 53. S donje je strane neizložen (FireID=0) i ta je granica na Slici 53 prikazana smeđom bojom. Na granicama ploča i šupljine unutar panela definiraju se granice i koriste odgovarajući koeficijenti za granicu gips-zrak, prikazani plavom i ružičastom linijom (Slika 53).





Na kartici *Time control* (Slika 54) odabrani su vremenski inkrementi koji odgovaraju onima tijekom kojih se bilježila temperatura na panelu tijekom eksperimentalne analize. Maksimalno vrijeme ispitivanja od 0,35 (koje odgovara 21 minuti) odabrano je iterativnim postupkom sve dok se na izloženoj površini nije pojavila temperatura od približno 800°C do koje su definirana svojstva materijala.

Time Control

**Time Control Data**

Maximum time of analysis

Maximum time increment (Default)

Time increment factor (Default)

Maximum number of time steps (Default)

Number of time steps between updating of heat conduction matrix (Default)

Number of specified times for printing of temperatures

**Specified Times for Temperature output**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.08"/>	<input type="text" value="0.15"/>	<input type="text" value="0.22"/>	<input type="text" value="0.28"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Caution: Please use consistent time units**

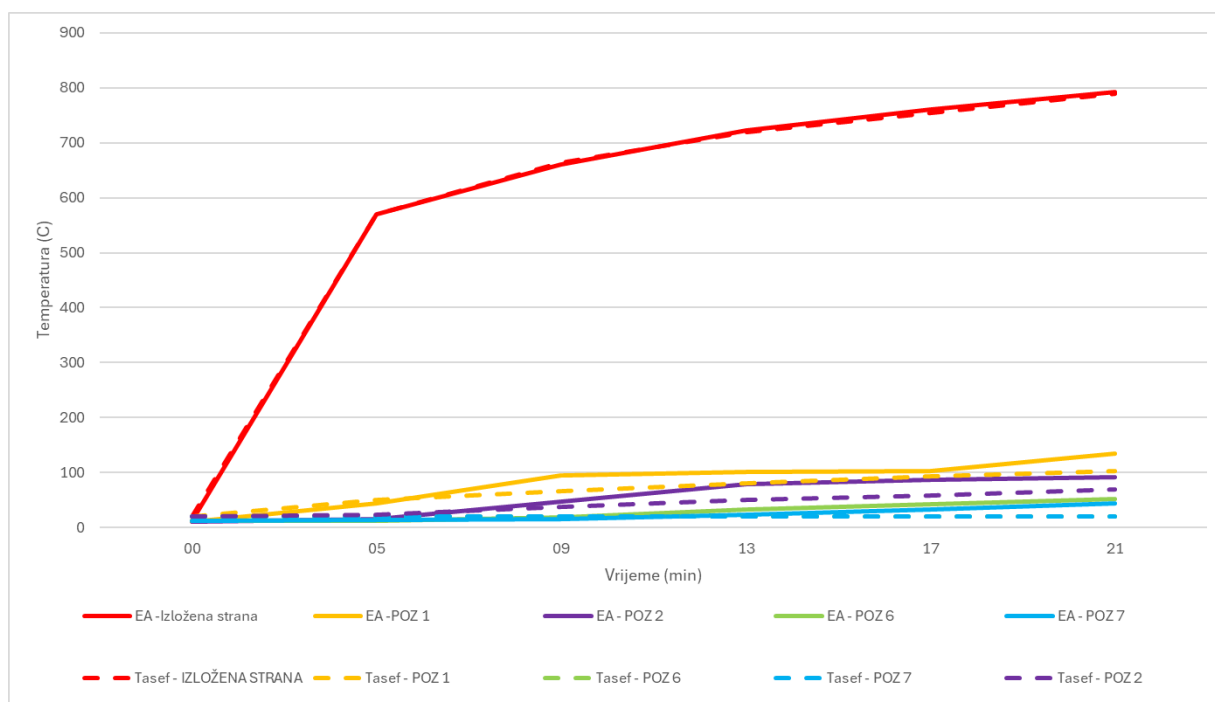
Slika 54: Definiranje vremenskih inkremenata

Na kartici *Physical constants* podaci su ostavljeni u izvornom obliku kako su zatečeni u softveru, čime se definira početna temperatura elementa i okoliša od 20°C.

Dijagram na Slici 55 prikazuje usporedbu rezultata ispitivanja Panela 1 dobivenih eksperimentalno u laboratoriju (označeno s EA – eksperimentalna analiza) i rezultata simulacije u softveru Tasef. Na x-osi prikazano je vrijeme u minutama, dok y-os predstavlja temperaturu u °C. Pozicije na ovom dijagramu odgovaraju pozicijama kako su bile označene i u prethodnim poglavljima. Temperature izmjerene na određenoj poziciji u laboratoriju prikazane su punom linijom, dok su temperature dobivene numeričkom analizom za istu tu poziciju označene istom bojom, ali crtkano.

Crveno je prikazana krivulja požara ISO 834, te je vidljivo da se krivulje poklapaju. S druge strane, kod unutarnjih mjernih pozicija (POZ 1, POZ 2, POZ 6, POZ 7) razlike između eksperimentalnih i simulacijskih rezultata su više izražene. Softver Tasef predviđa nešto

niže temperature u usporedbi s laboratorijskim mjerenjima. Međutim, proces zagrijavanja na izloženoj strani uzorka je sličan, što ukazuje na to da softver daje dobre procjene ponašanja panela pod utjecajem požara, iako s određenim odstupanjima. Veći problem nastaje na neizloženoj strani, gdje softver tijekom cijelog trajanja ispitivanja daje temperaturu od 20°C. To se događa zbog načina na koji je temperatura definirana u softveru, gdje se početna temperatura konstrukcije i temperatura neizložene strane postavljaju na 20°C. To može značiti da toplinski tok kroz panel nije dosegao neizloženu površinu ili da je ovakva simulacija ograničena uvjetima definiranim na početku koji ne omogućuju daljnji prijenos topline. Moguće je da vrijeme ispitivanja koje je postavljeno nije bilo dovoljno da temperatura pređe na neizloženu stranu panela, jer je ograničavajući faktor to što su svojstva materijala definirana samo do 800°C. Moguće je da do prijenosa topline nije došlo zbog načina na koji je u softveru definirana šupljina, tj. prostor oko čelika koji nije popunjen toplinskom izolacijom. U eksperimentalnom ispitivanju za neizloženoj strani dobivene su relativno niske temperature (max. oko 100°C), ali svejedno je dio topline prešao i na te ploče. Temperatura od 20°C dobivena u softveru na ovaj način stoga vrlo vjerojatno nije realna.



Slika 55: Usporedba rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize softverom Tasef za Panel 1

Mogući razlozi relativno malih razlika između laboratorijskih i simulacijskih rezultata mogu uključivati nesavršenosti u modeliranju materijala u softveru, kao i načina definiranja

poprečnog presjeka. Unatoč tome, rezultati numeričke simulacije mogu poslužiti kao korisna smjernica za predviđanje ponašanja panela u slučaju požara prije provođenja skupih i vremenski zahtjevnih eksperimentalnih ispitivanja. Stoga se u nastavku daje više varijacija ploča koje se mogu koristiti kao obloga ovakvih tankostijenih čeličnih panela. Svrha tih simulacija je predvidjeti ponašanje panela u slučaju požara, te na temelju razvijenih temperatura unutar presjeka, zaključiti koja vrsta ploča bi bila najbolja za korištenje i pod kojim uvjetima. Korištenje numeričkih simulacija u softveru poput Tasefa omogućava bržu i ekonomičniju analizu u usporedbi s eksperimentalnim ispitivanjima u laboratoriju, koja su često dugotrajna i skupa. Na ovaj način moguće je identificirati najučinkovitije materijale i smanjiti potrebu za velikim brojem fizičkih testiranja.

## 6.2. Numerička analiza ponašanja Panela 1 s različitim vrstama ploča

U prethodnom poglavlju utvrđeno je da softver Tasef daje približno jednake rezultate kao eksperimentalna ispitivanja u laboratoriju. U ovom poglavlju provodi se numerička analiza Panela 1, čija je geometrija identična onoj korištenoj tijekom eksperimentalnog ispitivanja. Međutim, umjesto Fermacell ploča, u model se uvode različite vrste ploča kako bi se pomoću softvera analiziralo njihovo ponašanje pod utjecajem požara.

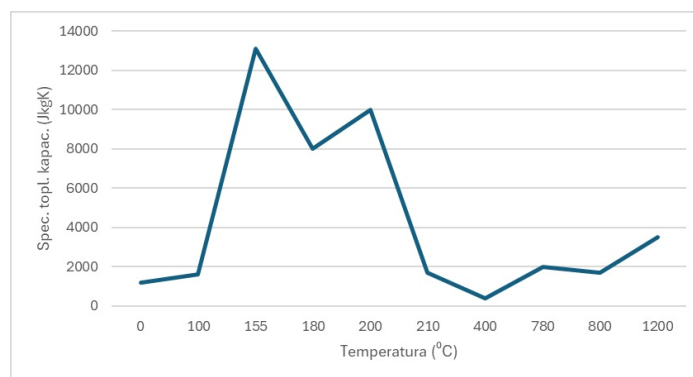
Kao standardna požarna krivulja ponovno se koristi ISO 834, a za usporedbu su odabrane tri vrste ploča:

1. Obične gips-kartonske ploče (GK)
2. Magnezijeve oksidne ploče (MgO)
3. Perlitne ploče

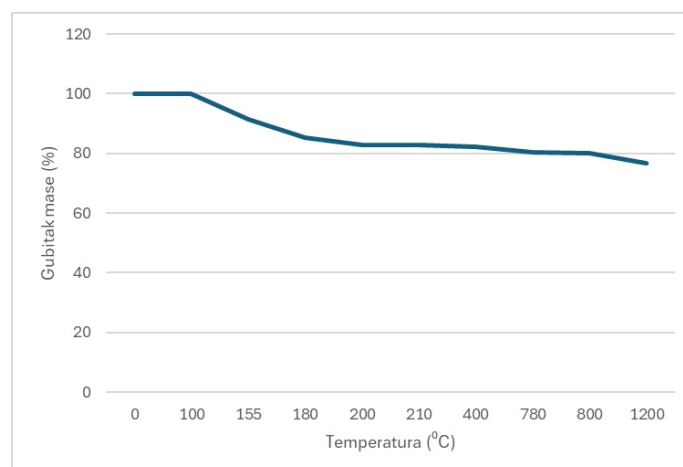
U Tablicama 11, 12 i 13 su prikazana svojstva materijala pojedinih ploča koja su unesena u Tasef. Iste vrijednosti prikazane su vizualno na Slikama 56-64. Vrijednosti su preuzete iz literature [7] i definirane do temperature 1200°C, zbog čega se simulacija izvodi sve dok temperatura na izloženoj površini ne dosegne tu granicu.

Tablica 11: Svojstva gips kartonskih (GK) ploča unesena u softver

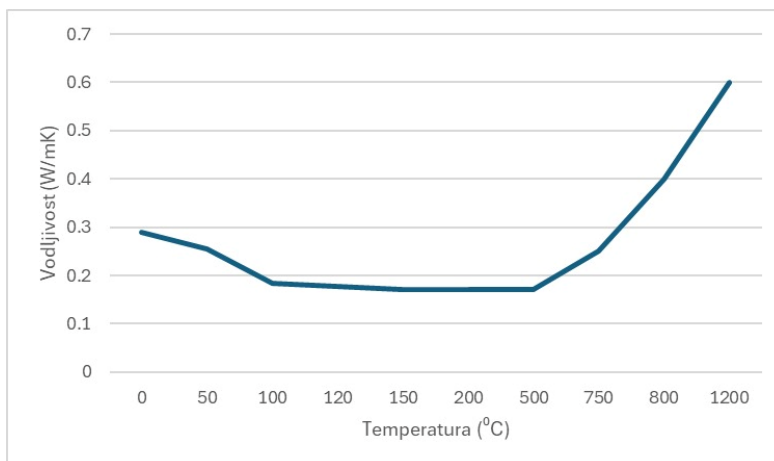
Temperatura (°C)	Specifični toplinski kapacitet (J/kgK)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpija (Wh/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Vodljivost (W/mK)
<b>0</b>	1200	836	0	<b>0</b>	0.289
<b>100</b>	1600	836	37159	<b>50</b>	0.256
<b>155</b>	13109	760.76	189533	<b>100</b>	0.184
<b>180</b>	8000	713.94	229199	<b>120</b>	0.178
<b>200</b>	10000	693.63	267738	<b>150</b>	0.17
<b>210</b>	1700	693.21	271011	<b>200</b>	0.17
<b>400</b>	400	687.11	285518	<b>500</b>	0.17
<b>780</b>	2000	671.81	427356	<b>750</b>	0.25
<b>800</b>	1700	670.39	433688	<b>800</b>	0.4
<b>1200</b>	3500	642.63	683620	<b>1200</b>	0.6



Slika 56: Specifični toplinski kapacitet gips kartonskih ploča



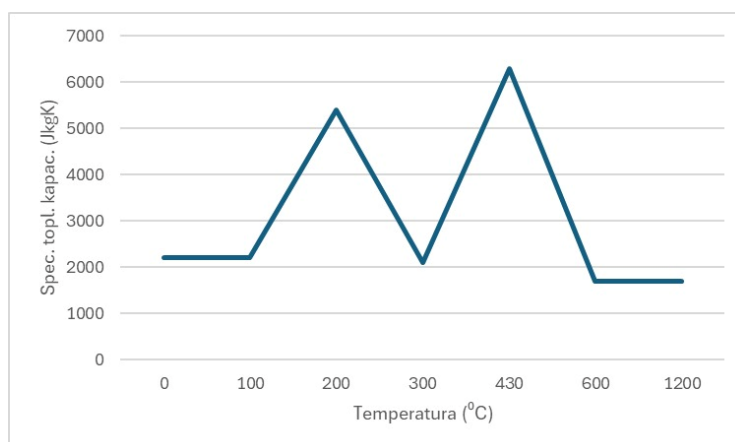
Slika 57: Gubitak mase gips kartonskih ploča



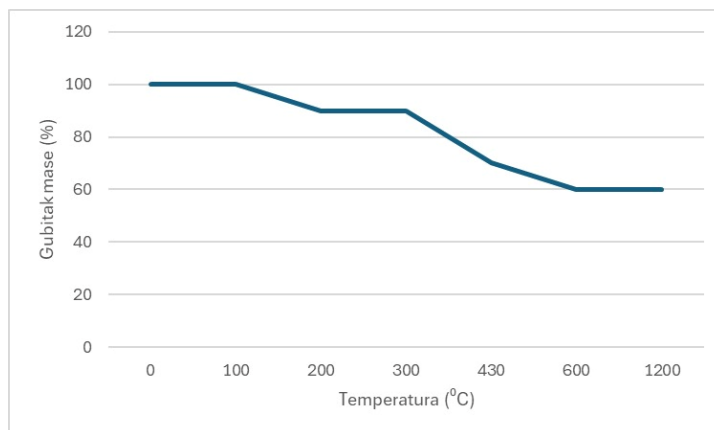
Slika 58: Vodljivost gips kartonskih ploča

Tablica 12: Svojstva magnezij oksidnih (MgO) ploča unesena u softver

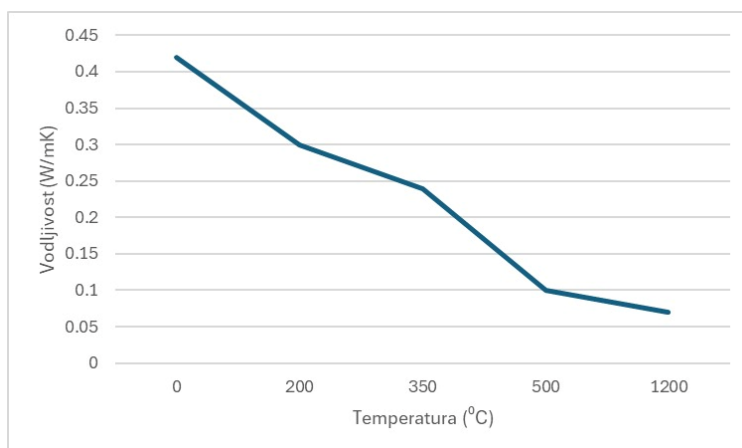
Temperatura (°C)	Specifični toplinski kapacitet (J/kgK)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpija (Wh/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Vodljivost (W/mK)
<b>0</b>	2200	1100	0	<b>0</b>	0.42
<b>100</b>	2200	1100	67228	<b>200</b>	0.3
<b>200</b>	5400	990	215739.5	<b>350</b>	0.24
<b>300</b>	2100	990	273494.1	<b>500</b>	0.1
<b>430</b>	6300	770	448683.1	<b>1200</b>	0.07
<b>600</b>	1700	660	501670.7		
<b>1200</b>	1700	660	688685.6		



Slika 59: Specifični toplinski kapacitet magnezij oksidnih ploča



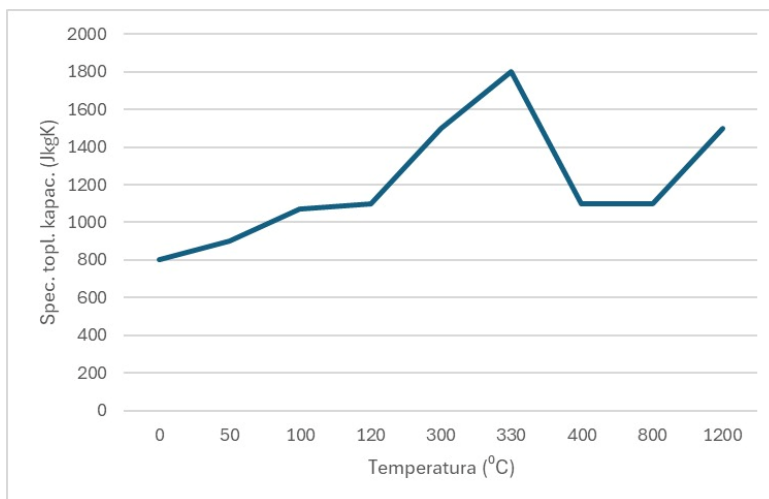
Slika 60: Gubitak mase magnezij oksidnih ploča



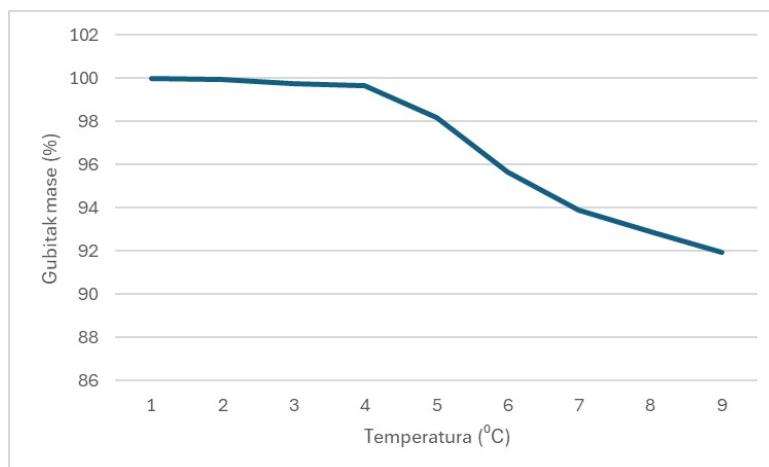
Slika 61: Vodljivost magnezij oksidnih ploča

Tablica 13: Svojstva perlitnih ploča unesena u softver

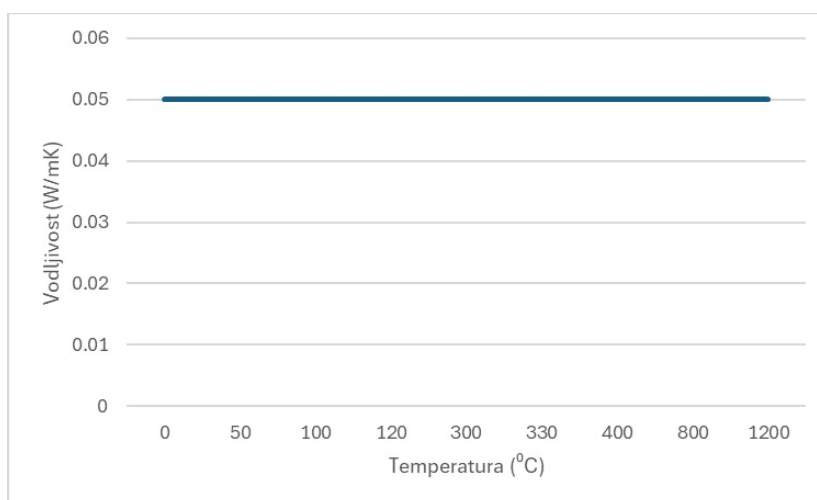
Temperatura (°C)	Specifični toplinski kapacitet (J/kgK)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpija (Wh/m <sup>3</sup> )	Vodljivost (W/mK)
0	800	204	0	0.05
50	900	203.9	2549	0.05
100	1070	203.49	5573	0.05
120	1100	203.33	6816	0.05
300	1500	200.29	21839	0.05
330	1800	195.19	24767	0.05
400	1100	191.52	28864	0.05
800	1100	189.56	52034	0.05
1200	1500	187.6	83303	0.05



Slika 62: Specifični toplinski kapacitet perlitnih ploča



Slika 63: Gubitak mase perlitnih ploča



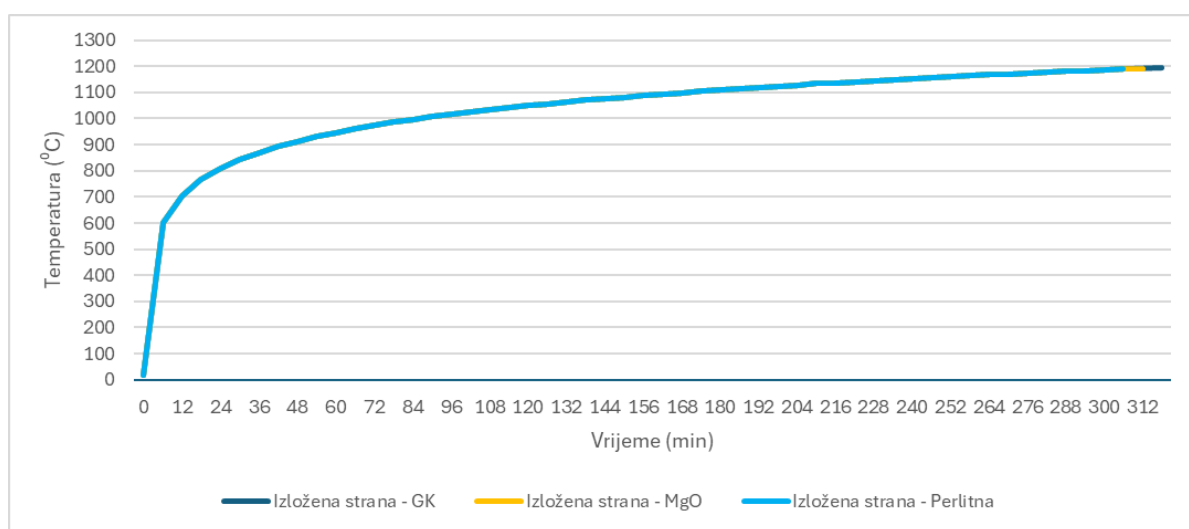
Slika 64: Vodljivost perlitnih ploča



Koeficijenti emisivnosti, konvekcijskog prijenosa topline i konvektivne snage topline jednaki su za sve ploče kako bi se osigurali konzistentni uvjeti za usporedbu. Pri računanju entalpije uzeto je u obzir isparavanje vode pri  $100^{\circ}\text{C}$ , čime se simulira dehidracija materijala.

Za svaku vrstu ploče definirane su različite temperaturne točke kako bi se obuhvatile promjene specifičnog toplinskog kapaciteta, toplinske provodljivosti i gubitka mase pri zagrijavanju. Gustoća ploča uzeta je u suhom stanju. Količina vode koja je unesena u softver sastoji se od zbroja kemijski vezane i slobodne vode u materijalu.

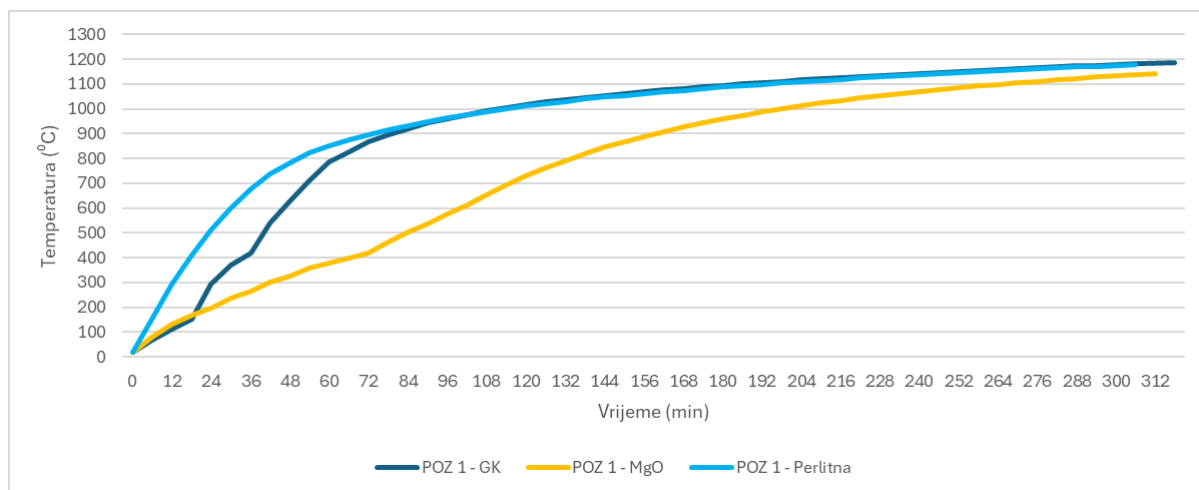
Na Slici 65 je prikazan razvoj temperatura na izloženoj strani panela za sva tri slučaja različitih ploča. Krivulja predstavlja standardiziranu krivulju požara ISO 834 i u potpunosti se poklapa s njom za sve tri vrste ploča.



Slika 65: Temperature na izloženoj strani Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče

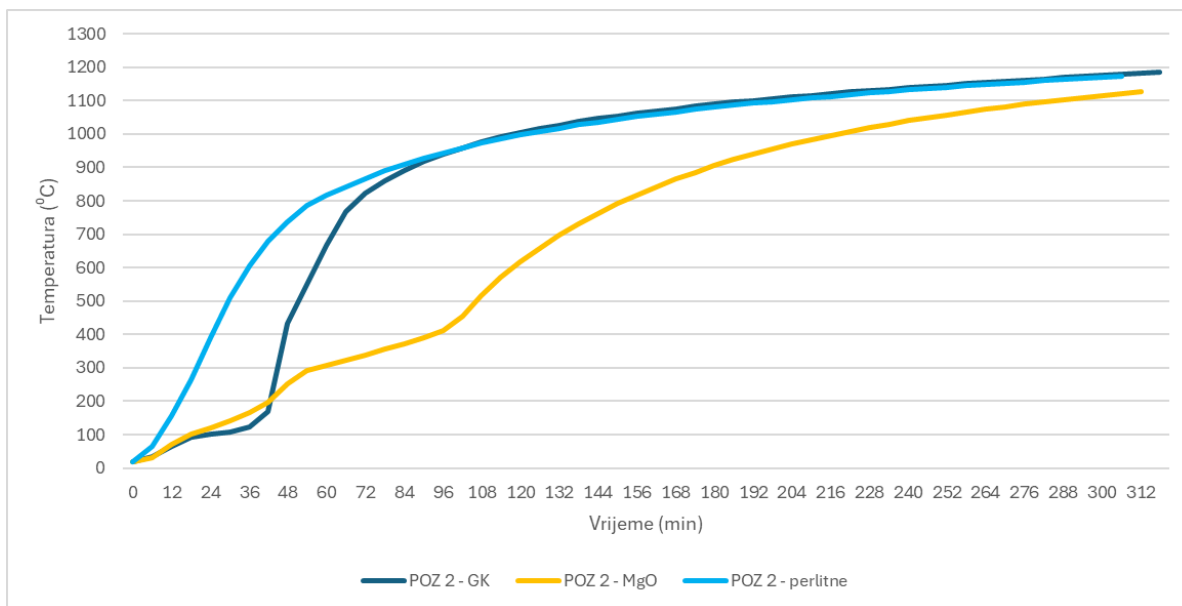
Slika 66 prikazuje razvoj temperature iza prve ploče za tri različite vrste ploča. U početnoj fazi ispitivanja (prvih 20-30 minuta) temperatura iza svih ploča raste sporije u odnosu na izloženu stranu, što je očekivano zbog toplinske otpornosti materijala i sporog provođenja topline prve ploče. U prvih 10-20 minuta temperatura iza svih ploča na ovoj poziciji raste relativno sporo. To se događa jer se ploče tek počinju zagrijavati, a značajan dio topline troši se na isparavanje vode unutar materijala. Kod svih ploča može se primijetiti blagi odmak od nule nakon otprilike 10 minuta, što ukazuje na početak provođenja topline kroz materijal. Nakon početne faze, dolazi do ubrzanog porasta temperature iza svih ploča. Perlitna ploča dostiže temperature iznad  $600^{\circ}\text{C}$  već oko 30. minute. To znači da nema značajne endotermne reakcije koja bi usporila prijenos topline, osim početnog isparavanja vlage.

Gips-kartonska ploča također pokazuje nagli porast temperature nakon 20. minute, ali i dalje nešto sporije od perlitne ploče. To se događa zbog kemijski vezane vode unutar gipsa koja tijekom dehidracije troši toplinsku energiju i usporava daljnji prijenos topline. Magnezij oksidna ploča i dalje pokazuje najsporiji porast temperature. Nakon 260. minute krivulje gips-kartonskih i perlitnih se počinju približavati 1200°C, dok magnezij oksidna do te temperature dolazi tek oko 300. minute.



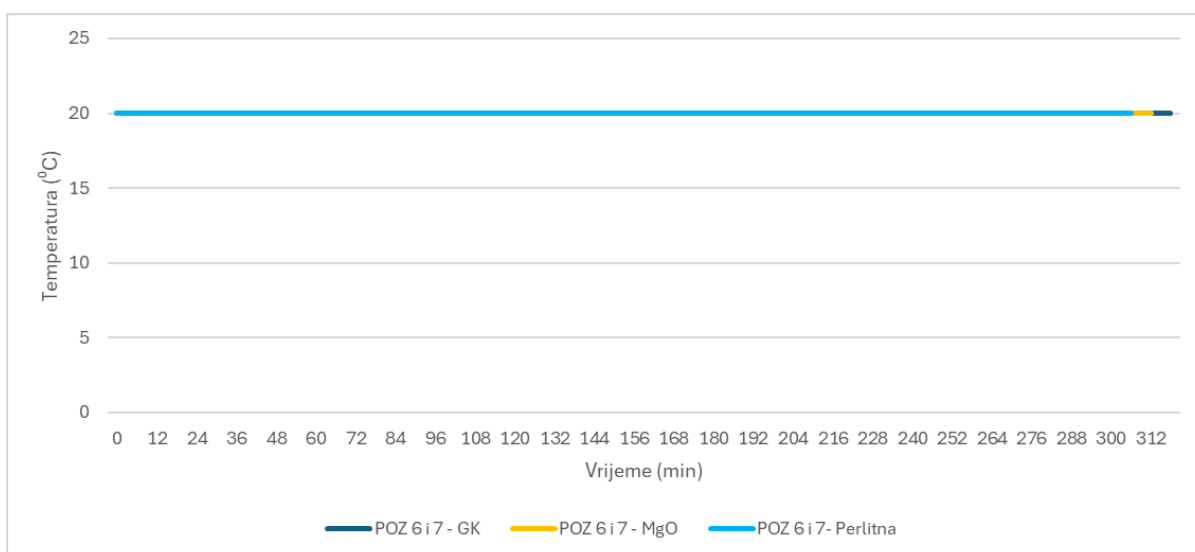
**Slika 66:** Temperature iza prve ploče (Pozicija 1) Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče

Graf (Slika 67) prikazuje promjene temperature iza druge ploče tijekom trajanja požara za tri različite vrste ploča. U početnoj fazi, temperatura iza druge ploče raste znatno sporije nego iza prve ploče, što ukazuje na to da prva ploča još uvijek apsorbira značajan dio toplinske energije i tako štiti čeličnu konstrukciju. Perlitna ploča pokazuje najbrži početni porast temperature, slično ponašanju u prethodnom dijagramu (Slika 57). To ukazuje da materijal relativno brzo gubi svoja izolacijska svojstva. Gips-kartonska ploča u početku pokazuje nešto sporiji porast temperature u odnosu na perlitnu ploču, ali se kasnije taj rast ubrzava. Magnezij oksidna ploča zadržava najnižu temperaturu. Nagli porast temperature na perlitnim pločama se događa odmah na početku ispitivanja, a na gips-kartonskim oko 40. minute ispitivanja. To znači da se prva ploča tada u potpunosti zagrijala i više ne apsorbira dovoljno topline da bi usporila prijenos. U 96. minuti na obje ploče izmjereno je malo ispod 1000°C, te se dalje temperature na njima kreću jednakom brzinom dok ne dosegnu 1200°C. Magnezij oksidna ploča i dalje pokazuje najsporiji porast temperature, zadržavajući temperature ispod 400°C čak i nakon 96 minuta, a tada počinje nagliji rast temperature. 1200°C se približava tek nakon 300. minute.



**Slika 67:** Temperature iza druge ploče (Pozicija 2) Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče

Tijekom cijelog trajanja ispitivanja, temperatura na neizloženoj strani panela (Slika 68) i u ovom slučaju ostala je konstantna na 20°C. Moguće je opet da vrijeme koje je postavljeno za pojedine vrste ploča nije bilo dovoljno da temperatura pređe na neizloženu stranu panela, jer je ograničavajući faktor to što su svojstva definirana samo do 1200°C. Temperatura od 20°C dobivena na ovaj način opet vrlo vjerojatno nije realna.



**Slika 68:** Temperature na neizloženoj strani (Pozicije 6 i 7) Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče

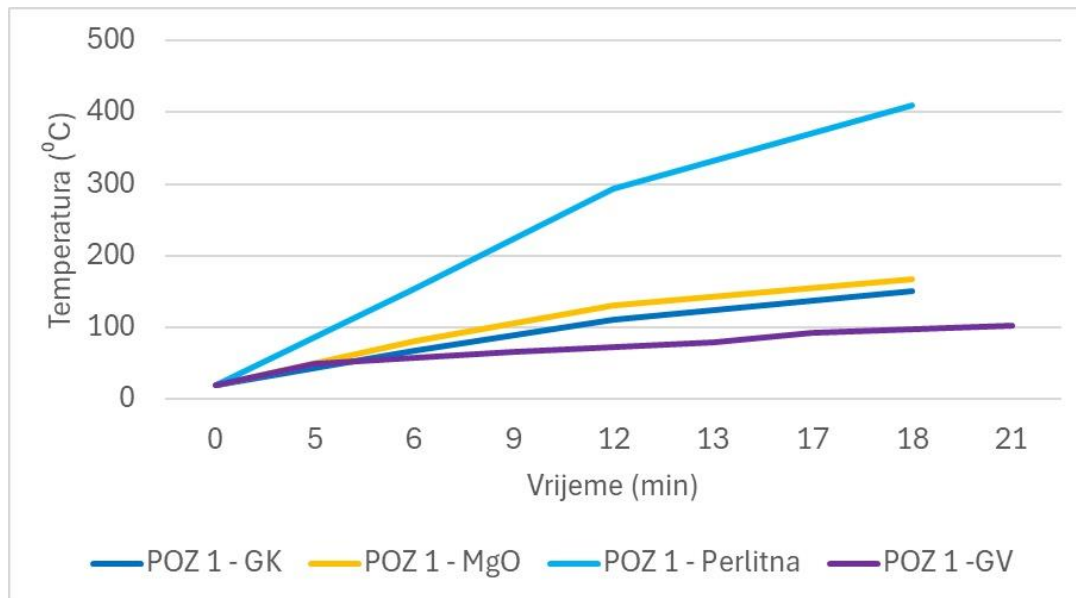
Nakon provedenih numeričkih simulacija može se zaključiti da magnezij-oksidge ploče (MgO) na prvu pokazuju najbolje ponašanje u smislu otpornosti na požar. Na pozicijama 1 i 2 (iza prve i druge ploče), temperature se kod njih razvijaju najsporije i najkasnije dostižu visoke vrijednosti, što znači da mogu najdulje pružiti zaštitu čeličnim nosačima u panelu. To omogućuje dulji vremenski okvir za evakuaciju i potencijalnu intervenciju vatrogasaca, čime se povećava sigurnost u slučaju požara. Međutim, kao što je prethodno navedeno u literaturi, magnezij oksidge ploče pokazuju najveći gubitak mase (42% i 44%), što znači da su podložnije pucanju i raspadanju pri visokim temperaturama [7]. Ako se to dogodi prije nego što bi došlo do raspadanja gips-kartonskih ploča, čelik bi ranije bio izložen visokim temperaturama, što bi smanjilo njihovu ukupnu učinkovitost. S druge strane, gips-kartonske ploče imaju veću specifičnu toplinu u odnosu na perlitne, što znači da mogu apsorbirati više toplinske energije prije nego što dođe do značajnog porasta temperature. To ih čini pogodnima za usporavanje prijenosa topline na čeličnu konstrukciju. Perlitne ploče pokazuju najlošije požarno ponašanje, budući da se na njima najbrže razvijaju visoke temperature, što je dovelo do toga da simulacija s njima traje 12 minuta manje u odnosu na gips kartonske ploče, jer je već tada dosegnuta temperatura od 1200 °C na izloženoj strani. Toplinska provodljivost perlitnih ploča je najmanja, što znači da slabije provode toplinu, no istovremeno imaju značajno manju gustoću u usporedbi s ostalim pločama, što znači da imaju manji toplinski kapacitet, odnosno sposobnost ploče da zadrži i postupno otpušta toplinsku energiju. Zbog toga se te ploče brže zagrijavaju i gube svoja zaštitna svojstva ranije nego druge vrste materijala.

Iako na prvi pogled magnezij oksidge ploče pružaju najbolju otpornost na visoke temperature, njihov visoki gubitak mase i sklonost pucanju predstavljaju veliki nedostatak. Gips-kartonske ploče pružaju solidnu zaštitu, dok perlitne ploče nisu pogodne za dugotrajnu zaštitu od požara zbog brzog porasta temperature i kratkog vremena trajanja zaštite. One se više preporučuju za konstrukcije u kojima je bitnija manja težina nego otpornost na požar.

### 6.3. Usporedba svih vrsta ploča

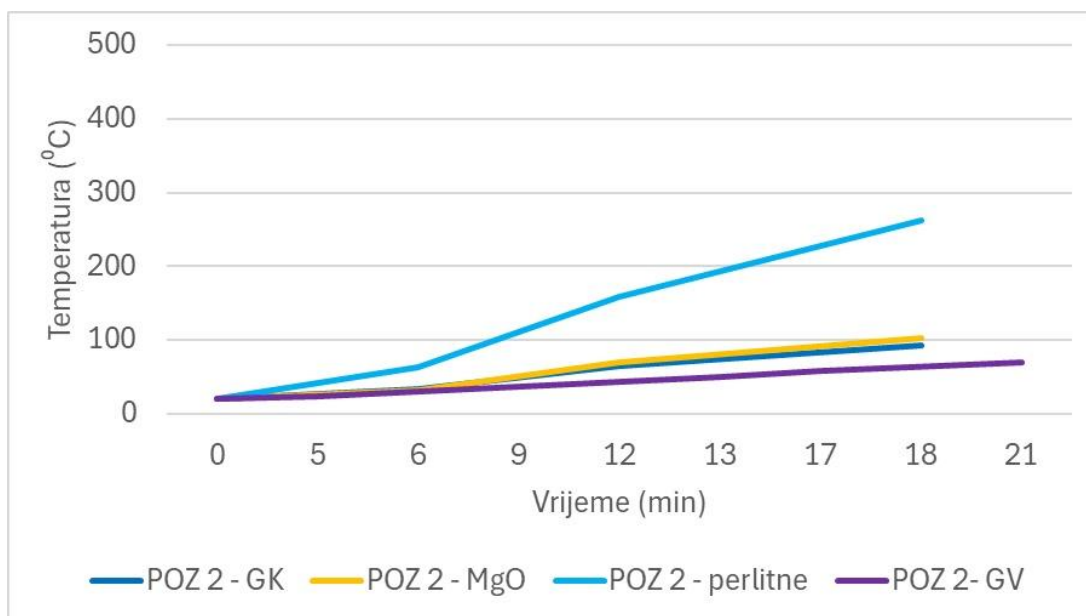
Zaključno, u nastavku će se usporediti sve četiri vrste ploča: obične gips kartonske, magnezij oksidge, perlitne i gips vlaknaste. Usporedba je napravljena do 21. minute jer tada gips vlaknaste dostižu temperature do koje su im definirana svojstva materijala. Na Slici 69 su temperature razvijene na prvoj poziciji – najveći porast imaju perlitne ploče, a najmanji gips

vlaknaste. Perlitne već u ovako kratkom vremenu dosežu  $400^{\circ}\text{C}$ , dok gips vlaknaste dosežu tek  $100^{\circ}\text{C}$ . Magnezij oksidne i gips kartonske se u početku ispitivanja ponašaju gotovo jednako.



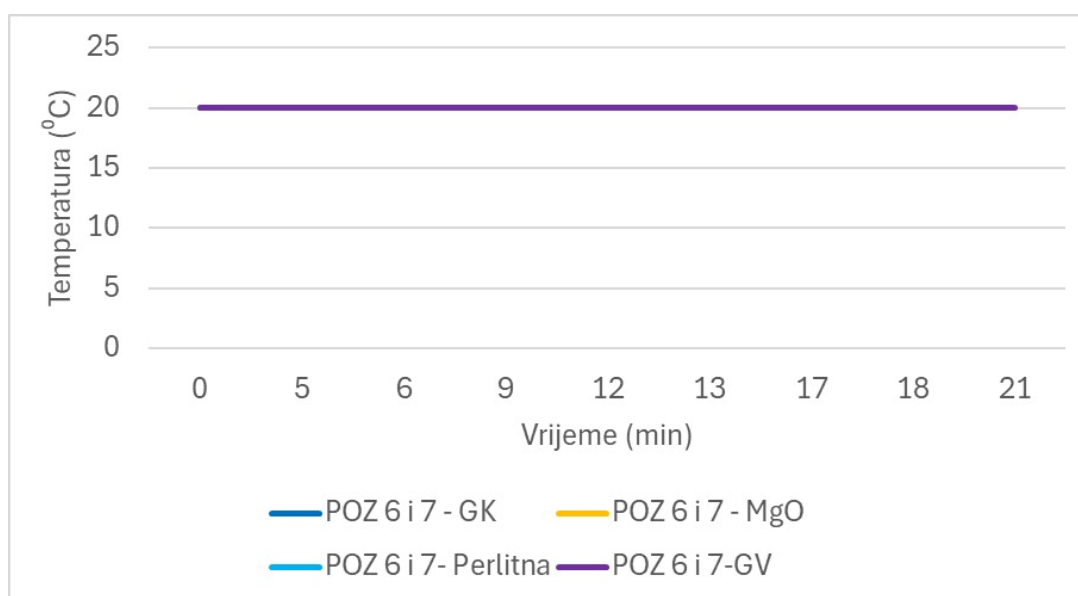
Slika 69: Temperature na pozicijama 1 za sve vrste ploča

Na poziciji 2 (Slika 70) nastavlja se trend rasta temperature kao i na prvoj poziciji, gdje najveći porast temperature iznosi malo iznad  $250^{\circ}\text{C}$  na perlitnim pločama. Na gips vlaknastim je tada  $70^{\circ}\text{C}$ .



Slika 70: Temperature na pozicijama 2 za sve vrste ploča

Na neizložnim pozicijama unutar presjeka (Slika 71) je opet 20° za sve ploče.



Slika 71: Temperature na pozicijama 6 i 7 za sve vrste ploča

## 7. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad bavi se istraživanjem prijenosa topline u tankostijenim kompozitnim čeličnim panelima (LSF panelima) s naglaskom na utjecaj različitih vrsta obložnih ploča i prisutnost toplinske izolacije. S obzirom na sve strože zahtjeve energetske učinkovitosti i zaštite od požara u građevinarstvu, važno je razumjeti kako pojedini materijali utječu na ponašanje ovakvih sustava u požaru i mogućnost njihove primjene u suvremenoj gradnji. U istraživanju su korištene eksperimentalne i numeričke metode. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u laboratorijskim uvjetima, gdje su dva uzorka panela izložena standardiziranom požaru putem krivulje ISO 834. Prvi uzorak sastojao se od čelične konstrukcije s dva sloja gips-vlaknastih ploča, dok je drugi imao tri sloja ploča i toplinsku izolaciju od poliuretanske pjene (PUR). Temperature su mjerene termoelementima postavljenima na različitim dubinama unutar panela kako bi se pratio prijenos topline kroz slojeve. Osim eksperimentalnih ispitivanja, provedena je i numerička analiza u softveru Tasef s ciljem usporedbe simuliranih i stvarnih rezultata. Rezultati istraživanja pokazali su da gips-vlaknaste ploče značajno usporavaju prijenos topline, čime pridonose zaštiti čelične konstrukcije. Prisutnost toplinske izolacije smanjila je temperaturu na neizloženoj strani panela, no poliuretanska pjena je zbog svoje zapaljivosti predstavljala dodatni rizik povećanju temperature na pozicijama čeličnih profila u panelu. Pokazalo se da se prilikom požara pjena pretvara u ugljen, što u početnim fazama požara može djelovati kao toplinska barijera, ali kasnije uzrokuje daljnje povećanje temperature unutar panela. Numerička analiza u softveru Tasef dala je usporedive rezultate onima dobivenim eksperimentalno, što pokazuje da se ovaj softver i njemu slični može pouzdano koristiti za predviđanje ponašanja LSF panela pri visokim temperaturama. Kako bi se dodatno istražio utjecaj različitih obložnih ploča, napravljena je numerička analiza na praznom panelu (bez izolacije), pri čemu su ispitane tri različite vrste ploča: gips-kartonske, magnezij-oksidge i perlitne. Rezultati su pokazali da magnezij-oksidge ploče postižu najniže temperature, no istovremeno dolazi do značajnog gubitka mase, što može uzrokovati njihovo pucanje i smanjiti njihovu zaštitnu funkciju. Perlitne ploče nisu pružile zadovoljavajuću zaštitu, jer su zabilježene previsoke temperature unutar panela, čime bi se ugrozila stabilnost čelične konstrukcije. Gips-kartonske ploče pokazale su bolje rezultate od perlitnih, ali su gips-vlaknaste ploče i dalje bile najučinkovitije u smanjenju prijenosa topline i zaštiti čelika od visokih temperatura. Na temelju dobivenih rezultata, može se zaključiti da se poboljšanje otpornosti LSF panela na požar može postići kombiniranjem negorivih izolacijskih materijala i otpornijih obložnih ploča. Iako poliuretanska pjena doprinosi smanjenju gubitaka topline i povećava energetske

učinkovitost panela, a samim tim povećava i njegove šanse za primjenu, njezina zapaljivost zahtijeva dodatne mjere zaštite.

Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na optimizaciju sastava panela korištenjem sigurnijih i učinkovitijih izolacijskih materijala, te daljnja poboljšanja u dizajnu spojeva kako bi se smanjio prijenos topline i poboljšala mehanička stabilnost panela pod utjecajem požara. Npr., umjesto PUR pjene kao toplinske izolacije pogodnija bi možda bila mineralna vuna, budući da je negoriva i osigurava bolju otpornost na požar. Međutim, mineralna vuna je osjetljiva na vlagu, što može dovesti do razvoja plijesni, korozije čelika i smanjenja izolacijskih svojstava tijekom vremena. Treba uzeti u obzir i činjenicu da je mineralna vuna teža od PUR pjene, čime bi se povećala vlastita težina panela i potencijalno ograničila njegova primjena. PIR pjena je poboljšana verzija PUR pjene s boljom otpornosti na vatru, ali je i dalje goriv materijal. Ako trošak nije prepreka, aerogel bi bio najbolja opcija izolacije za LSF panele jer ima jako nisku toplinsku vodljivost što ga čini dobrim izolatorom, lagan je, negoriv i otporan na vlagu. Ekspandirani polistiren je također dobar izolator s malom vlastitom težinom, ali je jako zapaljiv. Što se tiče ostalih vrsta ploča koje se mogu koristiti, tu su i kalcij silikatne ploče koje su otporne na vlagu i čvrste, ali su skuplje. OSB ploče su jako gorive jer su pravljene od strugotina drveta. Cementne su negorive, ali velike težine i skupe. Ovi rezultati pružaju smjernice u odabiru optimalnih materijala za izgradnju energetski učinkovitih i sigurnih konstrukcija. Daljnji razvoj i inovacije u području konstrukcijskih i izolacijskih materijala dodatno će unaprijediti ponašanje LSF sustava, čineći ih još konkurentnijima na tržištu. Stoga se može očekivati da će LSF tehnologija imati sve značajniju ulogu u modernom građevinarstvu, posebno u kontekstu održive i energetski učinkovite gradnje.



## POPIS LITERATURE

- [1.] Jelčić Rukavina, M., Skejić, D., Milovanović, B., Ščapec, T. Fire Tests of Load-Bearing, Light-SteelFramed Wall Systems Insulated with Polyurethane Foam. *Applied Scences*. 2024; 14, 637. Dostupno: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/637>
- [2.] Perera D., P Poologanathan K., Gillie M., Gatheeshgar P., Sherlock P., Nanayakkara S. M. A., Konthesingha K. M. C. Fire Performance of Cold, Warm and Hybrid LSF Wall Panels Using Numerical Studies. *Thin-Walled Structures*. 2020; 157, čl. 107109. Dostupno: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107109>
- [3.] Jelčić Rukavina, M., Skejić, D., Kralj, A., Ščapec, T., Milovanović, B. Development of Lightweight Steel Framed Construction Systems for Nearly-Zero Energy Buildings. *Buildings* 2022; 12(7), 929. Dostupno: <https://doi.org/10.3390/buildings12070929>
- [4.] Gunalan S., Mahendran M. Review of current fire design rules for cold-formed steel wall systems. *Journal of Fire Sciences*. 2014; 32(1): 3-34. Dostupno: doi: 10.1177/0734904113488336.
- [5.] Perera D., Poologanathan K., Gillie M., Gatheeshgar P., Sherlock P., Upasiri I.R, Rajanayagam H. Novel conventional and modular LSF wall panels with improved fire performance. *Journal of Building Engineering*. 2022; 46. Dostupno: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103612>.
- [6.] Thomas G. Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. *Fire and Materials*. 2022; 26(1): 37–45. Dostupno: doi: 10.1002/fam.786.
- [7.] Steau E., Mahendran M. Elevated temperature thermal properties of fire protective boards and insulation materials for light steel frame systems. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43. Dostupno: doi: 10.1016/j.jobe.2021.102571.
- [8.] Kodur V.R., Sultan M.A. Factors governing fire resistance of loadbearing steel stud walls. 2010. NRC Publications Archive. NRCC-45211. Dostupno: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=ebb52106-e848-4558-8185-778d8bfb7444>
- [9.] Ščapec T., Jelčić Rukavina M. Review of thermal performance of LSF walls used for nZEB: influence of components. U: N. Štirmer, ur. *7. simpozij doktorskog studija građevinarstva 2021. : zbornik radova*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet; 2021. Str. 107-122. Dostupno: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:291151>

- 
- [10.] Gharehbagh A., Ahmadi Z. Polyurethane Flexible Foam Fire Behavior. *Polyurethane InTech*. 2012. Dostupno: doi: 10.5772/47965.
- [11.] James Hardie Europe GmbH. Izjava o svojstvima Fermacell Firepanel A1. Dusseldorf 2019. Dostupno: <https://www.fermacell.hr/hr/proizvodi-hr/gips-vlaknaste-ploce-fermacell/gips-vlaknasta-ploca-firepanel-a1>.
- [12.] Fermacell. *Gips vlaknasta ploča Firepanel A1*. Dostupno: <https://www.fermacell.hr/hr/proizvodi-hr/gips-vlaknaste-ploce-fermacell/gips-vlaknasta-ploca-firepanel-a1>. Pristupljeno: 26. siječnja 2025.
- [13.] *Thermogravimetric Analysis (TGA) - A begginers guide*. SAD: PerkinElmer
- [14.] Promat. Tehnički list PROMASTOP-I protupožarni premaz. 2016. Dostupno: <https://www.adriaoffer.hr/wp-content/uploads/2022/05/protupozarni-premaz-promastop-i-tehnicki-list-promat-hr-2016-05.pdf>
- [15.] Promat. *PROMASTOP®-I Protupožarni premaz*. Dostupno: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/proizvodi-i-konstrukcije/proizvodi-za-protupozarnu-zastitu/protupozarno-brtvljenje/coatingcoated-batts/promastop-i-liquid/> (Pristupljeno: 20. veljače 2025.)
- [16.] *Ispitivanja otpornosti na požar -- 1. dio: Opći zahtjevi (EN 1363-1:2020)*. HRN EN 1363-1:2020. Hrvatski zavod za norme, 3. izd.
- [17.] *Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata -- 1. dio: Zidovi (EN 1365-1:2012/AC:2013)*. HRN EN 1365-1:2012/Ispr.1:2013. Hrvatski zavod za norme, 1. izd.
- [18.] TasefPlus Ltd. Dostupno: <https://tasefplus.com/>. (Pristupljeno: 19. veljače, 2025.)
- [19.] LaMalva K., Hopkin D. *International Handbook of Structural Fire Engineering*. Berlin: Springer; 2021.
- [20.] Promat. *Međunarodne krivulje požara i projektiranje protupožarne zaštite*. Dostupno: <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/33637/medjunarodne-krivulje-pozara-protupozarna-zastita/>. (Pristupljeno: 19. veljače 2025.)
- [21.] Wickstrom U. *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering*. Berlin: Springer; 2016.
- [22.] Sterner E, Wickstrom U. Tasef - Temperature analysis of structures exposed to fire - Users manual. *SP report. Fire Technology*. 1990:05

---

## POPIS SLIKA

Slika 1: LSF panel (Izvor: [4]).....	8
Slika 2: a) Pomak neutralne osi b) Toplinsko izvijanje (Izvor: [4]).....	9
Slika 3: a) Specifična toplina pri konstantnim tlaku b) Gubitak mase gipsanih ploča (Izvor: [7]).....	11
Slika 4: Položaj toplinske izolacije a) izolacija između čeličnih nosača b) hibridni način postavljanja izolacije c) izolacija izvana (Izvor: [3]).....	12
Slika 5: Nosiva čelična konstrukcija.....	16
Slika 6: Unutrašnjost panela.....	17
Slika 7: Gips-vlaknaste ploče.....	18
Slika 8: Promjena mase gips vlaknastih ploča i njena derivacija.....	19
Slika 9: Načini postavljanja ploča za pojedini sloj.....	19
Slika 10: Intumescentni materijal za spojeve ploča.....	20
Slika 11: Oznaka izložene strane uzorka panela.....	22
Slika 12: Dijagram temperature okoline tijekom ispitivanja panela 1.....	23
Slika 13: Dijagram temperature okoline tijekom ispitivanja Panela 2.....	23
Slika 14: a) Mjerna mjesta temperature u peći b) Poprečni presjek peći.....	24
Slika 15: Dijagram zadane temperature i srednje postignute temperature u peći tijekom ispitivanja Panela 1.....	25
Slika 16: Dijagram zadane temperature i srednje postignute temperature u peći tijekom ispitivanja Panela 2.....	25
Slika 17: a) Raspored termoelemenata na višim i nižim pozicijama b) Raspored termoelemenata na neizloženoj strani.....	27
Slika 18: a) Položaj termoelemenata u presjeku Panela 1 b) Položaj termoelemenata u presjeku Panela 2.....	27
Slika 19: Uzorak panela ugrađen u okvir ispitne peći na početku ispitivanja.....	28
Slika 20: a) Učvršćenje uzorka panela na betonski prag peći b) Keramička vuna, blokovi od autoklaviranog porobetona i termoelementi na slobodnim krajevima praznog panela.....	29
Slika 21: Detalj spoja ploča Panela 1.....	30
Slika 22: Promjene temperature unutar uzorka na višim pozicijama Panela 1.....	31
Slika 23: a) Izložena čelična konstrukcija Panela 1 nakon ispitivanja b) Gornji dio uzorka na izloženoj strani.....	33

Slika 24: a) Čvor 6 nakon ispitivanja b) Čvor 10 nakon ispitivanja c) Čelična dijagonala između čvorova 8 i 11 nakon ispitivanja Panela 1.....	33
Slika 25: Promjene temperature unutar uzorka na nižim pozicijama Panela 1.....	34
Slika 26: Razvijene temperature na neizloženoj strani Panela 1.....	35
Slika 27: a) Deformacije neizložene strane Panela 1 nakon ispitivanja b) Detalj slobodnih rubova zida.....	36
Slika 28: a) Komadići gips-vlaknastih ploča u peći nakon ispitivanja b) Uzorak izvađen iz peći .....	37
Slika 29: Promjene temperature unutar uzorka na višim pozicijama Panela 2.....	39
Slika 30: a) Početak odvajanja gips-vlaknastih ploča b) Odvajanje prvog sloja ploča c) Izlazak plamena iz spojeva i pukotina na drugom sloju ploča .....	40
Slika 31: Promjene temperature unutar uzorka na nižim pozicijama Panela 2.....	41
Slika 32: Razvijene temperature na neizloženoj strani Panela 2.....	42
Slika 33: a) Početak ispitivanja - premaz Promastop-I na spojevima ploča izložene strane Panela 2 b) Srednja faza ispitivanja - djelomične promjene na premazu c) Napredna faza ispitivanja - veće degradacije premaza d) Završna faza ispitivanja - kritične promjene na premazu.....	43
Slika 34: Panel 2 nakon ispitivanja .....	44
Slika 35: a) Izvijanje dijagonala na čvoru 11 nakon ispitivanja Panela 2 b) Čelični vijci nakon ispitivanja .....	44
Slika 36: a) Dijagonala između čvorova 2 i 5 b) Dijagonala između čvorova 3 i 8.....	45
Slika 37: Horizontalni dio čeličnog nosača između čvorova 5 i 8.....	45
Slika 38: Paneli nakon ispitivanja a) Panel 1 b) Panel 2 .....	47
Slika 39: Usporedba temperature na izloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 – VP....	49
Slika 40: Usporedba temperature na izloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 – NP ...	49
Slika 41: Usporedba temperature na čeličnim nosačima na Panelu 1 i Panelu 2 - VP .....	50
Slika 42: Usporedba temperature na čeličnim nosačima na Panelu 1 i Panelu 2 – NP.....	50
Slika 43: Usporedba temperature na neizloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 - VP	51
Slika 44: Usporedba temperature na neizloženim pozicijama na Panelu 1 i Panelu 2 - NP	51
Slika 45: krivulja ISO 834 (Izvor:[20]).....	54
<b>Slika 46: a) Specifična volumetrijska entalpija b) Specifični volumetrijski toplinski kapacitet (<math>c \cdot \rho</math>) (Izvor: [21]).....</b>	<b>56</b>
<b>Slika 47: Specifična volumetrijska entalpija gipsa (Izvor: [21]) .....</b>	<b>57</b>
Slika 48: Specifični toplinski kapacitet gips vlaknastih ploča .....	61
Slika 49: Gustoća gips vlaknastih ploča.....	62
Slika 50: Vodljivost gips vlaknastih ploča.....	62
Slika 51: Geometrija Panela 1 u softveru.....	63

---

Slika 52: Prozor za definiranje graničnih uvjeta .....	64
Slika 53: Poprečni presjek Panela 1 u softveru .....	64
Slika 54: Definiranje vremenskih inkremenata.....	65
Slika 55: Usporedba rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize softverom Tasef za Panel 1.....	66
Slika 56: Specifični toplinski kapacitet gips kartonskih ploča.....	68
Slika 57: Gubitak mase gips kartonskih ploča .....	68
Slika 58: Vodljivost gips kartonskih ploča.....	69
Slika 59: Specifični toplinski kapacitet magnezij oksidnih ploča.....	69
Slika 60: Gubitak mase magnezij oksidnih ploča .....	70
Slika 61: Vodljivost magnezij oksidnih ploča.....	70
Slika 62: Specifični toplinski kapacitet perlitnih ploča.....	71
Slika 63: Gubitak mase perlitnih ploča.....	71
Slika 64: Vodljivost perlitnih ploča.....	71
Slika 65: Temperature na izloženoj strani Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče .....	72
Slika 66: Temperature iza prve ploče (Pozicija 1) Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče.....	73
Slika 67: Temperature iza druge ploče (Pozicija 2) Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče.....	74
Slika 68: Temperature na neizloženoj strani (Pozicije 6 i 7) Panela 1 za gips-kartonske (GK), magnezij oksidne (MgO) i perlitne ploče .....	74
Slika 69: Temperature na pozicijama 1 za sve vrste ploča.....	76
Slika 70: Temperature na pozicijama 2 za sve vrste ploča.....	77
Slika 71: Temperature na pozicijama 6 i 7 za sve vrste ploča.....	77

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Mehanička i toplinska svojstva raznih vrsta čelika (Izvor: [3]).....	10
Tablica 2: Osnovi razmaci čeličnih profila na uzorcima .....	16
Tablica 3: Svojstva gips-vlaknastih ploča (Izvor: [12]).....	20
Tablica 4: Poprečni presjek uzoraka, sastav i debljina .....	21
Tablica 5: Maksimalne vrijednosti ostvarene na panelima nakon ispitivanja.....	48
<b>Tablica 6:</b> Vrijednosti toplinske provodljivosti u ovisnosti o temperaturi (Izvor: [22]).....	57
<b>Tablica 7:</b> Vrijednosti specifične volumetrijske entalpije u ovisnosti o temperaturi (Izvor: [22]) .....	58
<b>Tablica 8:</b> Iznosi koeficijenata $\beta$ i $\gamma$ (Izvor: [23]).....	59
Tablica 9: Iznosi koeficijenta $\varepsilon$ .....	59
Tablica 10: Svojstva gips vlaknastih ploča unesena u softver.....	61
Tablica 11: Svojstva gips kartonskih (GK) ploča unesena u softver .....	68
Tablica 12: Svojstva magnezij oksidnih (MgO) ploča unesena u softver .....	69
Tablica 13: Svojstva perlitnih ploča unesena u softver .....	70

## PRILOG A – IZJAVA O SVOJSTVIMA ZA PROMASTOP-I



<b>IZJAVA O SVOJSTVIMA</b>			
			Datum izdanja: 4/17/2015 Zamjenjuje: br. -- - CPR --/-- -- gggg/br. od: dd/mm/gggg
<b>No. 0761-CPR-14/0446-2015/4</b>			
1	<b>Jedinstvena identifikacijska oznaka tipa proizvoda: PROMASTOP®-I</b>		
2	<b>Vrsta i brojevi šarže:</b> kako je navedeno na pakiranju proizvoda		
3	<b>Predviđena područja primjene</b> kako je navedeno u ETA-14/0446: 3.1 - PROMASTOP®-I je intumescentni protupožarni premaz na bazi vode i koristi se za brtvljenje električnih kabela, snopova kabela, gorivih i negorivih cijevi (sa ili bez gorive izolacije) kod prolaza kroz zidove i stropne ploče (granice požarnih sektora). Proizvod je namijenjen za: - upotrebu u zatvorenom prostoru vlažnosti < 85% RH, isključujući temperature ispod 0°C, bez izlaganja kiši i UV zrakama (TR 024:2009, tip Z2)		
4	<b>Naziv i kontakt adresa proizvođača:</b>  Promat GmbH St.-Peter-Straße 25 4021 Linz Austria Tvornica :16 www.promat.at		
5	Ovlašteni predstavnik: nije primjenjivo.		
6	Sustav ili sustavi ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava (AVCP): vidjeti tablicu u točki 9.		
7	Građevni proizvod nije pokriven usklađenom normom (hEN).		
8	<b>Izjava o uspješnosti odnosi na građevinski proizvod za koji Europska tehnička procjena je izdala.</b> Österreichische Institut für Bautechnik (OIB, Austrija) izdao je ETA ( Europsko tehničko dopuštenje) za ovaj proizvod, pod br. ETA-14/0446 ETA se koristi kao europska tehnička ocjena u skladu s čl. 66-4 Uredbe o građevinskim proizvodima (CPR). Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda: No. 0761 (MPA Braunschweig) Potvrda o stalnosti svojstava 0761 - CPR - 0433		
9	<b>Deklarirana svojstva</b>		
	<b>Bitne značajke</b>	<b>Sustavi za ocjenu i provjeru stalnosti svojstava</b>	<b>Svojestvo</b>
			<b>Usklađena tehnička specifikacija</b>
<b>Temeljni zahtjev 1: Mehanička otpornost i stabilnost:</b>			
<b>Temeljni zahtjev 2: Sigurnost u slučaju požara:</b>			
Reakcija na požar:	1	C-s2, d0	ETA 14/0446
Otpornost na požar:	1	Ova značajka ovisi o ispitanom sustavu. Protupožarna konstrukcija u kojoj se proizvod rabio ispitana je, te je utvrđen razred svojstava u dokumentu o razredbi u skladu s primjenjivim dijelom norme EN 13501	
<b>Temeljni zahtjev 3: Higijena, zdravlje i okoliš:</b>			
Zrakonepropusnost:	-	NPD (bez utvrđenog svojstva)	ETA 14/0446
Vodonepropusnost:	-	NPD (bez utvrđenog svojstva)	
Ispuštanje opasnih tvari:	-	Izjava (predana Tijelu za tehničko dopuštenje).	
<b>Temeljni zahtjev 4: Sigurnost i dostupnost kod primjene:</b>			
Mehanička otpornost i stabilnost:		NPD (bez utvrđenog svojstva)	ETA 14/0446
Otpornost na udarce i pomak:	-	NPD (bez utvrđenog svojstva)	
Prianjanje:		NPD (bez utvrđenog svojstva)	
<b>Temeljni zahtjev 5: Zaštita od buke:</b>			
Izolacija od zračnog zvuka:		NPD (bez utvrđenog svojstva)	ETA 14/0446
<b>Temeljni zahtjev 6: Ušteda energije i očuvanje topline:</b>			
Toplinska vodljivost:	-	NPD (bez utvrđenog svojstva)	ETA 14/0446
Paropropusnost (koeficijent propusnosti):	-	NPD (bez utvrđenog svojstva)	

# Promat

<b>Trajnost:</b>			
Osnovna procjena trajnosti:		U skladu s deklariranom upotrebom, klasa Z2 prema EOTA TR24 i u skladnosti s ETAG 026-2	ETA 14/0446

Svojstva proizvoda navedenog u točkama 1 i 2 sukladna su objavljenim svojstvima u točki 9.

Ova Izjava o svojstvima izdaje se uz isključivu odgovornost proizvođača navedenog u točki 4.

Čitatelj ovog dokumenta pozvan je posjetiti web stranicu [www.promat-ce.eu](http://www.promat-ce.eu) za važeću verziju.

Sigurnosno-tehnički list 1907/2006/EG PROMASTOP®-I raspoloživ je na zahtjev.

Potpisano za i u ime proizvođača:

Ime: Bettina Rothböck  
Funkcija: Product Manager Fire Stopping & Intumescent  
Seals



Linz, 4/17/2015

Potpis:



## PRILOG B – TEHNIČKI LIST ZA PROMASTOP-I

**Promat**PROMASTOP®-I  
Protupožarni premaz  
Tehnički list**Opis proizvoda**

PROMASTOP®-I je premaz na vodenoj bazi koji na visokim temperaturama pjenu i stvara izolacijski sloj. Zbog svojstva stvaranja pjene u slučaju požara, PROMASTOP®-I je sigurna zaštita od prijenosa dima, vatre i topline u području spoja zida i provoda instalacija.

**Područje primjene**

PROMASTOP®-I može se primjenjivati za protupožarno brtvljenje kabela, fuga bez pomaka, gorivih i negorivih cijevi, u zidu i stropu.

**Koristi za kupca**

- ekspanzirajući protupožarni premaz
- nema ugrožavanja protupožarnih svojstava uslijed stvaranja malih pukotina na površini

**Konstrukcije i proizvodi su ispitani, klasificirani i dozvoljeni prema sljedećim normama**

- HRN EN 1366-3
- HRN EN 13501-1 / -2
- ETAG 026-2
- HRN EN ISO 10140-2
- HRN EN ISO 717-1

**Oblik isporuke**

- kanta 12,5 kg
- 44 kante/paleta
- 550 kg/paleta

Pridržano pravo izmjena.

**Skладиštenje**

- područje temperature skladištenja i transporta: 3°C - 35°C
- 6 mjeseci u originalnoj posudi
- otvorene posude brzo potrošiti

**Sigurnosne upute**

- Molimo preuzmite iz našeg sigurnosno-tehničkog lista

**Tehnički podaci i svojstva**

	nanošenje kistom	nanošenje špahtlom
Boja	bijela	bijela
Konzistencija	gusta tekućina	vrlo viskozna
Bruto gustoća	1,4 ± 0,2 g/cm <sup>3</sup>	1,4 ± 0,2 g/cm <sup>3</sup>
Viskoznost	20 - 40 Pa.s	190 - 220 Pa.s
Kategorija primjene	klasa Z <sub>2</sub>	klasa Z <sub>2</sub>
Početna temperatura	oko 300°C	oko 300°C
Sposobnost ekspaniranja	oko 1:22	oko 1:22
Ponašanje u požaru	klasa C-s2, d0	klasa C-s2, d0
Sadržaj VOC-a	38 g/l	38 g/l

Sve fizičke i mehaničke vrijednosti su prosjeci na osnovi standardne proizvodnje i testirane su u skladu s internim procedurama. Tipične vrijednosti dane su kao smjernice. Vrijednosti se mogu mijenjati ovisno o korištenim metodama ispitivanja. Ako je specifična vrijednost od ključne važnosti molimo konzultirati Promat tehnički odjel.

## PRILOG C – IZJAVA O SVOJSTVIMA GIPS VLAKNASTE PLOČE FIREPANEL

A1

## IZJAVA O SVOJSTVIMA



## fermacell® Firepanel A1

Br. FC-0004

1. Jednoznačna oznaka tipa proizvoda	<b>FC-0004</b>
2. Predviđeno područje primjene	<b>Gipsom vezana protupožarna ploča za preventivnu protupožarnu zaštitu u unutarnjim prostorijama</b>
3. Proizvođač	<b>James Hardie Europe GmbH Bennigsen- Platz 1 D-40474 Düsseldorf Tel. +49 800 3864001 E-Mail fermacell@jameshardie.de</b>
5. Sustav za procjenu ispitivanja postojanosti svojstava	<b>Sustav 3</b>
6. Usklađena norma Ovlašteni centar	<b>EN 15283-2-GF-I W2-C1 MPA Braunschweig (0761-CPR)</b>
7. Izjava o svojstvima	

Bitne značajke	Svojstva
Otpornost na smicanje	NPD
Ponašanje pri požaru	A1
Koeficijent otpornosti propusnosti na vodenu paru	16
Toplinska provodljivost	0,38 W/mK
Otpornost na savijanje	≥ 5,8N/mm <sup>2</sup>
Zračna izolacija	NPD
Otpornost na udarac	NPD

Svojstvo proizvoda sukladno je s Izjavom o svojstvima. Odgovornost za ovu Izjavu o svojstvima snosi proizvođač prema Uredbi (EU) br. 305/2011 te je isključivo odgovoran za sastavljanje Izjave o svojstvima.

Potpisano za proizvođača i u ime proizvođača od strane:

Düsseldorf, dana 01.01.2019

Dr. Jörg Brinkmann (CEO)

