

UTJECAJ GIPS-VLAKNASTIH PLOČA NA PONAŠANJE LAGANIH KOMPOZITNIH PANELA U POŽARNIM UVJETIMA

Mataković, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:426941>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Mataković

**UTJECAJ GIPS-VLAKNASTIH PLOČA NA
PONAŠANJE LAGANIH KOMPOZITNIH PANELA U
POŽARNIM UVJETIMA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023



University of Zagreb
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Martina Mataković

**THE INFLUENCE OF GYPSUM-FIBER BOARDS ON
THE BEHAVIOR OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE
PANELS IN FIRE CONDITIONS**

MASTER'S THESIS

Zagreb, 2023



TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Martina Mataković**

JMBAG: **0114029312**

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

Naslov teme
diplomskog rada:

HR	UTJECAJ GIPS-VLAKNASTIH PLOČA NA PONAŠANJE LAGANIH KOMPOZITNIH PANELA U POŽARNIM UVJETIMA
ENG	THE INFLUENCE OF GYPSUM-FIBER BOARDS ON THE BEHAVIOR OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE PANELS IN FIRE CONDITIONS

Opis teme diplomskog rada:

Osnovni cilj rada je eksperimentalno određivanje utjecaja različitih tipova gipsanih ploča na ponašanje laganih kompozitnih panela pod utjecajem visokih požarnih temperatura.

U radu je potrebno:

- 1/ istražiti stanje područja u dostupnoj literaturi vezano za promjene svojstva gipsanih ploča pod utjecajem visoke temperature
- 2/ odrediti promjene (promjena mase) koje visoke temperature uzrokuju na uzorcima najmanje dvije različite gipsane ploče pod utjecajem temperature minimalno do 700°C
- 3/ ispitati ponašanje 2 uzorka laganih kompozitnih panela s različitom vrstom gipsanih ploča pod utjecajem standardiziranog požara definiranog ISO 834 krivuljom
- 4/ analizirati utjecaj vrste ploče na prijenos topline kroz sustav laganih kompozitnih panela izloženih standardiziranom požaru

Datum: **19.4.2022.**

Komentor: -

(Ime i prezime komentora)

Mentor: **doc.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina**

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

Zahvala:

Zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Mariji Jelčić Rukavini na strpljenju i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

Srdačno zahvaljujem Tomislavu Ščapecu, asistentu na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta na pomoći, susretljivosti i ustupljenim materijalima.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojim roditeljima na razumijevanju i podršci tokom studiranja.

Ovo istraživanje financirala je Europska unija kroz Operativni program za konkurentnost i koheziju Europskog fonda za regionalni razvoj, broj KK.01.1.1.07.0060, projekt „Kompozitni lagani panel s integriranom nosivom konstrukcijom (KLIK-PANEL)“

SAŽETAK

Osnovni cilj ovog diplomskog rada je eksperimentalno određivanje utjecaja različitih tipova ploča na bazi gipsa na ponašanje laganih kompozitnih panela pod utjecajem visokih požarnih temperatura. U prvom dijelu rada je provedena termogravimetrijska (TG) analiza četiri različite ploče do 1000 °C. Ispitane su dvije vrste gips-vlaknastih ploča različitog razreda reakcije na požar, gips-kartonska ploča te gips-kartonska ploča za vlažne prostorije. Rezultati su pokazali da je gubitak mase gotovo jednak za sve ispitane ploče do temperature od 300 °C, dok nakon spomenute temperature veći gubitak mase pokazuju obje vrste gips-vlaknastih ploča. Gubitak mase je povezan s endotermnim reakcijama u kojima se troši toplina što ih opravdava kao bolju opciju za zaštitu u uvjetima visokih temperatura. U drugom dijelu je ispitana otpornost na požar dva uzorka kompozitnih laganih panela koji su se sastojali od: čelične nosive konstrukcije, polimerne toplinske izolacije te po tri gips-vlaknaste ploče s obje strane panela. Konfiguracije su se razlikovale u vrsti gips-vlaknaste ploče na neizloženoj strani panela, a tijekom ispitivanja se pratio porast temperature kroz presjek panela. Razvijene temperature na neizloženoj strani panela ukazuju na isti razred otpornosti na požar u pogledu svojstva izolacije, bez obzira na korištenu vrstu ploče.

Ključne riječi: gipsane ploče, gubitak mase, otpornost na požar, lagani kompozitni paneli

ABSTRACT

The main objective of this work is to experimentally determine the influence of different types of gypsum-based boards on the behavior of lightweight composite panels under the fire. In the first part of the work, a thermogravimetric (TG) analysis of four different boards up to 1000°C was performed. Two types of gypsum fiberboards, gypsum plasterboards and gypsum plasterboards for humid rooms were tested. The results showed that the mass loss is almost the same for all tested boards up to a temperature of 300 °C, while after the mentioned temperature a greater mass loss is observed for both types of gypsum fiberboards. The mass loss is associated with endothermic reactions that consume heat, which justifies them as a better option for protection at high temperatures. In the second part, the fire resistance of two specimens of lightweight composite panels was tested, consisting of a load-bearing steel structure, a polymer thermal insulation and three gypsum fiberboards on both sides of the panel. The configurations differed by the type of gypsum fiberboard on the unexposed side of the panel, and the temperature rise across the panel cross-section was monitored during the test. The temperatures that developed on the unexposed side of the board showed the same fire resistance rating in terms of insulation properties, regardless of the type of board used.

Key words: gypsum boards, mass loss, fire resistance test, lightweight composite panels

Popis slika:

Slika 1. Stropni (a) i zidni (b) sustav lakih čeličnih konstrukcija [8].....	4
Slika 2. Mikroskopske slike α - i β - oblika hemihidrata [12].....	6
Slika 3. Kristalne strukture (a) gipsa, (b) vermikulita i (c) staklenih vlakana [6].....	7
Slika 4. Dijagrami gubitka mase gips-kartonskih ploča [7], [13], [16].....	11
Slika 5. Dijagrami specifičnog toplinskog kapaciteta gips-kartonskih ploča [7], [13], [16]	12
Slika 6. Dijagrami toplinske vodljivosti gips-kartonskih ploča [7], [13], [16]	14
Slika 7. Uzorci gips-vlaknastih ploča.....	23
Slika 8. Uzorci gips-kartonskih ploča.....	23
Slika 9. Oprema za ispitivanje uzoraka	25
Slika 10. Priprema uzoraka gips-vlaknaste i gips-kartonske ploče	26
Slika 11. Posudica od platine u bijeloj posudici za prijenos	26
Slika 12. TGA uređaj, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu	27
Slika 13. Promjena mase uzoraka FP pri brzini od 10 °C/min.....	29
Slika 14. Derivacija promjene mase uzoraka FP pri brzini od 10 °C/min	29
Slika 15. Promjena mase uzoraka FP pri brzini od 20 °C/min.....	30
Slika 16. Derivacija promjene mase uzoraka FP pri brzini od 20 °C/min	31
Slika 17. Usporedba promjene mase uzoraka FP pri brzini od 10 i 20 °C/min.....	32
Slika 18. Usporedba derivacije promjene mase uzoraka FP pri brzini od 10 i 20 °C/min...	32
Slika 19. Promjena mase uzoraka GV pri brzini od 10 °C/min.....	33
Slika 20. Derivacija promjene mase uzoraka GV pri brzini od 10 °C/min	33
Slika 21. Promjena mase uzoraka GV pri brzini od 20 °C/min.....	34
Slika 22. Derivacija promjene mase uzoraka GV pri brzini od 20 °C/min	35
Slika 23. Usporedba promjene mase uzoraka GV pri brzini od 10 i 20 °C/min	35
Slika 24. Usporedba derivacije promjene mase uzoraka GV pri brzini od 10 i 20 °C/min..	36
Slika 25. Promjena mase uzoraka GK pri brzini od 10 °C/min.....	37
Slika 26. Derivacija promjene mase uzoraka GK pri brzini od 10 °C/min	37
Slika 27. Promjena mase uzoraka GK pri brzini od 20 °C/min.....	38
Slika 28. Derivacija promjene mase uzoraka GK pri brzini od 20 °C/min	38

Slika 29. Usporedba gubitka mase uzoraka GK pri brzini od 10 i 20 °C/min	39
Slika 30. Usporedba derivacije mase uzoraka GK pri brzini od 10 i 20 °C/min.....	39
Slika 31. Promjena mase uzoraka GKZ pri brzini od 10 °C/min	40
Slika 32. Derivacija promjene mase uzoraka GKZ pri brzini od 10 °C/min.....	41
Slika 33. Promjena mase uzoraka GKZ pri brzini od 20 °C/min	42
Slika 34. Derivacija promjene mase uzoraka GKZ pri brzini od 20 °C/min.....	42
Slika 35. Usporedba gubitka mase GKZ pri brzini od 10 i 20 °C/min.....	43
Slika 36. Usporedba derivacije mase GKZ pri brzini od 10 i 20 °C/min.....	43
Slika 37. Promjena mase gipsanih ploča pri brzini od 10 °C/min.....	45
Slika 38. Derivacija promjene mase gipsanih ploča pri brzini od 10 °C/min	45
Slika 39. Promjena mase gipsanih ploča pri brzini od 20 °C/min.....	46
Slika 40. Derivacija promjene mase gipsanih ploča pri brzini od 20 °C/min	47
Slika 41. Ispitna požarna peć	51
Slika 42. Skica mjernih mjesta temperature u slojevima obloge panela	53
Slika 43. Kriteriji otpornosti na požar [28]	54
Slika 44. PANEL 1 prije ispitivanja otpornosti na požar	56
Slika 45. PANEL 1 nakon ispitivanja otpornosti na požar.....	56
Slika 46. PANEL 2 prije ispitivanja otpornosti na požar	58
Slika 47. PANEL 2 nakon ispitivanja otpornosti na požar.....	58
Slika 48. Odabrani termočlanci na spoju 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani	60
Slika 49. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T2.....	61
Slika 50. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T3.....	62
Slika 51. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T5.....	62
Slika 52. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T6.....	63
Slika 53. Odabrani termočlanci na spoju 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani	64
Slika 54. Spoj 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T8.....	65
Slika 55. Spoj 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T9.....	65
Slika 56. Spoj 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T11	66
Slika 57. Odabrani termočlanci na spoju 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani.....	67
Slika 58. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T14	68

Slika 59. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T15	68
Slika 60. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T16	69
Slika 61. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T18	69
Slika 62. Dijagram porasta prosječne temperature na neizloženoj strani uzorka.....	70

Popis tablica:

Tablica 1. Klasifikacija gipsanih ploča [10].....	5
Tablica 2. Prednosti i nedostaci TG analize [19].....	16
Tablica 3. Faktori koji utječu na rezultate TG analize [19].....	20
Tablica 4. Informacije o ispitnim uzorcima u TG analizi.....	21
Tablica 5. Tehničke specifikacije korištenih materijala	22
Tablica 6. Gustoće ispitnih uzoraka	24
Tablica 7. Osnovne informacije o ispitnim uzorcima.....	49
Tablica 8. Opažanja tijekom požarnog ispitivanja uzorka PANEL 1 [25].....	55
Tablica 9. Opažanja tijekom požarnog ispitivanja uzorka PANEL 2 [26].....	57

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	STANJE PODRUČJA.....	3
2.1	Općenito	3
2.1.1	Reakcije dehidracije gipsa	6
2.2	Toplinska svojstva gipsanih ploča pri povišenim temperaturama.....	9
2.2.1	Toplinska difuzivnost	9
2.2.2	Gubitak mase	10
2.2.3	Specifični toplinski kapacitet.....	11
2.2.4	Toplinska vodljivost	12
3	EKSPERIMENTALNI RAD.....	15
3.1	Ispitivanje gipsanih ploča TG analizom	15
3.1.1	Opis metode	15
3.1.2	Korišteni ispitni uzorci za TG analizu	20
3.1.3	Priprema uzoraka.....	25
3.1.4	Ispitivanje uzoraka.....	27
3.1.5	Rezultati TG analize	28
3.1.5.1	Gips-vlaknasta ploča razreda reakcije na požar A1	28
3.1.5.2	Gips-vlaknasta ploča	32
3.1.5.3	Gips-kartonska ploča.....	36
3.1.5.4	Gips-kartonska ploča za vlažne prostorije	40
3.1.5.5	Zajednička usporedba rezultata gipsanih ploča.....	44
3.1.6	Zaključak	47
3.2	Otpornost na požar panela	48
3.2.1	Korišteni ispitni uzorci	49
3.2.2	Postupak ispitivanja.....	50
3.2.3	Opazanja tijekom ispitivanja	54

3.2.4	Analiza rezultata ispitivanja	59
3.2.5	Zaključak	71
4	ZAKLJUČAK	72
5	LITERATURA	74

1 UVOD

Zidni sustavi lakih čeličnih konstrukcija jedan su od popularnijih tipova zidnih sustava u današnjoj građevinskoj industriji. Veći omjer čvrstoće i mase koji se odnosi na hladno oblikovane čelične konstrukcije dovodi do lakših konstrukcija što rezultira značajnim uštedama u vremenu izgradnje, troškovima transporta i zahtjevima za radom. Provede se mnoga istraživanja kako bi se ovi zidni sustavi učinili učinkovitijima u različitim aspektima, a jedan od njih je i zaštita od požara [1].

Unatoč svim ovim prednostima, postoji nekoliko nedostataka vezanih uz ove hladno oblikovane čelične konstrukcije. Budući da brzina prijenosa topline kroz zidne i podne panele može biti mnogo veća nego u tradicionalnoj gradnji (od opeke i betona) zbog visoke toplinske vodljivosti čelika [1], energetske zahtjevi zgrade tijekom njezinog životnog ciklusa puno su veći. Stoga je bitno riješiti ovu lošu energetske učinkovitost svojstvenu hladno oblikovanim čeličnim konstrukcijama i osigurati odgovarajuću toplinsku izolaciju slijedeći ispravne smjernice za projektiranje [1].

Kao pasivna zaštita od požara u sustavima lakih čeličnih konstrukcija koriste se vatrootporne ploče. Najčešće korištena vatrootporna ploča je gips-kartonska ploča zbog svoje nezapaljive jezgre i dobrih toplinskih svojstava. Međutim, u novije vrijeme proizvode se gips-vlaknaste ploče uz tvrdnje da su superiornije u odnosu na gips-kartonske ploče zbog dodanih celuloznih vlakana i aditiva. Međutim, svojstva gips-vlaknastih ploča pri izloženosti visokim požarnim temperaturama nisu dovoljno istražena i podaci o njima nisu dostupni u literaturi. Iz tog razloga, u ovom radu su provedena eksperimentalna istraživanja gubitka mase različitih tipova gipsanih ploča te otpornost na požar laganih panela s nosivom čeličnom konstrukcijom, a koji su obloženi pločama na bazi gipsa.

Gubitak mase, kao jedno od toplinskih svojstava gipsanih ploča, bitan je parametar koji nam pokazuje njihovo ponašanje kada su izložene visokim požarnim temperaturama, a određen je termogravimetrijskom analizom. Ispitane su četiri različite gipsane ploče, dvije vrste gips-vlaknastih ploča različitog razreda reakcije na požar, gips-kartonska ploča te gips-kartonska ploča za vlažne prostorije, kako bi se vidjela razlika između gips-vlaknastih ploča u odnosu na već istražene gips-kartonske ploče.

Drugo istraživanje koje je provedeno je ispitivanje otpornosti na požar gdje su korištena dva panela različitih konfiguracija. Cilj je bio istražiti ponašanje novog sustava s različito postavljenim pločama pri izloženosti visokim požarnim temperaturama. Oba panela sastoje se od čelične nosive konstrukcije koja je obostrano obložena s tri sloja gipsanih ploča, a šupljina između ploča ispunjena je polimernom pjenom. Prvi panel obložen je s tri gips-vlaknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama, dok je drugi panel obložen s jednom gips-vlaknastom pločom s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama na koju su postavljene još dvije obične gips-vlaknaste ploče.

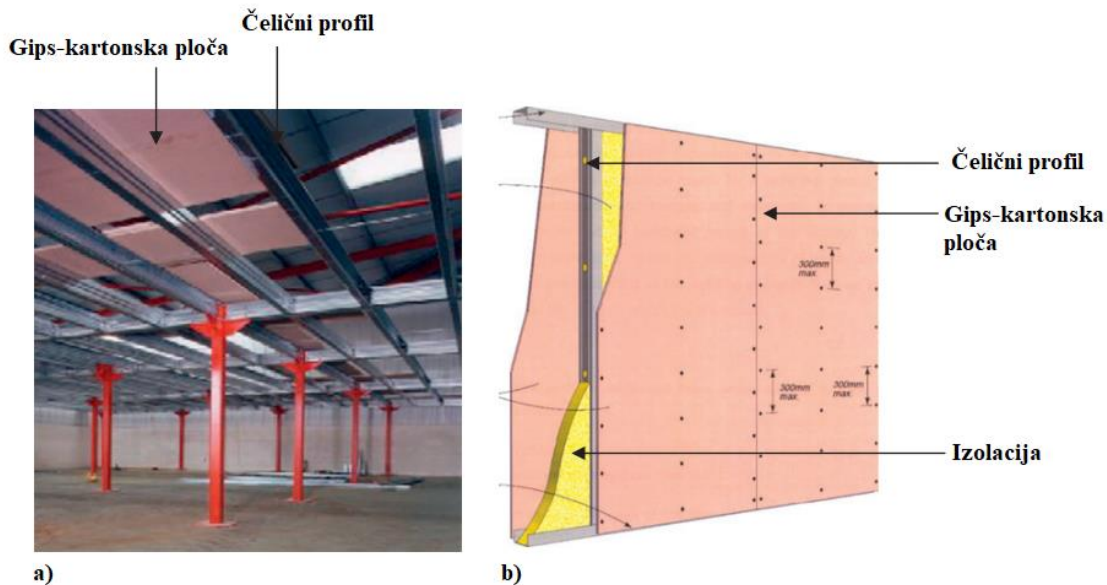
Rad se sastoji od dva dijela – teorijskog u kojem je opisano stanje područja i eksperimentalnog u kojem su detaljno opisana ispitivanja i njihovi rezultati. U stanju područja opisani su okvirni sustavi lakih čeličnih konstrukcija, gips-kartonske ploče i zašto dolazi do reakcija dehidracije gipsa te su ukratko prikazani rezultati toplinskih svojstava gips-kartonskih ploča iz literatura. Eksperimentalni rad sastoji se od ispitivanja gubitka mase termogravimetrijskom (TG) analizom i ispitivanja otpornosti na požar panela.

2 STANJE PODRUČJA

2.1 Općenito

Zaštita od požara građevinskog sustava igra ključnu ulogu od sprječavanja urušavanja zgrade do zaštite ljudi u zgradi ako dođe do izbijanja požara u njoj. Razumijevanje otpornosti na požar građevinskog sustava je imperativ jer obuzdavanje požara izravno utječe na zgradu, posebno na građevinske sustave lakih čeličnih konstrukcija [2]. Osim toga, ispuštanje dima, otrovnih plinova i prekomjerne topline ili moguće eksplozije neke su od mnogih opasnosti uzrokovanih požarom [3]. Požar se smatra jednom od najtežih nepogoda kojima zgrade mogu biti izložene u svome životnom vijeku. Stoga zidovi okvirnih sustava lakih čeličnih konstrukcija koji se koriste u zgradama trebaju zadovoljiti potrebne zahtjeve otpornosti na požar [4].

Nosivi zidovi okvirnih sustava lakih čeličnih konstrukcija sve se više upotrebljavaju u građevinarstvu diljem svijeta [5]. Obično se koriste u stambenim i poslovnim zgradama zbog mnogih prednosti koje pružaju u odnosu na druge materijale koji se koriste za zidne sustave [4]. Prednosti kao što su mala masa, dobra akustična svojstva, jednostavna izrada te brza izgradnja rezultiraju sve većom potražnjom za ovim sustavima [5]. Trenutno se ovi zidni i podni sustavi izrađuju od hladno oblikovanih čeličnih profila s tankim stijenkama i pločama od gipsa [6]. U visokogradnji se koriste kao nosivi ili nenosivi konstrukcijski elementi. Oni također djeluju kao zidovi požarnog odjeljka kako bi se spriječilo širenje vatre i vrućih otrovnih plinova u susjedne odjeljke [4]. U uvjetima požara, ovi tanki čelični stupovi i grede brzo se zagrijavaju što rezultira brzim smanjenjem njihove čvrstoće i krutosti [6]. Stoga otpornost na požar nosivih zidova okvirnih sustava lakih čeličnih konstrukcija uglavnom ovisi o zaštitnim oblogama koje se koriste, tj. pločama otpornima na požar, koje sprječavaju da čelični profili dosegnu svoje granične temperature. Najčešće korištene vrste ploča kao zaštitne obloge za ove zidne sustave su vatrootporne gips-kartonske ploče [7]. Slika 1 prikazuje upotrebu gips-kartonskih ploča u sustavima lakih čeličnih konstrukcija.



Slika 1. Stropni (a) i zidni (b) sustav lakih čeličnih konstrukcija [8]

Gips-kartonske ploče se naširoko koriste u građevinarstvu kao estetski ugodne, lako ugradive i mehanički izdržljive obloge zidova, podova i stropova [9]. Sadrže gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) i kalcijev karbonat (CaCO_3), a dehidracija gipsa i razgradnja kalcijevog karbonata apsorbiraju toplinu što gips-kartonske ploče čini vatrootpornima [6]. Većina konstruktivnih elemenata gubi sposobnost nošenja opterećenja na temperaturama između $450\text{ }^\circ\text{C}$ i $800\text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Stoga je procjena odgovora vatrootpornih barijera tijekom požara od velike važnosti u procjenama sigurnosti i pouzdanosti u građevinskoj industriji [3].

Razredi gipsanih ploča navedeni u tablici 1 klasificiraju se prema normi „Gipsane ploče – Definicije, zahtjevi i metode ispitivanja (EN 520:2004+A1:2009)“ [10]. Svojstva definiranih vrsta gipsanih ploča navedenih u tablici mogu se kombinirati u jednoj ploči. U tom slučaju se u oznaci navodi slovo koje identificira svaku vrstu zadovoljenih svojstava.

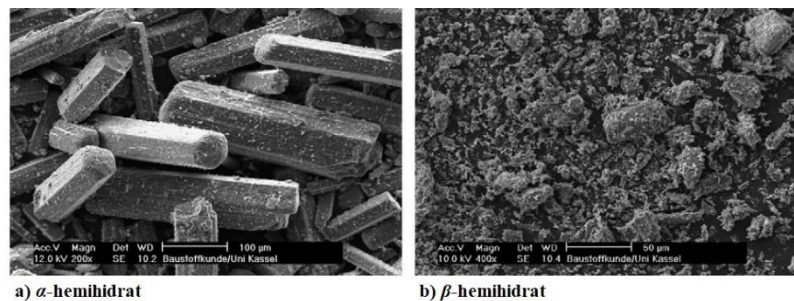
Tablica 1. Klasifikacija gipsanih ploča [10]

Redni br.	Razred	Opis
1	Tip A	Gipsane ploče s licem na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekorativne žbuke.
2	Tip H (gipsana ploča sa smanjenom brzinom apsorpcije vode)	Vrste ploča koje imaju aditive za smanjenje brzine apsorpcije vode. Prikladne su za posebne primjene u kojima su potrebna smanjena svojstva upijanja vode kako bi se poboljšala izvedba ploče. Za potrebe identifikacije, ove ploče su označene tipom H1, H2 i H3, s različitim učinkom upijanja vode.
3	Tip E (gipsana ploča za oblaganje)	Posebno proizvedene za upotrebu kao ploče za oblaganje vanjskih zidova. Nisu namijenjene u dekorativne svrhe. Nisu dizajnirane da budu trajno izložene vanjskim vremenskim uvjetima. Ova vrsta zidnih ploča ima smanjenu brzinu apsorpcije vode. Moraju imati minimalnu propusnost vodene pare.
4	Tip F (gipsane ploče s poboljšanom adhezijom jezgre na visokim temperaturama)	Gipsane ploče s licem na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekorativne žbuke. Ove ploče imaju mineralna vlakna i/ili druge dodatke u gipsanoj jezgri za poboljšanje kohezije jezgre na visokim temperaturama.
5	Tip P	Ploče koje imaju lice namijenjeno za nanošenje gipsane žbuke ili za kombiniranje kolaža s drugim materijalima u obliku ploča ili panela. U slučaju ploča namijenjenih za postavljanje gipsane žbuke, rubovi su kvadratni ili okrugli.
6	Tip D (gipsana ploča kontrolirane gustoće)	Ove ploče imaju kontroliranu gustoću, s licem na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekorativne žbuke. To omogućuje postizanje poboljšanih svojstava u određenim primjenama.
7	Tip R (gipsane ploče s povećanom čvrstoćom)	Ove ploče za posebne primjene gdje je potrebna veća čvrstoća imaju i povećana uzdužna i poprečna prekidna opterećenja. Imaju lice na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekoracije.
8	Tip I (gipsane ploče s povećanom tvrdoćom površine)	Ploče koje se koriste za primjene gdje je potrebna veća površinska tvrdoća. Imaju lice na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekoracije.

Kada su gipsane ploče izložene požaru, dolazi do dvije reakcije dehidracije gipsa, što rezultira oslobađanjem značajne količine vodene pare. Nastala vodena para difundira kroz pore gipsane ploče i otpušta se u požarni odjeljak, a povezani fenomeni prijenosa topline i mase rezultiraju smanjenjem prosječne temperature zidova i srednje koncentracije kisika u požarnom odjeljku [9].

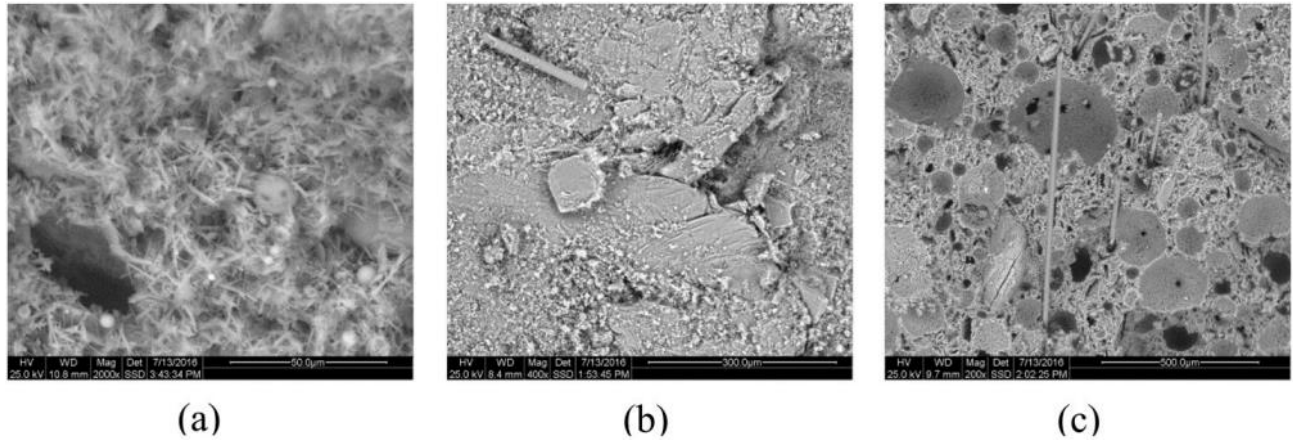
2.1.1 Reakcije dehidracije gipsa

Vatrootporne gips-kartonske ploče proizvode se prešanjem guste gipsane jezgre između otpornih recikliranih papira. Glavni sastojak jezgre, gips, prirodni je meki sulfatni mineral i obično se nalazi u naslagama vapnenačkih sedimentnih stijena [7]. To je kristalni oblik kalcijevog sulfata u kombinaciji s vodom poznat kao kalcijev sulfat dihidrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Postoje dvije kristalne strukture za hemihidrat i anhidrit, α - i β - oblici (slika 2) [11]; α - oblik se priprema mokrom metodom, a β - oblik suhim metodama iz kalcijevog sulfata dihidrata, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [12].



Slika 2. Mikroskopske slike α - i β - oblika hemihidrata [12]

Standardne gips-kartonske ploče sadrže više od 80 % gipsa [13], [14], iako postotak može varirati za različite gips-kartonske ploče ovisno o proizvođaču [7]. Kako bi se poboljšala toplinska svojstva, gips-kartonskim pločama se u malim postocima dodaju različiti materijali i dodaci [13]. Osim gipsa, komercijalne gips-kartonske ploče sastoje se od tri druge kategorije sastojaka, vermikulita, staklenih vlakana i punila, koji su odgovorni za kontroliranje skupljanja, održavanje cjelovitosti i osiguranje niske toplinske vodljivosti krajnjeg proizvoda [7]. Na slici 3 prikazane su kristalne strukture gipsa, vermikulita i staklenih vlakana. Kada se zagriju na temperaturu iznad 300 °C, vermikulit, prirodni mineral iz skupine hidro-liskuna, prolazi kroz značajnu ekspanziju [7].



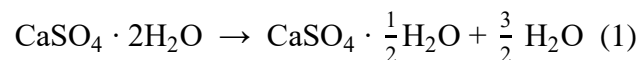
Slika 3. Kristalne strukture (a) gipsa, (b) vermikulita i (c) staklenih vlakana [6]

Vatrootporne gips-kartonske ploče obično su ojačane staklenim vlaknima. Staklena vlakna djeluju kao prenosni materijal tijekom toplinski induciranih kemijskih reakcija gipsane jezgre pri čemu ona gubi dio svoje mase. Tako staklena vlakna pomažu u održavanju cjelovitosti gipsane jezgre do temperature taljenja iznad 800 °C. Osim toga, staklena vlakna pomažu u poboljšanju mehaničkih svojstava gips-kartonskih ploča. Nakon 800 °C, gips-kartonske ploče prolaze kroz opsežnu ablaciju i pucanje [7]. Ablacija je proces kojim se uzastopni tanki slojevi materijala troše dok se materijal zagrijava [11]. To se događa jer materijal prolazi kroz kemijske i fizikalne promjene tijekom zagrijavanja koje smanjuju međusobno vezivanje slojeva materijala. Stoga će promijenjeni materijal otpasti jer nije čvrsto spojen s nepromijenjenim materijalom ispod. Kako se gips zagrijava, transformira se u anhidrit kalcijevog sulfata, koji izgleda kao suhi prah bez kohezije i tada otpada s ploče. Taj se proces usporava ako je ploča ojačana staklenim vlaknima [11]. Različita punila također su prisutna u malim količinama ovisno o specifikacijama proizvođača. Obično su ta punila niske gustoće i niske toplinske vodljivosti kako bi ploče bile lakše i manje toplinski vodljive [7].

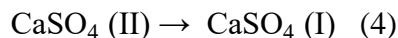
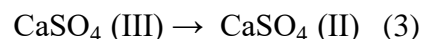
Osnova vatrootpornih svojstava gipsanih ploča proizlazi iz činjenice da sadrže i slobodnu i kemijski vezanu vodu [15]. Voda unutar gips-kartonskih ploča oslobađa se tijekom procesa dehidracije kao vodena para uz veliku apsorpciju topline. Čisti gips sadrži približno 20,9 % kemijski vezane vode. Dodatno, oko 3-4 % sadržaja slobodne vode prisutno je unutar pora gipsane jezgre, ovisno o temperaturi okoline i relativnoj vlažnosti [3], [7], [16]. Kada su gipsane ploče izložene visokim temperaturama, energija u obliku topline se apsorbira kako bi sadržaj slobodne i

kristalne vode ispario. Ova apsorpcija topline usporava prijenos topline po presjeku gipsane ploče. Kemijska reakcija koja uključuje oslobađanje molekule vode iz molekule reakcije poznata je kao dehidracija, a odvija se u dvije faze [7].

Isprva materijal gubi $\frac{3}{4}$ svoje kemijski vezane vode i rezultira praškastim materijalom ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ – kalcijev sulfat hemihidrat) (1). U drugom procesu dehidracije preostala $\frac{1}{4}$ kemijski vezane vode oslobađa se iz kalcijevog sulfata hemihidrata i rezultira sa CaSO_4 (III), kalcijevim sulfatom anhidritom III (2). Početne i završne temperature za ove dvije reakcije mogu se kretati u temperaturnom području 80 – 140 °C, odnosno 110 – 220 °C, ovisno o brzini zagrijavanja [7].



Na temperaturama iznad 300 °C nastali kalcijev sulfat anhidrit III prelazi u CaSO_4 (II), kalcijev sulfat anhidrit II (3). U ovoj transformaciji, topljiva heksagonalna kristalna struktura nepovratno se promijenila u ortorombsku kristalnu strukturu nižeg netopivog energetskog stanja. Konačna reakcija odvija se na temperaturama iznad 1180 °C gdje sulfatni anhidrit II prelazi u kubičnu kristalnu strukturu CaSO_4 (I) – kalcijev sulfat anhidrit I (4) [7].



Tijekom prve reakcije gips dehidrira u kalcijev sulfat hemihidrat (ili pariški gips) i oslobađa se 75 % kemijski vezane vode. Daljnjim povećanjem temperature uklanja se i ostatak od 25 % kemijski vezane vode i ostaje anhidrit kalcijevog sulfata [3].

Kalcijev karbonat u pločama od gipsa se raspada na 670 °C (5). Temperature na kojima se te kemijske reakcije odvijaju i energija apsorbirana u tim reakcijama bitne su informacije za razumijevanje ponašanja gipsanih ploča na povišenim temperaturama [5].



Tijekom gore navedenih reakcija, energija za koju se pretpostavlja da je potrebna za isparavanje nastale oslobođene vode, te temperature na kojima se odvijaju reakcije značajno utječu na toplinska svojstva gipsa, posebno na njegovu vodljivost, specifični toplinski kapacitet i brzinu gubitka mase [15], koja će se opisati u narednom poglavlju.

2.2 Toplinska svojstva gipsanih ploča pri povišenim temperaturama

Prelazak energije s jednog tijela na drugo zbog razlike u temperaturi naziva se toplinom [17]. Prijenos topline odvija se kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. Prijenos topline kondukcijom događa se unutar čvrstog materijala, konvekcijom kretanjem konvekcijske struje unutar tekućine ili plina zbog različitih gustoća toplijih i hladnijih dijelova, a zračenjem putem elektromagnetskih valova i najbrža je metoda [8]. Dva glavna svojstva povezana s kondukcijom topline su toplinska vodljivost i toplinska difuzivnost [17].

Razumijevanje termo-fizikalnih svojstava vatrootpornih gips-kartonskih ploča i na sobnim i na povišenim temperaturama vrlo je korisno kada se koriste kao materijali za pasivnu zaštitu od požara [7]. Toplinska svojstva gips-kartonskih ploča tipa F (gipsane ploče s poboljšanom adhezijom jezgre na visokim temperaturama) koja uključuju gubitak mase, specifični toplinski kapacitet i toplinsku vodljivost prikazana su na slikama 4-6. Temelje se na istraživanjima koja su objavili Steau i Mahendran [16], Gnanachelvam i sur. [12] te Dodangoda i sur. [7].

2.2.1 Toplinska difuzivnost

Toplinska difuzivnost (oznaka α) definira se kao mjera prijenosa topline s jedne strane materijala na drugu [18]. Dobiva se pri visokim temperaturama korištenjem *LFA* uređaja (*eng. Laser Flash Analysis*) [7], [16]. U metodi određivanja toplinske difuzivnosti, prednja strana uzorka zagrijava se svjetlosnim (laserskim) impulsom visokog intenziteta i kratkog trajanja, dok infracrvena kamera bilježi promjenu temperature s vremenom na stražnjoj strani uzorka [16].

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \text{ [mm}^2\text{/s]} \text{ (6)}$$

Ovo nije jedini način kojim se može odrediti toplinska difuzivnost. Drugi način je da odredimo tri parametra iz gornje formule i iz tih podataka izračunamo difuzivnost. Gubitak mase dobijemo termogravimetrijskom analizom, specifični toplinski kapacitet diferencijalnom skenirajućom kalorimetrijom, a toplinsku vodljivost na *heat flow meter*-u.

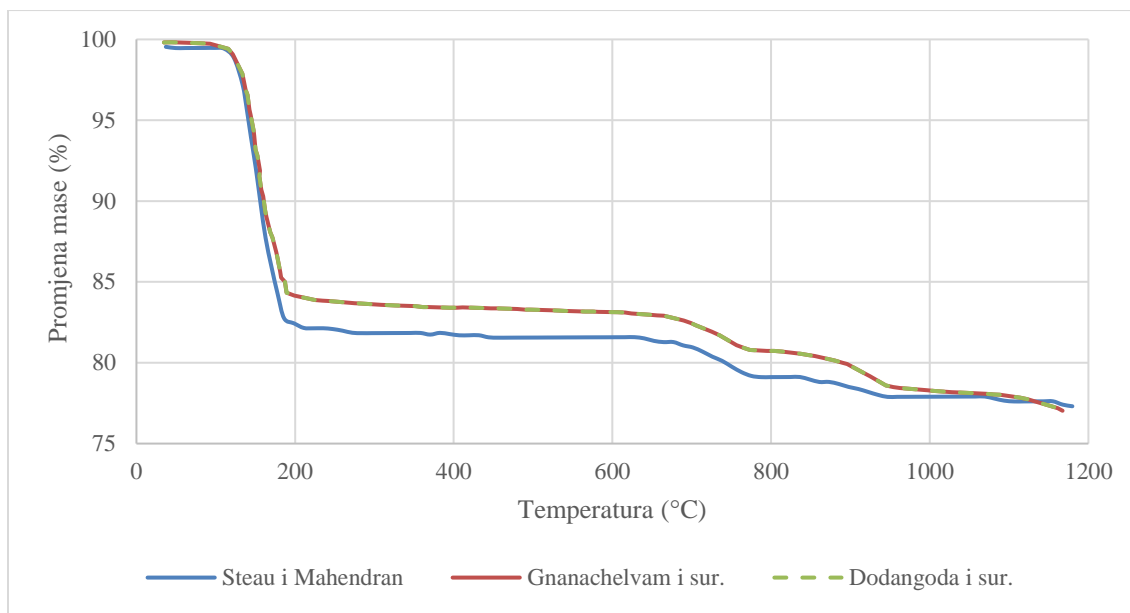
2.2.2 Gubitak mase

Obično se pretpostavlja da odnos između gubitka mase i temperature opisuje gustoću kao funkciju temperature što implicira da nema dimenzionalne promjene u debljini gipsane ploče zbog izloženosti požaru [15]. Za mjerenje gubitka mase koristi se tehnika termogravimetrijske analize (TGA), gdje se promjene u uzorku mjere pri konstantnoj brzini zagrijavanja [13].

Slika 4 prikazuje dijagrame gubitka mase gips-kartonskih ploča iz različitih literatura. U gips-kartonskoj ploči koju su ispitali Steau i sur. [16] do značajnog gubitaka mase došlo je zbog dva endotermna vrha. Ti gubici su u temperaturnom rasponu 118 – 202 °C za ovu ploču, dostižući gubitke mase od 18 %. Daljnji gubitak mase dogodio se tijekom temperaturnog raspona 650 – 1180 °C, dosežući vrijednost gubitka mase od 23 % [16].

U gips-kartonskoj ploči koju su ispitali Gnanachelvam i sur. [13] primjećuje se gubitak mase od 16 % 100 – 200 °C zbog dehidracije gipsa. Ukupni gubitak mase je 26 % na konačnoj temperaturi ispitivanja od 1200 °C [13].

U gips-kartonskoj ploči koju su ispitali Dodangoda i sur. [7] dolazi do smanjenja mase od oko 16 – 17 %, s dvije reakcije dehidracije na temperaturama između 115 i 185 °C. Još jedno smanjenje mase od 4 – 6 % događa se nakon 650 °C nakon razgradnje nečistoća gipsa. Promjene gustoće, odnosno mase ove gips-kartonske ploče su male (ukupni gubitak mase ≤ 24 %) i stoga će učinci pucanja i skupljanja biti minimalizirani iznad 650 °C [7].



Slika 4. Dijagrami gubitka mase gips-kartonskih ploča [7], [13], [16]

2.2.3 Specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet (c_p) materijala varira s temperaturom zajedno s promjenama gubitka mase. Simultani termalni analizator (STA) koristi se za mjerenje specifičnog toplinskog kapaciteta pri konstantnom tlaku i gubitka mase. Mjerenja specifičnog toplinskog kapaciteta obavljaju se tehnikom diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC) [13].

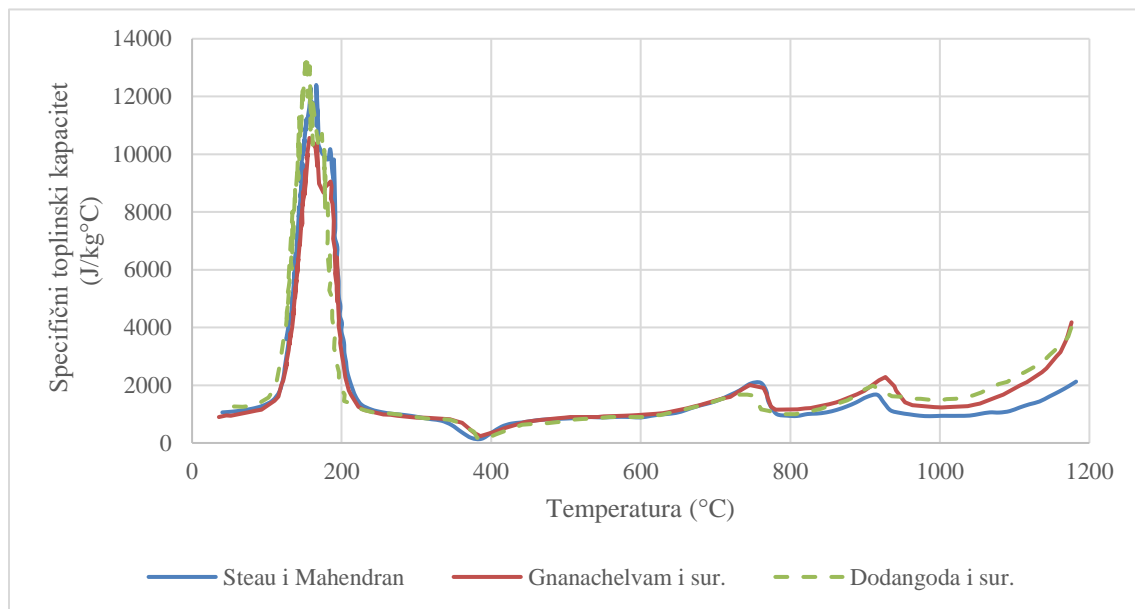
Dijagrami specifičnog toplinskog kapaciteta tri ispitna uzorka gips-kartonskih ploča iz različitih literatura prikazani su na slici 5. Sva tri ispitna uzorka pokazuju slične karakteristike specifičnog toplinskog kapaciteta u odnosu na temperaturu. Vidljiva su dva vrha gdje se odvijaju dvije reakcije dehidracije gipsa koje su opisane u prošlom poglavlju.

Specifični toplinski kapacitet gips-kartonske ploče iz literature [16] pri početnoj temperaturi iznosi 1059 J/kg°C. Brzo je porastao nakon temperature od 116 °C, a prva vršna endotermna reakcija dogodila se na 158 °C. Na toj temperaturi, izmjerena je vrijednost od 12 493 J/kg°C. Nakon toga je uslijedila druga iznenadna endotermna reakcija na 182 °C, a izmjerena vrijednost bila je 10 230 J/kg°C.

Početna/prava vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta (c_p) je 1000 J/kgK. Promjenu specifičnog toplinskog kapaciteta gips-kartonskih ploča pokazuju dva endotermna vrha čije su

vrijednosti od 10 672 J/kgK i 9214 J/kgK na 160 °C, odnosno 184 °C [13], koji su posljedica reakcija dehidracije naznačenih jednadžbama (1) i (2). Pad specifičnog toplinskog kapaciteta opaža se na oko 400 °C, dok se toplina oslobađa tijekom promjene topljivog CaSO₄ u netopljivi CaSO₄. [13]

Uzorak gips-kartonske ploče iz literature [7] ima dva endotermna vrha na temperaturama oko 150 °C i 172 °C koji su povezani s reakcijama dehidracije gipsa.



Slika 5. Dijagrami specifičnog toplinskog kapaciteta gips-kartonskih ploča [7], [13], [16]

2.2.4 Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost (λ) je važan faktor koji utječe na prijenos topline. Izračuni toplinske vodljivosti (λ) temelje se na toplinskoj difuznosti (α), specifičnoj toplini (C_p) i relativnoj gustoći (ρ). Međutim, varijacije relativne gustoće treba uzeti u obzir u izračunima toplinske vodljivosti pri povišenim temperaturama.

Obično se za mjerenje toplinske vodljivosti koristi LFA (*eng. Laser Flash Analysis*) uređaj. Međutim, promjena toplinske vodljivosti u ovisnosti o temperaturi za gipsane ploče izračunava se i pomoću jednadžbe (1), gdje je toplinska vodljivost ovisna o temperaturi, λ (T) [W/m·K]

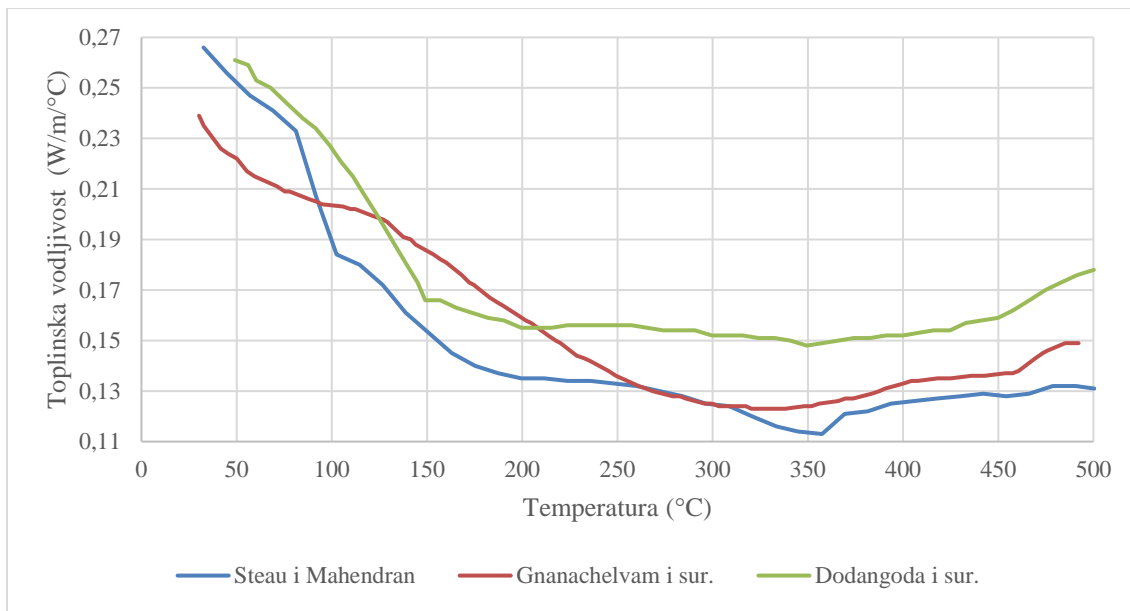
definirana kao funkcija toplinske difuzivnosti, α (T) [m²/s], specifičnog toplinskog kapaciteta, C_p (T) [J/kg·K] i gustoće ρ (T) [kg/m³] [5].

$$\lambda(T) = \alpha(T) \cdot C_p(T) \cdot \rho(T) \quad (7)$$

Plavi graf prikazuje varijacije toplinske vodljivost izračunate pomoću gornje jednadžbe za gipsane ploče. Toplinska vodljivost smanjuje se u fazama od 30 do 500 °C (0,269-0,129 W/m/°C). Značajno se smanjuje od 0,237 do 0,185 W/m/°C u temperaturnom rasponu od 80 do 100 °C. Međutim, povećava se s 0,119 na 0,129 W/m/°C kada se temperatura poveća s 340 na 500 °C [16].

Crveni graf prikazuje varijacije toplinske vodljivosti gips-kartonske ploče do 500 °C. Početna toplinska vodljivost iznosi 0,23 W/mK na 30 °C. Postupno se smanjuje na 0,125 W/mK na 300 °C i ostaje na istoj vrijednosti do 375 °C. Tada se povećava na 0,14 W/mK na 500 °C [13].

Zeleni graf prikazuje varijacije toplinske vodljivosti za gips-kartonsku ploču do 500 °C. Dobivena varijacija toplinske vodljivosti može se podijeliti u četiri glavne faze. Prvo, pokazuje lagano smanjenje do oko 100 – 120 °C nakon područja ekspanzije čvrstog materijala. Ovo smanjenje događa se s povećanjem zračnih pora/praznina između čestica uz širenje materijala. Druga faza do oko 170 – 200 °C također pokazuje postupno smanjenje s gubitkom mase zbog dehidracije gipsa, što opet povećava praznine između čestica. U sljedećoj fazi toplinska vodljivost ostaje konstantna do oko 350 – 370 °C. U završnoj fazi toplinska vodljivost postupno raste aktiviranjem nakon transformacije materijala iz CaSO₄ (III) u CaSO₄ (II) (3) u uskom temperaturnom rasponu od oko 375 – 400 °C [7]. Utvrđeno je da je ovo postupno povećanje toplinske vodljivosti posljedica procesa sinteriranja materijala. Sinteriranje je proces zbijanja i formiranja čvrste mase materijala pomoću topline bez taljenja do točke ukapljivanja [7]. Sinteriranje dovodi do povećanja kontaktne površine između čestica, a time i povećanja vodljivosti [7].



Slika 6. Dijagrami toplinske vodljivosti gips-kartonskih ploča [7], [13], [16]

3 EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad sastoji se od dva dijela:

1. određivanja gubitka mase gipsanih ploča termogravimetrijskom analizom i
2. ispitivanja otpornosti na požar panela.

Ispitivanje termogravimetrijskom (TG) analizom provedeno je kako bi se dobili rezultati gubitka mase četiri različite vrste gipsanih ploča kao funkcije temperature. Koristeći ove rezultate, napravljene su usporedbe kako bi se odredilo koja od gipsanih ploča je najprikladnija kao zaštita od požara u zidnom sustavu lakih čeličnih konstrukcija. Korišteni su uzorci dvije vrste gips-vlaknastih ploča različitog razreda reakcije na požar proizvođača Fermacell te uzorci gips-kartonske ploče i gips-kartonske ploče za vlažne prostorije proizvođača Norgips. Svaka ploča ispitana je najprije s prirastom temperature od 10 °C/min te nakon toga, za usporedbu rezultata, s prirastom temperature od 20 °C/min do konačne temperature od 1000 °C. Za potrebe ispitivanja uzimani su uzorci mase 50 ± 5 mg. Opis ispitanih uzoraka TG analizom dan je u točki 3.1.2.

Ispitivanja otpornosti na požar provedena su na dva uzorka laganih kompozitnih panela. Svrha tih ispitivanja bila je izmjeriti sposobnost reprezentativnog uzorka laganog kompozitnog panela da se odupre širenju požara s jedne strane na drugu i da zadrži svoju nosivost te temeljem analize rezultata kvalitativno odrediti doprinos korištenih ploča u sustavu panela. Opis ispitanih uzoraka otpornosti na požar dan je u točki 3.2.1.

3.1 Ispitivanje gipsanih ploča TG analizom

3.1.1 Opis metode

Termogravimetrijska analiza (TGA) je tehnika u kojoj se masa tvari mjeri kao funkcija temperature, dok je tvar podvrgnuta kontroliranom temperaturnom programu. Ova se tehnika proučava u toplinskoj analizi i koristi se za procjenu onih materijala koji su podvrgnuti promjeni mase kada su izloženi toplinskim procesima kao što su razgradnja, redukcija i oksidacija. Rezultati se dobivaju iscrtavanjem grafa između promjene mase i temperature. Instrument koji se najviše koristi za TGA poznat je kao „termovaga“, a podaci dobiveni iz TGA bilježe se u obliku krivulje

koja je poznata kao „termogram“. Peć služi za podizanje temperature do 1000 °C, a izrađena je od kvarca [19].

TGA je tehnika u kojoj se promjena mase tvari bilježi kao funkcija temperature ili vremena. Promjena temperature utječe na uzorak tako što mijenja masu uzorka. Kristalizacija, desorpcija, sublimacija, isparavanje, oksidacija, redukcija i razgradnja donose drastičnu promjenu mase uzorka. Postoje tri vrste TGA, a to su [19]:

- a. *dinamička TGA*, tehnika u kojoj dolazi do kontinuiranog linearnog povećanja temperature uzorka s obzirom na vrijeme,
- b. *izotermna TGA*, vrsta analize u kojoj se temperatura uzorka održava konstantnom određeno vrijeme i mjeri se promjena mase i
- c. *kvazistatička TGA*, analiza u kojoj se uzorak zagrijava sve dok se ne postigne konstantna težina kada temperatura raste u nizu.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci TG analize [19]

PREDNOSTI	bilo koja vrsta čvrste tvari može se analizirati uz minimalnu pripremu uzorka
	visoka točnost vage, visoka preciznost sustava za kontrolu temperature i atmosferskih uvjeta
	praktična tehnika koja štedi vrijeme jer nema previše konstrukcijskih zahtjeva
	uzorak i držač uzorka mogu se jednostavno mijenjati
	može se održavati velika brzina zagrijavanja s dobrom rezolucijom
NEDOSTACI	ograničenje mase uzorka
	vrlo teško tumačenje rezultata
	vrlo osjetljivo na svaku promjenu
	ne može optimizirati osjetljivost i razlučivost u jednom eksperimentu
	kvantitativna analiza pojedinačnog procesa je nemoguća
	uzorci se mogu lijepe se unutar stijenke TGA ćelije (zbog razgradnje ljepljivih uzoraka)
	smanjen životni vijek zbog ljepljivih uzoraka

Mikrovaga je vaga koja je dizajnirana za mjerenje vrlo malih masa kao što su dijelovi po milijunima grama. Termočlanak je elektronički uređaj koji služi za mjerenje temperature. Ima par žica koje se sastoje od različitih metala koji su međusobno spojeni, a njihovi slobodni krajevi pričvršćeni su na voltmetar koji se koristi za mjerenje razlike potencijala stvorene između mjesta spajanja metala. Peć je zatvorena struktura koja daje toplinu uzorku, a uzorak se može zagrijavati na visokoj temperaturi. Programator temperature služi za podešavanje temperature. Temperatura

sustava podešava se unosom unaprijed planiranih podataka. Temperatura sustava može se povećavati ili smanjivati korak po korak. Izlaz dobiven iz peći i mikrovage bilježi se u obliku grafikona ili pomoću mikroročunala. Danas je sustav bilježenja podataka povezan sa softverom koji omogućuje pohranjivanje podataka i iscrtavanje grafikona za učinkovito tumačenje rezultata [19].

Uzorak se ručno postavlja na mikrovagu. Termočlanak se postavlja točno iznad uzorka. Temperatura peći se polako podiže. Zatim se mjeri promjena mase koja odgovara temperaturi. Termočlanak se koristi za mjerenje temperature uzorka, a promjena mase mjeri se pronalaženjem otklona grede. Tijekom cijelog eksperimenta izbjegava se izravan kontakt uzorka s termočlankom dok se uzorak nalazi u posudici od platine. TGA se koristi za mjerenje promjena mase uzorka, a njegovo skeniranje se izvodi u visoko kontroliranoj atmosferi. Masa uzorka se mjeri kao funkcija temperature pomoću termovage. Uzorak se stavlja u peć vješanjem na vagu i uzorak se toplinski izolira od peći [19]. Tijekom rada na TGA treba uzeti u obzir sljedeće točke:

Pripremu uzorka

Za dobivanje relevantnih podataka vrlo je važna priprema uzorka. Povećanjem površine uzorka koji se stavlja u posudicu, može se poboljšati razlučivost i ponovljivost temperatura gubitka mase. Ako se masa uzorka smanji, to utječe na točnost mjerenja mase. Obično se u većini primjena koristi 10 – 20 mg uzorka. Ako je uzorak hlapljiv po prirodi, tada bi težina uzorka trebala biti 50 – 100 mg. Treba uzeti u obzir da većina TGA instrumenata obično ima vrijednost pomaka osnovne linije od 0,025 mg što je jednako 0, 25 % uzorka tvari od 10 mg [19].

Brzinu zagrijavanja

U većini slučajeva uzorak se zagrijava brzinom od 20 °C/min. Razlučivost preklapajućeg gubitka mase poboljšava se smanjenjem brzine zagrijavanja. Promjenjive brzine zagrijavanja također se mogu koristiti u TGA. U tu svrhu, TGA instrument treba biti konstruiran tako da automatski povećava rezoluciju smanjenjem brzine zagrijavanja tijekom intervala gubitka težine [19].

Plin za pročišćavanje

Dušik je u prirodi inertan. Zato se zbog svoje prirode može koristiti za pročišćavanje uzoraka u termogravimetrijskoj analizi. Razlika u oksidativnoj stabilnosti komponenata uzorka utječe na rezultat dobiven TGA. Njegova rezolucija može se povećati korištenjem zraka. Kada su komponente uzorka hlapljive prirode, tada se može koristiti vakuum koji poboljšava odvajanje komponenata od početka razgradnje i hlapljivih tvari nastalih iz uzorka na nižoj temperaturi u vakuumu [19].

Instrument se kalibrira pomoću sljedećih koraka:

Slijepi test

Uzorak se ne stavlja u posudicu kada se izvodi kalibracija. Kroz posudicu se propušta samo zrak, a temperatura se podiže do 1000 °C pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min. Prije provođenja ovog slijepog testa treba provjeriti opće stanje aparature. Kada se temperatura poveća, uočava se blagi pomak TGA krivulje. To je odgovorno za promjenu konvekcije i uzgona. Šum se može pojaviti u TGA krivulji zbog sljedećih razloga: kontakta između posude za uzorke i termočlanka, kvarcne žice za ovjes i cijevi za dovod plina za pročišćavanje i posude za utege i staklenog poklopca. Vibracije i udari također su odgovorni za stvaranje šuma. Lagano smanjenje krivulje opaženo je u TGA krivulji kada je posudica s uzorkom ili obješena žica kontaminirana produktom razgradnje [19].

Kalibracija promjene mase

TGA se obično koristi za mjerenje mase uzorka brzinom promjene mase uzorka. Zato je kalibracija apsolutne vrijednosti mase uzorka jako bitna. Masa uzorka od 20 mg izračunata je s preciznošću od 10 µg pomoću precizne vage i izračunata je prosječna vrijednost. Kontrola ravnoteže instrumenta je podešena za postavljanje automatske nule kada se peć uključi i TGA signali se stabiliziraju [19].

Kalibracija temperature

Temperatura TGA može se kalibrirati na dva načina: jedan način je korištenje tališta čistog metala, a drugi je korištenje temperature Curiejeve točke. U prvom postupku, jednim od metala se rukuje u obliku vrpce, a zatim se taj metal postavlja na TGA žicu za ovjes. U tehnici temperature Curiejeve točke, standardne tvari provjerava Međunarodni kongres za toplinsku analizu (*International Congress on Thermal Analysis, ICTA*). Standardna tvar koja se može koristiti u TGA su feromagnetni i njihova Curiejeva temperatura je različita. Dakle, potrebno ga je kalibrirati procjenom prividnih promjena težine na Curiejevim temperaturama pomoću trajnog magneta. Sastav materijala uzorka i njihova toplinska stabilnost mogu se predvidjeti iz TGA podataka. Ovisi o promjenama mase uzorka uslijed oksidacije, dehidracije, isparavanja i razgradnje. Ovi fenomeni se mogu pojaviti kada je temperatura visoka i do 1000 °C. Tipičan primjer je kalcijev oksalat hidrat. Kada se zagrije do 1000 °C tada dolazi do razgradnje što se vidi iz krivulje koja pokazuje da se razgradnja odvija u tri koraka. Podaci o gubitku težine mjere se nakon pola sekunde tijekom cijelog eksperimenta [19].

Faktori koji utječu na rezultate TGA kategorizirani su u dvije velike skupine i prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Faktori koji utječu na rezultate TG analize [19]

INSTRUMENTALNI FAKTORI	BRZINA ZAGRIJAVANJA PEĆI	Temperatura pri kojoj se uzorak razgrađuje ovisi o brzini zagrijavanja. Kada je brzina zagrijavanja visoka, tada se i razgradnja tvari odvija velikom brzinom.
	ATMOSFERA UNUTAR PEĆI	Na temperaturu pri kojoj se uzorak razgrađuje utječe atmosfera unutar peći koja okružuje uzorak. Čisti plinoviti dušik prolazi iz cilindra u peć za stvaranje vrlo inertne atmosfere.
KARAKTERISTIKE UZORKA	MASA UZORKA	Obično se koristi mala težina uzorka. Zbog male količine uzorka, temperaturni gradijent će se smanjiti kroz uzorak. Ako se koristi velika količina uzorka, dolazi do odstupanja od linearnosti osobito kod egzotermne reakcije.
	VELIČINA ČESTICA UZORKA	Koriste se male čestice jednolikog oblika. Korištenje velikih čestica ili kristala može uzrokovati brzi gubitak težine tijekom zagrijavanja.

3.1.2 Korišteni ispitni uzorci za TG analizu

Za potrebe ispitivanja promjene mase termogravimetrijskom (TG) analizom korišteni su uzorci četiri različite vrste gipsanih ploča. Korišteni su uzorci dvije vrste gips-vlaknastih ploča različitog razreda reakcije na požar proizvođača Fermacell te uzorci gips-kartonske ploče i gips-kartonske ploče za vlažne prostorije proizvođača Norgips. Za potrebe ispitivanja svakom uzorku dana je njegova oznaka te je izmjerena masa koja mora iznositi 50 ± 5 mg. Svaka ploča ispitana je šest puta, tri puta s prirastom temperature od 10 °C/min i tri puta s prirastom temperature od 20 °C/min. Korišteni su različiti prirasti da bi se moglo vidjeti dolazi li do razlika u rezultatima

promjene mase ovisno o brzini prirasta temperature. Osnovne informacije o ispitnim uzorcima u TG analizi dane su u tablici 4.

Tablica 4. Informacije o ispitnim uzorcima u TG analizi

Redni br.	Naziv uzorka	Proizvođač	Termogravimetrijska analiza (TGA)		
			Oznaka uzorka	Prirast temperature [°C/min]	Masa [mg]
1	Gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama	Fermacell	FP-1-10	10	55.40
			FP-2-10	10	52.70
			FP-3-10	10	54.00
			FP-1-20	20	52.80
			FP-2-20	20	56.20
			FP-3-20	20	49.50
2	Gips-vlaknasta ploča	Fermacell	GV-1-10	10	51.00
			GV-2-10	10	49.40
			GV-3-10	10	57.00
			GV-1-20	20	48.10
			GV-2-20	20	53.90
			GV-3-20	20	53.00
3	Gips-kartonska ploča	Norgips	GK-1-10	10	53.20
			GK-2-10	10	50.40
			GK-3-10	10	50.10
			GK-1-20	20	52.70
			GK-2-20	20	49.80
			GK-3-20	20	49.40
4	Gips-kartonska ploča za vlažne prostorije	Norgips	GKZ-1-10	10	52.90
			GKZ-2-10	10	53.80
			GKZ-3-10	10	51.30
			GKZ-1-20	20	49.20
			GKZ-2-20	20	47.40
			GKZ-3-20	20	49.10

U tablici 5 dane su tehničke specifikacije korištenih materijala prema proizvođaču istih, uključujući razred reakcije na požar, specifičnu gustoću, toplinsku vodljivost te specifični toplinski kapacitet.

Tablica 5. Tehničke specifikacije korištenih materijala

Materijal	Tehničke specifikacije
Gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama	Razred reakcije na požar: A1 [20] Specifična gustoća: $1200 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ [20] Toplinska vodljivost: $\lambda = 0,38 \text{ W/mK}$ [20]
Gips-vlaknasta ploča	Razred reakcije na požar: A2-s1, d0 [21] Specifična gustoća: $1150 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ [21] Toplinska vodljivost: $\lambda = 0,32 \text{ W/mK}$ [21] Specifični toplinski kapacitet: $c = 1,1 \text{ kJ/kgK}$ [21]
Gips-kartonska ploča	Razred reakcije na požar: A2-s1, d0 (B) [22] Specifična gustoća: $\geq 680 \text{ kg/m}^3$ [22] Toplinska vodljivost: $0,21 \text{ W/mK}$ [22]
Gips-kartonska ploča za vlažne prostorije	Razred reakcije na požar: A2-s1, d0 (B) [23] Specifična gustoća: $\geq 680 \text{ kg/m}^3$ [23] Toplinska vodljivost: $0,21 \text{ W/mK}$ [23]

Ispitani su uzorci gipsanih ploča standardne debljine 12,5 mm. Za potrebe ispitivanja gips-kartonskih ploča prvo su uklonjene papirnate obloge ploča, a pripremljeni su uzorci za ispitivanje iz gipsane jezgre svake ploče.



Slika 7. Uzorci gips-vlaknastih ploča



Slika 8. Uzorci gips-kartonskih ploča

Izmjerene su mase i dimenzije ispitnih uzoraka gipsanih ploča sa slika 7 i 8 na temelju čega je izračunata gustoća svakog uzorka. Vrijednosti mase i dimenzija ispitnih uzoraka te izračunata gustoća prikazani su u tablici 6. Izračun gustoće proveden je u svrhu usporedbe vrijednosti gustoće ispitnih uzoraka s vrijednostima iz tehničkih specifikacija proizvoda koji su prikazani u tablici 5.

Tablica 6. *Gustoće ispitnih uzoraka*

Ime uzorka	Masa uzorka [g]	Dimenzije uzorka [cm]	Gustoća uzorka [kg/m ³]
Gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama	140,3765	9 x 10 x 1,25	1247,79
Gips-vlaknasta ploča	123,9359	9 x 10 x 1,25	1101,65
Gips-kartonska ploča	81,8770	10 x 11 x 1,25	595,47
Gips-kartonska ploča za vlažne prostorije	115,8321	10 x 15,5 x 1,25	597,84

Gustoća ispitnog uzorka gips-vlaknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama iznosi 1247,79 kg/m³ što je u skladu s vrijednostima od 1200 ± 50 kg/m³ navedenima u tehničkim specifikacijama toga proizvoda. Izmjerena gustoća gips-vlaknaste ploče koja iznosi 1101,65 kg/m³ također je u skladu s tehničkim specifikacijama gdje je navedeno da specifična gustoća ove ploče iznosi 1150 ± 50 kg/m³. U tehničkim specifikacijama navedeno je da specifična gustoća gips-kartonskih ploča iznosi ≥ 680 kg/m³ dok izračunate vrijednosti iznose 595,47 kg/m³ za gips-kartonsku ploču i 597,84 kg/m³ za gips-kartonsku ploču za vlažne prostorije.

3.1.3 Priprema uzoraka

Prije ispitivanja uzorke je potrebno pripremiti, odnosno usitniti. Manji komad uzorka za ispitivanje brzo se i ugrubo usitni u mužaru. Na slici 9 prikazana je oprema potrebna za pripremu uzoraka za ispitivanje (mužar, žličica, kistić, pinceta, bijele plastične posudice).



Slika 9. Oprema za ispitivanje uzoraka

Primijećeno je da se uzorci gips-kartonskih ploča puno lakše usitne od uzoraka gips-vlaknastih ploča. Razlog tome su celulozna vlakna koja povezuju dijelove gips-vlaknaste ploče te se zbog toga teže odvajaju i usitnjavaju (slika 10). Kod gips-kartonskih ploča prilikom pripreme uzorka se uklanja papir te se usitnjava samo gipsana jezgra.



Slika 10. Priprema uzoraka gips-vlknaste i gips-kartonske ploče

Uzorak je potrebno postaviti u posebnu posudicu od platine (slika 11). Važno je napomenuti da je posudica od platine iznimno osjetljiva te se s njom mora postupati nježno i polagano. Posudica se može uzeti jedino korištenjem pincete, nikako rukom, te se postavi u bijelu posudicu za prijenos. Uzorak mora zadovoljavati masu od 50 ± 5 mg. Prije vaganja potrebno je tarirati praznu posudicu od platine. Uzorak materijala polagano se stavlja u posudicu od platine pomoću male žličice sve dok se ne napuni do željene mase. Kada masa uzorka zadovoljava, uzorak je spreman za ispitivanje.



Slika 11. Posudica od platine u bijeloj posudici za prijenos

3.1.4 Ispitivanje uzoraka

Uzorci se ispituju upotrebom uređaja Discovery TGA 55, TA Instruments koji je prikazan na slici 12.



Slika 12. TGA uređaj, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Prije ispitivanja potrebno je otvoriti ventile na boci dušika kako bi se ostvario dovoljan protok. Dušik se mora pustiti kroz uređaj minimalno 45 minuta prije samog ispitivanja, a poželjno je da bude otvoren 2 sata prije kako bi se postigli relevantni podaci. Dušik je inertan plin i zato se može koristiti za pročišćavanje uzoraka u TG analizi. Razlika u oksidativnoj stabilnosti komponenata uzorka utječe na rezultat dobiven TGA. Odmah nakon otvaranja ventila potrebno je spojiti uređaj s računalom i odrediti tok dušika. Uobičajena praksa laboratorija LATOM je korištenje protoka plina od 40 ml/min, a minimalno i maksimalno dopuštene vrijednosti su od 30 ml/min do 60 ml/min.

Ispitivanje započinje na temperaturi od 30 °C, a zatim se povećava do 1000 °C brzinom od 10 °C/min ili 20 °C/min. Prirast temperature od 10 °C/min korišten je kao referentan, dok je prirast od 20 °C/min korišten kako bi se vidjelo postoje li razlike u rezultatima zbog različitih brzina

zagrijavanja. Prije svakog ispitivanja vaga u TGA uređaju se mora tarirati s praznom posudicom. Posudicu je potrebno staviti na „ruku“ za prihvat pritom pazeći na perforaciju na „ruci“ i na donjoj strani posudice koje se moraju poklopiti. Pritiskom na ikonu vage na računalu uređaj će prenijeti posudicu u peć i tarirati. Na kraju tariranja „ruka“ će sama vratiti posudicu u početnu poziciju.

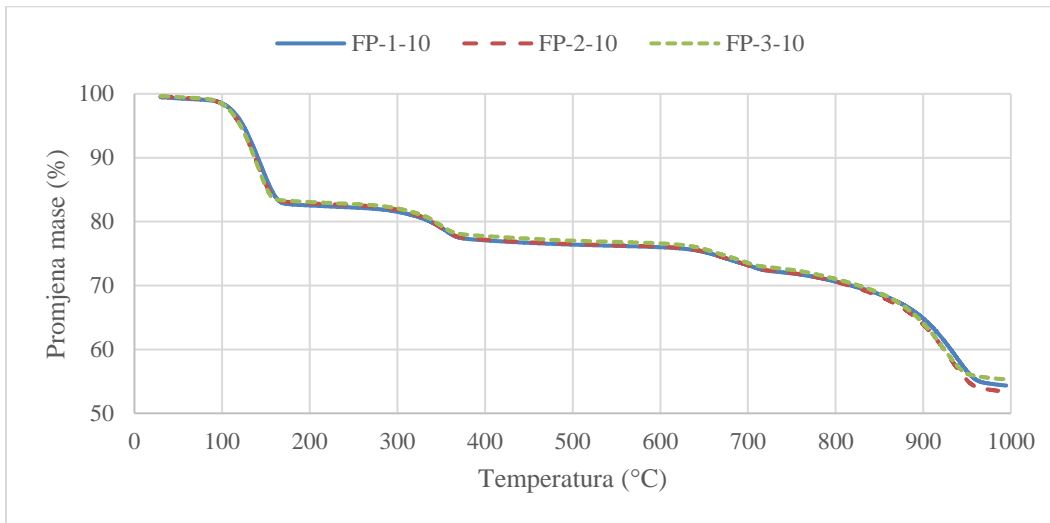
Nakon ispitivanja potrebno je spremati rezultate. Dobiveni rezultati koriste se za izradu grafova koristeći program MS Excel.

3.1.5 Rezultati TG analize

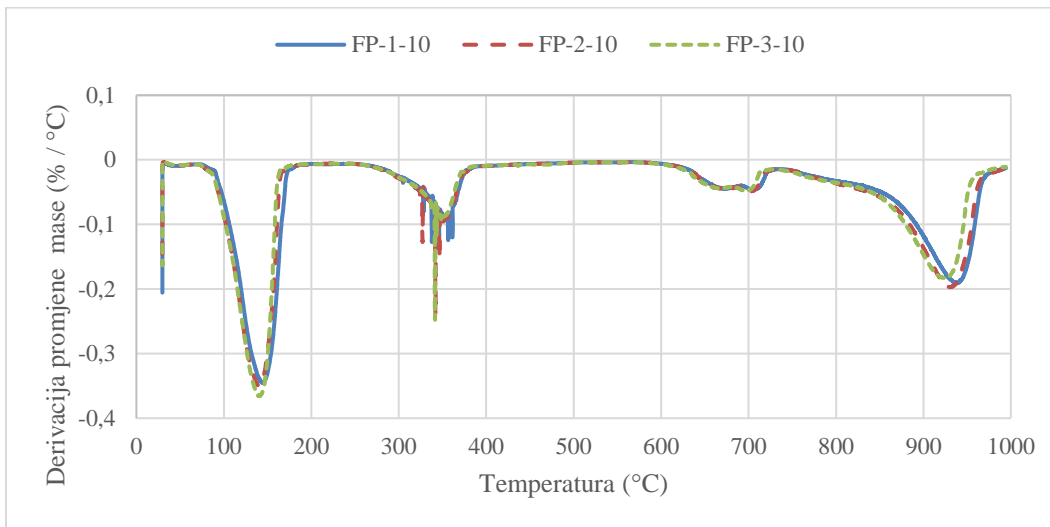
Rezultati termogravimetrijske analize (TGA) prikazuju se pomoću TGA i DTG krivulja. TGA krivulja prikazuje promjenu mase uzorka kao funkciju temperature. DTG krivulja je 1. derivacija TGA krivulje koja pokazuje vrhove dijagrama koji odgovaraju pojedinom koraku promjene mase uzorka. U slučaju kada se TGA krivulja sastoji od slabije razlučenih koraka, DTG krivulja je od pomoći kod određivanja završetka jednog i početka sljedećeg koraka termičkog raspada.

3.1.5.1 Gips-vlaknasta ploča razreda reakcije na požar A1

Slike 13 i 14 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka Fermacellove gips-vlaknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama (označenih kao FP-1-10, FP-2-10 i FP-3-10) pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min. Vidljivo je da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase slični za sva tri uzorka FP. Do manjih razlika dolazi tek nakon 950 °C iz čega je vidljivo da je uzorak FP-2-10 izgubio najviše mase, dok je uzorak FP-3-10 izgubio najmanje mase. Razlike su unutar 2 %. Temperatura uzorka FP ravnomjerno se povećava sve dok ne dosegne oko 100 °C. Smanjenje gustoće na oko 100 °C nastaje zbog isparavanja vode. Promjene na 100 °C odgovaraju gubitku kemijski vezane vode što se slaže s podacima iz literature. U uzorcima FP-1-10, FP-2-10 i FP-3-10 dolazi do smanjenja mase od oko 16 % na temperaturama između 100 i 160 °C. U tom temperaturnom rasponu odvijaju se dvije reakcije dehidracije gipsa. Iduće značajnije promjene mase događaju se na oko 350 °C, 700 °C te nakon 900 °C. Pretpostavlja se da do njih dolazi zbog raspadanja celuloznih vlakana u gips-vlaknastoj ploči.



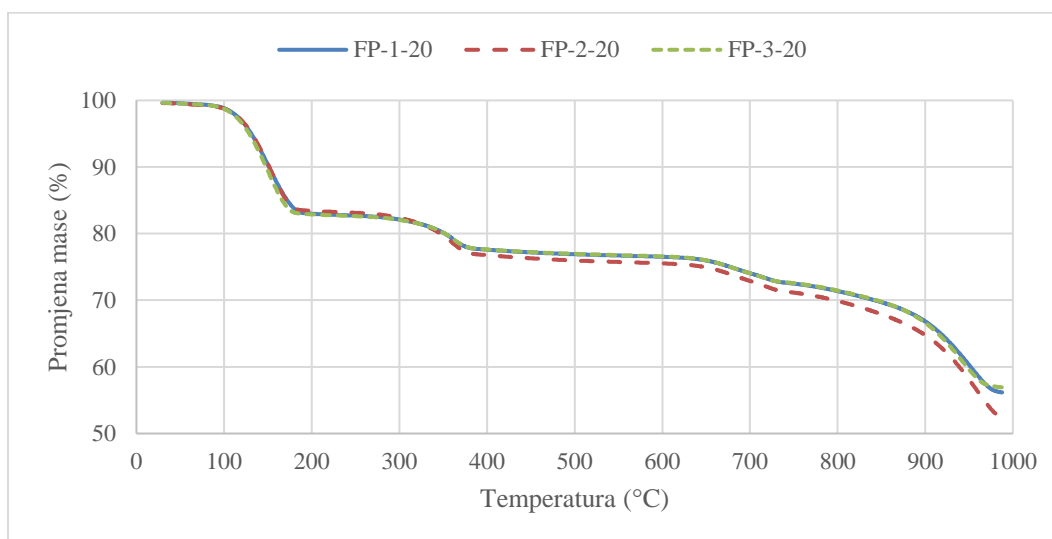
Slika 13. Promjena mase uzoraka FP pri brzini od 10 °C/min



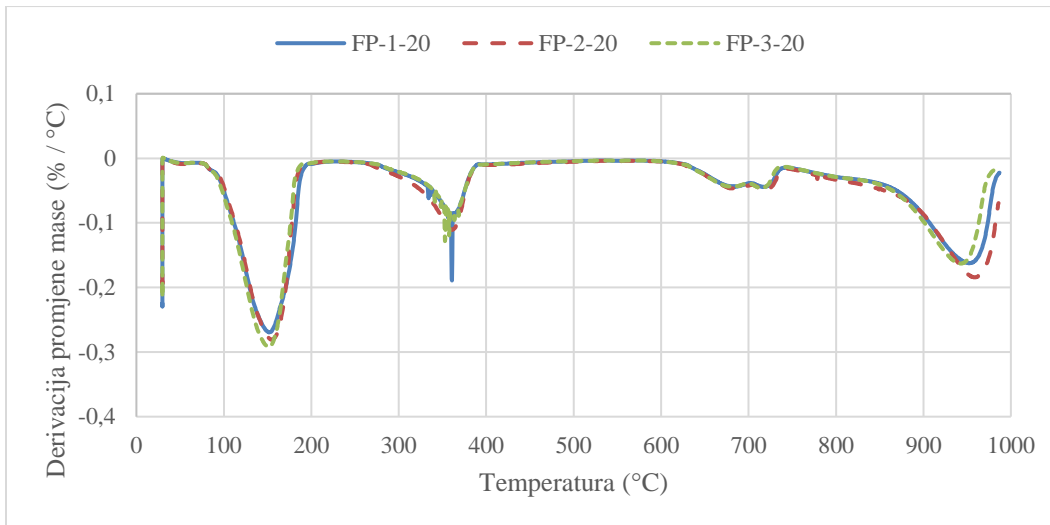
Slika 14. Derivacija promjene mase uzoraka FP pri brzini od 10 °C/min

Slike 15 i 16 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka Fermacellove gips-vlaknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama (označenih kao FP-1-20, FP-2-20 i FP-3-20) pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min. Izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase slični su za sva tri uzorka FP. Do razlika u grafovima dolazi na oko 400 °C. Nakon 900 °C je vidljivo da je uzorak FP-2-20 izgubio najviše mase, dok je uzorak FP-3-20 izgubio

najmanje mase. Razlike su unutar 5 %. Temperatura uzorka FP ravnomjerno se povećava sve dok ne dosegne oko 100 °C. Smanjenje mase na oko 100 °C nastaje zbog isparavanja vode. Promjene na 100 °C odgovaraju gubitku kemijski vezane vode što se slaže s podacima iz literature. U uzorcima FP-1-20, FP-2-20 i FP-3-20 dolazi do smanjenja mase od oko 16 % na temperaturama između 100 i 160 °C. U tom temperaturnom području odvijaju se dvije reakcije dehidracije gipsa. Iduće značajnije promjene mase događaju se na oko 350 °C, 700 °C te nakon 950 °C. Pretpostavlja se da do njih dolazi zbog raspadanja celuloznih vlakana u gips-vlaknastoj ploči.

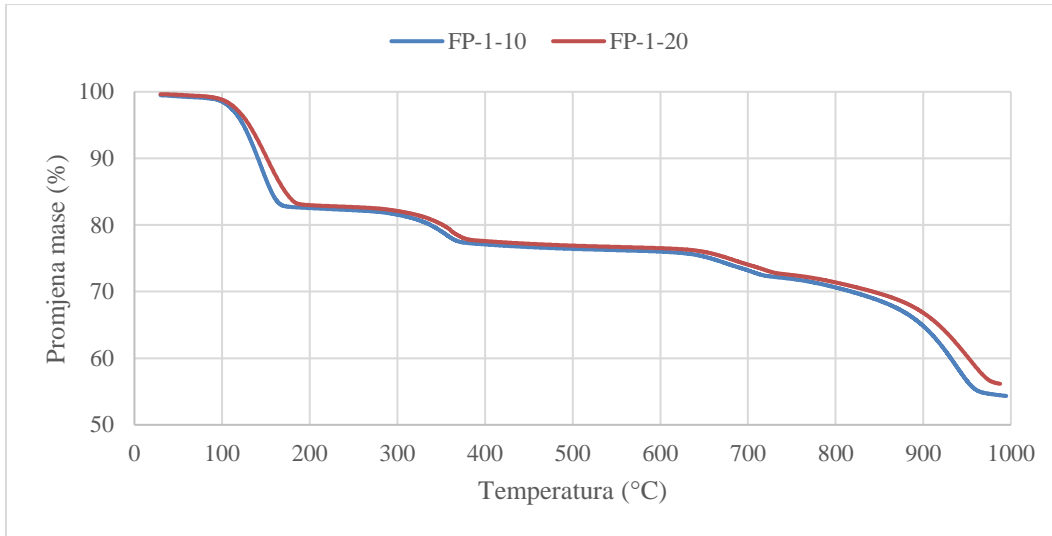


Slika 15. Promjena mase uzoraka FP pri brzini od 20 °C/min

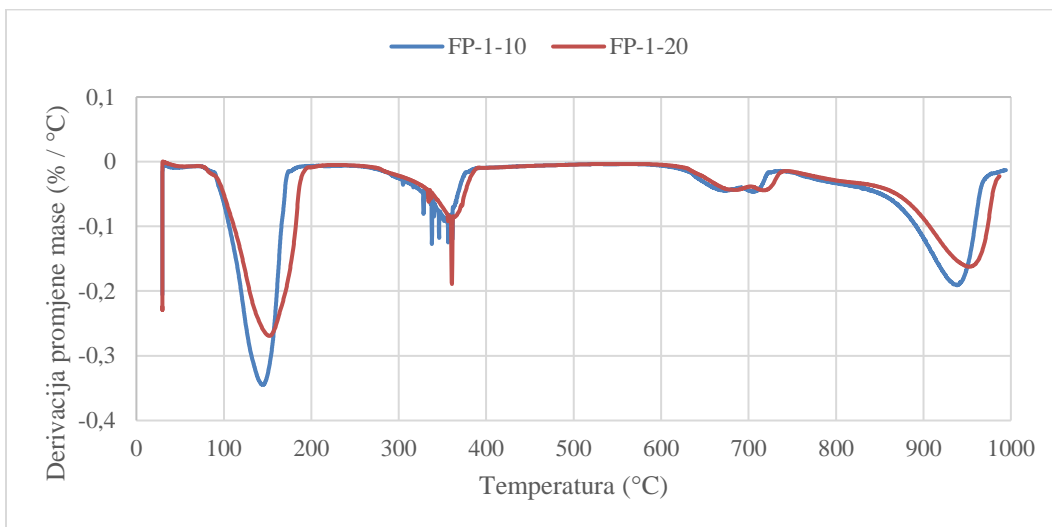


Slika 16. Derivacija promjene mase uzoraka FP pri brzini od 20 °C/min

Slike 17 i 18 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase dva izabrana uzorka gips-vlknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama (označenih kao FP-1-10 i FP-1-20) pri brzinama zagrijavanja od 10 i 20 °C/min. Kao što je vidljivo iz slika izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase pokazuju slične karakteristike unatoč različitim brzinama zagrijavanja. Međutim, u temperaturnim rasponima prilikom kojih se događaju određene promjene vidljive su razlike u temperaturama. Tako su temperature više kada je brzina zagrijavanja veća.



Slika 17. Usporedba promjene mase uzoraka FP pri brzini od 10 i 20 °C/min

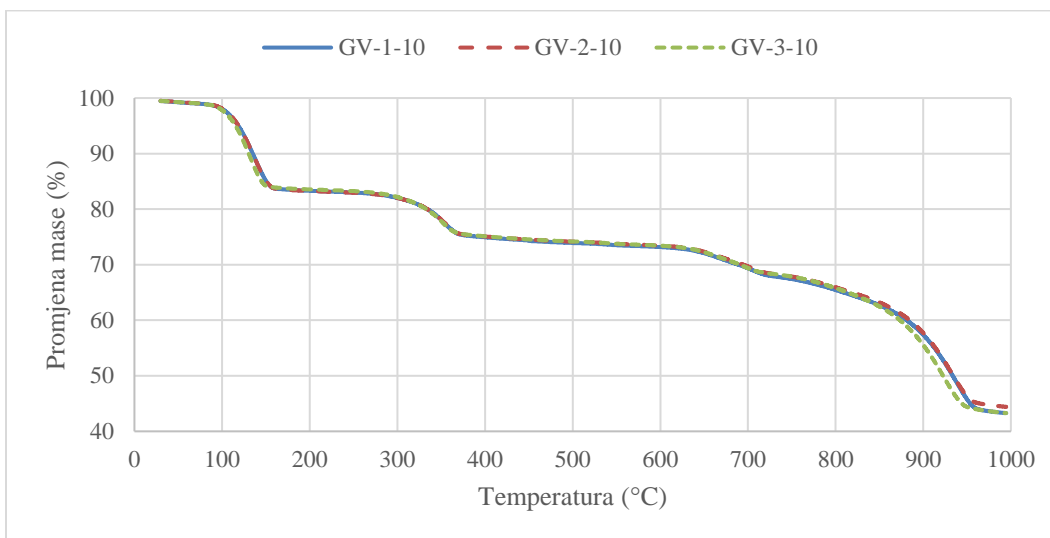


Slika 18. Usporedba derivacije promjene mase uzoraka FP pri brzini od 10 i 20 °C/min

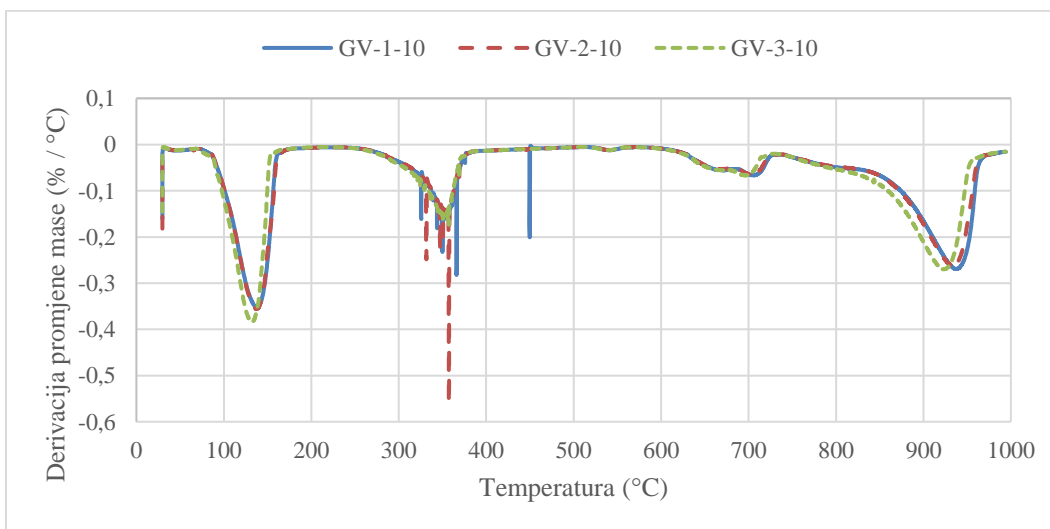
3.1.5.2 Gips-vlknasta ploča

Slike 19 i 20 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka gips-vlknaste ploče (označenih kao GV-1-10, GV-2-10 i GV-3-10) pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min. Vidljivo je da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase slični za sva tri uzorka GV. Temperatura se ravnomjerno povećava sve dok ne dosegne oko 100 °C. Promjena mase, odnosno

smanjenje gustoće na oko 100 °C nastaje zbog isparavanja vode. Značajnija promjena mase zbog dvije endotermne reakcije dehidracije događa se u temperaturnom rasponu 100 – 150 °C dostižući gubitak mase od oko 16 %. Nadalje, smanjenje mase za oko 8 % događa se pri temperaturi od oko 360 °C. Razlog tome je vjerojatno razgradnja dodatnih vlakana koje gips-vlaknaste ploče sadrže. Smanjenje mase za 2 – 5 % događa se nakon 550 °C nakon razgradnje nečistoća gipsa. Kao što se vidi na slici gubitak mase ovih gipsanih ploča veći je od 50 %.

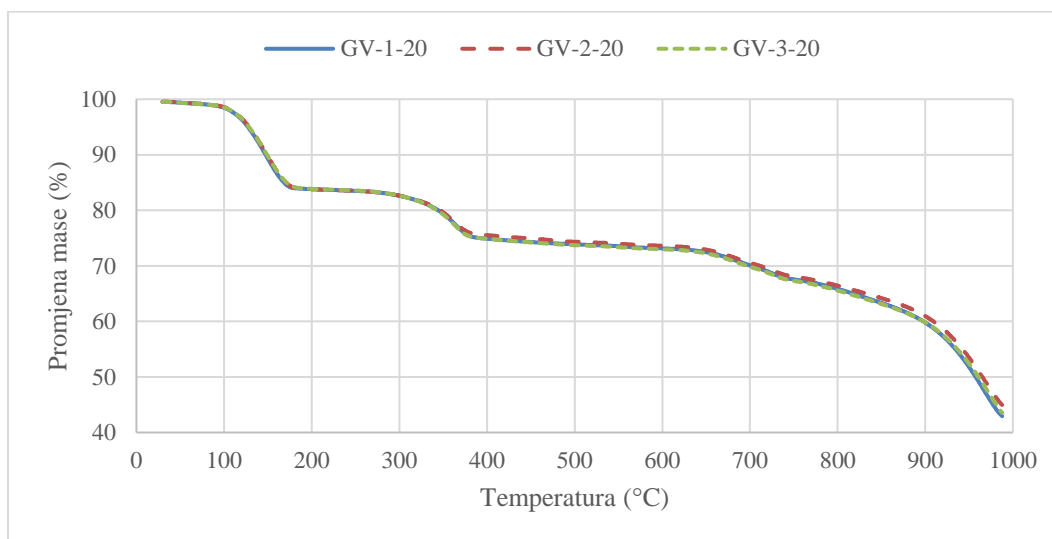


Slika 19. Promjena mase uzoraka GV pri brzini od 10 °C/min

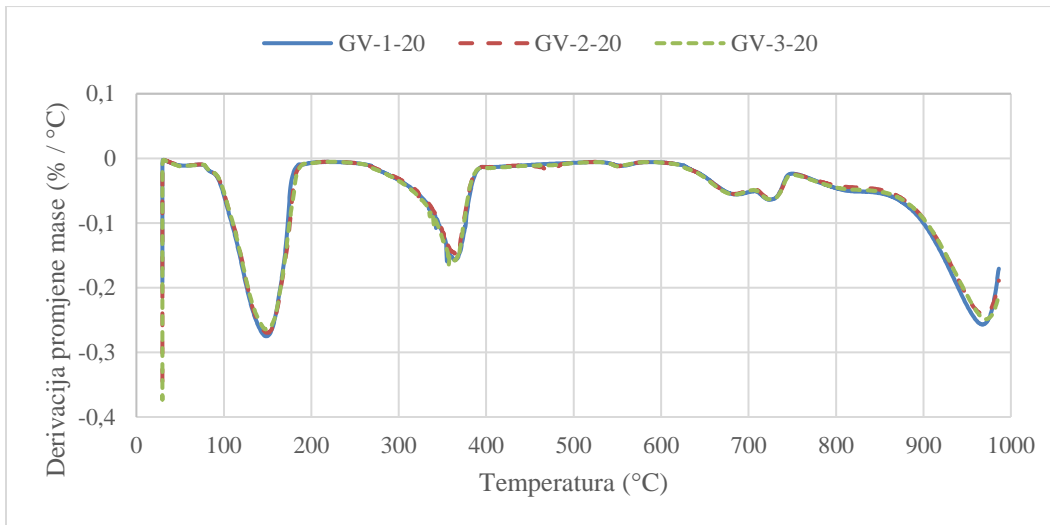


Slika 20. Derivacija promjene mase uzoraka GV pri brzini od 10 °C/min

Slike 21 i 22 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka gips-vlaknaste ploče (označenih kao GV-1-20, GV-2-20 i GV-3-20) pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min. Vidljivo je da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase slični za sva tri uzorka GV. Temperatura se ravnomjerno smanjuje sve dok ne dosegne oko 100 °C. Promjena mase, odnosno smanjenje gustoće na oko 100 °C nastaje zbog isparavanja vode. Značajnija promjena mase zbog dvije endotermne reakcije dehidracije događa se u temperaturnom rasponu 100 – 180 °C dostižući gubitak mase od oko 16 %. Nadalje, smanjenje mase za oko 9 % događa se pri temperaturi od oko 380 °C. Razlog tome je vjerojatno razgradnja dodatnih vlakana koje gips-vlaknaste ploče sadrže. Smanjenje mase za cca 30 % događa se nakon 650 °C zbog razgradnje nečistoća gipsa. Kao što se vidi na slici gubitak mase ovih gipsanih ploča veći je od 50 %.

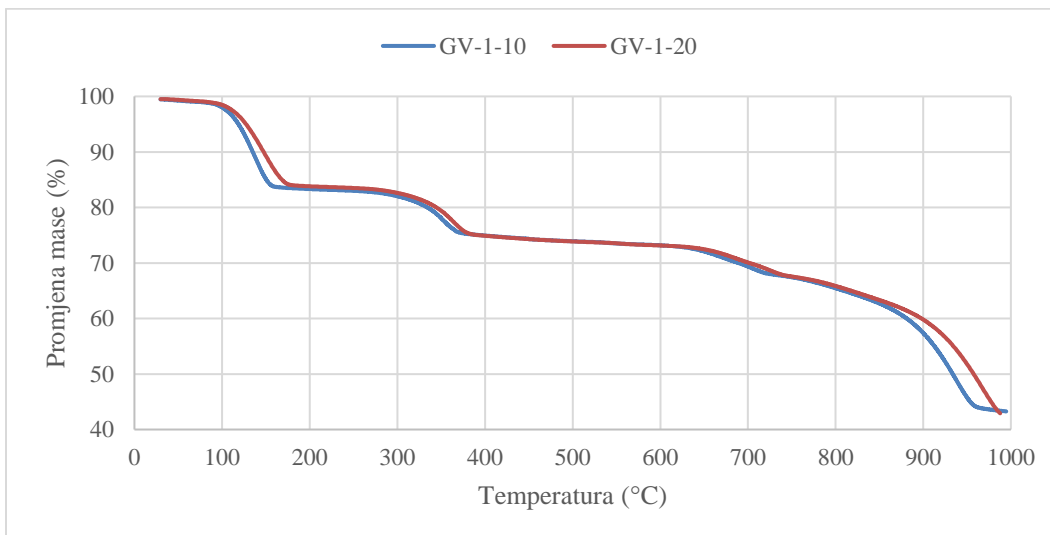


Slika 21. Promjena mase uzorka GV pri brzini od 20 °C/min

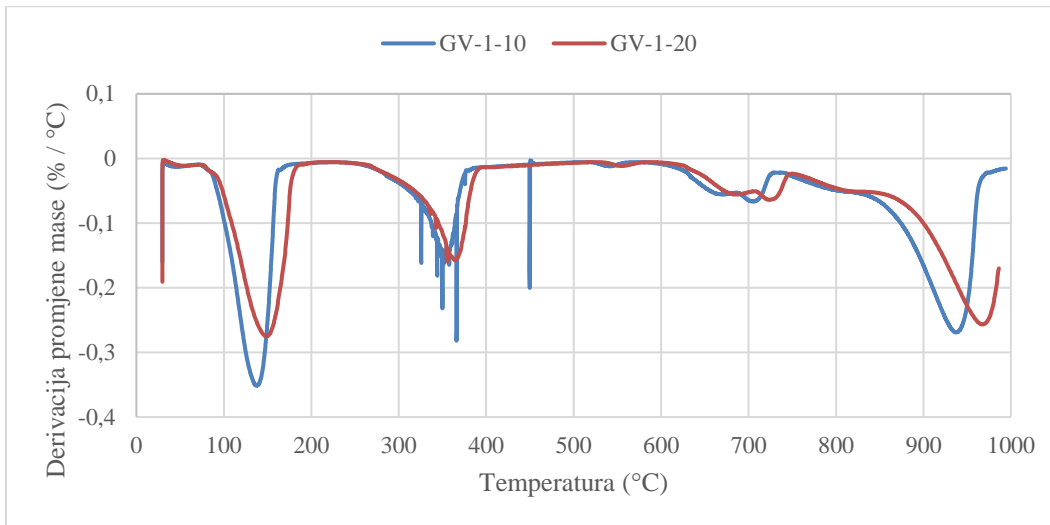


Slika 22. Derivacija promjene mase uzoraka GV pri brzini od 20 °C/min

Slike 23 i 24 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase dva izabrana uzorka gips-vlaknaste ploče (označenih kao GV-1-10 i GV-1-20) pri brzinama zagrijavanja od 10 i 20 °C/min. Kao što je vidljivo iz slika izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase pokazuju slične karakteristike unatoč različitim brzinama zagrijavanja. Međutim, u temperaturnim rasponima prilikom kojih se događaju određene promjene vidljive su razlike u temperaturama. Tako su temperature više kada je brzina zagrijavanja veća.



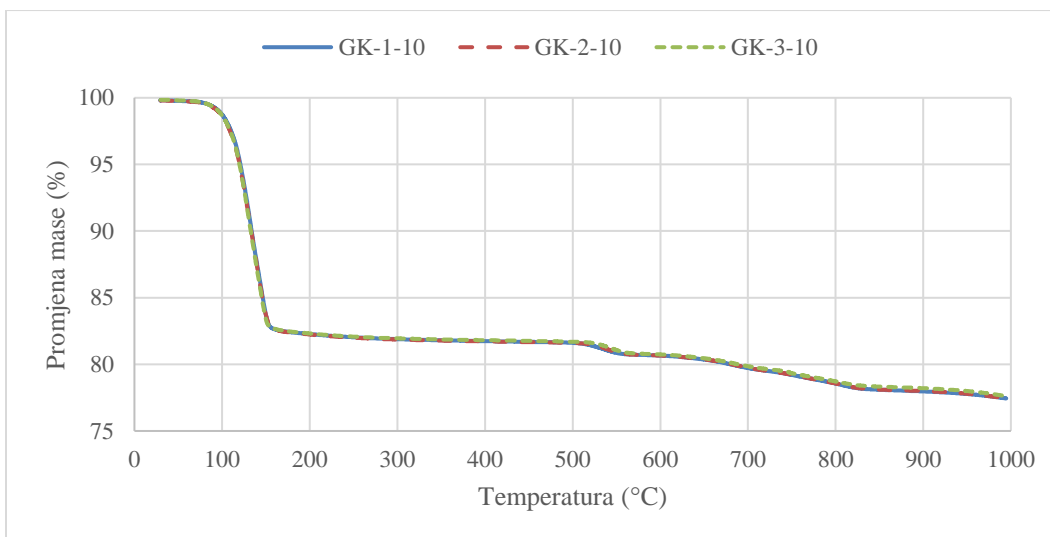
Slika 23. Usporedba promjene mase uzoraka GV pri brzini od 10 i 20 °C/min



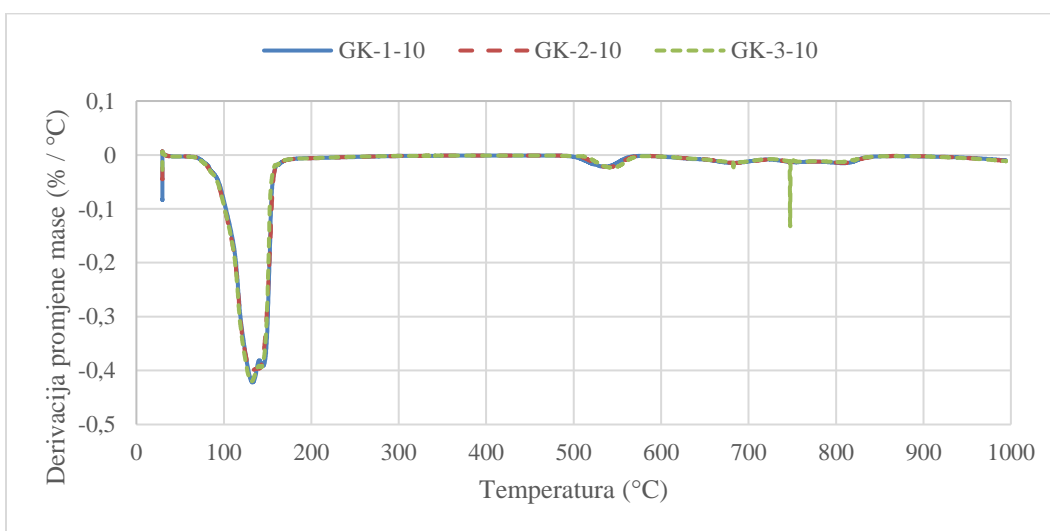
Slika 24. Usporedba derivacije promjene mase uzoraka GV pri brzini od 10 i 20 °C/min

3.1.5.3 Gips-kartonska ploča

Slike 25 i 26 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka gips-kartonske ploče (označenih kao GK-1-10, GK-2-10 i GK-3-10) pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min. Vidljivo je da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase gotovo identični za sva tri uzorka GK. Značajnija promjena mase zbog dvije endotermne reakcije dehidracije događa se u temperaturnom rasponu 100 – 150 °C dostižući gubitak mase od oko 17 %. Daljnja promjena mase zbog razgradnje nečistoća gipsa događa se tijekom temperaturnog raspona od 520 – 1000 °C dosežući vrijednost gubitka mase od oko 22 %. Gubitak mase ovih gipsanih ploča je mali stoga će učinci pucanja i skupljanja biti minimalizirani iznad 520 °C.



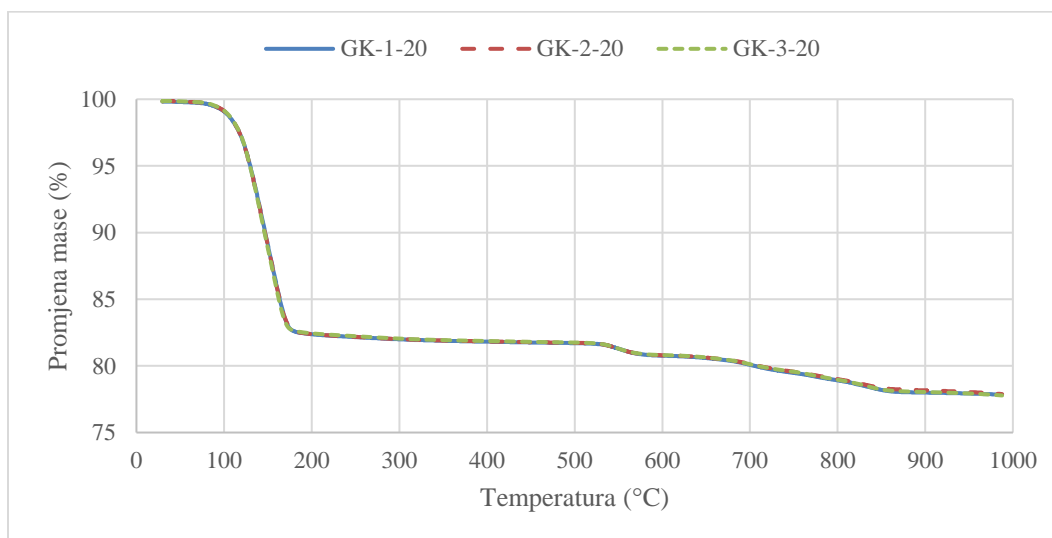
Slika 25. Promjena mase uzoraka GK pri brzini od 10 °C/min



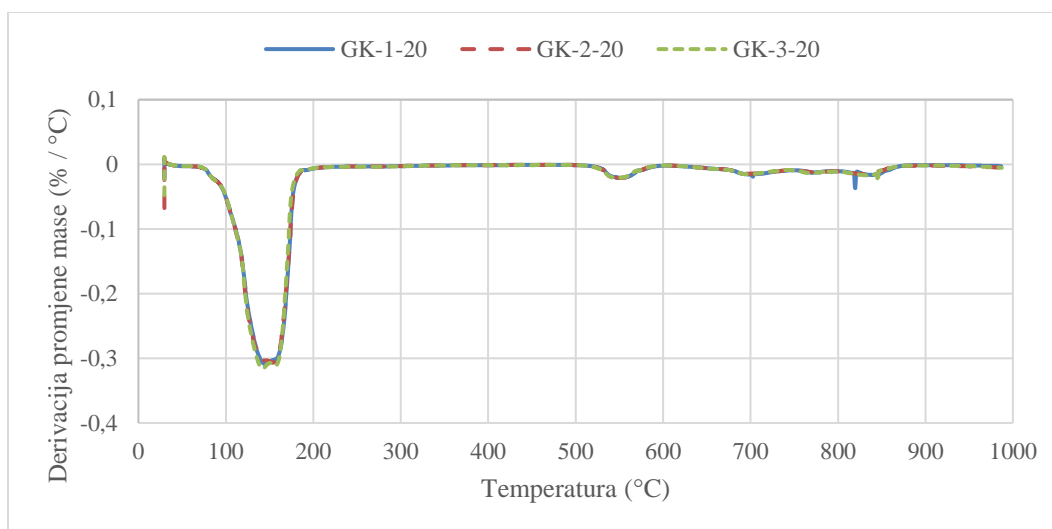
Slika 26. Derivacija promjene mase uzoraka GK pri brzini od 10 °C/min

Slike 27 i 28 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka gips-kartonske ploče (označene kao GK-1-20, GK-2-20 i GK-3-20) pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min. Vidljivo je, kao i pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min, da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase gotovo identični za sva tri uzorka. Značajnija promjena mase zbog dvije endotermne reakcije dehidracije događa se u temperaturnom rasponu 100 – 180 °C dostižući gubitak mase od oko 17

% Daljnji gubitak mase zbog razgradnje nečistoća gipsa dogodio se tijekom temperaturnog raspona od otprilike 530 – 1000 °C dosežući vrijednost od oko 22 %.



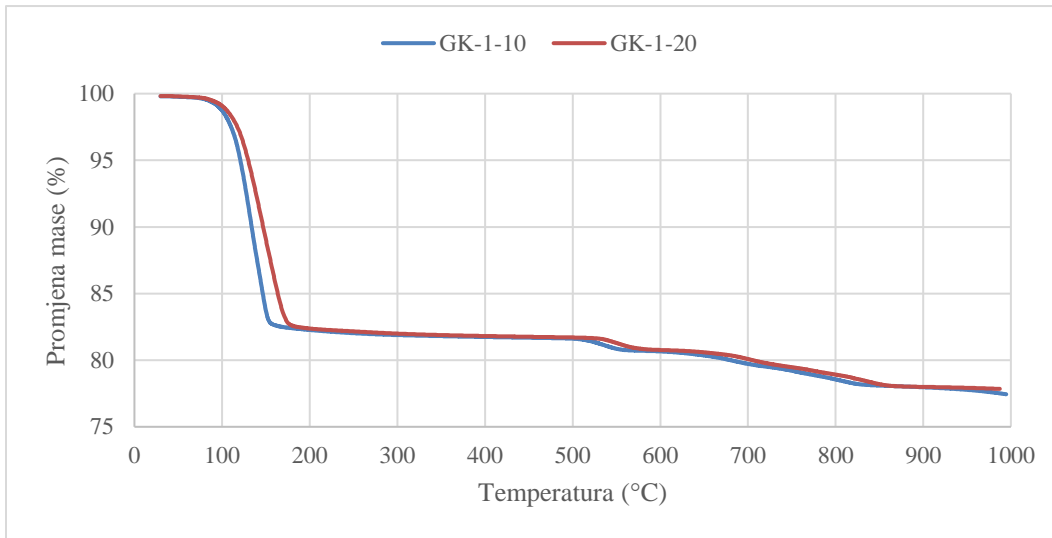
Slika 27. Promjena mase uzoraka GK pri brzini od 20 °C/min



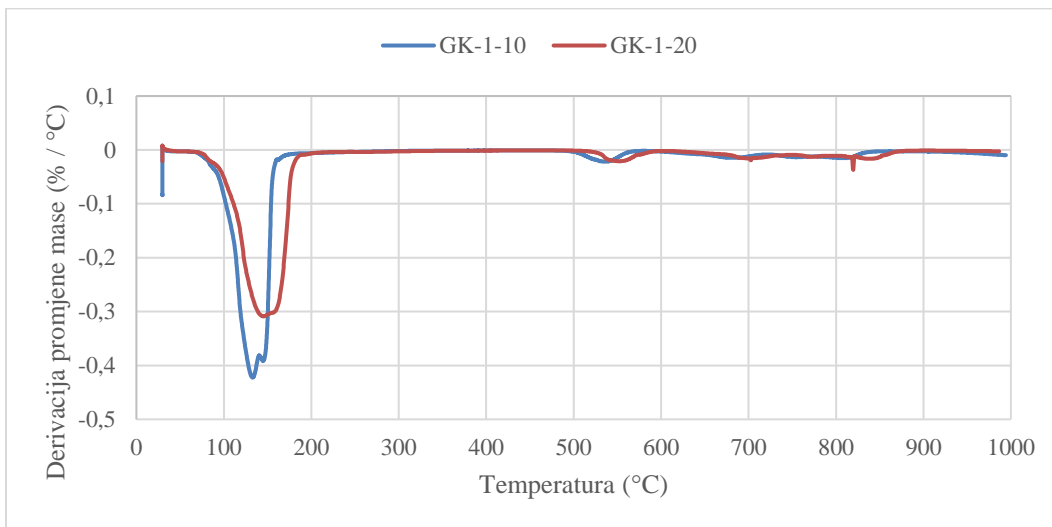
Slika 28. Derivacija promjene mase uzoraka GK pri brzini od 20 °C/min

Slike 29 i 30 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase dva izabrana uzorka gips-kartonskih ploča (označenih kao GK-1-10 i GK-1-20) pri brzinama zagrijavanja od 10 i 20 °C/min. Kao što je vidljivo iz slika izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase pokazuju

slične karakteristike unatoč različitim brzinama zagrijavanja. Međutim, u temperaturnim rasponima prilikom kojih se događaju reakcije dehidracije gipsa (100 – 200 °C) te razgradnja nečistoća gipsa (nakon 500 °C) vidljive su razlike u temperaturama. Tako su temperature pri reakcijama dehidracije i razgradnje gipsa više kada je brzina zagrijavanja veća.



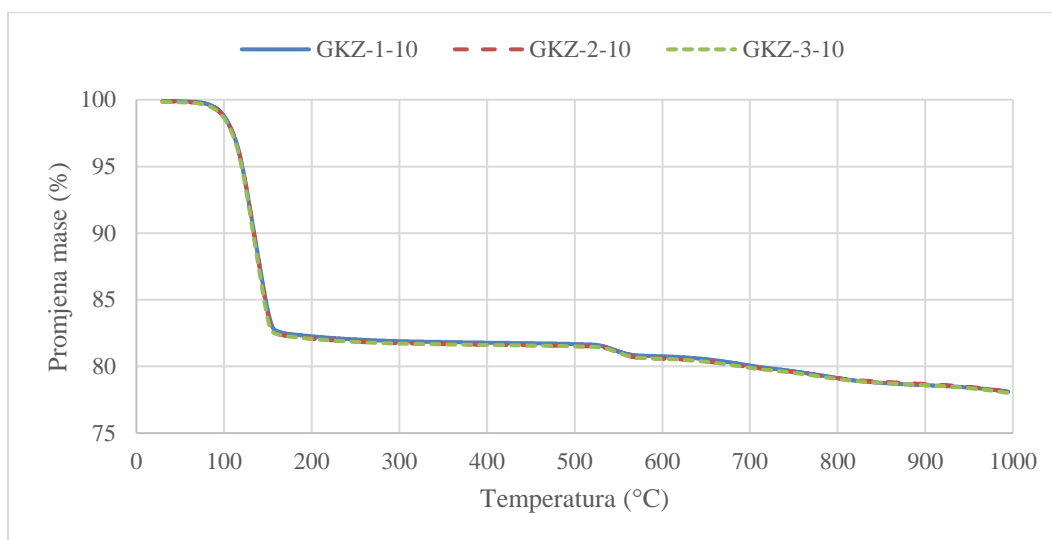
Slika 29. Usporedba gubitka mase uzoraka GK pri brzini od 10 i 20 °C/min



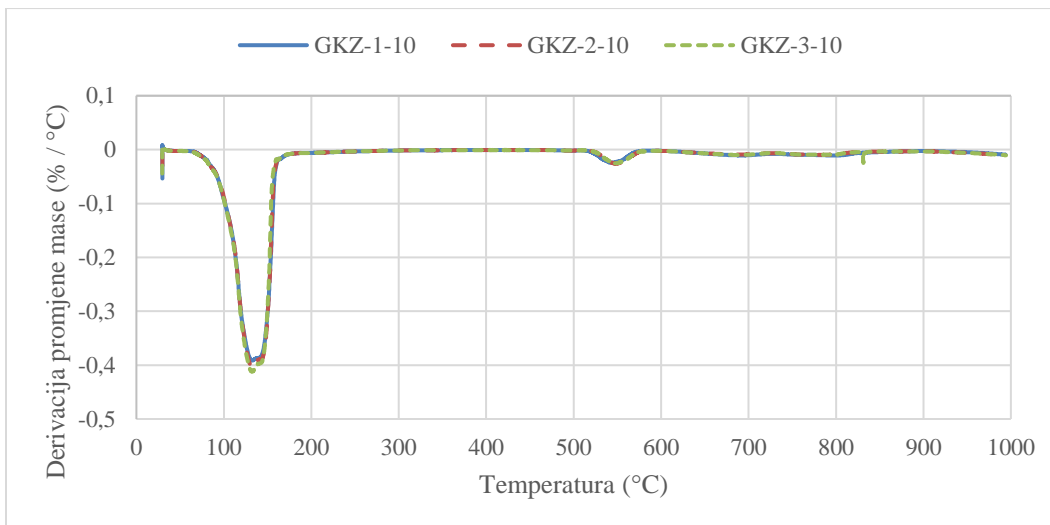
Slika 30. Usporedba derivacije mase uzoraka GK pri brzini od 10 i 20 °C/min

3.1.5.4 Gips-kartonska ploča za vlažne prostorije

Slike 31 i 32 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka gips-kartonske ploče za vlažne prostorije (označenih kao GKZ-1-10, GKZ-2-10 i GKZ-3-10) pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min. Vidljivo je da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase gotovo identični za sva tri uzorka GKZ. Značajnija promjena mase zbog dvije endotermne reakcije dehidracije događa se u temperaturnom rasponu 100 – 155 °C dostižući gubitak mase od oko 18 %. Daljnji gubitak mase zbog razgradnje nečistoća gipsa događa se nakon 550 °C dosežući vrijednost od oko 22 %. Gubitak mase ovih gipsanih ploča je mali stoga će učinci pucanja i skupljanja biti minimalizirani iznad 550 °C.

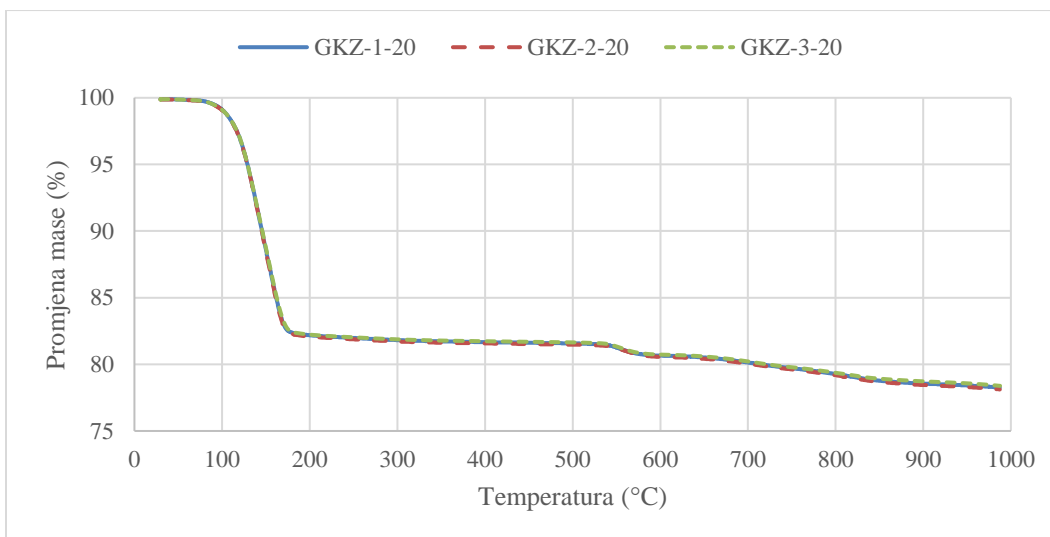


Slika 31. Promjena mase uzoraka GKZ pri brzini od 10 °C/min

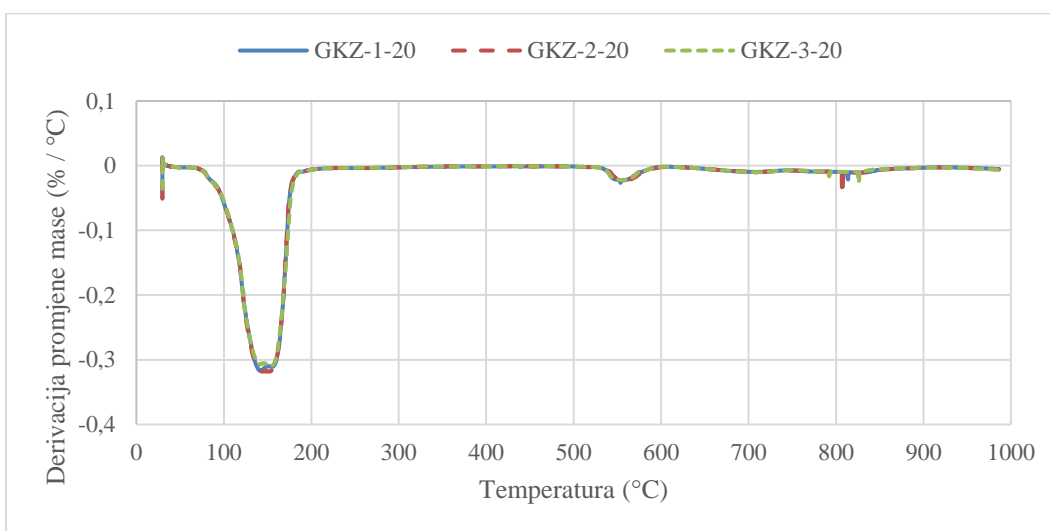


Slika 32. Derivacija promjene mase uzoraka GKZ pri brzini od 10 °C/min

Slike 33 i 34 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase tri uzorka gips-kartonske ploče za vlažne prostorije (označene kao GKZ-1-20, GKZ-2-20 i GKZ-3-20) pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min. Vidljivo je, kao i pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min, da su izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase gotovo identični za sva tri uzorka. Značajnija promjena mase zbog dvije endotermne reakcije dehidracije događa se u temperaturnom rasponu 100 – 190 °C dostižući gubitak mase od oko 18 %. Daljnji gubitak mase zbog razgradnje nečistoća gipsa dogodio se nakon 550 °C dosežući vrijednost od oko 22 %.



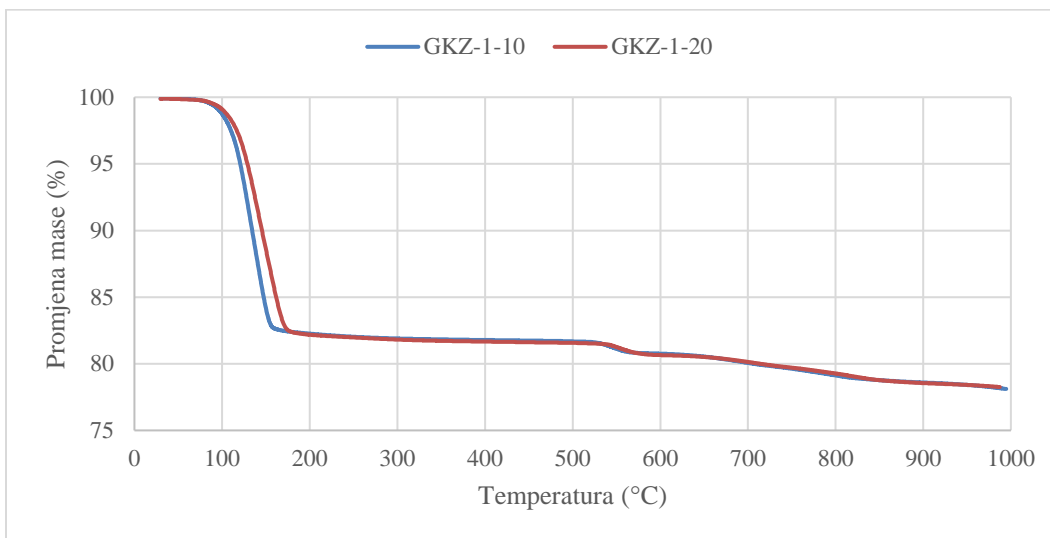
Slika 33. Promjena mase uzoraka GKZ pri brzini od 20 °C/min



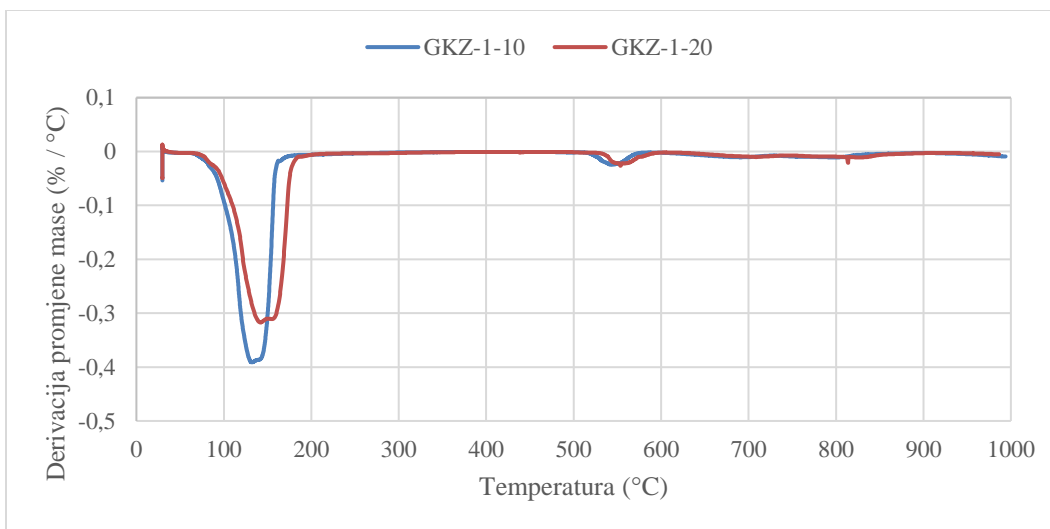
Slika 34. Derivacija promjene mase uzoraka GKZ pri brzini od 20 °C/min

Slike 35 i 36 prikazuju promjenu mase i derivaciju promjene mase dva izabrana uzorka gips-kartonskih ploča za vlažne prostorije (označenih kao GKZ-1-10 i GKZ-1-20) pri brzinama zagrijavanja od 10 i 20 °C/min. Kao što je vidljivo iz slika izmjerena promjena mase i derivacija promjene mase pokazuju slične karakteristike unatoč različitim brzinama zagrijavanja. Međutim, u temperaturnim rasponima prilikom kojih se događaju reakcije dehidracije gipsa (100 – 200 °C)

te razgradnja nečistoća gipsa (nakon 500 °C) vidljive su razlike u temperaturama. Tako su temperature pri reakcijama dehidracije i razgradnje gipsa više kada je brzina zagrijavanja veća.



Slika 35. Usporedba gubitka mase GKZ pri brzini od 10 i 20 °C/min

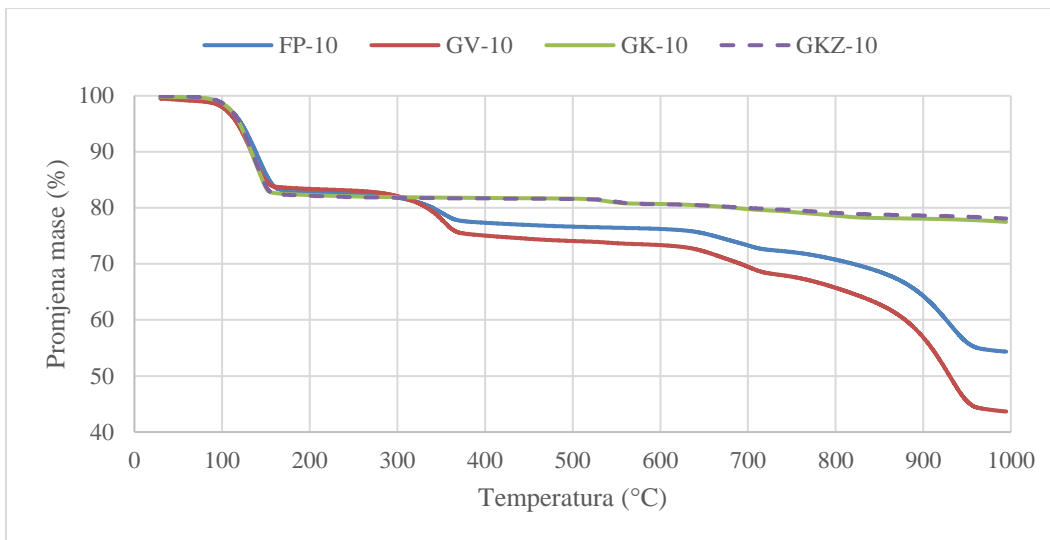


Slika 36. Usporedba derivacije mase GKZ pri brzini od 10 i 20 °C/min

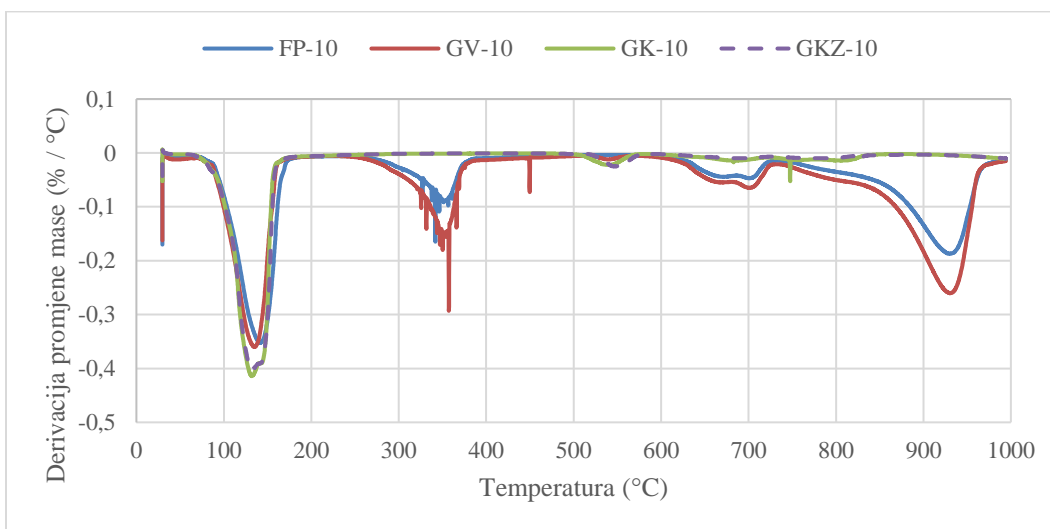
3.1.5.5 Zajednička usporedba rezultata gipsanih ploča

Naredni dijagrami prikazuju promjenu mase (slika 37) i derivaciju promjene mase (slika 38) u ovisnosti o temperaturi različitih uzoraka gipsanih ploča pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min. Za zajedničku analizu rezultata gipsanih ploča pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min odabrane su srednje vrijednosti ispitanih uzoraka FP, GV, GK i GKZ. Iz dijagrama promjene mase vidljivo je da je gubitak mase gips-kartonskih ploča, GK i GKZ, identičan. S obzirom na to da se krivulja promjene mase sastoji od slabije razlučenih koraka pa razlike nisu vidljive prikazan je i dijagram derivacije promjene mase kako bi se uočile razlike u promjeni mase različitih uzoraka pri određenim temperaturama. Na dijagramu derivacije promjene mase vidljiva je mala razlika u gubitku mase na temperaturi između 100 i 150 °C što odgovara vremenima dvije reakcije dehidracije gipsa što se slaže s podacima iz literature. Također, razlika je vidljiva na temperaturi od oko 550 °C što odgovara razgradnji nečistoća gipsa. Ukupni gubitak mase kod oba uzorka gips-kartonskih ploča iznosi nešto više od 20 %. Vidljivo je iz dijagrama da je taj postotak puno veći kod uzoraka gips-vlaknastih ploča, FP i GV. Gubitak mase uzorka FP iznosi oko 45 %, a GV više od 55 %. Uzorak FP izgubi oko 24 % više mase od uzoraka GK i GKZ, dok uzorak GV izgubi otprilike još 10 % više od FP.

Analizom promjene mase različitih uzoraka gipsanih ploča pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min može se zaključiti da se gips-vlaknaste ploče bolje ponašaju pri visokim temperaturama od gips-kartonskih ploča zbog većeg gubitka mase koji je povezan s njihovom funkcijom smanjenja prijenosa topline u nekom sustavu.



Slika 37. Promjena mase gipsanih ploča pri brzini od 10 °C/min

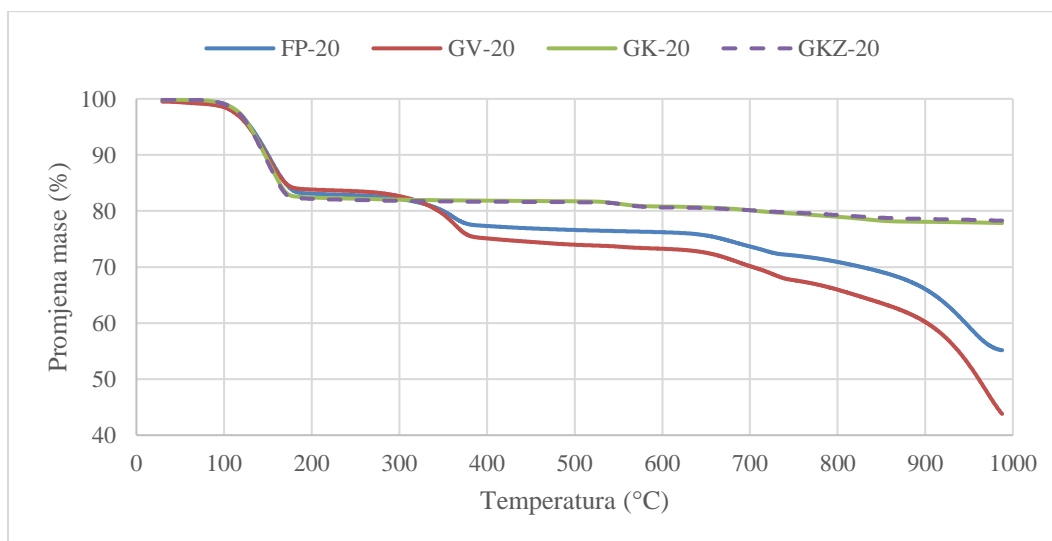


Slika 38. Derivacija promjene mase gipsanih ploča pri brzini od 10 °C/min

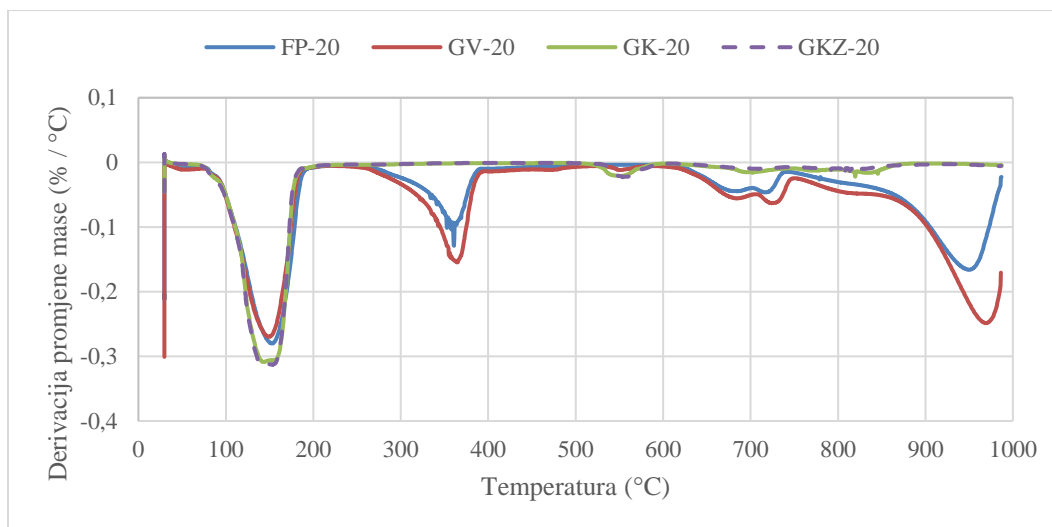
Naredni dijagrami prikazuju promjenu mase (slika 39) i derivaciju promjene mase (slika 40) u ovisnosti o temperaturi različitih uzoraka gipsanih ploča pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min. Za zajedničku analizu rezultata gipsanih ploča pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min korištene su srednje vrijednosti uzoraka FP, GV, GK i GKZ. Iz dijagrama promjene mase vidljivo je da je gubitak mase gips-kartonskih ploča, GK i GKZ, identičan. S obzirom na to da se krivulja promjene mase sastoji od slabije razlučenih koraka pa razlike nisu vidljive prikazan je i dijagram derivacije

promjene mase kako bi se uočile razlike u promjeni mase različitih uzoraka gipsanih ploča pri određenim temperaturama. Na dijagramu derivacije promjene mase vidljiva je mala razlika u promjeni mase na temperaturi između 100 i 150 °C što odgovara vremenima dvije reakcije dehidracije gipsa što se slaže s podacima iz literature. Također, razlika je vidljiva na temperaturi od oko 550 °C što odgovara razgradnji nečistoća gipsa. Ukupni gubitak mase kod oba uzorka gips-kartonskih ploča, GK i GKZ, iznosi nešto više od 20 %. Vidljivo je iz dijagrama da je taj postotak puno veći kod uzoraka FP i GV. Gubitak mase uzorka FP iznosi oko 45 %, a GV više od 55 %.

Analizom gubitka mase gipsanih ploča može se zaključiti da se gips-vlaknaste ploče bolje ponašaju pri visokim temperaturama od gips-kartonskih ploča zbog većeg gubitka mase koji je povezan uz njihovu funkciju smanjenja prijenosa topline u nekom sustavu.



Slika 39. Promjena mase gipsanih ploča pri brzini od 20 °C/min



Slika 40. Derivacija promjene mase gipsanih ploča pri brzini od 20 °C/min

3.1.6 Zaključak

Prvi dio eksperimentalnog rada predstavio je detalje eksperimentalnog istraživanja promjene mase različitih gipsanih ploča korištenjem termogravimetrijske (TG) analize. Za potrebe istraživanja korišteni su ispitni uzorci gips-vlknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama, obične gips-vlknaste ploče, gips-kartonske ploče i gips-kartonske ploče za vlažne prostorije. Ispitivanje gipsanih ploča provedeno je kako bi se odredio njihov gubitak mase pri visokim požarnim temperaturama. Rezultati pokazuju da je gubitak mase gotovo jednak kod svih ispitanih gipsanih ploča do temperature od 300 °C, a nakon te temperature veći gubitak mase pokazuju gips-vlknaste ploče. Prema istraživanjima literature poznato je da je gubitak mase povezan s endotermnim kemijskim reakcijama, odnosno pri toplinski induciranim kemijskim reakcijama jezgre gipsanih ploča, jezgra gubi dio svoje mase. Iz toga možemo zaključiti da gips-vlknaste ploče pružaju bolju zaštitu na visokim temperaturama. Gips-vlknasta ploča ima najveći gubitak mase, veći i od gips-vlknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama. Pretpostavlja se da je razlog tome dodatna razgradnja organskih sastojaka koji se nalaze u gips-vlknastoj ploči. Iz tablice 5 vidljivo je da je gips-vlknasta ploča razreda reakcije na požar A2 što znači da, za razliku od gips-vlknaste ploče s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama koja je razreda reakcije na požar A1, ima u sebi organske sastojke.

Ovim ispitivanjem ispitano je samo jedno toplinsko svojstvo, ali s obzirom da se podaci eksperimentalnog istraživanja gubitka mase poklapaju s onima iz literature pretpostavlja se da bi se podaci poklapali i kod ostala dva toplinska svojstva, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske vodljivosti.

Ovo istraživanje pružilo je korisne informacije o gubitku mase različitih vrsta gipsanih ploča pri visokim požarnim temperaturama što će eliminirati poteškoće pri odabiru materijala za uporabu u požarnim uvjetima.

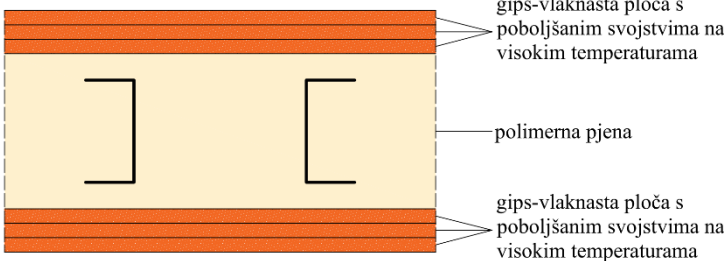
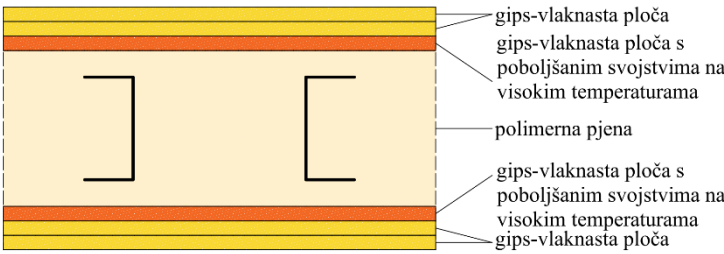
3.2 Otpornost na požar panela

Cilj određivanja otpornosti na požar je procijeniti ponašanje uzorka elementa građevinske konstrukcije kada je izložen definiranim uvjetima zagrijavanja i tlaka. Ova metoda omogućuje kvantificiranje sposobnosti elementa da izdrži izloženost visokim temperaturama tako što se postavljaju kriteriji prema kojima se, među ostalim karakteristikama, mogu procijeniti nosivost, cjelovitost i izolacija [24].

Reprezentativni uzorak elementa izlaže se određenom režimu zagrijavanja, a ponašanje ispitnog uzorka prati se na temelju kriterija opisanih u normi [24]. Otpornost na požar ispitnog elementa izražava se kao vrijeme za koje su zadovoljeni odgovarajući kriteriji. Tako dobivena vremena su mjera primjerenosti konstrukcije u požaru, ali nemaju izravnu vezu s vremenom trajanja pravog požara [24].

3.2.1 Korišteni ispitni uzorci

Tablica 7. Osnovne informacije o ispitnim uzorcima

Naziv uzorka	Sastav uzorka	Naneseno opterećenje tijekom ispitivanja
PANEL 1	 <p>gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama</p> <p>polimerna pjena</p> <p>gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama</p>	37,5 kN/m' (ukupna sila)
PANEL 2	 <p>gips-vlaknasta ploča</p> <p>gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama</p> <p>polimerna pjena</p> <p>gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama</p> <p>gips-vlaknasta ploča</p>	37,5 kN/m' (ukupna sila)

Dva uzorka laganih kompozitnih panela za ispitivanje otpornosti na požar, naziva PANEL 1 i PANEL 2 (tablica 7), pripremljena su korištenjem dvije različite vrste gips-vlaknastih ploča. Ispitni uzorci su širine 1550 mm, visine 3000 mm i debljine 210 mm. Oba ispitna uzorka sastavljena su od čeličnih „C“ profila koji su obostrano obloženi gips-vlaknastim pločama debljine 12,5 mm u tri sloja. Šupljina između obložnih ploča ispunjena je polimernom pjenom gustoće 25,6 kg/m³. Korištene su dvije različite vrste gips-vlaknastih ploča: Firepanel A1 ploča i gips-vlaknasta ploča gustoće 1150 kg/m³, tipa Fermacell -1. Ispitni uzorak PANEL 1 sastoji se od nosive čelične konstrukcije obostrano obložene s tri sloja Firepanel A1 ploča, a ispitni uzorak PANEL 2 obostrano je obložen jednim slojem Firepanel A1 ploče na koji su postavljena dva sloja gips-vlaknaste ploče [25], [26].

Prije ispitivanja provedena je kontrola ispitnog uzorka kako bi se vidjelo je li uzorak u skladu s tehničkim specifikacijama te je zaključeno da ispitni uzorak odgovara specifikacijama u tehničkoj dokumentaciji i da je djelomično u skladu s normom HRN EN 1365-1 [25], [26].

Pripremljeni ispitni uzorak ugrađen je u okvir ispitne požarne peći koji je prilagođen ispitivanju nosivih građevinskih elemenata te je učvršćen samo u donjem horizontalnom dijelu. Prostor između vertikalnih krajeva ispitnog uzorka i okvira ispitne peći ispunjen je keramičkom vunom te predstavlja slobodne krajeve uzorka [25], [26].

Tako ugrađeni uzorak prije ispitivanja kondicioniran je u laboratoriju gdje su uvjeti okoline iznosili približno 50 % relativne vlažnosti i temperature 20 °C što je u skladu s normom HRN EN 1363-1 [25], [26]. Svrha kondicioniranja uzorka je to da u vrijeme ispitivanja, čvrstoća i sadržaj vlage ispitnog uzorka moraju biti približni onima koji se očekuju u uobičajenoj primjeni [24].

3.2.2 Postupak ispitivanja

Ispitivanje otpornosti na požar uzoraka laganih kompozitnih panela provedeno je djelomično u skladu s normama:

- HRN EN 1363-1:2020 Ispitivanje otpornosti na požar – 1.dio: Opći zahtjevi (EN 1363-1:2020) [24],
- HRN EN 1365-1:2012 + Ispr.1:2013 Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata - 1. dio: Zidovi (EN 1365-1:2012/AC:2013) [27] i
- HRN EN 1365-1:2012 Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata – 1. dio: Zidovi (EN 1365-1:2012) [27].

Ispitivanje je provedeno u laboratorijskim uvjetima. Ispitni uzorak PANEL 1 ispitivan je na otpornost na požar pri temperaturi okoline od 24,5 °C i relativnoj vlažnosti zraka 52,1 % [25], a uzorak PANEL 2 ispitivan je pri temperaturi okoline od 22,3°C i relativnoj vlažnosti zraka 53,8 % [26].

Oprema korištena za provođenje ispitivanja sastoji se od: ispitne požarne peći (slika 41), opreme za kontrolu temperature i tlaka unutar peći, okvira, uređaja za opterećenje ispitnog uzorka, opreme za mjerenje temperature u peći, na neizloženoj strani uzorka te gdje je potrebno unutar ispitnog uzorka, opreme za mjerenje deformacija, opreme za procjenu cjelovitosti i za utvrđivanje sukladnosti s kriterijima nosivosti i izolacije te opreme za mjerenje koncentracije kisika u plinovima iz peći.



Slika 41. Ispitna požarna peć

Za provođenje ispitivanja, mjerna oprema morala je zadovoljiti sljedeće razine preciznosti:

- a. mjerenje temperature:
 - 1) peć: ± 15 K
 - 2) okolina i neizložena strana: ± 4 K
 - 3) ostalo: ± 10 K
- b. mjerenje tlaka: $\pm 2,0$ Pa
- c. razina opterećenja: $\pm 2,5$ % ispitnog opterećenja
- d. mjerenje aksijalne kontrakcije/ekspanzije: $\pm 0,5$ mm
- e. ostala mjerenja deformacija: ± 2 mm

Ispitna požarna peć projektirana je za korištenje tekućih ili plinovitih goriva i mora biti sposobna za zagrijavanje vertikalnih ili horizontalnih pregradnih elemenata na jednoj strani. Obloge peći moraju se sastojati od materijala gustoće manje od 1000 kg/m^3 . Takvi materijali za oblaganje moraju imati minimalnu debljinu od 50 mm i sačinjavati najmanje 70 % unutarnje izložene površine peći. Ispitna požarna peć pruža standardne uvjete izloženosti požaru s obzirom

na toplinsku izloženost i tlak. Požar u požarnom prostoru peći ostvaren je pomoću šest plamenika na tekuće gorivo (lož ulje), u skladu sa normom HRN EN 1363-1. Temperatura zraka u ispitnom prostoru održavana je na temperaturi 20 ± 5 °C 24 sata prije ispitivanja otpornosti na požar. Zagrijavanje u peći određeno je po standardnoj temperaturnoj krivulji, u skladu s normom HRN EN 1363-1, a definirana je prema sljedećoj formuli:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20,$$

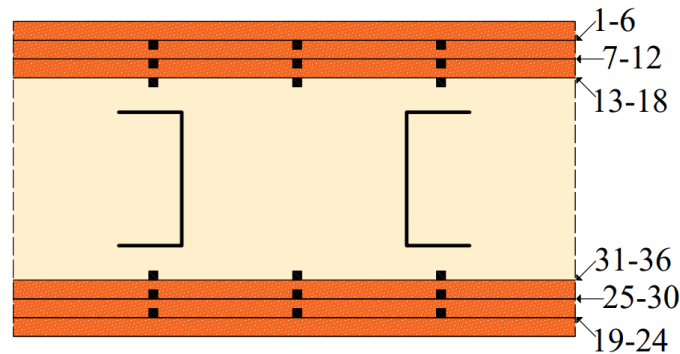
gdje je T prosječna temperatura u peći u °C, a t vrijeme u minutama.

Za mjerenje temperature u peći kod oba ispitivanja korišteni su termočlanci tipa K. Oni su ravnomjerno raspoređeni na šest mjesta kako je prikazano na slici 29. Postavljeni su tako da ne budu u kontaktu s otvorenim plamenom iz plamenika i udaljeni su 100 mm od požarom izložene strane uzorka. Tlak u peći mora se mjeriti pomoću senzora (mjerača tlaka) te oprema za mjerenje i bilježenje mora biti sposobna raditi unutar granice od $\pm 2,0$ Pa. Statički pretlak ispitne peći održavan je u rasponu od 15 ± 2 Pa.

Termočlanci tipa K korišteni su za mjerenje temperature oba ispitna uzorka. Temperatura na požaru neizloženoj strani uzorka mjerena je sa četrnaest termočlanaka. Dodatni termočlanci postavljeni su za mjerenje temperature unutar konstrukcije uzorka.

Raspored i oznake termočlanaka jednaki su za oba ispitna uzorka. Na svakoj strani nalazi se po osamnaest termočlanaka koji mjere porast temperature u pojedinom sloju obloge. Na izloženoj strani termočlanci 1-6 mjere porast temperature između prvog i drugog sloja ploča, termočlanci 7-12 između drugog i trećeg sloja ploča, a termočlanci 13-18 iza trećeg sloja ploča. Na neizloženoj strani termočlanci 19-24 mjere porast temperature između prvog i drugog sloja ploča, termočlanci 25-30 između drugog i trećeg sloja ploča, a termočlanci 31-36 iza trećeg sloja ploča. Skica mjernih mjesta temperature u slojevima obloge panela prikazana je na slici 42. Na slici je prikazan PANEL 1, no raspored je isti i za PANEL 2.

IZLOŽENA STRANA



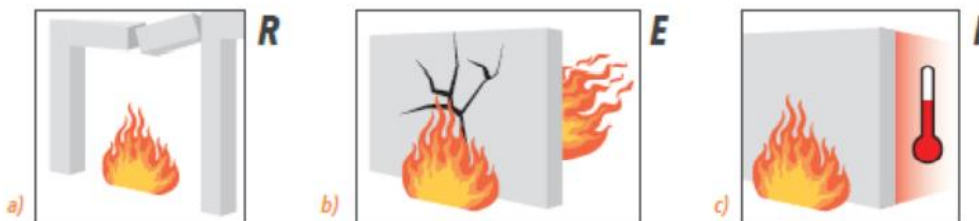
Slika 42. Skica mjernih mjesta temperature u slojevima obloge panela

Za nosive elemente, ispitno opterećenje primjenjuje se najmanje 15 minuta prije početka ispitivanja i takvom brzinom da ne nastaju nikakvi dinamički učinci. Mjere se sve nastale deformacije. Opterećenje se primjenjuje konstantno prije i tijekom ispitivanja, a kada se ispitni uzorak deformira, hidraulički sustav koji primjenjuje opterećenje reagira te održava konstantnu vrijednost. Oba ispitna uzorka su opterećena s kontinuiranim opterećenjem u iznosu od 25 kN/m', što odgovara ukupnom primijenjenom kontinuiranom opterećenju na uzorak u iznosu od 37,5 kN. Uzorak je postupno opterećen prije početka ispitivanja. Potrebno opterećenje od 37,5 kN postignuto je 20 minuta prije početka te je održavano cijelim tokom ispitivanja do postizanja vertikalnog progiba uzorka 3-4 mm.

Deformacije i temperature ispitnih uzoraka bilježene su u intervalu od 1 min korištenjem sustava za prikupljanje podataka. Ispitivanja su odmah zaustavljena kada je bilo koji od sljedećih kriterija određivanja otpornosti na požar (slika 43) ispunjen:

- a) *Kriterij nosivosti (R)*: vrijeme u punim minutama tijekom kojeg ispitni uzorak nastavlja održavati sposobnost podnošenja ispitnog opterećenja tijekom ispitivanja;
- b) *Kriterij cjelovitosti (E)*: vrijeme u punim minutama tijekom kojeg ispitni uzorak nastavlja održavati svoju funkciju odvajanja tijekom ispitivanja bez paljenja pamučnog jastučića, probijanja mjerača razmaka ili nastanka stalnog plamena;

- c) *Kriterij izolacije (I)*: vrijeme u punim minutama tijekom kojeg ispitni uzorak nastavlja održavati svoju funkciju odvajanja tijekom ispitivanja bez razvijanja visokih temperatura na svojoj neizloženoj strani.



Slika 43. Kriteriji otpornosti na požar [28]

Ispitivanje može biti prekinuto radi sigurnosti osoblja ili mogućeg oštećenje ispitne opreme, dobitka traženih podataka ili zahtjeva investitora. Kada je ispitivanje prekinuto prije loma, ali sa svim ispunjenim kriterijima ispitivanja, razlog istog se mora navesti. Rezultat istraživanja se u tome slučaju bilježi kao vrijeme prestanka ispitivanja.

3.2.3 Opažanja tijekom ispitivanja

Uzorak PANEL 1 bio je izložen požarnom ispitivanju 125 minuta i 22 sekunde. Do 107. minute održavano je opterećenje od 37,5 kN. Ispitivanje je dalje nastavljeno održavanjem standardne krivulje požara bez održavanja početne sile do 108. minute kada su ugašeni plamenici peći. Nakon toga nastavljeno je mjerenje temperature do prekida ispitivanja u 126. minuti. Prilikom ispitivanja bilježene su promjene na uzorcima koje su prikazane u tablici 8.

Tablica 8. Opažanja tijekom požarnog ispitivanja uzorka PANEL 1 [25]

Vrijeme (min:s)	Strana*	Opažanje
00:00		Početak ispitivanja.
04:20	PI	Potamnili spojevi te površina uzorka. Izlazi ekspandirajući materijal na spojevima ploča (premaz na spojevima ploča).
14:50	PI	Površina ploča ponovo potpuno pobijelila.
28:20	PI	Blaga deformacija površina ploča prema peći. Uslijed deformacija dolazi do pucanja i raslojavanja na sredini uzorka, horizontalnom spoju ploča.
39:10	PI	Povećavaju se zazori na spojevima ploča prvog sloja.
40:20	PI	Odvajaju se ploče prvog sloja i povremeni plamenovi kroz pukotine.
58:20	PI	Mjestimično otpada prvi sloj ploča – počinje tamniti unutarnji sloj ploča na tom dijelu.
83:20	PI	Izlazi plamen iz spojeva i pukotina na pločama drugog sloja ploča.
90:10	PI	Otvara se te djelomično otpada drugi sloj ploča, kroz pukotine izlaze plamenovi. Gori ispuna od polimerne pjene.
106:10	PN	Prekid opterećenja na uzorku.
107:10	PI	Plamenici u peći su ugašeni. Nastavak mjerenja temperatura.
125:22		Prekid mjerenja temperatura. Prekid ispitivanja.

* PI – požaru izložena strana; PN – požaru neizložena strana

Slike 44 i 45 prikazuju PANEL 1 prije i nakon ispitivanja otpornosti na požar.



Slika 44. PANEL 1 prije ispitivanja otpornosti na požar



Slika 45. PANEL 1 nakon ispitivanja otpornosti na požar

Uzorak *PANEL 2* bio je izložen požarnom ispitivanju 115 minuta i 20 sekundi. Do 96. minute održavano je opterećenje od 37,5 kN. Ispitivanje je dalje nastavljeno održavanjem standardne krivulje požara bez održavanja početne sile do 98. minute kada su ugašeni plamenici peći. Nakon toga nastavljeno je mjerenje temperature do prekida ispitivanja u 116. minuti. Prilikom ispitivanja bilježene su promjene na uzorku koje su prikazane u tablici 9.

Tablica 9. Opažanja tijekom požarnog ispitivanja uzorka *PANEL 2* [26]

Vrijeme (min:s)	Strana*	Opažanje
00:00		Početak ispitivanja.
03:40	PI	Potamnili spojevi te površina uzorka. Izlazi ekspandirajući materijal na spojevima ploča (premaz na spojevima ploča).
18:40	PI	Površina ploča ponovo potpuno pobijelila.
23:20	PI	Blaga deformacija površina ploča prema peći. Napukla ploča prvog sloja na sredini uzorka i odvaja se od površine.
32:10	PI	Mjestimično otpada prvi sloj ploča – počinje tamniti unutarnji sloj ploča na tom dijelu.
45:20	PI	Pojavljuju se pukotine na pločama drugog sloja.
49:50	PI	Pukotine i odvajanje drugi sloj ploča. Povremeni plamenovi kroz pukotine ploča.
69:30	PI	Izlazi plamen iz svih spojeva i pukotina na pločama, gori ispuna od polimerne pjene.
72:20	PI	Izlazi plamen iz svih spojeva i pukotina na pločama, gori ispuna od polimerne pjene.
73:20	PI	Izlazi plamen iz svih spojeva i pukotina na pločama, gori ispuna od polimerne pjene.
90:10	PN	Na vanjskoj površini uzorka nisu vidljive nikakve promjene.
96:10	PN	Prekid opterećenja uzorka.
97:30	PI	Plamenici u peći su ugašeni. Nastavak mjerenja temperatura.
115:20		Prekid mjerenja temperatura. Prekid ispitivanja.

* PI – požaru izložena strana; PN – požaru neizložena strana

Slike 46 i 47 prikazuju *PANEL 2* prije i nakon ispitivanja otpornosti na požar. Kriterij cjelovitosti (E) je zadovoljen jer nije došlo do pojave pukotina ili otvora u panelima koji omogućuju da dođe do zapaljenja neizložene strane uzorka.



Slika 46. PANEL 2 prije ispitivanja otpornosti na požar



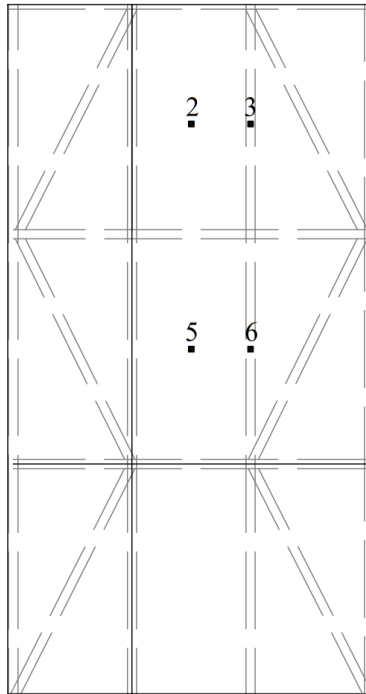
Slika 47. PANEL 2 nakon ispitivanja otpornosti na požar

3.2.4 Analiza rezultata ispitivanja

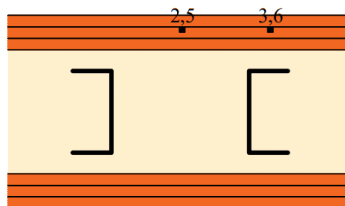
Rezultati ispitivanja laganih kompozitnih panela u požarnim uvjetima prikazani su na dijagramima u nastavku. Fokus je stavljen na razvoj temperature na izloženoj strani ispitnog uzorka do polimerne pjene. Za analizu rezultata odabrani su termočlanci čiji su podaci poznati kod oba ispitna uzorka panela kako bi se mogao usporediti razvoj temperature za različite panele. Kako je ranije navedeno, prekid mjerenja temperature kod oba ispitna uzorka je različit. Tako je razvoj temperature za PANEL 1 prikazan do 125. minute, a za PANEL 2 do 115. minute. Osim dijagrama razvoja temperature na određenim termočlancima, stavljeni su i dijagrami razvoja temperature u peći za svaki pojedini panel. Oni služe za usporedbu temperatura postignutih u peći i na oblogama panela.

Slika 48 prikazuje dva presjeka ispitnog uzorka panela s označenim termočlancima na spoju prvog i drugog sloja ploča na izloženoj strani. Prikazani su termočlanci koji su korišteni za prikaz rezultata ispitivanja (T2, T3, T5 i T6). Termočlanci T2 i T3 nalaze se na jednakim visinama, kao i termočlanci T5 i T6.

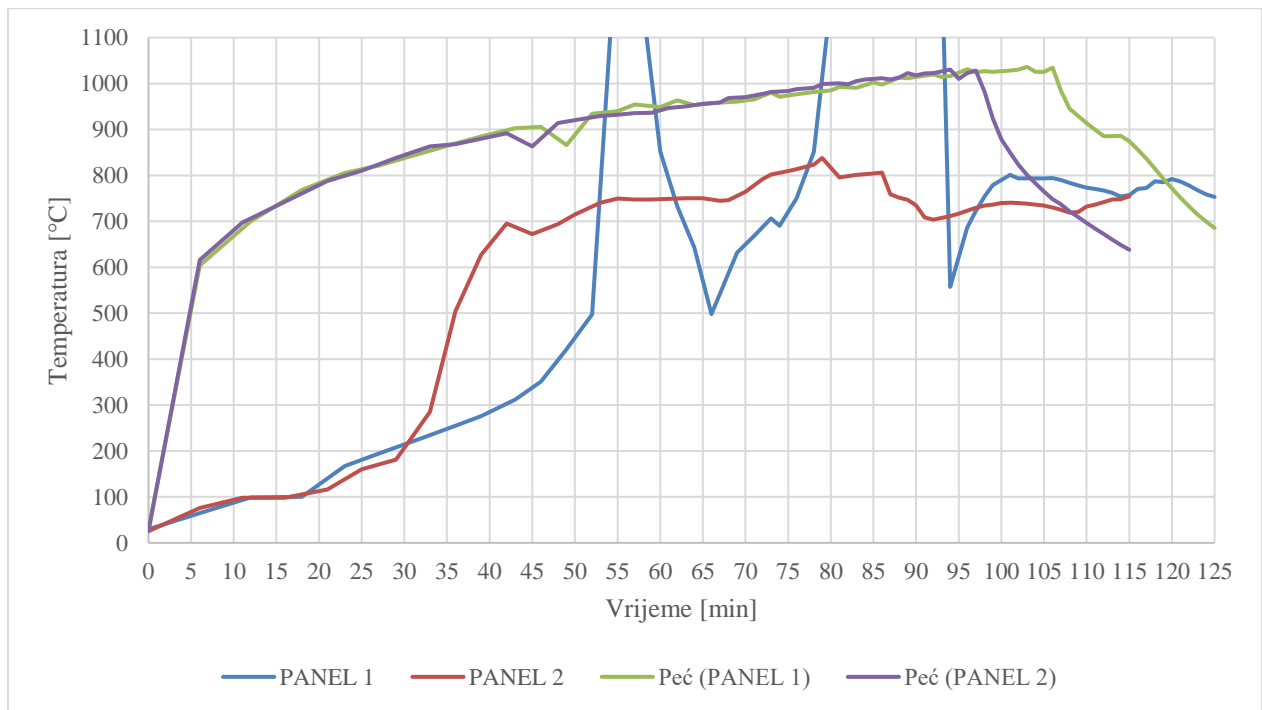
IZLOŽENA STRANA



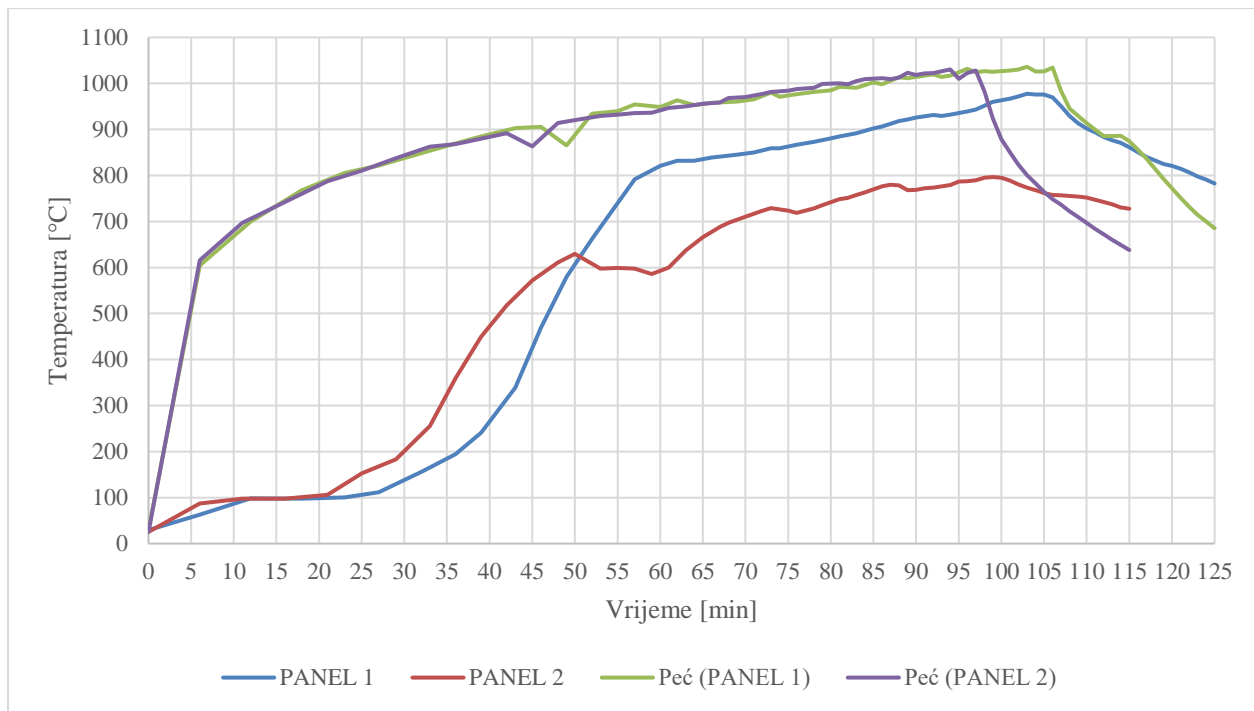
IZLOŽENA STRANA



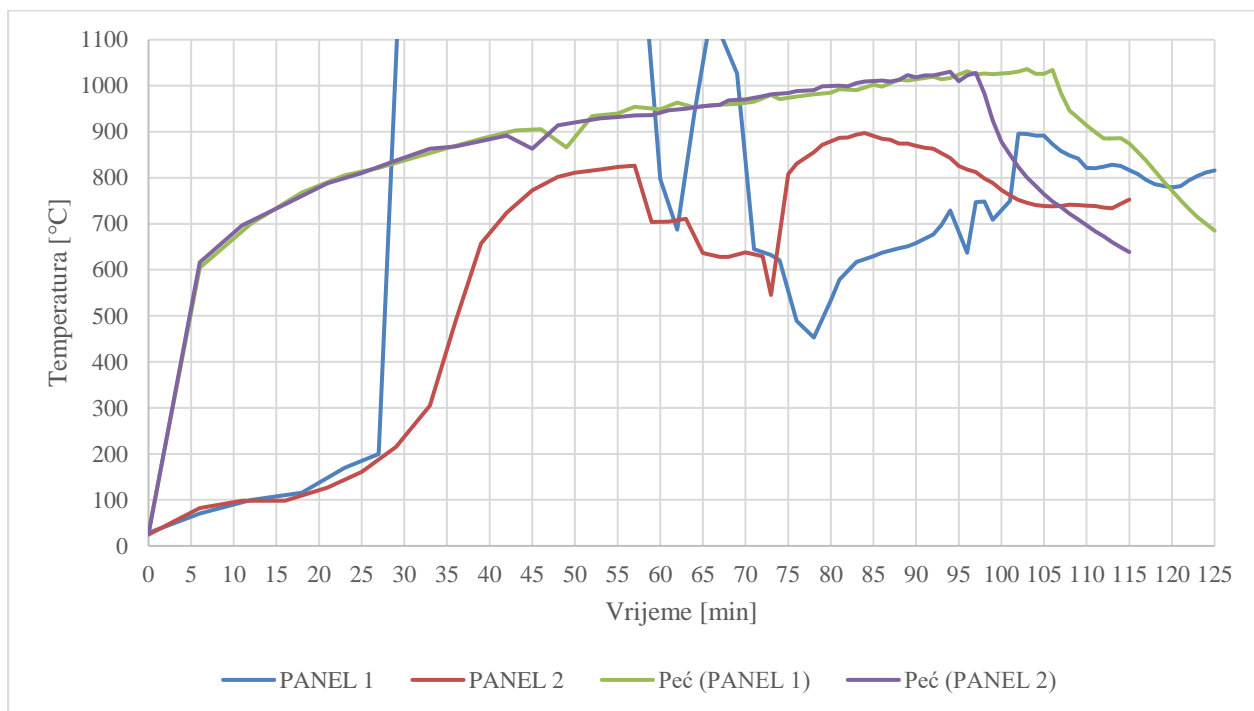
Slika 48. Odabrani termočlanci na spoju 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani



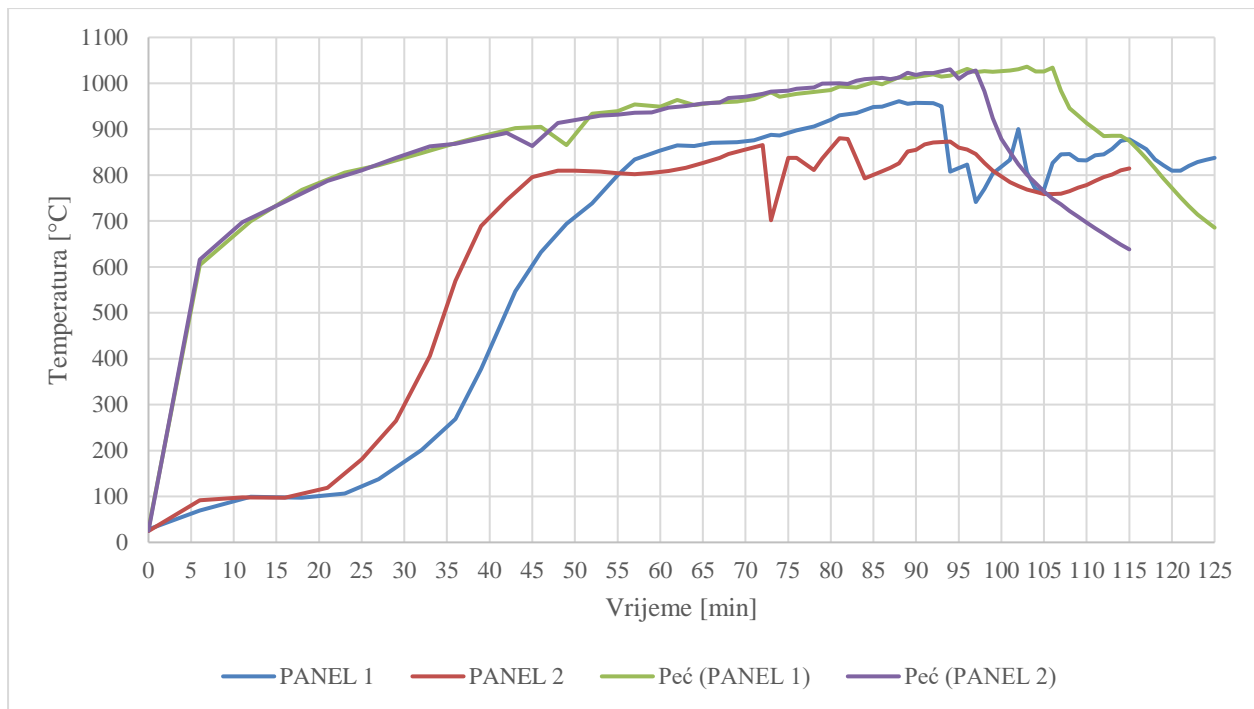
Slika 49. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T2



Slika 50. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T3



Slika 51. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T5

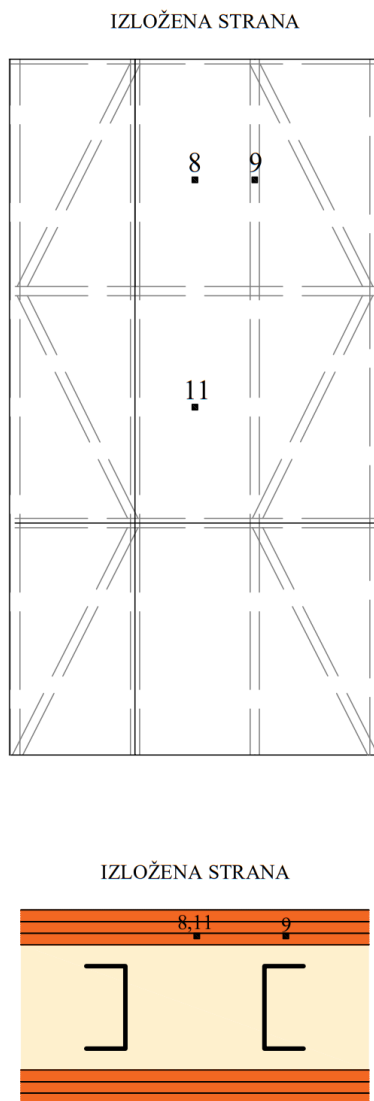


Slika 52. Spoj 1. i 2. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T6

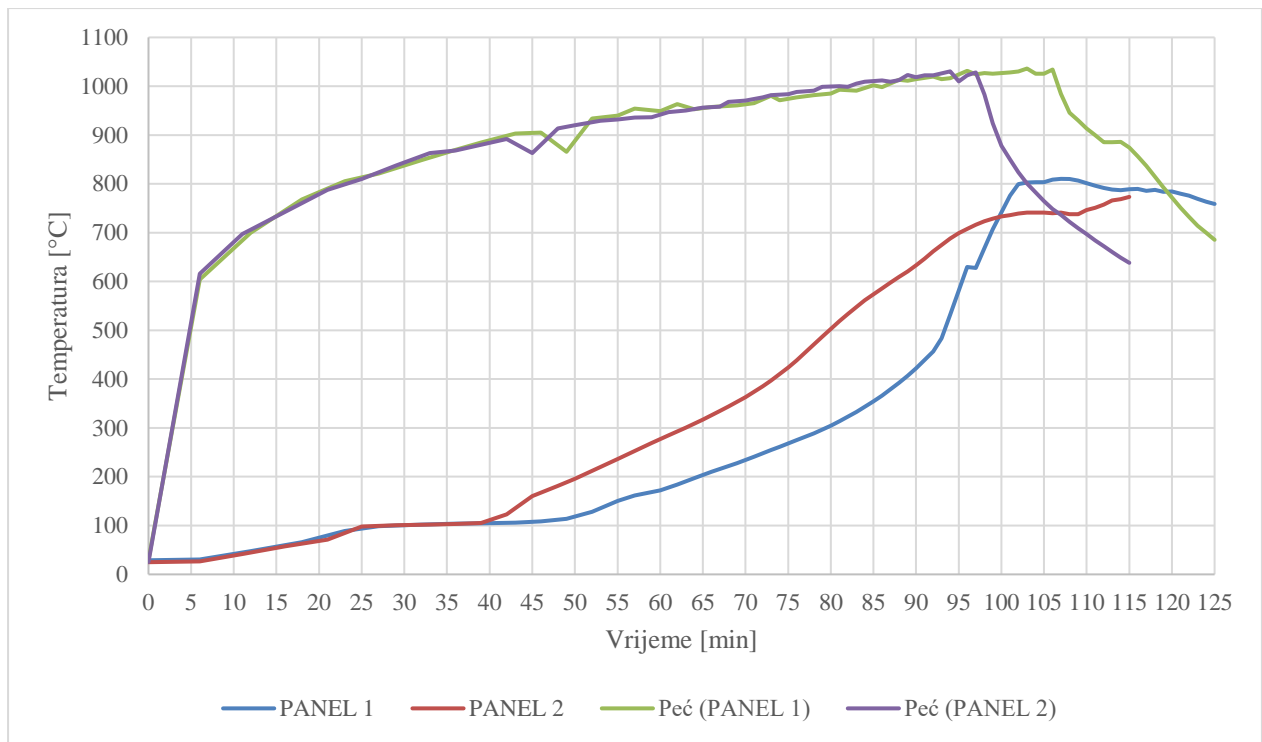
Razvoj temperature na dijagramima na slikama 49-52 približno je jednak za oba panela do otprilike 100 °C što odgovara početku isparavanja kemijski vezane vode u gipsu. Dok voda isparava temperatura ne raste što se vidi po platou gdje nema promjena temperature. Kada voda ispari počinje se povećavati temperatura. Iz dijagrama je vidljivo da se temperatura povećava već nakon cca 20 minuta. Na temperaturama između 100 °C i 200 °C događaju se dvije reakcije dehidracije gipsa. Povećanjem temperature dolazi i do raspadanja vlakana u gips-vlaknastim pločama, a samim time i raspadanja same ploče. Na dijagramima 49 i 51 vidljivi su nagli porasti temperature na termočlancima. Do toga je došlo zbog kvara na termočlanku čiji je uzrok vjerojatno raspadanje ploča zbog izloženosti visokim temperaturama.

Ako usporedimo razvoj temperature na termočlancima s razvojem temperature u peći vidljivo je da su razlike u temperaturama velike, na dijelu između 15. i 20. minute i više od 600 °C. Iz toga možemo zaključiti da ploče dobro apsorbiraju toplinu i da su dobri toplinski izolatori.

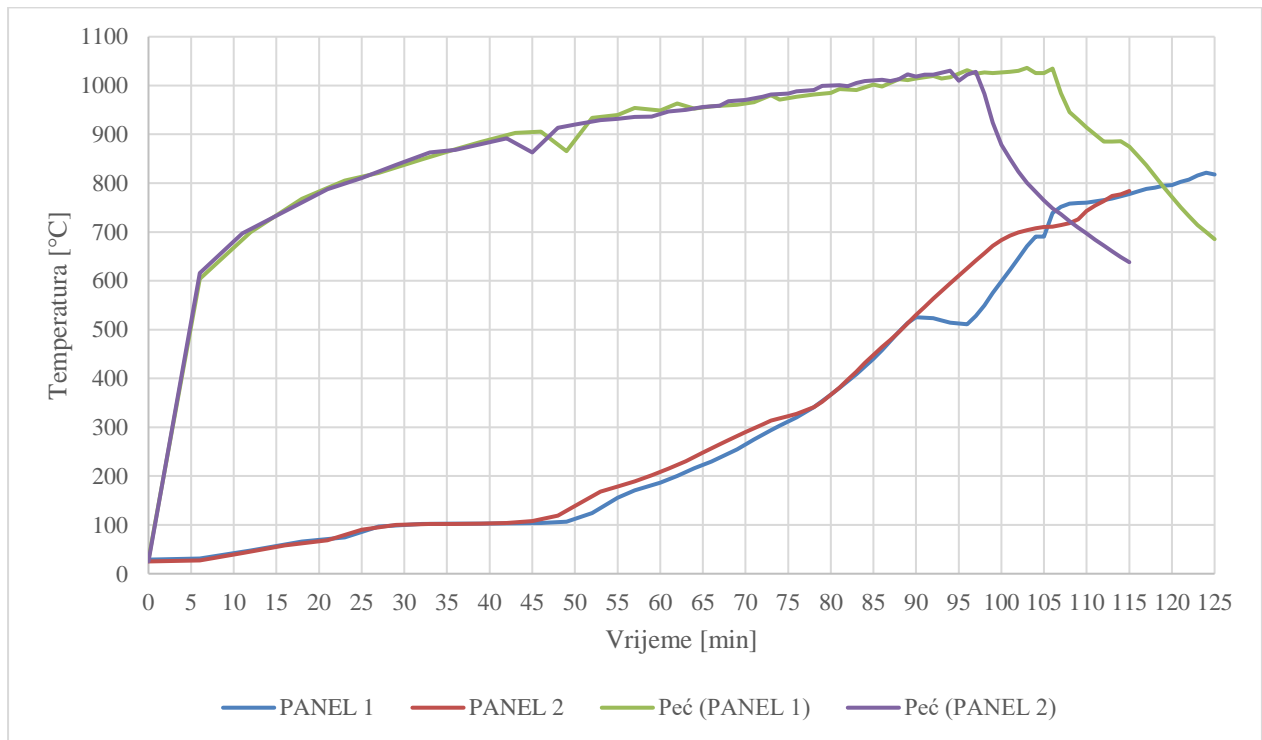
Slika 53 prikazuje dva presjeka ispitnog uzorka panela s označenim termočlancima na spoju drugog i trećeg sloja ploča na izloženoj strani. Prikazani su termočlanci koji su korišteni za prikaz rezultata ispitivanja (T8, T9 i T11). Termočlanci T8 i T9 nalaze se na jednakim visinama za razliku od termočlanka T11.



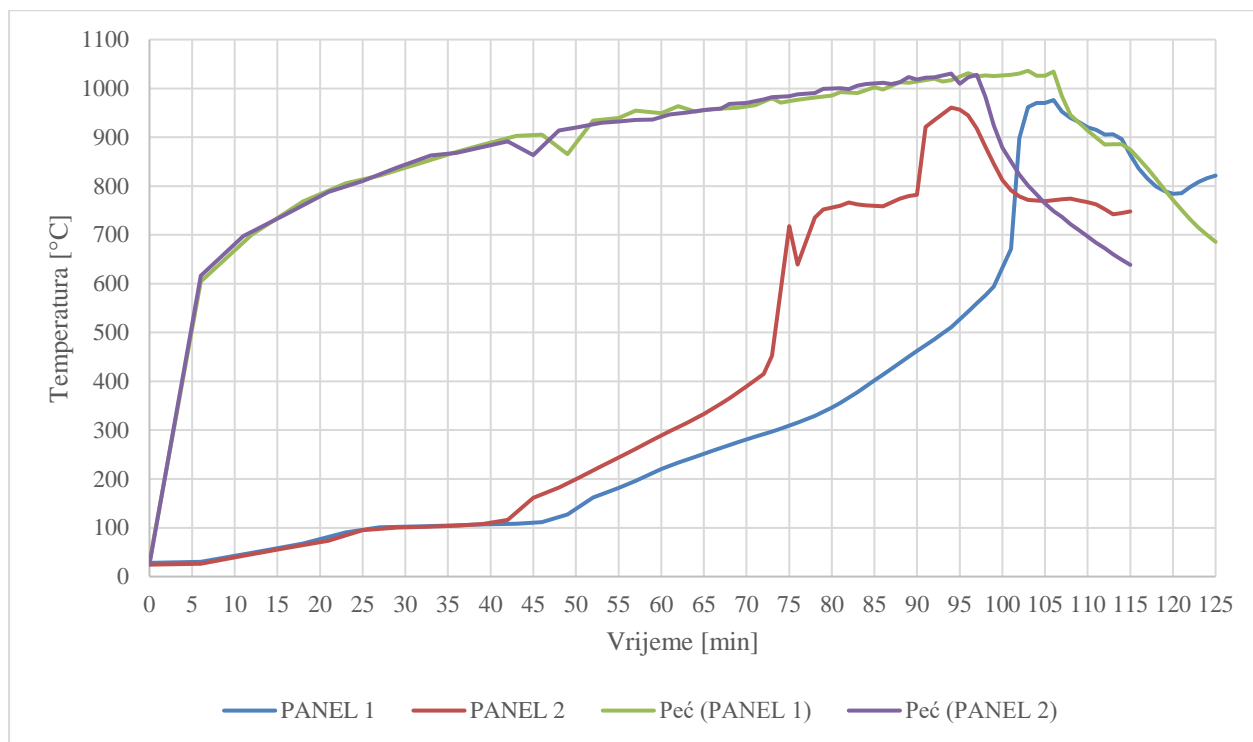
Slika 53. Odabrani termočlanci na spoju 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani



Slika 54. Spoj 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T8



Slika 55. Spoj 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T9

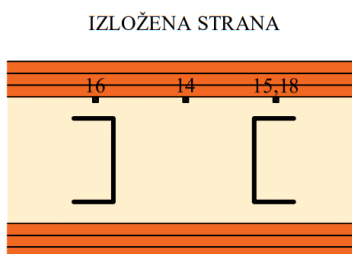
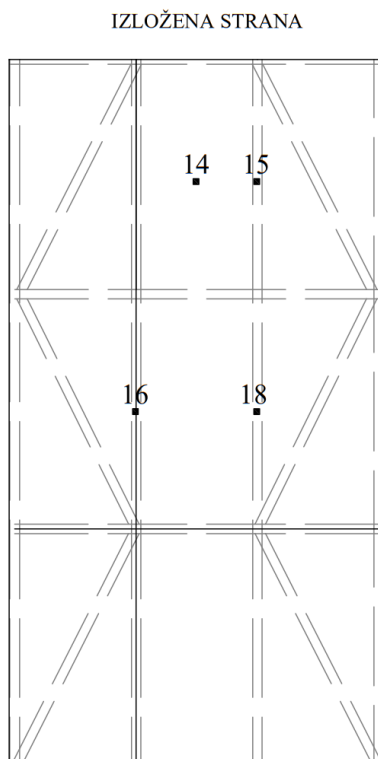


Slika 56. Spoj 2. i 3. sloja ploča na izloženoj strani – termočlanak T11

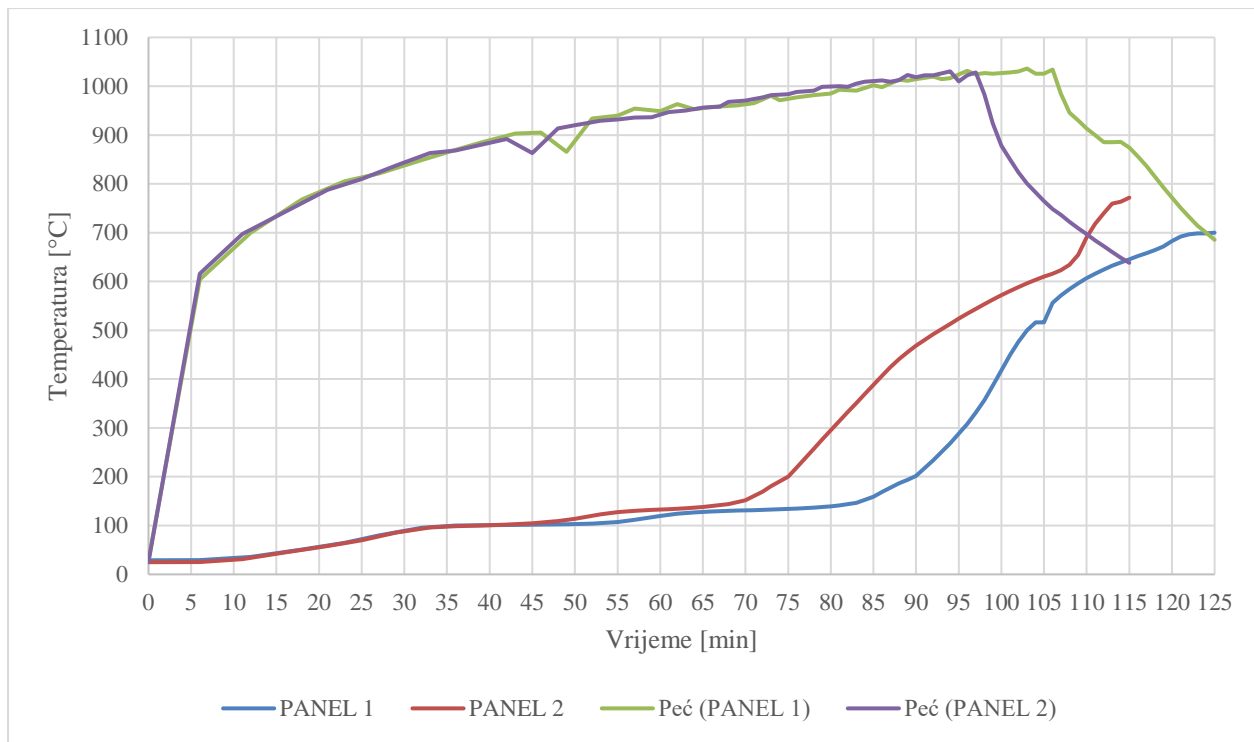
Razvoj temperature na dijagramima na slikama 54-56 približno je jednak za oba panela do otprilike 100 °C što odgovara početku isparavanja kemijski vezane vode u gipsu. Dok voda isparava temperatura ne raste što se vidi po platou gdje nema promjena temperature. Kada voda ispari počinje se povećavati temperatura. Iz dijagrama je vidljivo da se temperatura povećava već nakon cca 40 minuta. Na temperaturama između 100 °C i 200 °C događaju se dvije reakcije dehidracije gipsa. Povećanjem temperature dolazi i do raspadanja vlakana u gips-vlaknastim pločama, a samim time i raspadanja same ploče.

Ako usporedimo razvoj temperature na termočlanaku s razvojem temperature u peći vidljivo je da su razlike u temperaturama velike, na dijelu između 35. i 40. minute i do 800 °C. Iz toga možemo zaključiti da ploče dobro apsorbiraju toplinu i da su dobri toplinski izolatori.

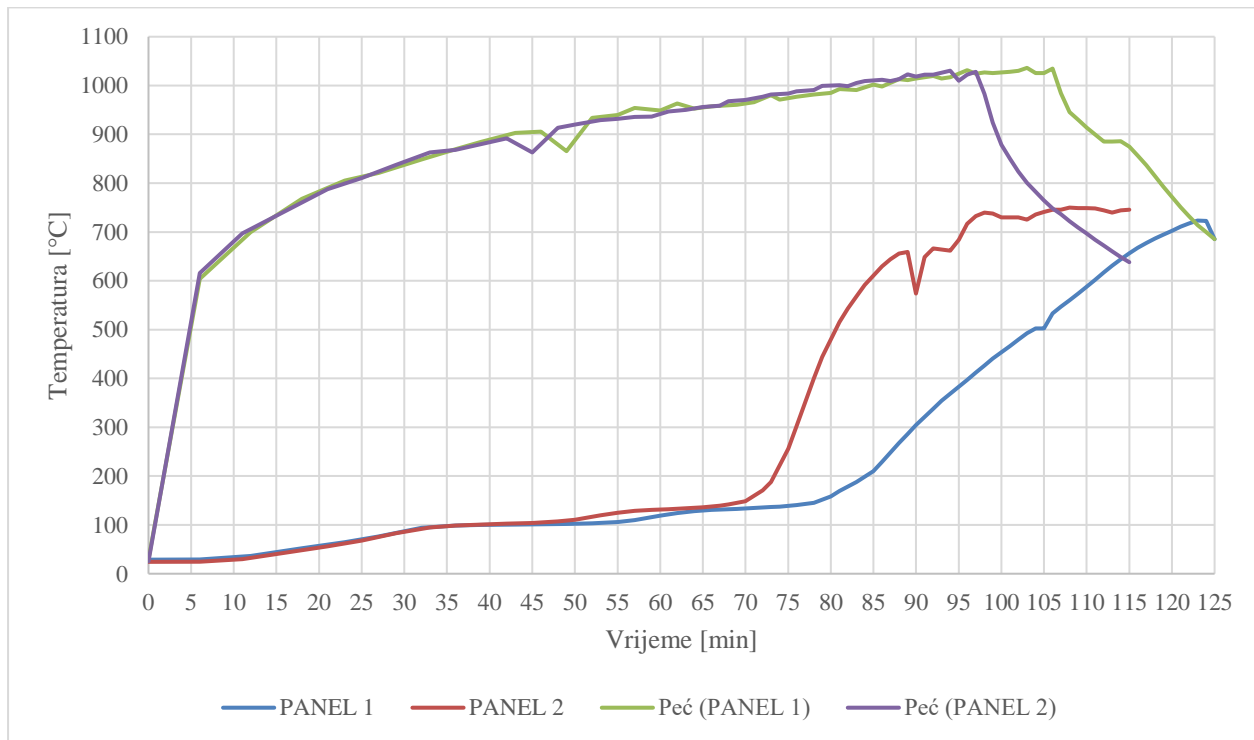
Slika 57 prikazuje dva presjeka ispitnog uzorka panela s označenim termočlancima na spoju iza trećeg sloja ploča na izloženoj strani. Prikazani su termočlanci koji su korišteni za prikaz rezultata ispitivanja (T14, T15, T16 i T18). Termočlanci T14 i T15 nalaze se na jednakim visinama, kao i termočlanci T16 i T18.



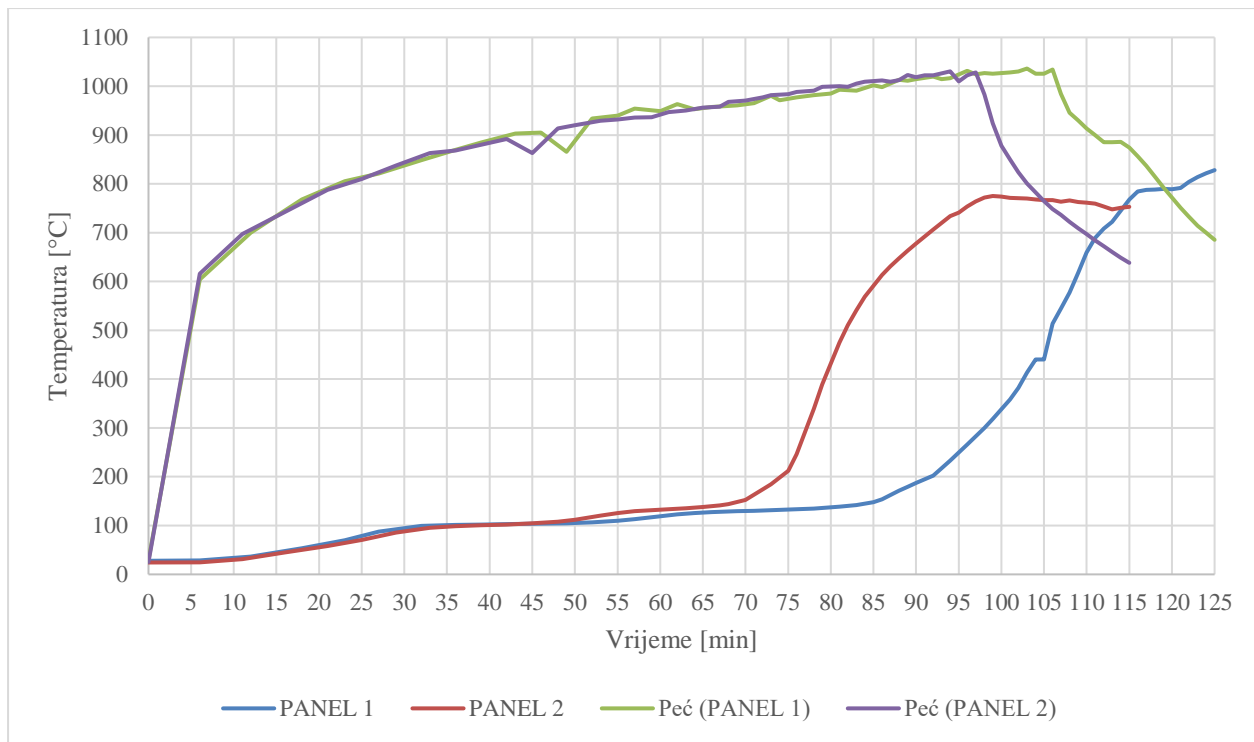
Slika 57. Odabrani termočlanci na spoju 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani



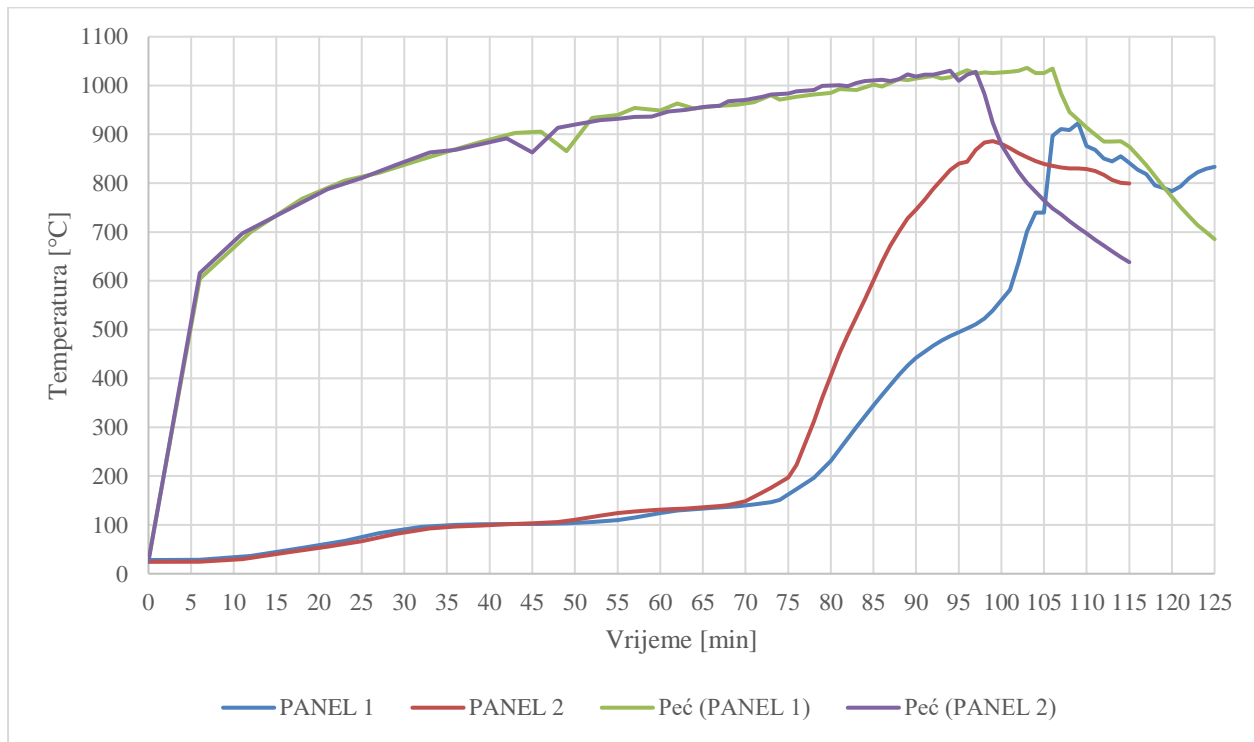
Slika 58. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T14



Slika 59. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T15



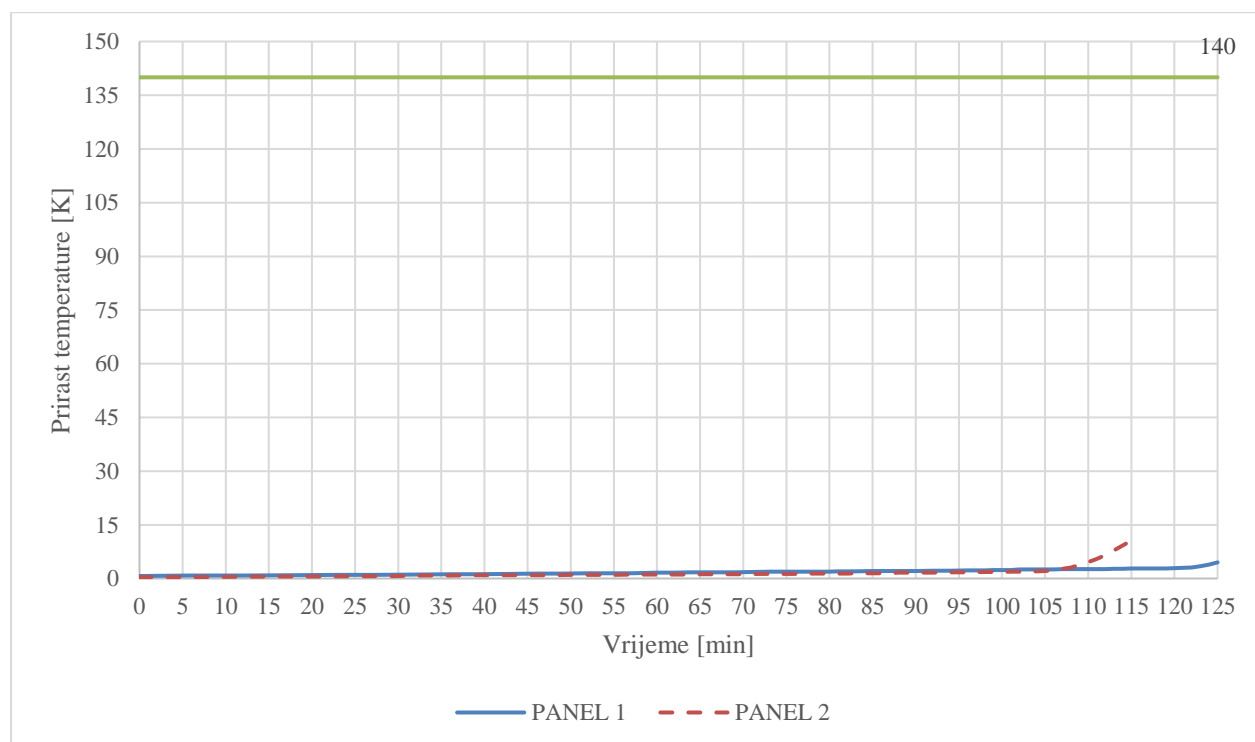
Slika 60. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T16



Slika 61. Spoj 3. sloja ploča i PUR pjene na izloženoj strani – termočlanak T18

Razvoj temperature na dijagramima na slikama 58-61 približno je jednak za oba panela do otprilike 100 °C što odgovara početku isparavanja kemijski vezane vode u gipsu. Dok voda isparava temperatura ne raste što se vidi po platou gdje nema promjena temperature. Kada voda ispari počinje se povećavati temperatura. Iz dijagrama je vidljivo da se temperatura povećava već nakon cca 50 minuta. Na temperaturama između 100 °C i 200 °C događaju se dvije reakcije dehidracije gipsa. Povećanjem temperature dolazi i do raspadanja vlakana u gips-vlaknastim pločama, a samim time i raspadanja same ploče. Ako usporedimo razvoj temperature na termočlanku s razvojem temperature u peći vidljivo je da su razlike u temperaturama velike, na dijelu između 45. i 50. minute i preko 800 °C. Iz toga možemo zaključiti da ploče dobro apsorbiraju toplinu i da su dobri toplinski izolatori.

Za određivanje kriterija izolacije (I) mjerio se razvoj temperature u određenim točkama na neizloženoj strani uzorka oba panela. Razvoj prosječne temperature na neizloženoj strani uzorka prikazan je na slici 62. Vidljivo je da su izmjereni prirasti temperature puno manji (iznose ispod 15 K) od kriterija otkaza koji iznosi $\Delta T = 140$ K. To znači da je kriterij izolacije zadovoljen za oba ispitna uzorka panela.



Slika 62. Dijagram porasta prosječne temperature na neizloženoj strani uzorka

3.2.5 Zaključak

Drugi dio eksperimentalnog rada predstavio je detalje eksperimentalnog istraživanja otpornosti na požar dva panela različitih konfiguracija naziva PANEL 1 i PANEL 2. Uzorak PANEL 1 sastoji se od tri obostrano postavljene Firepanel A1 ploče, a uzorak PANEL 2 sastoji se od obostrano postavljene jedne Firepanel A1 ploče na sloju uz polimernu pjenu i na nju dodane dvije obične gips-vlknaste ploče. Ispitivanje otpornosti na požar panela provedeno je kako bi se odredilo koja konfiguracija panela pokazuje bolje ponašanje pri izloženosti visokim požarnim temperaturama. Vidljivo je iz svih dijagrama kako se temperatura ne povećava do 100 °C što odgovara isparavanju vode iz gipsa. Kada voda ispari počinje se povećavati temperatura. Vrijeme početka povećanja temperature sve je veće kako se približavamo sloju do polimerne pjene, odnosno svakim dodavanjem nove ploče povećava se vrijeme početka rasta temperature. To znači da je svaka dodana ploča značajna za postizanje veće otpornosti na požar panela. Na spoju prvog i drugog sloja ploča na izloženoj strani kod termočlanaka T2 i T5 došlo je do kvara te se njihovi podaci ne mogu uzimati kao relevantni.

Na slici 62. prikazan je dijagram porasta prosječne temperature na neizloženoj strani uzorka koji nam pokazuje da je kriterij izolacije zadovoljen za oba ispitna uzorka. Iz opažanja opisanih u tablicama 8 i 9 vidljivo je da je zadovoljen i kriterij cjelovitosti zadovoljen za oba ispitna uzorka. Prema tome, možemo zaključiti da razvijene temperature na neizloženoj strani oba uzorka panela ukazuju na isti razred otpornosti na požar u pogledu svojstava cjelovitosti i izolacije. S obzirom na to da je Firepanel A1 ploča cjenovno skuplja, s ekonomskog stajališta je PANEL 2 prihvatljiviji.

4 ZAKLJUČAK

U ovom su radu predstavljeni rezultati teorijskih i eksperimentalnih istraživanja gipsanih ploča koje se koriste kao pasivna zaštita od požara u sustavima lakih čeličnih konstrukcija.

Kao prvi dio istraživanja predstavljeno je stanje područja u kojem su općenito opisani sustavi lakih čeličnih konstrukcija, područje njihove primjene, prednosti njihovog korištenja i problemi koji se javljaju kada su izloženi visokim požarnim temperaturama. S obzirom na štetu koju građevinska konstrukcija može pretrpjeti pri izloženosti požaru potrebno je zaštititi ove sustave određenim vatrootpornim oblogama. Kao obloge takvih sustava najčešće se koriste gips-kartonske ploče zbog svojih prednosti kao što su nezapaljiva jezgra i dobra toplinska svojstva. Postoje različiti tipovi gips-kartonskih ploča te je u obliku tablice prikazana njihova klasifikacija s kratkim opisima svojstava svakog pojedinog tipa ploče. Kako bi se objasnilo zašto su gips-kartonske ploče povoljne kao pasivna zaštita od požara opisan je njihov kemijski sastav i kemijske reakcije koje se događaju kada su ove ploče izložene visokim temperaturama. Prikazane su i opisane dvije reakcije dehidracije gipsa i razgradnja kalcijevog karbonata koje su kasnije bile potrebne kod analize toplinskih svojstava gipsanih ploča.

Toplinska svojstva gipsanih ploča pri povišenim temperaturama opisana su kroz istraživanja iz različitih literatura. Osnovna toplinska svojstva gipsanih ploča su toplinska difuzivnost, gubitak mase, specifični toplinski kapacitet i toplinska vodljivost. Dijagrami gubitka mase, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske vodljivosti prikazani su na slikama te su kratko opisani s podacima dostupnima u literaturi.

Drugi dio rada odnosi se na eksperimentalno istraživanje i sastoji se od dva dijela koja uključuju ispitivanje gubitka mase termogravimetrijskom analizom (TGA) i ispitivanje otpornosti na požar panela. Za ispitivanje termogravimetrijskom analizom korišteni su ispitni uzorci četiri različite gipsane ploče: gips-vlaknasta ploča s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama, gips-vlaknasta ploča, gips-kartonska ploča i gips-kartonska ploča za vlažne prostorije. Rezultati ispitivanja dani su kao funkcija temperature za svaki materijal te su detaljno analizirani. Napravljena je korelacija između podataka dostupnih iz literatura i onih dobivenih ispitivanjima. Zaključak je da se podaci iz literature poklapaju s onima dobivenima u laboratoriju. Treba napomenuti da se literatura bazira samo na gips-kartonskim pločama jer gips-vlaknaste ploče još nisu dovoljno istražene. Stoga su određeni dijelovi dijagrama gips-vlaknastih ploča opisani na

temelju pretpostavki. Gubitak mase gips-kartonskih ploča, obične i one za vlažne prostorije, bio je identičan. Gips-vlaknaste ploče imale su sličan gubitak mase pri povišenoj temperaturi. Međutim, obična gips-vlaknasta ploča imala je nešto veći gubitak mase od one s poboljšanim svojstvima na visokim temperaturama. Pretpostavlja se da je razlog tome prisutnost organskih sastojaka koji se dodatno razgrađuju u gips-vlaknastoj ploči te ona zbog toga ima veći gubitak mase. Na temelju usporedbe sve četiri gipsane ploče utvrđeno je da gips-vlaknaste ploče imaju veći gubitak mase od gips-kartonskih ploča. S obzirom da je gubitak mase povezan s endotermnim reakcijama dehidracije gipsa možemo zaključiti da će gips-vlaknaste ploče pokazivati bolje ponašanje u uvjetima požara. Ispitano je samo jedno toplinsko svojstvo, ali s obzirom da se gubitak mase poklapa s rezultatima iz literatura pretpostavlja se da će se i specifični toplinski kapacitet i toplinska vodljivost također poklapati.

Ispitivanje otpornosti na požar provedeno je na dva panela različitih konfiguracija. Prvi panel sastojao se od nosive čelične konstrukcije obostrano obložene s tri Firepanel A1 ploče, dok se drugi panel sastojao od nosive čelične konstrukcije obostrano obložene jednom Firepanel A1 pločom na koju su postavljene dvije gips-vlaknaste ploče. Iz određivanja kriterija cjelovitosti i izolacije dobiveno je da oba uzorka panela imaju isti razred otpornosti na požar. S obzirom da je cijena Firepanel A1 ploča veća, a razred otpornosti na požar je isti kod oba panela, s ekonomskog pogleda je prihvatljivije koristiti PANEL 2 koji sadrži dvije gips-vlaknaste ploče i jednu Firepanel A1 ploču.

5 LITERATURA

- [1] Rajanayagam H. i sur. Thermal performance of LSF wall systems with vacuum insulation panels. *Buildings*. 2021; 11 (12).
- [2] Steau E., Mahendran M., i Poologanathan K. Experimental study of fire resistant board configurations under standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2020; 116: 103-153.
- [3] Rahmanian I. Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards and Their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems. *School of Civil Engineering*. 2011.
- [4] Ariyanayagam A. D., Kesawan S. i Mahendran M. Detrimental effects of plasterboard joints on the fire resistance of light gauge steel frame walls. *Thin-Walled Structures*. 2016; 107: 597-611.
- [5] Kesawan S. i Mahendran M. A Review of Parameters Influencing the Fire Performance of Light Gauge Steel Frame Walls. *Fire Technology*, 2018; 54 (1): 3-35.
- [6] Keerthan P. i Mahendran M. Thermal performance of non-load bearing LSF walls using numerical studies. *From Mater. to Struct. Adv. Through Innov. - Proc. 22nd Australas. Conf. Mech. Struct. Mater. ACMSM 2012*. 2013; December: 549-554.
- [7] Dodangoda M. T., Mahendran M., Keerthan P. i Frost R. L. Developing a performance factor for fire rated boards used in LSF wall systems. *Fire Safety Journal*. 2019; 109 (September)
- [8] Keerthan P. i Mahendran M. Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2012; 53:105-119.

- [9] Kolaitis D. I. i Founti M. A. Development of a solid reaction kinetics gypsum dehydration model appropriate for CFD simulation of gypsum plasterboard wall assemblies exposed to fire, *Fire Safety Journal*, 2013; 58:151-159
- [10] Gipsane ploče – Definicije, zahtjevi i metode ispitivanja (EN 520:2004+A1:2009)
- [11] Thomas G. Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures, *Fire Mater.*, 2002; 26 (1): 37-45
- [12] Singh N. B. i Middendorf B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, 2007; 53 (1): 57–77
- [13] Gnanachelvam S., Mahendran M. i Ariyanayagam A. Elevated temperature thermal properties of advanced materials used in LSF systems. *Fire Mater.* 2022; 46 (1):12-28
- [14] Gnanachelvam S., Ariyanayagam A. i Mahendran M. Fire resistance of light gauge steel framed wall systems lined with PCM-plasterboards. *Fire Saf. J.* 2019; 108 (May)
- [15] Hopkin D. J., Lennon T., El-Rimawi J. i Silberschmidt V. V. A numerical study of gypsum plasterboard behaviour under standard and natural fire conditions, *Fire Mater.*, 2012; 36 (2): 107–126
- [16] Steau E. i Mahendran M. Elevated temperature thermal properties of fire protective boards and insulation materials for light steel frame systems. *J. Build. Eng.* 2021; 43 (April)
- [17] Salazar A. On thermal diffusivity. *Eur. J. Phys.* 2003; 24 (4):351-358
- [18] Jaković M., Slaviček I. Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010

- [19] Akash M. S. H. i Rehman K. Essentials of pharmaceutical analysis. 2019
- [20] <https://www.fermacell.com/en/products/fibre-gypsum/firepanel-a1>
[Pristupljeno: 15. prosinca 2022.]
- [21] <https://www.fermacell.com/en/products/fibre-gypsum/flooring-elements>
[Pristupljeno: 15. prosinca 2022.]
- [22] https://knauf.hr/wp-content/uploads/2021/09/9_1_k711b.hr_knauf_ploca-tipa-a_web.pdf
[Pristupljeno: 15. prosinca 2022.]
- [23] https://knauf.hr/wp-content/uploads/2022/06/9_2_k712b_ploca-tipa_h2_web.pdf
[Pristupljeno: 15. prosinca 2022.]
- [24] HRN EN 1363-1: Ispitivanja otpornosti na požar – 1. dio: Opći zahtjevi (EN 1363-1:2012)
- [25] Izvještaj o kontrolnom ispitivanju otpornosti na požar građevnih proizvoda i građevnih elemenata djelomično prema HRN EN 1365-1:2012 + Ispr.1:2013 Br. I-4705/22-3
- [26] Izvještaj o kontrolnom ispitivanju otpornosti na požar građevnih proizvoda i građevnih elemenata djelomično prema HRN EN 1365-1:2012 + Ispr.1:2013 Br. I-4705/22-2
- [27] HRN EN 1365-1: Ispitivanja otpornosti na požar nosivih elemenata – 1. dio: Zidovi (EN 1365-1:2012)
- [28] Jelčić Rukavina M. Djelovanje požara na građevinske materijale i konstrukcije – razradba; kolegij: Zaštita od požara, predavanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.