

Eksperimentano i numeričko određivanje toplinskih svojstava vatrootporne žbuke i vatrobetona na visokim temperaturama

Kuzmić, Roman

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:077883>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Roman Kuzmić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivanka Boras, dipl. ing.

Student:

Roman Kuzmić

Zagreb, 2019. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Ivanki Boras, prof.dr.sc. Srećku Švaiću i mag.ing. Ivanu Horvatu koji su me usmjeravali prilikom izrade ovog rada. Također, hvala laborantu Željku Badžeku na profesionalnoj pomoći tijekom obavljanja eksperimentalnih mjerenja.

Hvala mojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom cijelog mog obrazovnog putovanja. Također, zahvaljujem se svojoj djevojci koja me pratila tijekom studija i pružila mi neupitnu ljubav i podršku.

Roman Kuzmić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Roman Kuzmić** Mat. br.: 0035199073

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno i numeričko određivanje toplinskih svojstava vatrootporne žbuke i vatrobetona na visokim temperaturama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and numerical determination of thermal properties of fireproof mortar and concrete at high temperatures**

Opis zadatka:

Zaštita od požara građevinskih konstrukcija, između ostalog, postiže se i primjenom odgovarajućih materijala koji su otporni na visoke temperature - vatrootporne žbuke i vatrobetona. Poznavanje njihovih fizikalnih i toplinskih svojstva na visokim temperaturama je nužno radi procjene integriteta cijele građevinske konstrukcije. Parametri koji pri tome određuju ponašanje materijala su: temperatura, vrijeme izloženosti visokoj temperaturi, tijek procesa (grijanje, hlađenje, procesi nakon ohlađivanja i sl.), vrsta betona, vrsta agregata i drugo.

U radu je potrebno mjerenjem odrediti i numeričkom simulacijom potvrditi ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi za dvije vrste materijala:

- vatrootporna žbuka VATROSTOP, proizvođač Samoborka, Samobor i
- vatrobeton VATRIT, proizvođač VIG, Zagreb.

Maksimalna temperatura koju treba postići u uzorcima je 500 °C. Mjerenja je, za svaki ispitivani materijal, potrebno provesti na tri uzorka jednake geometrije, a rezultate prikazati u obliku funkcije $c = c(\vartheta)$. Numeričku simulaciju treba provesti za svaki ispitivani uzorak, uvažavajući specifične početne i rubne uvjete procesa zagrijavanja. Rezultate usporediti s rezultatima eksperimenta te analizirati eventualna odstupanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2019.

Datum predaje rada:

28. studenoga 2019.

Predviđeni datum obrane:

2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

I. Boras

Prof. dr. sc. Ivanka Boras

Predsjednica Povjerenstva:

Tanja Jurčević

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. O požaru.....	1
1.2. Opasnosti požara.....	2
1.3. Mjere sigurnosti i prevencije požara.....	4
1.3.1. Građevinske mjere prevencije.....	4
1.3.2. Civilne mjere prevencije.....	4
2. VATROOTPORNOSTI MATERIJALI.....	8
2.1. Najčešći primjeri.....	8
2.2. Istraživanja vatrootpornosti.....	10
2.2.1. Izvadci iz literature.....	11
2.3. Svojstva ispitivanih materijala.....	13
2.3.1. VATROSTOP žbuka.....	14
2.3.2. VATRIT vatrobeton.....	15
3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA.....	16
3.1. Opis sustava.....	16
3.1.1. Svojstva komponenti sustava.....	17
3.1.2. Model prijelaza topline.....	18
3.1.3. Kritične vremenske točke.....	23
3.2. Provedba mjerenja.....	24
3.2.1. Mjerna oprema.....	25
3.2.3. Geometrija i priprema uzoraka.....	32
3.3. Zapažanja.....	33
3.3.1. Utjecaj vlage.....	34
3.3.2. Identifikacija gubitaka tijekom mjerenja.....	36
3.4. Rezultati mjerenja.....	37
4. NUMERIČKA ANALIZA.....	41
4.1. Opis analize.....	41
4.2. Matematički model.....	42
4.3. Izrada geometrije i mreže.....	45
4.4. Rubni i početni uvjeti.....	48
4.5. Rezultati numeričke analize.....	50
5. ANALIZA REZULTATA.....	54
5.1. Vatrootporna žbuka.....	54
5.3. Vatrobeton.....	56
5.5. Usporedba s literaturom.....	58
6. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	60
PRILOZI.....	62

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz raspodjele udjela pojedinih vrsta materijala koji se pojavljuju kao prijenosnici požara	1
Slika 2.	Crkva Notre Dame, Pariz (2019.) u požaru	3
Slika 3.	Minerali korišteni u vatrostatnim materijalima	8
Slika 4.	Materijali korišteni za izradu staklenog vlakna	9
Slika 5.	Najčešće korišteni vatrootporni materijali	10
Slika 6.	Krivulja razvoja temperature požara [6]	11
Slika 7.	Izvadak iz literature: mjerenje betona DSC metodom	12
Slika 8.	Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta gipsa o temperaturi prema [10].....	13
Slika 9.	Izvadak iz literature. Mjerenje DSC metodom.....	13
Slika 10.	Vatrootstop protupožarna žbuka [Samoborka].....	14
Slika 11.	Shematski prikaz sustava izolacijske posude, električnog grijača i ispitnog uzorka	17
Slika 12.	Prikaz kretanja toplinskog toka u sustavu	18
Slika 13.	Krivulja temperatura mjerenih u uzorku	23
Slika 14.	Skica izolacijske posude s dimenzijama (lijevo). Poklopac (desno).....	26
Slika 15.	Realni prikaz termoizolacijske posude (lijevo. Pogled odozgora (desno).	26
Slika 16.	Električni grijač	27
Slika 17.	Termopar tip K	27
Slika 18.	Varijabilni transformator korišten tijekom mjerenja (lijevo). Nova izvedba (desno).	28
Slika 19.	Mjerni uređaji: ampermetar (lijevo), voltmetar (desno).....	29
Slika 20.	Keysight 34970A za prikupljanje podataka tijekom mjerenja [15]	29
Slika 21.	Nadograđeni Keysight uređaj korišten tijekom mjerenja.....	30
Slika 22.	Sučelje sustava Agilent BenchLink 3.0.....	30
Slika 23.	Shematski prikaz eksperimentalne opreme	31
Slika 24.	Skica uzorka s dimenzijama (lijevo). Način montiranja uzorka na poklopac (desno).	32
Slika 25.	Uzorci žbuke (desno). Uzorci betona (lijevo).	32
Slika 26.	Uzorak betona nakon mjerenja (lijevo). Uzorak žbuke nakon mjerenja (desno)..	33
Slika 27.	Utjecaj vlage na rezultate zagrijavanja uzoraka	35
Slika 28.	Prikaz toplinskih gubitaka u sustavu	36
Slika 29.	Prikaz temperaturnog profila termobetona pri zagrijavanju do 500°C	38
Slika 30.	Prikaz temperaturnog profila vatrootporne žbuke pri zagrijavanju do 500°C	38
Slika 31.	Krivulja ovisnosti temperature stijenke grijača o vremenu. Zagrijavanje pri 150V.	39
Slika 32.	Specifični toplinski kapacitet vatrootporne žbuke u ovisnosti o temperaturi	40
Slika 33.	Specifični toplinski kapacitet vatrobetona u ovisnosti o temperaturi.....	40
Slika 34.	Diskretizacija sredine uzorka prema dominantnom širenju topline	43
Slika 35.	Diskretizacija modela na rubu uzorka	44
Slika 36.	Model ispitnog uzorka izrađenog u SolidWorks-u.....	45
Slika 37.	Detalji izrade mreže (lijevo). Prikaz mreže (desno).....	46
Slika 38.	Mreža uzorka i stijenke posude	47
Slika 39.	Zadavanje globalnog početnog uvjeta	48
Slika 40.	Zadavanje rubnih uvjeta (ANSYS Mechanical).....	49
Slika 41.	Temperaturna mapa prvog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).	50

Slika 42.	Temperaturna mapa drugog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).	51
Slika 43.	Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).	51
Slika 44.	Temperaturna mapa prvog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).....	52
Slika 45.	Temperaturna mapa drugog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).....	52
Slika 46.	Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).....	53
Slika 47.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, prvi uzorak	54
Slika 48.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, drugi uzorak	55
Slika 49.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, treći uzorak	55
Slika 50.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, prvi uzorak	56
Slika 51.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, drugi uzorak	56
Slika 52.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, treći uzorak	57
Slika 53.	Usporedba rezultata vatrobetona s literaturom.....	58
Slika 54.	Usporedba rezultata vatrootporne žbuke s literaturom.....	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike Vatrostop žbuke	14
Tablica 2. Tehničke karakteristike Vatri vatrobetona	15
Tablica 3. Svojstva komponenti mjernog sustava	17
Tablica 4. Popis korištenih termoparova	28
Tablica 5. Iznos jakosti struje tijekom mjerenja.....	33
Tablica 6. Način zapisivanja podataka iz mjerenja	37
Tablica 7. Specifični toplinski kapacitet elektrogrijača	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T	K	Termodinamička temperatura
t	s	Vrijeme
c	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Specifični toplinski kapacitet
e	-	Maseni sadržaj vode
f	-	Korekcijski faktor
ϑ	°C	Temperatura
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Toplinska provodnost
E	J	Električna energija
Q	J	Toplinska energija
P	W	Snaga
U	V	Napon
I	A	Jakost struje
m	kg	Masa
A	m ²	Površina
C	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot (100\text{K})^4}$	Konstanta zračenja
ε	-	Emisivnost
σ	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot (100\text{K})^4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
ω	-	Geometrijski faktor
ρ	kg/m ³	Gustoća
a	m ² /s	Toplinska provodnost
Indeks	Opis	
d	Isparena voda	

<i>sl</i>	Slobodna voda
<i>ul</i>	Ulazna komponenta
<i>g</i>	Elektrogrijač
<i>uz</i>	Ispitni uzorak
<i>zr</i>	Zračenje
<i>z</i>	Zrak
<i>EL</i>	Električna energija
<i>0</i>	Početno (nulto) vrijeme
<i>i</i>	Isključivanje
<i>su</i>	Stijenka uzorka
<i>sp</i>	Stijenka termoizolacijske posude
<i>i</i>	i-ti trenutak

SAŽETAK

U ovom radu obrađen je i prikazan postupak utvrđivanja specifičnog toplinskog kapaciteta pri požarnim temperaturama (do 500 °C) sljedećih materijala: Vatrostop vatrootporne žbuke (Samoborka, Samobor) i Vatriit vatrobetona (VIG, Zagreb). Analiza je izvedena eksperimentalnom metodom, a onda provjerena numeričkom metodom. Za analizu je osmišljen i predstavljen matematički model prijelaza topline, a krajnji rezultat je definirana funkcijska ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi.

Osim navedenog, u radu su navedene osnove zaštite od požara uključujući i zakonsku regulativu te ispitne mjere koje objekti moraju zadovoljiti. Prikazan je pregled vatrootpornih materijala u svakodnevnoj upotrebi kao i sirovine od kojih se isti proizvode.

Ključne riječi: specifični toplinski kapacitet, požar, termodinamička analiza, Vatrostop, vatrootporna žbuka, Vatriit, vatrobeton, prijenos topline

SUMMARY

This article addresses the topic of determining the specific heat capacity of Vatrostop fire mortar (Samoborka, Zagreb) and Vatrut high-temperature resistant concrete. An experimental and then numerical approach is used. For the purpose of this analysis, a mathematical model of heat transfer is designed. The final result is a function of temperature-dependent specific heat capacity.

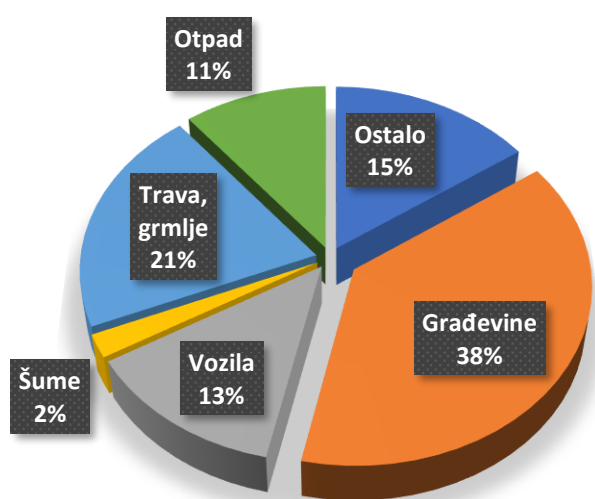
Furthermore, the article deals with the description of fire-resistant materials and precaution measures that are needed for the protection of a fire accident.

Key words: specific heat capacity, fire-resistant materials, fire mortar, fire concrete, heat transfer

1. UVOD

Sve utjecajniiji problem globalnog zatopljenja donosi između ostalog i veće vjerojatnosti za pojavom požara zbog većih godišnjih prosječnih temperatura. Statistike pokazuju da je 2015. godine u državama koje sudjeluju u vođenju statistike požar odnio 18 400 života. Ukupno je u trideset jednoj državi zabilježeno 3,5 milijuna požara [1]. Od toga je Republici Hrvatskoj 2015. godine zabilježena brojka od 12 156 požara te 24 izgubljena života.

Ono što je iznenađujuće jest da je čak 38,2 % požara prenošeno preko građevina i struktura, što među ostalim medijima širenja (trava, smeće, vozila, šume) čini najveći udio. Na Slici 1. vidljiv je točan raspored udjela medija širenja požara u 2015. godini.



Slika 1. Prikaz raspodjele udjela pojedinih vrsta materijala koji se pojavljuju kao prijenosnici požara

Zbog prethodno navedenih podataka od velike je važnosti u građevinarstvu korištenje materijala poznatih svojstava kako bi se pravilno projektirali požarni putevi i brane. Najvažnija svojstva u tom pogledu su ona termodinamička; toplinska provodnost i specifični toplinski kapacitet i mehanička svojstva pri visokim temperaturama. Mjerenje i određivanje specifičnog toplinskog kapaciteta vatrootporne žbuke i vatrobetona predmet je ovog diplomskog rada.

1.1. O požaru

Vatra je kemijska reakcija koja je ljudima poznata još od davnih vremena. Stari Grci poznavali su tehniku paljenja vatre pomoću koncentriranja Sunčevih zraka. U današnje vrijeme parabolično se zrcalo i dalje koristi kao tehnika paljenja vatre na olimpijskoj baklji. Poznata je činjenica da je Zemlja jedini poznati planet gdje se može odvijati proces gorenja. Bilo gdje

drugdje nema dovoljno kisika za navedeni proces. Za nastanak i održanje vatre potrebna su tri esencijalna uvjeta: visoka temperatura, kisik i goriva tvar. U slučaju nestanka jedne od ovih komponenti vatra se gasi. Boja plamena vatre određena je količinom kisika u plamenu; žuti plamen je onaj s nedostatkom kisika, a plavi plamen s dovoljno kisika.

Požar ima drukčiju definiciju od vatre; požar je nekontrolirano gorenje vatre koje nanosi materijalnu štetu i/ili ugrožava ljudske živote. Unatoč mjerama opreza požari i dalje izbijaju pod raznim okolnostima. Požari se mogu klasificirati prema više kriterija:

- Fazi požara: početni požar, razbuktali požar, faza zgarišta
- Obujmu požara: mali, srednji, veliki i katastrofalni

U malom požaru izgara manja količina gorive tvari i lako se gasi. Srednji požar zahvaća jednu prostoriju neke zgrade ili više njih, a u velikom zahvaćena je cijela zgrada, tvornica ili velika površina.

Požari prema vrsti gorive tvari:

- A. Požari klase A su požari krutih tvari poput papira, ugljena, drva i slično. Za gašenje se koriste sredstva poput vode, pijeska, određenih vrsti praha, pjene i halona.
- B. Požari klase B su požari zapaljivih tekućina - npr. zapaljiva ulja i slično. Gasimo ih pomoću pjene, praha, halona, ugljičnog dioksida ili raspršene vode.
- C. Požari klase C su požari zapaljivih plinova. Gase se pomoću praha i halona.
- D. Požari klase D su specijalni požari koji se teško gase, npr. požari lakih metala i sredstava koja su samozapaljiva i sl. Za njihovo gašenje nisu dovoljni obični vatrogasni aparati već se koriste posebni aparati sa specijalnim prahom ili suhi pijesak.[2]

Prilikom konstruiranja većih objekata (institucije, javne zgrade, tvornice, itd.) obavezno je provođenje mjera zaštite od požara o kojima će više biti u Poglavlju 1.3.

1.2. Opasnosti požara

Posljedice i opasnosti od požara mnogo su drastičnije od onih kakvima se većini ljudi čini i kakvima se prikazuju na televiziji i filmovima. Požari u kućama uzrokuju gusti i crni dim koji uvelike otežava vidljivost; ljudi koji inače poznaju svoj dom i lako se orijentiraju postaju izgubljeni i u mogućnosti su krenuti u krivom smjeru/prema vatri. Spomenuti dim poguban je za ljude i uzima živote puno prije nego vatra dođe blizu. Razlog tomu prisutnost je otrovnih plinova koji djeluju na ljudska osjetila i u stanju su spriječiti čovjeka da se probudi/vrati svijest.

Ova činjenica veoma je značajna zbog toga što većina požara izbija tijekom noći, kad ljudi spavaju.

Temperature koje se postižu tijekom požara u stambenim objektima mogu dostići do 2000 °C u razini stropa, a pri takvim temperaturama zadobivaju se teške opekotine i doživljavaju se gubici svijesti. Plamen tijekom požara rapidno se širi i u stanju je progutati nečiji dom u roku od par minuta te bez prisutnosti detektora dima i požarnih alarmnih sustava, ljudi imaju vrlo male šanse za spasom.

Požari u spavaćoj sobi ili dnevnom boravku čine čak 73% svih smrtnih slučajeva u stambenim objektima. Među najčešćim uzrocima požara u stanovima su: zaboravljena hrana na upaljenom štednjaku, prijenosni grijači koji se nalaze preblizu zapaljivim predmetima (zavjesama, namještaju, rublju), slučajno ostavljen neugašen opušak, neispravna električna oprema ili neugašena električna oprema poput pegle, uvijača za kosu. Također, ljudi znaju ostaviti upaljene svijeće ili neadekvatno odlažu spremnike sa zapaljivim tekućinama.



Slika 2. Crkva Notre Dame, Pariz (2019.) u požaru

1.3. Mjere sigurnosti i prevencije požara

1.3.1. Građevinske mjere prevencije

Građevinske konstrukcije i elementi otporni na požar su bilo koja građevinska konstrukcija (zid, međukatna konstrukcija, stup, greda) ili bilo koji element koji ima neki stupanj otpornosti na požar (od 15 do 360 minuta), a izveden je od negorivog i/ili ograničeno gorivog materijala. Pravilan izbor materijala tijekom izgradnje građevina pokazao se kao jedna od najbitnijih mjera prevencije požara.

Osnovni zahtjevi za zaštitu građevine od požara:

- očuvanje nosivosti konstrukcije u slučaju požara tijekom određenog vremena
- sprječavanje širenja vatre i dima unutar građevine
- sprječavanje širenja vatre na susjedne građevine
- omogućavanje da osobe mogu neozlijeđene napustiti građevinu odnosno da se omogući njihovo spašavanje
- omogućavanje zaštite spašavatelja

Važno je razlikovati pojmove negorivost materijala od požarne otpornosti građevinskih sustava. Negorivost je svojstvo pojedinog materijala koja opisuje njegovo ponašanje tijekom požara. Prema standardu EN 13501-1 materijali su razvrstani u više razreda gorivosti:

- A1 i A2 su razredi negorivih materijala
- B, C, D, E i F su razredi manje ili više gorivih materijala odnosno materijala kod kojih se negorivost ne deklarira

S druge strane, požarna otpornost određuje se za konstrukcije koje su sastavljene od više pojedinačnih građevinskih materijala, a ona u pravilu označava vremenski period u kojem se određena konstrukcija odupire vatri, sprječava njezin prolazak i koliko čuva svoje toplinsko izolacijske sposobnosti.

1.3.2. Civilne mjere prevencije

Prema [1] sustav zaštite od požara podrazumijeva planiranje zaštite od požara, propisivanje mjera zaštite od požara građevina, ustrojavanje subjekata zaštite od požara, provođenje mjera zaštite od požara, financiranje zaštite od požara te osposobljavanje i ovlašćivanje za obavljanje

poslova zaštite od požara, s ciljem zaštite života, zdravlja i sigurnosti ljudi i životinja te sigurnosti materijalnih dobara, okoliša i prirode od požara, uz društveno i gospodarski prihvatljiv požarni rizik.

U cilju zaštite od požara poduzimaju se organizacijske, tehničke i druge mjere i radnje za:

- otklanjanje opasnosti od nastanka požara,
- rano otkrivanje, obavješćivanje te sprječavanje širenja i učinkovito gašenje požara,
- sigurno spašavanje ljudi i životinja ugroženih požarom,
- sprječavanje i smanjenje štetnih posljedica požara,
- utvrđivanje uzroka nastanka požara
- otklanjanje njegovih posljedica.

Terminologija korištena u zakonskim propisima

- a) Otpornost na požar je sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo, kako je propisano normom o ispitivanju otpornosti na požar.
- b) Reakcija na požar je doprinos materijala razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izlaganjem tog materijala određenim ispitnim uvjetima.
- c) Neposredna opasnost je stanje visokog požarnog rizika, koje može u bliskoj budućnosti dovesti do požara.
- d) Evakuacijski put iz građevine je posebno projektiran i izveden put koji vodi od bilo koje točke u građevini do vanjskog prostora ili sigurnog prostora u građevini, čije značajke (otpornost i reakcija na požar, širina, visina, označavanje, protupanična rasvjeta i dr.) omogućuju da osobe zatečene u požaru mogu sigurno (samostalno ili uz pomoć spasitelja) napustiti građevinu.

Zakonska regulativa zaštite od požara

Svaka fizička i pravna osoba, tijelo državne vlasti te jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave dužni su djelovati na način kojim se ne može izazvati požar.

Svaka fizička i pravna osoba, tijela državne vlasti te jedinice lokalne i područne (regionalne) samouprave dužni su provoditi mjere zaštite od požara utvrđene odredbama Zakona o zaštiti od požara i drugim propisima donesenim na temelju njega, planovima i procjenama ugroženosti od požara, odlukama jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave te drugim općim aktima iz područja zaštite od požara.

Svaka fizička i pravna osoba odgovorna je za neprovođenje mjera zaštite od požara, izazivanje požara, kao i za posljedice koje iz toga nastanu sukladno odredbama Zakona o zaštiti od požara i odlukama jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave.

Svatko ima pravo i obvezu biti upoznat s opasnostima od požara na mjestu gdje boravi ili radi. Radi osiguranja pravodobne i učinkovite zaštite od požara jedinice lokalne i područne (regionalne) samouprave te pravne osobe organiziraju osposobljavanje pučanstva za provedbu preventivnih mjera zaštite od požara, gašenje početnih požara i spašavanje ljudi i imovine ugroženih požarom prema posebnim propisima.

Svaka građevina ili njezin dio, ovisno o svojoj namjeni, mora se tijekom svog trajanja održavati na način da ispunjava bitni zahtjev zaštite od požara.

Svaki prostor ili njegov dio, ovisno o svojoj namjeni, mora se održavati na način da ispunjava propisane mjere zaštite od požara.

Vlasnici, odnosno korisnici građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su održavati slobodnima i propisno označenima evakuacijske putove, kao i pristupe vatrogasnim vozilima.

Vlasnici, odnosno korisnici građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su posjedovati uređaje, opremu i sredstva za gašenje požara.

Vlasnici, odnosno korisnici građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su sukladno propisima, tehničkim normativima, normama i uputama proizvođača održavati u ispravnom stanju postrojenja, uređaje i instalacije električne, plinske, ventilacijske i druge namjene, dimnjake i ložišta, kao i druge uređaje i instalacije, koji mogu prouzročiti nastajanje i širenje požara te o održavanju moraju posjedovati dokumentaciju. Vlasnik, odnosno korisnik građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su održavati prijenosne i prijevozne aparata za gašenje požara, sukladno uputi proizvođača, o čemu mora postojati evidencija.

U nastavku slijede primjeri postupaka ustanova za obavljanje poslova zaštite od požara, koje posjeduju predmetna ovlaštenja izdana od nadležnih tijela Republike Hrvatske.

Ispitivanja:

- Pregled i ispitivanje hidrantske mreže
- Mjerenje tlakova i izračun količine vode u vodovodnoj mreži
- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje vodom – sprinkle
- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje vodom – drencher
- Pregled i ispitivanje sustava za hlađenje vodom

- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje požara pjenom
- Pregled i ispitivanje bacača vode i pjene
- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje požara plinom
- Pregled i ispitivanje sustava za dojavu požara
- Pregled i ispitivanje sustava za dojavu prisutnosti zapaljivih plinova i para
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti sustava za signalizaciju i gašenja požara
- Pregled i ispitivanje sustava za odvođenje dima i topline
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti klapni (zaklopki) otpornih prema požaru
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti vrata otpornih prema požaru
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti tipkala za isključenje električne energije
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti sigurnosne rasvjete
- Pregled i ispitivanje sustava za dojavu prisutnosti toksičnih plinova i para
- Pregled i ispitivanje nepropusnosti plinske instalacije
- Ispitivanje funkcionalnosti elektromagnetskih ventila
- Pregled i ispitivanje brodova unutarne plovidbe:
 - sustava za dojavu i gašenje požara
 - sustava za dojavu zapaljivih plinova

Akti (elaborati):

- Procjena ugroženosti od požara
- Plan zaštite od požara
- Normativni akt iz zaštite od požara (Pravilnik zaštite od požara)
- Elaborat zaštite od požara

2. VATROOTPORNI MATERIJALI

Vatrootpornost se definira kao svojstvo materijala da u određenom periodu izdrži visoke temperature koje se razvijaju tijekom gorenja. Takvi materijali pomažu u suzbijanju širenja vatre jer usporavaju njeno napredovanje. Iako se materijali nazivaju vatrootpornima to ipak nije u potpunosti ispravan izraz. Svaki materijal podložan je izgaranju ako se podvrgne utjecajima dovoljno visokih temperatura. Među široko korištenim materijalima su: cigla i opeka, staklena vlakna i kamena vuna (Slika 5.).

2.1. Najčešći primjeri

Vatrostalni materijali

U ovu skupinu tvrdih, vatrootpornih materijala ubrajaju se cement, cigla, keramika i opeka. U sastav ovih materijala ulaze određeni minerali (Slika 3.); aluminijev oksid (Al_2O_3), krom-željezov oksid (FeCr_2O_4), vatrena glina, magnezit (MgCO_3) i silicijev karbid (SiC). Vatrostalni materijali najčešće se koriste u visokotemperaturnim okruženjima poput peći, reaktora i ostalih sličnih jedinica u tehničkim procesima. Također se koriste u svrhe električne ili toplinske izolacije. Navedeni materijali u stanju su podnijeti veće temperature od metala ($540\text{ }^\circ\text{C}$) i otporni su na fizičko trošenje i kemijska sredstva.



Slika 3. Minerali korišteni u vatrostalnim materijalima

Stakleno vlakno

Stakleno vlakno (eng. fiberglass) kombinacija je primarno stakla i pijeska. Sirovine koje se koriste u proizvodnji „fiberglassa“ su: silicijev pijesak, vapnenac, natrijev karbonat, kalcificirani aluminijski oksid, boraks (natrijev borat), feldspat, nefelin sijenit, magnezit i kaolin glina (Slika 4). Stakleno vlakno proizvodi se na način da se otopljeno staklo gura kroz stroj za prosijavanje koji ga formira u navoje, a koji se dalje sljepljuju. Ovaj materijal je snažan, izdržljiv i prirodno nezapaljiv zbog sastava kojeg čine pijesak i reciklirano staklo. Služi za razne svrhe poput električne izolacije, tekstila i ojačanja. Također koristi se za potrebe stvaranja kiseline otpornosti i za toplinsku izolaciju. U praksi svoje je mjesto ovaj proizvod našao na trupovima brodova, automobilima, pećima i rashladnim jedinicama te akustičnim zidovima (zvučna izolacija).



Slika 4. Materijali korišteni za izradu staklenog vlakna

Mineralna i staklena vuna

Mineralna i staklena vuna loši su vodiči topline i zvuka, a osim toga teško su gorivi i imaju visoku temperaturu zapaljenja. Ovakva svojstva čine ih odličnim vatrootpornim materijalima. Oba materijala su otporna na najezde insekata što ih čini odličnima za građevinsku namjenu. Mineralna vuna, a i staklena načinjene su od šljake, kamena, stakla i minerala. Navedene sirovine tale se i razvijaju u filamente (spiralne čestice). Najčešća upotreba ovih materijala uključuje termoizolaciju, vatrootporne barijere, brtve u autoindustriji i kočione elemente.



Vatrostalna opeka

Stakleno vlakno

Mineralna vuna

Slika 5. Najčešće korišteni vatrootporni materijali

2.2. Istraživanja vatrootpornosti

Prema [5] u klasičnom požarnom ispitivanju ispitne su komponente izložene rastućoj temperaturi čija se ovisnost o vremenu prema [6] izražava na sljedeći način:

- a) Celulozni požar (standardni)

$$\vartheta = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

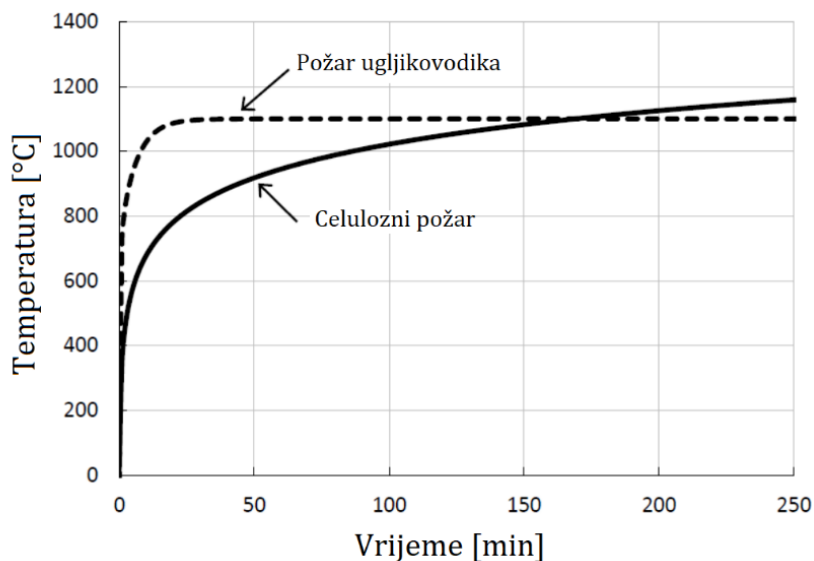
- b) Požar ugljikovodika (prema ISO/DIS 834)

$$\vartheta = 1100(1 - 0.325e^{-0.1667t} - 0.204e^{-1.417t} - 0.471e^{-15.833t}) \quad (2)$$

gdje su

- ϑ - temperatura [$^{\circ}\text{C}$];
- t - vrijeme trajanja požara [min], maksimalno do 360 min.

Na Slici 6. može se vidjeti razvoj temperature ovisno o navedenim vrstama požara. Relevantna vrsta požara za problem ovog rada je celulozni požar koji je najčešći ako govorimo o slučaju požara na klasičnom građevinskom objektu. Razvoj temperature u takvom požaru, kao što potvrđuju krivulje, blaže je prirode i prema takvome će se provoditi scenariji grijanja korišteni tijekom analize dalje u tekstu.



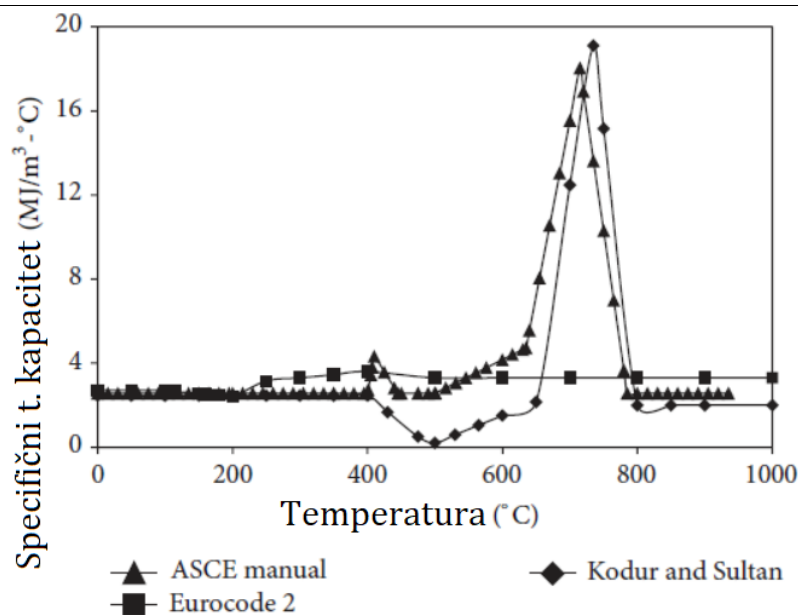
Slika 6. Krivulja razvoja temperature požara [6]

2.2.1. Izvadci iz literature

Ispitivanje materijala DSC metodom

DSC (eng. differential scanning calorimetry) termoanalitički je pristup pri kojemu se ispituje količina topline potrebna da se ispitni uzorak i referentni objekt zagriju do neke temperature. Rezultat mjerenja je funkcija ovisna o temperaturi. I uzorak i referentni objekt cijelo vrijeme moraju se održavati na istoj temperaturi. Načelo odabira temperature ispitivanja je takvo da temperatura držača uzorka bude povećavana linearno kao funkcija vremena. Referentni uzorak mora imati precizno definiran toplinski kapacitet za raspon temperatura pri kojemu se mjeri ispitni uzorak [10].

Istraživači Khaliq i Kodur [7] sakupili su podatke iz više znanstvenih studija o mjerenim specifičnim toplinskim kapacitetima različitih materijala. Na Slici 7. prikazani su različiti rezultati mjerenja s DSC opremom temeljeni na ne posve jednakim standardima. Međutim, pokazano je da je specifični toplinski kapacitet betona u svim mjerenjima skoro konstantan do vrijednosti od oko 400 °C kada doživljava nagli skok između temperatura 700 i 800 °C. Ovo se objašnjava odvijanjem endotermičke reakcije koja je rezultat raspadanja u strukturi materijala što apsorbira veliku količinu energije.



Slika 7. Izvadak iz literature: mjerenje betona DSC metodom

Specifični toplinski kapacitet gipsa pri visokim temperaturama

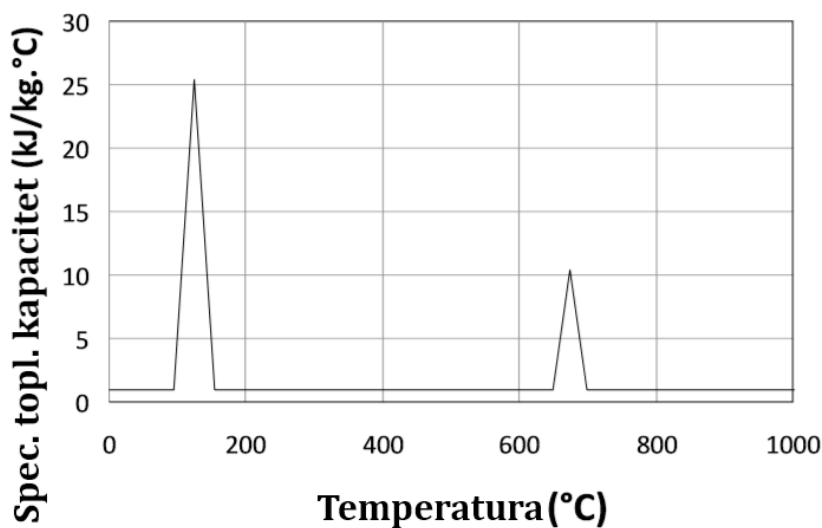
Prema [8] u materijalima se tijekom provođenja ispitivanja specifičnog toplinskog kapaciteta pojavljuju 2 nagla skoka u krivuljama (Slika 8.). Te pojave objašnjavaju se kao pojave dehidracije uzorka. Voda koja isparava iz materijala preuzima toplinu za odvijanje reakcije promjene faznog stanja i prividno povećava specifični toplinski kapacitet. Zbog toga su autori iz navedenog članka naveli izraz za korekciju ove pojave. Dodana vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta zbog isparavanja vode može se izračunati prema

$$\Delta c = \frac{2.26 \times 10^6}{\Delta \vartheta} (e_d f_1 + e_{sl}) f_2 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad (3)$$

gdje je

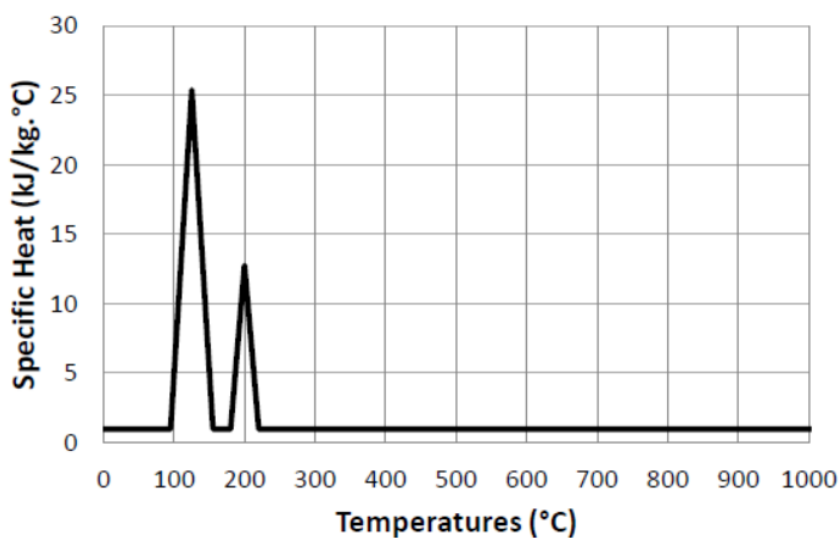
- Δc - prosječno povećanje spec. toplinskog kapaciteta [$\text{J/kg}^\circ\text{C}$],
- e_d - sadržaj isparene vode (postotak ukupne mase),
- e_{sl} - sadržaj slobodne vode (postotak ukupne mase)
- $\Delta \vartheta$ - temperaturni interval [$^\circ\text{C}$],
- f_1, f_2 - korekcijski faktori koji u obzir uzimaju brzinu reakcija (ovisno o jačini toplinskog toka) i utjecaj kretanja čestica vode

Vrijednosti faktora f_1 i f_2 su 1,28 i 1,4.[11]



Slika 8. Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta gipsa o temperaturi prema [10]

Slična opažanja zabilježena su i ovoj doktorskoj studiji [9].



Slika 9. Izvadak iz literature. Mjerenje DSC metodom.

Iako u drugim temperaturnim intervalima, pojava povećanog specifičnog toplinskog kapaciteta prisutna je u svim materijalima s udjelom vlage u svom sadržaju.

2.3. Svojstva ispitivanih materijala

U sklopu ovog diplomskog rada određivan je specifični toplinski kapacitet sljedećih materijala:

- vatrootporne žbuke „Vatrostop“, proizvođač Samoborka, Samobor i
- vatrobetona „Vatrit“, proizvođač VIG, Zagreb

2.3.1. VATROSTOP žbuka

Ovaj materijal proizvod je Samoborke d.d. i namijenjen je protupožarnoj zaštiti metalnih i armirano-betonskih konstrukcija. Po izgledu to je sivi prah, a tehničke karakteristike i svojstva prikazana su u Tablica 1.

Tablica 1. Tehničke karakteristike Vatrostop žbuke

Razredba prema HRN EN 998-1: GP CS II W 2	
Gustoća suhog očvrslog morta (HRN EN 1015-10)	$\approx 550 \text{ kg/m}^3$
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (HRN EN 1015-11)	CS II (1,5 – 5,0 N/mm ²)
Čvrstoća prionjivosti (HRN EN 1015-12)	$\geq 0,2 \text{ N/mm}^2$; SL:B
Vodoupojnost (HRN EN 1015-18)	W 2 ($\leq 0,2 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$)
Paropropusnost, μ (HRN EN 1015-19)	≤ 15
Toplinska provodljivosti, $\lambda_{10,\text{dry}}$ (HRN EN 1745) tab.	$\approx 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (kod 20°C)
Razredba reakcije na požar (HRN EN 13501-1)	A 1
Otpornost prema požaru (HRN DIN 4102-2)	razred F120



Slika 10. Vatrostop protupožarna žbuka [Samoborka]

2.3.2. VATRIT vatrobeton

Vatrit vatrobeton proizvod je tvrtke VIG d.d. iz Zagreba. Namijenjen je upotrebi pri gradnji objekata koji rade u visokotemperaturnim uvjetima. Koristi se za oblaganje konstrukcija poput čeličnih stupova ili ostalih nosivih elemenata koje je potrebno dodatno zaštititi od utjecaja požara. Poznata su sljedeća svojstva ovog materijala.

Tablica 2. Tehničke karakteristike Vatrit vatrobetona

VATRIT vatrobeton	
Struktura	Polipropilenska mikroarmatura PM6/15; 2kg/m ³
	Zrna veličine maksimalno 8mm
	Drobljeni dolomitni agregat
	Mikroarmirani vatrobeton C30/37 (XC4;XS1;CI0,10)
SVOJSTVO	Vrijednost
Gustoća, ρ	2006 [kg/m ³]
Toplinska provodnost, λ	$-0,221\ln(T)+2,0929$ [W/m°C] $\lambda = 0,65152 \frac{W}{m^{\circ}C}$ pri 680 °C

3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Veoma je važno znati kako se građevni materijal ponaša u uvjetima požara. Zato se prije stvarne izgradnje objekata konstruiraju njihovi virtualni modeli i provodi se analiza stvarnih uvjeta požara kako bi se utvrdile moguće slabe točke i zadovoljavaju li postavljene požarne barijere i zidovi zadane uvjete i kriterije. Na kraju, ovakve analize svode se na utvrđivanje otpornosti određenog zida ili elementa gradnje na povećanje temperature, odnosno pri kojoj temperaturi takav element popušta (urušava se). Mehanička svojstva materijala koja su od značajne važnosti u ovakvim analizama su linearno istezanje i gubitak mase u ovisnosti o temperaturi. Kako bi se mogla napraviti takva mehanička analiza potrebno je, između ostalog, poznavati funkciju ovisnosti termodinamičkih svojstava o temperaturi; specifičnog toplinskog kapaciteta $c = c_p(\vartheta) \left[\frac{J}{kgK} \right]$ i toplinske provodljivosti $\lambda = \lambda(\vartheta) \left[\frac{W}{mK} \right]$.

Za rješavanje predstavljenog problema u ovom radu prvo će se napraviti eksperimentalna analiza nakon koje će slijediti provjera numeričkom analizom.

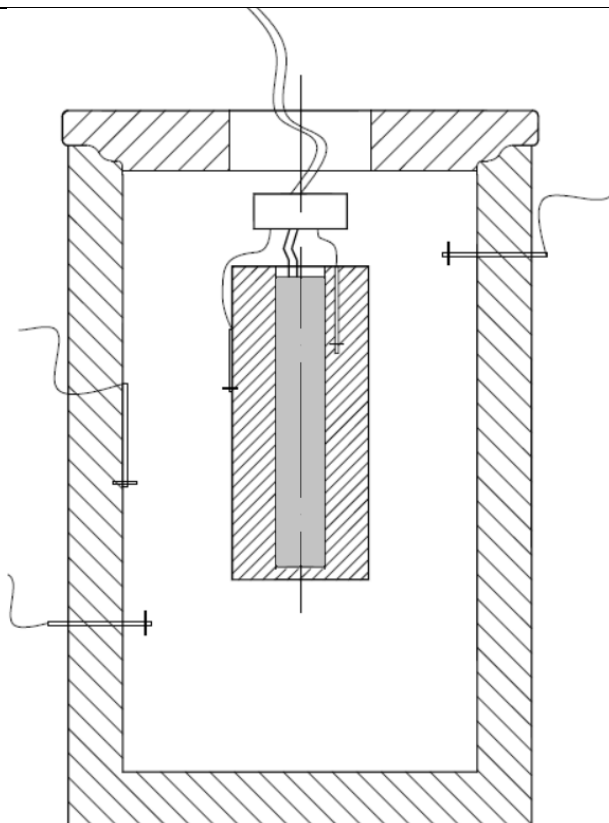
3.1. Opis sustava

Za utvrđivanje specifičnog toplinskog kapaciteta termootporne žbuke i vatrobetona postoji više načina i metoda mjerenja. Za tu svrhu u literaturi se mogu pronaći razni primjeri ispitivanja, ali će se u sklopu ovog rada primijeniti posebno osmišljen i jedinstven sustav za ispitivanje koji se sastoji od sljedećih komponenti:

- uzorak materijala koji se ispituje (cilindrični oblik),
- termoizolacijska posuda u kojoj se nalazi uzorak (cilindrični oblik),
- elektrogrijač s varijabilnim transformatorom
- mjerna oprema: termoparovi, multimetri, računala, itd.

Najvažniji parametar koji se za rješavanje ovog problema prati je temperatura. Iz tog je razloga na svaku komponentu sustava pričvršćen/spojen 1 ili 2 termopara, ovisno o tome koliki volumni temperaturni gradijent na određenoj komponenti postoji.

Na Slici 11. moguće je vidjeti shemu stvarnog sustava predviđenog za mjerenje i točne pozicije termoparova. Sivom bojom označen je električni grijač postavljen u središte uzorka. Dakle, uzorak se nalazi u sredini termoizolacijske posude viseći s poklopca tako da ne postoji direktan dodir sa stijenkom posude u kojoj se uzorak nalazi.



Slika 11. Shematski prikaz sustava izolacijske posude, električnog grijača i ispitnog uzorka

3.1.1. Svojstva komponenti sustava

U sklopu analize podataka dobivenih mjerenjem potrebno je poznavati svojstva komponenti koje sudjeluju u izmjenama topline (mase, volumeni, površine, itd.). U sljedećoj tablici (Tablica 3.) prikazana su svojstva važna za izvedbu analize. Toplinska provodljivost materijala dobivena je u srodnom ispitivanju provedenom na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Tablica 3. Svojstva komponenti mjernog sustava

Svojstvo	Komponenta				
	Zrak	Grijač	Žbuka	Beton	Posuda
Masa [kg]	0,007795	0,0507	0,111	0,435	-
Volumen [L]	6,019	0,020027	0,19781		6,019
Gustoća [kg/m ³]	1,295	2531,58	561,14	2199,08	-
Oplošje [m ²]	-	0,011741	0,02147		0,1669
cp [kJ/kgK] pri 20 °C	1,004	1,200	?		-
λ [W/mK] pri 20 °C	0,025	-	0,1014	2,093	-
Emisivnost	-	-	0,91	0,92	0,047

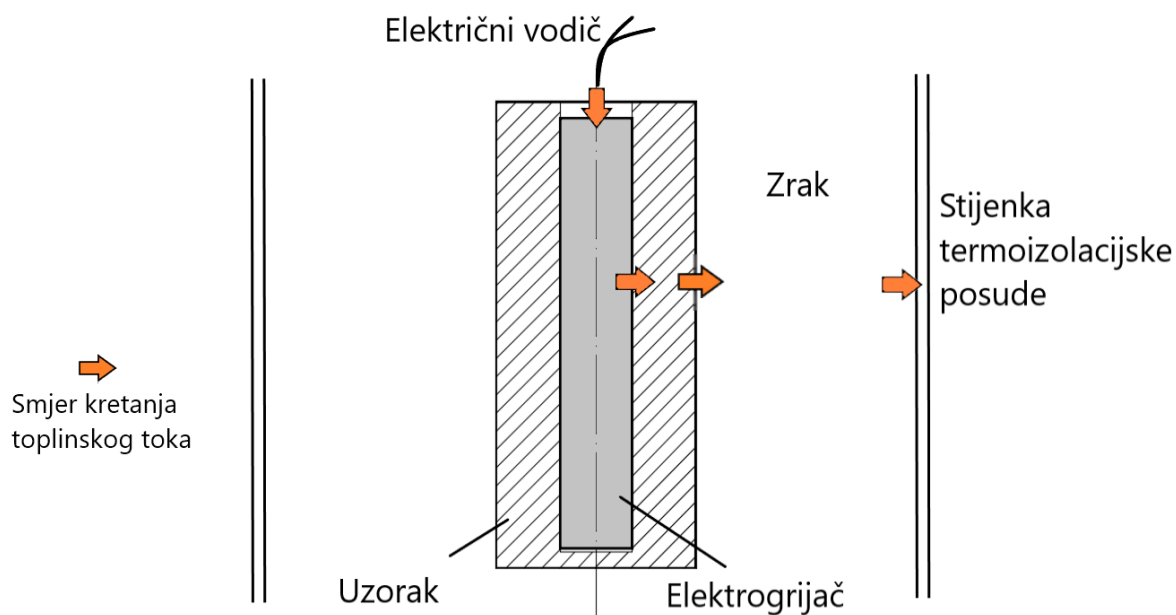
3.1.2. Model prijelaza topline

Elektrogrijač koji se nalazi u središtu cilindričnog uzorka izvor je topline u sustavu. Najznačajniji dio toplinskog toka širi se radialno kroz uzorak, a zanemarivi dio aksijalno (gore i dolje). Toplinski tok polazi iz središta grijača i provodi se kroz grijač prema unutarnjoj stijenci uzorka do vanjske stijenske uzorka gdje postoji prijelaz topline konvekcijom na zrak i zračenjem na unutarnju stijenku termoizolacijske posude.

Matematički model opisanog sustava sastoji se od bilanca energije u više razina (podsustava). Svaka razina predstavlja zatvoreni sustav i određena je prema objektima koji se nalaze u interakciji. Na taj način postoji sljedeća podjela bilanci energija:

- 1) Izmjena energije električnog vodiča i elektrogrijača,
- 2) Izmjena topline provođenjem između elektrogrijača i uzorka,
- 3) Izmjena topline konvekcijom između uzorka i zraka i
- 4) Izmjena topline zračenjem između stijenki uzorka i termoizolacijske posude

Shematski prikaz modela prijelaza topline vidljiv je na Slici 12.



Slika 12. Prikaz kretanja toplinskog toka u sustavu

Prema navedenom prikazu moguće je uočiti izmjene topline između određenih objekata. Međutim, kako je cijeli sustav (pod pretpostavkom) idealno izoliran, mogu se postaviti granice oko sustava i promatrati ulazne i izlazne energije iz istog.

Osnovna energetska bilanca

Uzimajući u obzir cijeli promatrani sustav, unutar njegovih granica može se postaviti ukupna bilanca energije:

$$E_{ul} - Q_g - Q_{uz} - Q_{zr} - Q_z = 0 \quad [J] \quad (4)$$

gdje je

- E_{ul} - ulazna električna energija [J],
- Q_g - toplinska energija koja zagrijava elektrogrijač [J],
- Q_{uz} - toplinska energija koja zagrijava ispitni uzorak [J],
- Q_{zr} - toplinska energija koja se predaje zračenjem na stijenku posude [J],
- Q_z - toplinska energija koja zagrijava zrak u sustavu [J].

Kako je za potrebe utvrđivanja termodinamičkih svojstava navedenih materijala od najveće važnosti odrediti toplinsku energiju koja zagrijava uzorak, tako će se i opis modela orijentirati tako da krajnji rezultat bude Q_{uz} i specifični toplinski kapacitet $c = c_p(\vartheta)$. Prema tome, jednadžba (1) može se preformulirati na sljedeći način:

$$Q_{uz} = E_{ul} - Q_g - Q_{zr} - Q_z \quad [J] \quad (5)$$

S obzirom na to da su poznate temperature komponenti u sustavu, slijede prikladni matematički izrazi koji opisuju članove iz glavne energetske bilance.

Ulazna električna energija

Električna energija koja ulazi u sustav u pretpostavljenom slučaju (bez gubitaka) u 100%-tnoj mjeri pretvara se u ulaznu toplinsku energiju Q_{ul} , a jednaka je električnoj snazi P_{EL} (mjerena u vodiču) integriranoj u vremenu. Podatke o naponu i struji tijekom mjerenja moguće je bilo očitati na multimetrima koji su postavljeni na mjernoj liniji (Poglavlje 3.2.1)

$$E_{ul} = Q_{ul} = \int_{t_0}^{t_i} P_{EL} \cdot dt = \int_{t_0}^{t_i} U \cdot I \cdot dt = U \cdot I \cdot \int_{t_0}^{t_i} dt \quad [J] \quad (6)$$

gdje su

- Q_{ul} - toplinska energija koja ulazi u sustav [J],

- P_{EL} - ulazna električna snaga [W],
- U - napon u vodiču (mjeren voltmetrom) [V],
- I - jakost struje u vodiču (mjerena ampermetrom) [A],
- t_0 - početni vremenski trenutak [s],
- t_i - vremenski trenutak isključivanja elektrogrijača [s].

Toplinska energija predana grijaču

Toplinska energija predana masi grijača Q_g rezultira povećanjem temperature grijača i može se odrediti prema mjerenim vrijednostima temperatura na temelju jednadžbe

$$Q_g = m_g \cdot c_g \cdot (\vartheta_{g,t2} - \vartheta_{g,t1}) \quad [J] \quad (7)$$

gdje je

- Q_g - toplinska energija koja zagrijava elektrogrijač [J],
- m_g - masa elektrogrijača [kg],
- c_g - specifični toplinski kapacitet grijača [J/kgK],
- $\vartheta_{g,t2}$ - temperatura grijača u krajnjem vremenskom trenutku [s],
- $\vartheta_{g,t1}$ - temperatura grijača u početnom vremenskom trenutku [s].

Toplinska energija predana zračenjem

Toplinska energija koja se emitira s površine vanjske stijenke uzorka Q_{zr} i rezultira povećanjem temperature stijenke termoizolacijske posude može se odrediti prema jednadžbi zračenja temeljem poznatih temperatura dviju stijenki.

$$Q_{zr} = \int_{t_0}^{t_i} A_{uz} \cdot C_{12} \left[\left(\frac{T_{su}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right] \cdot dt \quad [J] \quad (8)$$

gdje je

- A_{uz} - površina oplošja ispitnog uzorka [m²],
- C_{12} - konstanta zračenja između dviju stijenki [W/m²(100K)⁴],
- T_{su} - apsolutna temperatura vanjske stijenke uzorka [T],

- T_{sp} - apsolutna temperatura unutarnje stijenke posude [T],
- t_0 - početni vremenski trenutak [s],
- t_i - vremenski trenutak postizanja stacionarnog stanja [s](Slika 13.).

Kako su vrijednosti površine oplošja A_{uz} i konstante zračenja C_{12} konstantne tijekom vremena integracije, mogu se izvući izvan integrala te jednadžba sada glasi

$$Q_{zr} = A_{uz} \cdot C_{12} \int_{t_0}^{t_i} \left[\left(\frac{T_{su}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right] \cdot dt \quad [J] \quad (9)$$

Konstanta zračenja C_{12} svojstvo je određeno emisivnošću stijenke u međudjelovanju te odnosom veličina njihovih površina. Izraz ovisnosti glasi

$$C_{12} = \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_{su}} + \omega \left(\frac{1}{\varepsilon_{sp}} - 1 \right)} \quad [W/m^2(100K)^4] \quad (10)$$

gdje je

- C_c - Stefan-Boltzmannova konstanta zračenja [$W/m^2(100K)^4$],
- ε_{su} - emisivnost stijenke uzorka [-],
- ε_{sp} - emisivnost stijenke termoizolacijske posude [-],

Toplinska energija predana zraku

Masa zraka u sustavu izmjenjuje toplinu konvekcijom s ispitnim uzorkom te sa stijenkom posude. Toplinska energija koja se predaje masi zraka Q_z i rezultira povećanjem temperature zraka u termoizolacijskoj posudi može se odrediti prema mjerenim vrijednostima temperature na temelju sljedećeg izraza

$$Q_z = m_z \cdot c_z \cdot (\vartheta_{z,t2} - \vartheta_{z,t1}) \quad [J] \quad (11)$$

gdje je

- Q_z - toplinska energija predana zraku [J],
- m_z - masa zraka u sustavu [kg],
- c_z - specifični toplinski kapacitet zraka [$J/kg \cdot K$],

- $\vartheta_{z,t2}$ - temperatura zraka u krajnjem vremenskom trenutku [s],
- $\vartheta_{z,t1}$ - temperatura zraka u početnom vremenskom trenutku [s].

Specifični toplinski kapacitet uzorka

Nakon što se prema izrazu (5) odredi toplinska energija Q_{uz} koja zagrijava masu uzorka m_{uz} moguće je odrediti specifični toplinski kapacitet uzorka c_{uz} koji je ispitivan. Navedeno se računa prema sljedećem izrazu

$$c_{uz} = \frac{Q_{uz}}{m_{uz}(\vartheta_{uz,t2} - \vartheta_{uz,t1})} \quad [\text{J/kgK}] \quad (12)$$

gdje je

- Q_{uz} - toplinska energija koja zagrijava masu uzorka [J],
- m_{uz} - masa ispitivanog uzorka [kg],
- c_{uz} - specifični toplinski kapacitet uzorka [J/kgK],
- $\vartheta_{uz,t2}$ - temperatura uzorka u krajnjem vremenskom trenutku [s],
- $\vartheta_{uz,t1}$ - temperatura uzorka u početnom vremenskom trenutku [s].

Važno je napomenuti da je fizički nemoguće montiranje više termoparova u samo središte uzorka na način kako bi jedan mjerio točnu temperaturu grijača, a drugi temperaturu središta uzorka (nekoliko mm razmaka). Navedeno bi uzrokovalo pucanje i degradaciju materijala na tom dijelu pa se stoga temperatura grijača odredila prema mjerenim rezultatima gdje je zagrijavao samo grijač i prikladno se ta informacija iskoristila u ovoj analizi.

Specifični toplinski kapacitet uzorka pridružuje se maksimalnoj prosječnoj temperaturi uzorka postignutoj u jednom mjerenju. Prosječna temperatura uzorka računa se na sljedeći način:

$$\vartheta_{uz,ti} = \frac{(\vartheta_{sr,ti} + \vartheta_{su,ti})}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (13)$$

gdje je

- $\vartheta_{uz,ti}$ - prosječna temperatura uzorka u i-tom trenutku [$^{\circ}\text{C}$],
- $\vartheta_{sr,ti}$ - temperatura središta uzorka u i-tom trenutku [$^{\circ}\text{C}$],
- $\vartheta_{su,ti}$ - temperatura stijenke uzorka u i-tom trenutku [$^{\circ}\text{C}$].

3.1.3. Kritične vremenske točke

Kako bi se unaprijed razjasnilo u kojim trenucima se uzimaju relevantne temperature (krajnja i početna) koje su važne u prethodno navedenim jednadžbama topline u analizi, prikazana je krivulja razvoja temperature u uzorku na središnjem termoparu i onome na stijenci (Slika 13.).

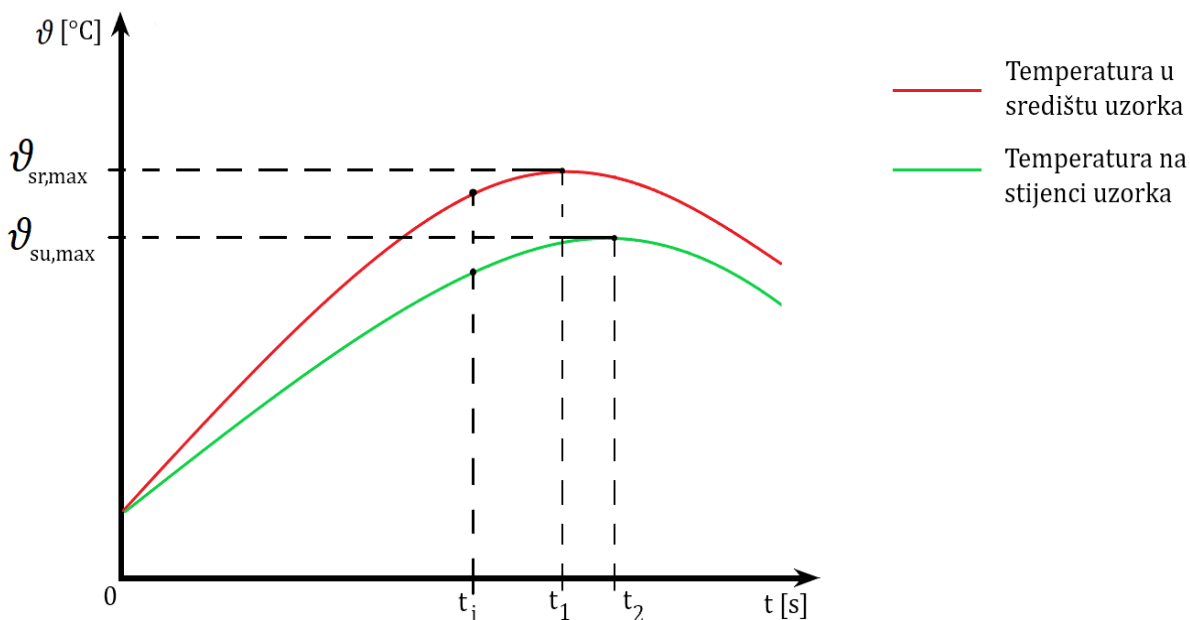
Stacionarno stanje

Zbog različitih pozicija dvaju termoparova u uzorku, onaj na stijenci bilježi sporiji porast temperature i niži maksimum (zeleno krivulja). Početna vremenska točka u nultom trenutku t_0 jednostavna je za odrediti jer obje krivulje počinju iz iste točke, ali ona krajnja koja predstavlja stacionarno stanje sustava dobiva se iz aritmetičke sredine vremenskih točaka s maksimalnim temperaturama. Stoga, izraz za izračun krajnje vremenske točke t_{12} glasi

$$t_{12} = \frac{(t_1 + t_2)}{2} \quad [\text{s}] \quad (14)$$

gdje je

- t_{12} - vrijeme dogovorenog postizanja stacionarnog stanja sustava [s],
- t_1 - vrijeme potrebno za postizanje maksimalne temperature u središtu uzorka [s],
- t_2 - vrijeme potrebno za postizanje maksimalne temperature na stijenci uzorka [s].



Slika 13. Krivulja temperatura mjerenih u uzorku

Točka isključivanja grijača

U jednadžbama termodinamičkog modela ključan je trenutak t_i koji označava vrijeme trajanja uključenosti elektrogrijača u sekundama jer će to vrijeme direktno utjecati na količinu energiju ubačenu u sustav. Tijekom mjerenja bilježi se točno vrijeme isključivanja grijača, a to je u trenutku postizanja unaprijed dogovorene temperature središta (npr. 400 °C ili 500 °C). Na grafu (Slika 13.) označen je opisani vremenski trenutak.

3.2. Provedba mjerenja

Mjerenja na ispitnim uzorcima provedena su u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Zbog mjerenja tijekom duljeg vremenskog perioda, početni temperaturne uvjeti u uzorcima i sustavu razlikovali su se i po 10 °C. Osim toga, veliki faktor tijekom provođenja eksperimenta bila je vlaga u zraku koja se proširila na uzorke tijekom hlađenja sustava i između mjerenja. Temperatura i vlaga uzrokovala su sporiji ili brži trend zagrijavanja uzorka (unošenja topline u sustav) i zbog toga su morale biti uvedene korekcije kako bi analiza bila valjana.

Prilikom određivanja temperaturno ovisnih svojstava materijala, potrebno je napraviti takve uvjete mjerenja koji će isključiti utjecaj ostalih faktora na rezultate. U slučaju utvrđivanja specifičnog toplinskog kapaciteta kada je uzorke potrebno nadzirati termoparovima ili ostalim mjernim uređajima tijekom postupka grijanja, sustav u kojem se uzorak nalazi potrebno je idealno izolirati tako da toplina koja ulazi u sustav može biti kontrolirana (zatvoren sustav).

Analiza se provodila na sljedeći način: u prije opisani zatvoren sustav kreće se s ubacivanjem toplinskog toka preko elektrogrijača (svaki materijal s određenom vrijednošću toka). Od početnog trenutka obavlja se mjerenje temperature u središtu uzorka i stijenke uzorka, kao i temperature zraka u posudi i stijenke posude. Kako se uzorak zagrijava središnji termopar mjeri rapidno povećanje temperature dok onaj vanjski bilježi sporije povećanje. Uzrok tomu je masa grijača, uzorka, isparavanje vode u uzorku itd.

Grijač se isključuje u trenutku postizanja središnje temperature koja je određena scenarijem grijanja, a ta se točka u vremenu bilježi. Svaki uzorak prošao je kroz minimalno 6 scenarija grijanja, a koji se očituju u maksimalnoj temperaturi mjerenoj u uzorku.

Scenarij s minimalnom temperaturom bio je pri 250 °C, a maksimalnom 500 °C. Dakle temperature su povećavane s inkrementom od 50 °C (250, 300, 350, 400, 450 i 500 °C). Redoslijed obavljanja mjerenja nije nužno bio od najmanje do najveće temperature, a u pravilu

je bilo moguće provesti jedno do dva mjerenja u jednom danu zbog potrebnog postizanja istih početnih uvjeta (sustav se u potpunosti morao ohladiti).

Napon na varijabilnom izlazu transformatora (napon koji napaja grijač) u slučaju žbuke iznosio je 150 V (0,7 A), a u slučaju betona 220 V (1 A). Navedeni podaci mjereni su na multimetrima (Poglavlje Mjerna oprema). Prema navedenom bilo je moguće izračunati snagu koja je napajala električni grijač i određivala ulazni toplinski tok u sustav.

Nakon isključivanja grijača u trenutku postizanja željene temperature zbog akumulirane topline u grijaču se u uzorak i dalje dovodi toplota, a stacionarno stanje u sustavu postiglo se par minuta kasnije. U trenutku postizanja stacionarnog stanja bilježi se druga točka u vremenu kako bi se za analizu mogla dobiti vrijednost ubacivane topline.

Po završetku mjerenja poklopac termoizolacijske posude ostavljen je otvoren kako bi se uzorak i cijeli sustav učinkovitije ohladio. Ovo je donijelo i nužnu smetnju prilikom sljedećeg mjerenja, a to je povlačenje vlage iz okolnog prostora nazad u sustav.

3.2.1. Mjerna oprema

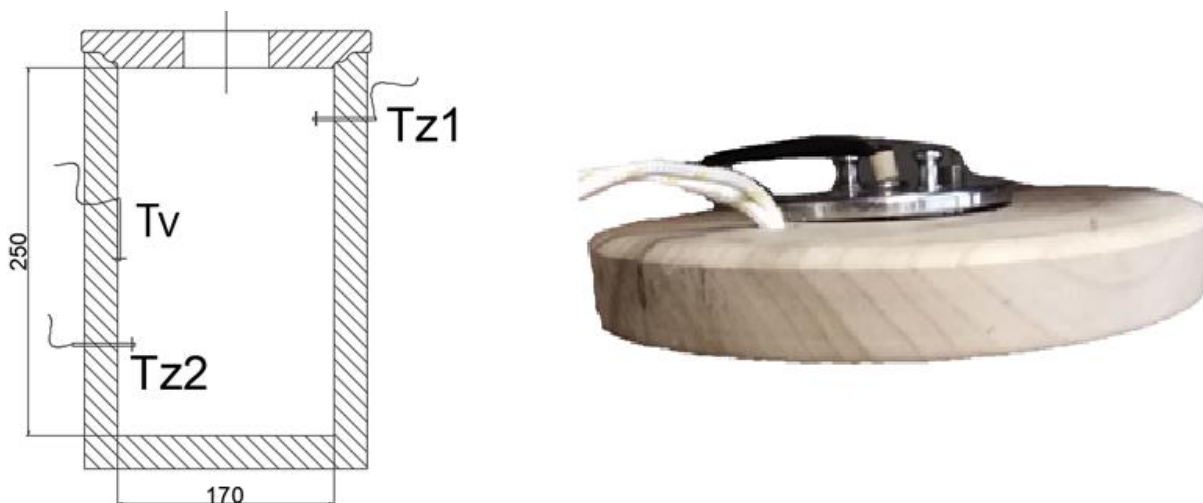
Sva mjerna oprema omogućena je od strane fakulteta i osoblja Laboratorija za toplotu i toplinske uređaje. Od mjerne opreme bile su potrebne sljedeće komponente:

- Termoizolacijska posuda
- Elektrogrijač
- Termoparovi
- Varijabilni transformator
- Multimetri
- Modul za obradu podataka
- Računalo

Termoizolacijska posuda

Kako bi se kontrolirali uvjeti tijekom provedbe ispitivanja uzorci su bili postavljeni u termički izoliranu posudu. Posuda je cilindričnog oblika promjera 170 mm i visine 250 mm (Slika 14.). U posudi su se nalazila tri termopara K tipa; dva koja su mjerila temperaturu zraka u peći i jedan koji je mjerio temperaturu stijenke posude. Stijenka posude limena je i glatka sjajna površina faktora emisivnosti $\varepsilon_s = 0,1$. Izolacijska posuda sastoji se (gledajući iznutra) od unutarnje sjajne stijenke, više međuslojeva za izolaciju, vanjske stijenke (obični lim). Iako je navedena izolacijska posuda nekomercijalni proizvod, proizvedena je u laboratoriju Fakulteta

strojarstva i brodogradnje na Zavodu za tehničku termodinamiku i odlično služi namijenjenoj funkciji, izoliranju ispitnog sustava. Također, na skici su vidljive pozicije triju termoparova (T_v , T_{z1} i T_{z2}) kao i provrta u poklopcu posude kroz koji se montira uzorak. Poklopac ima središnji provrt u koji dolazi čelični umetak s držačima za grijač te bočni provrt za žice termoparova (Slika 14. desno). Dno poklopca obloženo je aluminijskom folijom za dodatnu toplinsku izolaciju.



Slika 14. Skica izolacijske posude s dimenzijama (lijevo). Poklopac (desno).



Slika 15. Realni prikaz termoizolacijske posude (lijevo. Pogled odozgora (desno).

Svaki uzorak na sebi ima montirana 2 termopara; jedan koji mjeri temperaturu središta TC i nalazi se u spomenutom provrtu na dubini od 40 mm od vrha uzorak, dok drugi TS mjeri temperaturu stijenke uzorka (Slika 15.).

Elektrogrijač

Ubacivanje topline u sustav postignuto je elektrogrijačem cilindričnog oblika koji je načinjen od kvarcnog pijeska i keramika (punjenje i kontaktna površina) te bakra (vodič). Grijač ($\phi 17$) je postavljen u provrt promjera 18 mm i oslanja se na donju stranicu uzorka dok s gornje strane visi na vodiču. Prikaz elektrogrijača nalazi se na Slici 16.

Grijač je vodičima spojen na varijabilni transformator preko kojega je moguće kontrolirati ubacivanu električnu snagu (toplinski tok grijača)



Slika 16. Električni grijač

Termoparovi

Vrsta opreme koja služi za mjerenje temperature tijekom ispitivanja materijala jesu termoparovi. Korišteni su termoparovi tipa K (nikal,krom-nikal) (Slika 17.). Ovaj mjerni element funkcionira na temelju termoelektričnog efekta kojeg je otkrio Thomas Johann Seebeck. Sastoji se od dva različita električna vodiča koji pri mjerenim temperaturama proizvode razliku u potencijalu (napon). Termoparovi su tijekom predmetnog mjerenja bili spojeni s jedne strane u jedinicu za obradu mjernih podataka, a s druge strane su mjerili temperature u sustavu. U sljedećoj tablici navedeni su svi termoparovi korišteni tijekom eksperimenta.



Slika 17. Termopar tip K

Tablica 4. Popis korištenih termoparova

Oznaka	Mjerno mjesto
102	Temperatura okolnog (sobnog) zraka
103	Temperatura središta uzorka
104	Temperatura stijenke uzorka
105	Temperatura zraka u posudi
106	Temperatura zraka u posudi
107	Temperatura stijenke posude

Varijabilni transformator

Varijabilni transformator dio je opreme koji služi za regulaciju snage grijača. Ulazni vodiči spojeni su na standardnu utičnicu (220V), a izlazni vodiči spojeni su na električni grijač. Okretanjem potencijometra na transformatoru moguće je odrediti izlazni napon koji napaja grijač (150V za žbuku i 220V za beton). Na Slici 18. vidi se fotografija opisanog varijabilnog transformatora korištenog tijekom mjerenja (lijevo) i slika novog modela tog uređaja (desno)[14]. Izlazne vrijednosti električne energije mjerene su na multimetrima.



Slika 18. Varijabilni transformator korišten tijekom mjerenja (lijevo). Nova izvedba (desno).

Transformator se uključivao (ručno) u isto vrijeme kada je započeto mjerenje, a isključivao u trenutku postizanja zadane temperature u središtu uzorka predviđene za određeni scenarij. S obzirom da je potrebno neko vrijeme da se transformator zagrije, početne vrijednosti ubacivane snage ne odgovaraju onima koje se ustale nakon par minuta, što je uzeto u obzir u proračunu.

Multimetar

Tijekom mjerenja korištena su istodobno uvijek dva multimetra. Jedan je mjerio jakost izlazne struje iz transformatora, dok je drugi bilježio izlazni napon iz transformatora. Produkt ovih dviju veličina daje iznos električne snage kojom se napajao električni grijač u sustavu. Na Slici 19. u nastavku moguće je vidjeti opisane mjerne uređaje u stvarnom eksperimentalnom postavu. Uređaji su jednaki, ali su podešeni na odgovarajući način kako bi se mjerile oba temeljna parametra električne energije.



Slika 19. Mjerni uređaji: ampermetar (lijevo), voltmetar (desno).

Modul za obradu podataka

Tijekom mjerenja korišten je Keysightov 34970A uređaj koji služi za prikupljanje podataka iz mjernih instrumenata, obradu i transfer obrađenih podataka prema računalu. Na komercijalni uređaj nadograđena je dodatna jedinica za prihvatanje većeg broja termoparova (proizvod iz Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje)(Slika 21.). Ovaj uređaj omogućuje čitanje podataka iz termoparova na rezoluciji do 3 decimale, što je i više nego dovoljno za potrebe ovog rada.



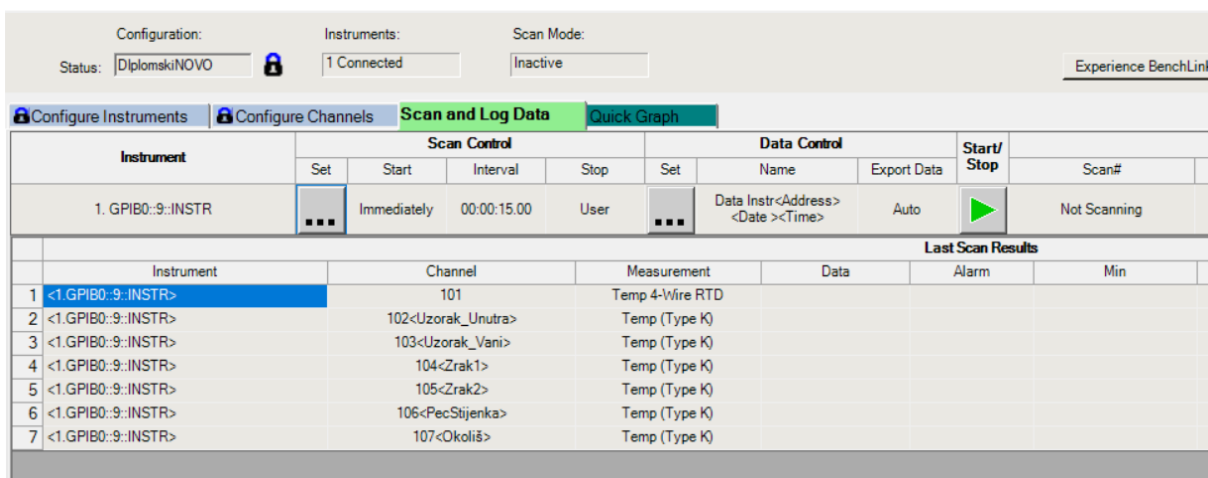
Slika 20. Keysight 34970A za prikupljanje podataka tijekom mjerenja [15]



Slika 21. Nadograđeni Keysight uređaj korišten tijekom mjerenja

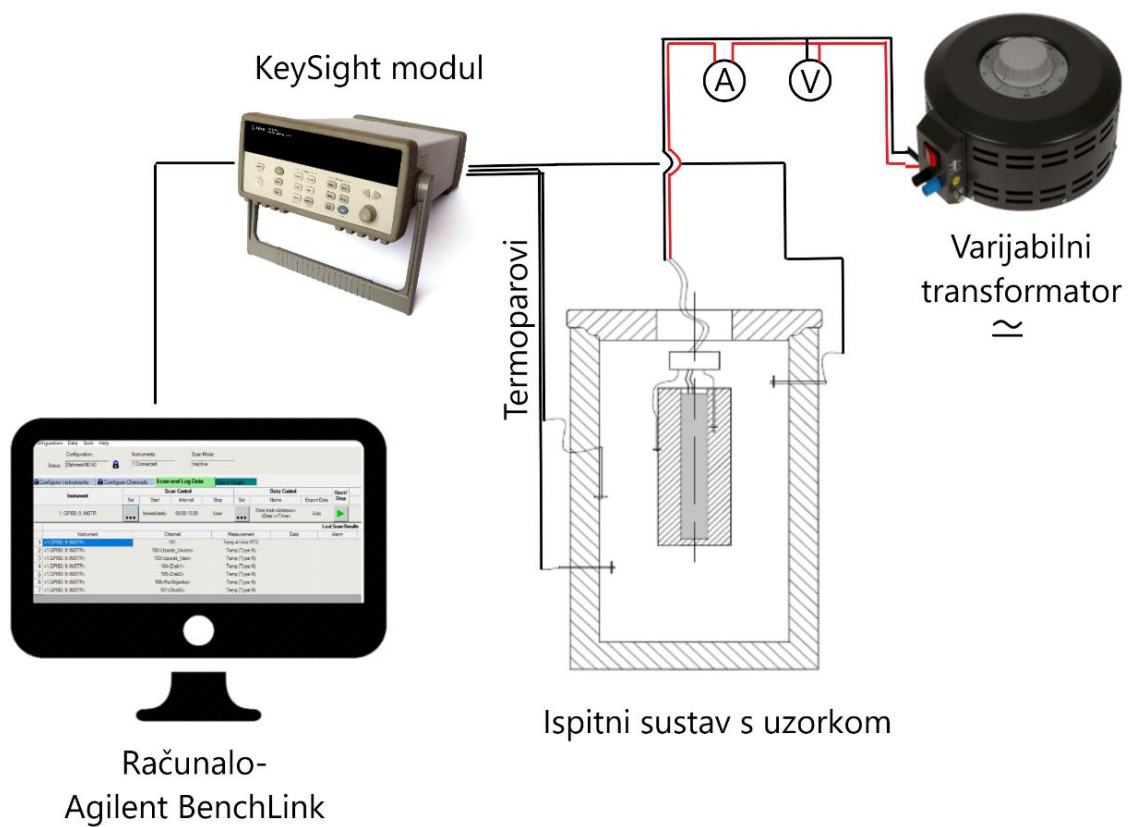
Računalo

Sustav praćenja rezultata, kontroliranja i podešavanja scenarija eksperimenta nalazio se na računalu. Preko softverskog alata Agilent BenchLink Data Logger 3.0. (Slika 22.) moguće je bilo postaviti interval mjerenja, termoparove koji su od interesa tijekom mjerenja i ostale informacije potrebne za konačnu analizu podataka. Podaci dobiveni mjerenjem u programu su strukturirani i prilagođeni daljnjoj upotrebi.



Slika 22. Sučelje sustava Agilent BenchLink 3.0

Shema spajanja mjerne opreme tijekom izvođenja eksperimenta vidljiva je na Slici 23.



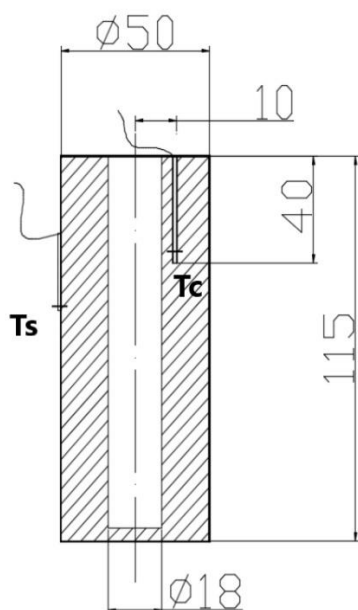
Slika 23. Shematski prikaz eksperimentalne opreme

3.2.3. Geometrija i priprema uzoraka

Uzorci vatrootporne žbuke i vatrobetona proizvedeni su u obliku cilindara promjera 50 mm i visine 115 mm sa središnjim provrtom promjera 14 mm. Važno je spomenuti da su uzorci porozne strukture i nisu u potpunosti homogeni kao što je vidljivo na priloženim fotografijama. Zbog navedenih činjenica strukturne prirode očekivano je odstupanje u mjerenjima dvaju uzoraka istih materijala. Tijekom pripreme za mjerenja na udaljenosti od 10 mm od središta cilindričnog uzorka izbušena je rupa minimalnog provrta za ugradnju termopara. Ta rupa kasnije je zatvorena istim materijalom koji je nastao bušenjem uz primjesu termostakla.

Uzorak je montiran na ranije opisani poklopac termoizolacijske posude. Termoparovi koji mjere temperature na uzorku (središte i stijenku) prolaze kroz provrt na poklopcu posude (Slika 24., desno).

Kotiranu skicu uzorka moguće je vidjeti na. Stvarni prikaz uzoraka vidljiv je na Slici 25. Žbuka je prikazana desno, a betonski uzorci lijevo.



Slika 24. Skica uzorka s dimenzijama (lijevo). Način montiranja uzorka na poklopac (desno).



Slika 25. Uzorci žbuke (desno). Uzorci betona (lijevo).

3.3. Zapažanja

Tijekom prvih mjerenja na ispitnim uzorcima zapažena je značajna količina isparavanja iz termoizolacijske posude, a po završetku mjerenja u posudi u blizini gornjeg poklopca nalazio se kondenzat (u manjoj ili većoj mjeri) u obliku kapljica na rubu otvora. Kondenzat je nakon mjerenja uklonjen.

Osim toga, ispitivanje koje je uključivalo zagrijavanje uzoraka na visoke temperature (iznad 500 °C) vizualno je ostavilo pukotine u uzorku (najviše kod žbuke) kao posljedicu dehidracije uzoraka (Slika 26.). Također, jedan uzorak betona nakon par mjerenja po sebi je imao nakupine stvrdnute pjene iz nepoznatog razloga.

Tijekom svakog mjerenja na početku procesa grijanja snaga koja je ulazila u električni grijač bila je na maksimumu, a vremenom se smanjila i stabilizirala. Razlog tomu je povećana količina struje za vrijeme inicijacije grijanja (veći otpor energiji zbog hladnog grijača).

Tablica 5. Iznos jakosti struje tijekom mjerenja

Vrsta materijala (desno)	Žbuka	Beton
Vrijeme mjerenja (dolje)		
Početak grijanja	$I=0,74\text{ A}$	$I=1,06\text{ A}$
Nakon 5 minuta	$I=0,69\text{ A}$	$I=1,00\text{ A}$



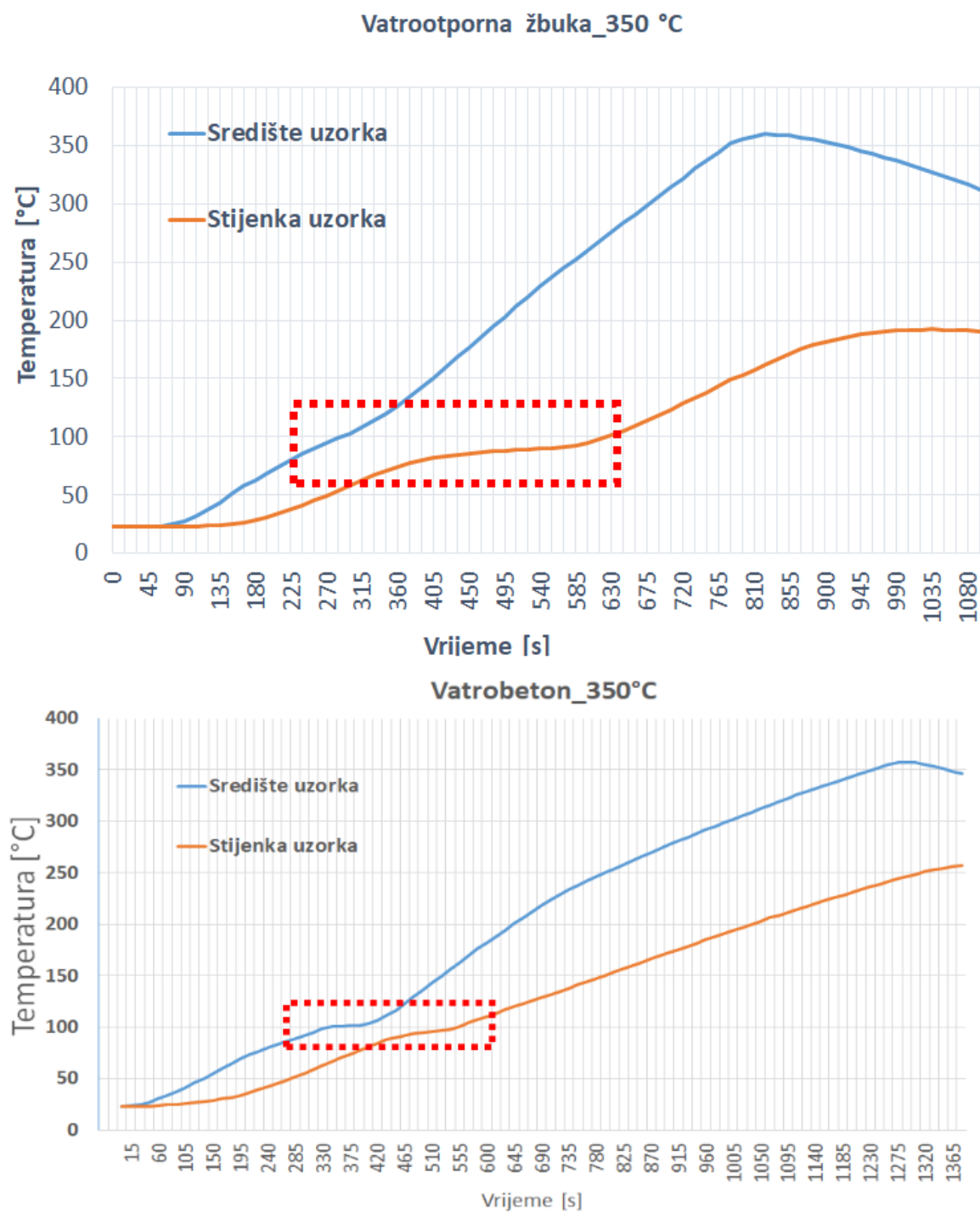
Slika 26. Uzorak betona nakon mjerenja (lijevo). Uzorak žbuke nakon mjerenja (desno).

3.3.1. Utjecaj vlage

Kao što je navedeno u literaturi [8] specifični toplinski kapacitet nekog materijala značajno ovisi o udjelu vlage u tom materijalu. Zagrijavajući uzorke unutar ovog ispitivanja zamijećena je stagnacija temperature (od 90 °C do 120 °C) na termoparu stijenke uzorka, dok je ona u središtu linearno rasla cijelo vrijeme. Dakle, toplina koja je provođenjem iz središta krenula prema stijenci potrošena je na isparavanje sadržaja vode u materijalu te iz tog razloga nije bilo porasta temperature stijenke uzorka. Ovaj proces isparavanja vode (dehidracije materijala) prividno povećava specifični toplinski kapacitet materijala jer je potrebna veća količina energija za postizanje određene temperaturne razlike.

Važno je napomenuti da je ova pojava zamijećena prilikom prvog i drugog mjerenja na istom uzorku jer je u njemu bila prisutna količina vode koja je utjecala na rezultate. Na trećem mjerenju uzorak je bio dehidriran i utjecaj vlage više nije bio značajan. Iz tog razloga se na mjerenjima koja su prikazala opisane stagnacije temperature primijenila korekcija rezultata opisana jednačinom (3).

Na Slici 27. vidi se promjena u nagibu krivulje pri navedenim temperaturama (označeno crvenom površinom). Temperatura stijenke stagnira oko vrijednosti 100 °C, a na krivulji temperature središta vidi se smanjenje nagiba. Graf pripada mjerenjima vatrootporne žbuke.

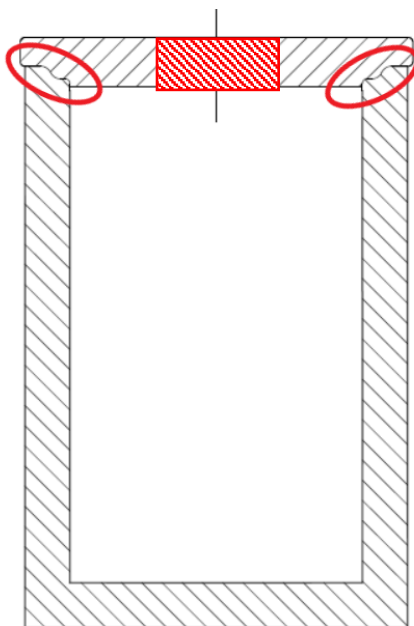


Slika 27. Utjecaj vlage na rezultate zagrijavanja uzoraka

3.3.2. Identifikacija gubitaka tijekom mjerenja

Tijekom mjerenja zbog opaženih kapljica kondenzata na kontaktu termoizolacijske posude i poklopca moguće je bilo zaključiti da je tu mjesto gdje postoji značajan gradijent temperature te da zbog toga para na tom mjestu kondenzira. Na shemi ispod (Slika 28.) moguće je vidjeti točno mjesto gdje se opisani proces odvija.

Osim toga, zbog isparavanja vode iz uzorka postoji bježanje vodene pare iz sustava kroz prostor u poklopcu (označen šrafiranim pravokutnikom). Međutim, taj toplinski gubitak ne uzima se u obzir tijekom proračuna jer se radi o neznčajnoj masi vodene pare.



Slika 28. Prikaz toplinskih gubitaka u sustavu

Osim gubitaka vezanih uz postojanje vlage u sustavu, zbog ne 100% idealno izolirane termoizolacijske posude sigurno postoji zagrijavanje mase stijenke posude te prijelaz topline u okoliš s vanjske stijenke posude. Međutim, ovi gubici zanemarivi su i nisu uzimani u obzir tijekom analize i proračuna rezultata.

Pored navedenih toplinskih gubitaka, praksa govori da postoje gubici u transformatoru tijekom pretvorbe napona, ali u razmatranjima koja su važna za zatvoreni termodinamički sustav ovakvi su gubici nevažni jer ono što se mjeri jest energija u vodiču tik ispred električnog grijača.

3.4. Rezultati mjerenja

Rezultati dobiveni tijekom eksperimentalnih ispitivanja spremeni su u Excel tablice, a sadržavaju podatke o temperaturama zapisanim u pravilnim vremenskim intervalima. Znajući koliko je prošlo vremena od početka do kraja zagrijavanja može se izračunati ukupno ubačena toplinska energija u sustav (Jednadžba (6)).

Tablica tempertaura sastoji se od onolikog broja kolona koliko je termoparova sudjelovalo u mjerenju. Sljedeća demonstracijska tablica (Tablica 6.) prikazuje način na koji su rezultati bili prikazani. Legenda koja sadrži odgovarajuće nazive za termoparove 102,103, itd. nalazi se u potpoglavlju Mjerna oprema (Tablica 4.).

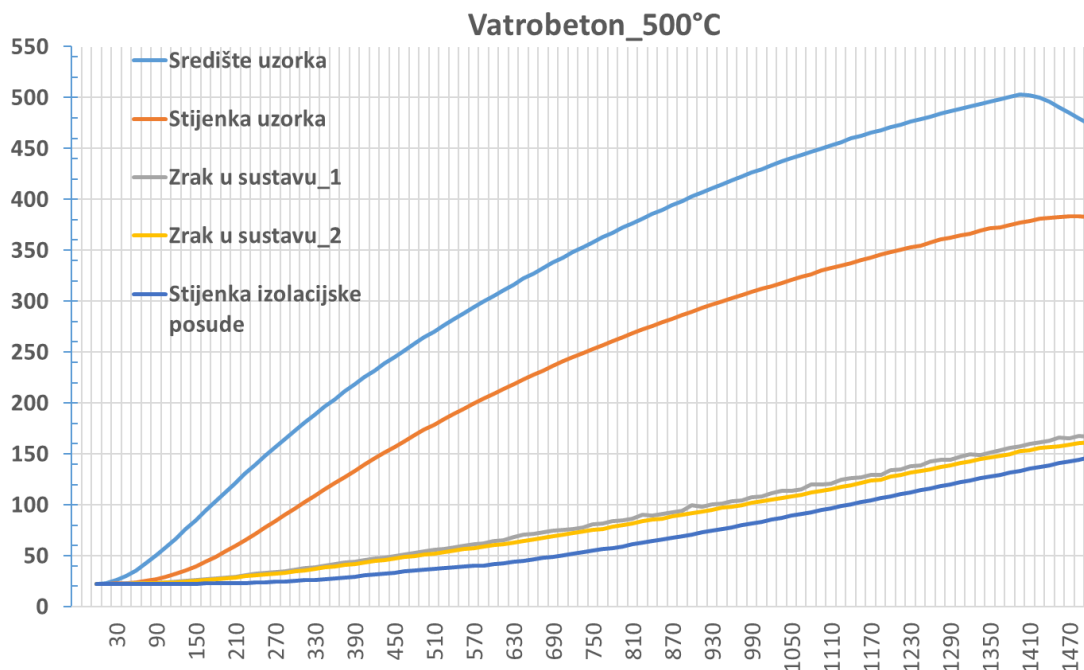
Tablica 6. Način zapisivanja podataka iz mjerenja

Scan	Time	101	102	103	104	105	106	107
1	30.9.2019. 12:55:36	20,881	24,96	24,51	22,637	22,435	22,598	20,853
2	30.9.2019. 12:55:46	20,884	24,929	24,537	22,682	22,567	22,601	20,872
3	30.9.2019. 12:55:56	20,886	24,928	24,541	22,713	22,632	22,59	20,911
4	30.9.2019. 12:56:06	20,883	24,946	24,533	22,76	22,705	22,587	20,906
5	30.9.2019. 12:56:16	20,883	24,949	24,536	22,768	22,729	22,605	20,879
6	30.9.2019. 12:56:26	20,882	25,045	24,53	22,783	22,741	22,58	20,867
7	30.9.2019. 12:56:36	20,88	25,264	24,591	22,791	22,741	22,57	20,884
8	30.9.2019. 12:56:46	20,882	25,671	24,7	22,825	22,754	22,565	20,875
9	30.9.2019. 12:56:56	20,879	26,347	24,842	22,838	22,751	22,593	20,872
10	30.9.2019. 12:57:06	20,878	27,253	25,088	22,855	22,789	22,584	20,879

Krajnji rezultat analize grafički je prikaz ovisnosti specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi. S obzirom da su za svaki materijal ispitana po 3 uzorka, a na svakom uzorku u prosjeku je napravljeno 6 ispitivanja, po završetku ispitivanja svakom materijalu pridruženo je minimalno 18 točaka koje su sadržavale informaciju o specifičnom toplinskom kapacitetu i temperaturi kojoj isti pripada.

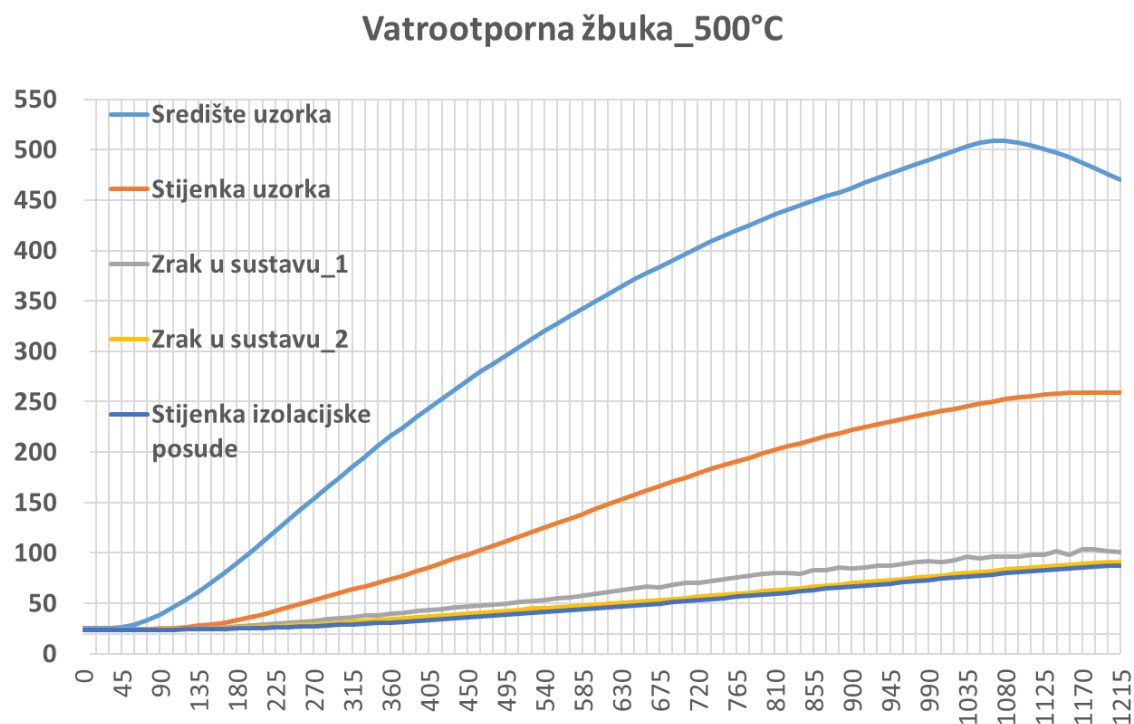
Za temperaturu kojoj se pridružuje navedeno termodinamičko svojstvo odabran je prosjek temperature kroz cijeli volumen uzorka u trenutku postizanja stacionarnog stanja (opisano prethodno u tekstu).

Nakon što su podaci sortirani u Excel tablice bilo je moguće napraviti krivulje temperaturnog razvoja u uzorcima tijekom zagrijavanja i hlađenja (Slika 29.).



Slika 29. Prikaz temperaturnog profila termobetona pri zagrijavanju do 500°C

Moguće je uočiti na krivulji temperature stijenke uzorka da ne postoji opisana stagnacija u porastu temperature zbog ishlapljivanja vode iz uzorka. Razlog tomu jest što je navedeni uzorak već prošao nekoliko ciklusa mjerenja (grijanja) koji su za posljedicu već imali dehidraciju uzorka te nije postojala značajna količina vode koja bi mogla naknadno ishlapiti.

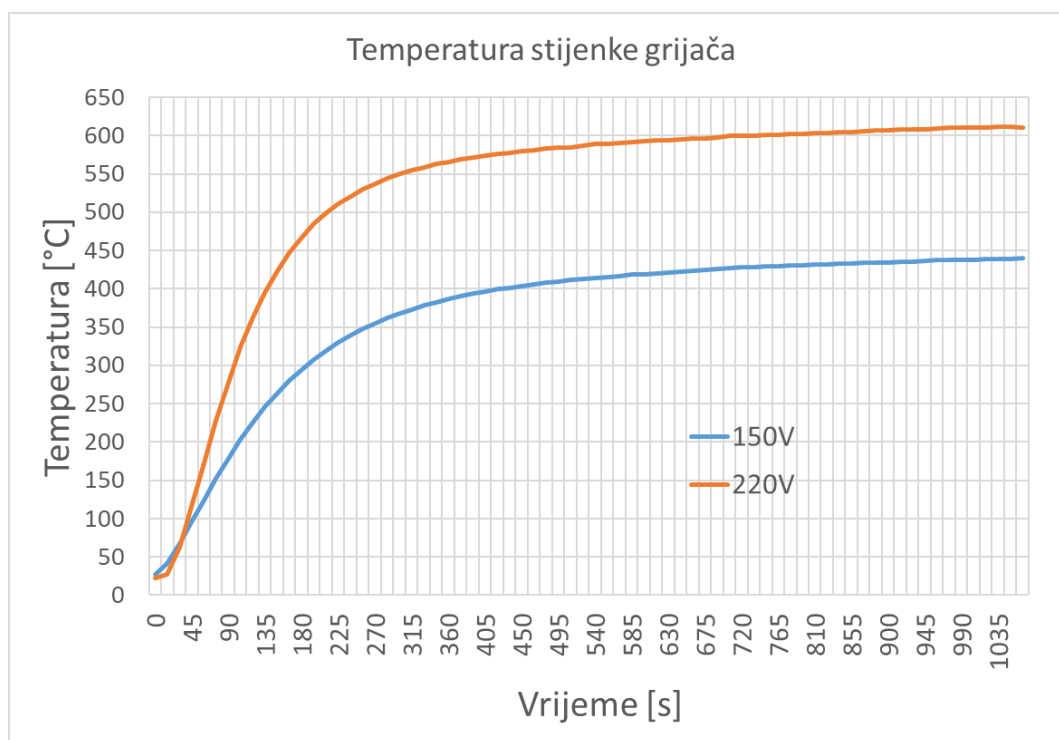


Slika 30. Prikaz temperaturnog profila vatrootporne žbuke pri zagrijavanju do 500°C

S obzirom na to da točni tehnički podaci o električnom grijaču nisu bili dostupni tijekom analize, grijač je zasebno podvrgnut ispitivanju kako bi se utvrdila dinamika njegovog ponašanja prilikom zagrijavanja. Na taj način izmjereni podaci o grijaču su se mogli primijeniti na analizu zagrijavanja cijelog sustava.

Eksperimentalni postav i mjerna oprema koji su korišteni pri ispitivanju grijača u potpunosti su bili jednaki kao u slučaju analize uzoraka materijala. Grijač je bio ispitan na sljedeći način: u termoizolacijsku posudu (koja je korištena i za ostala mjerenja) bio je postavljen samo grijač bez uzorka. Mjerenje je započelo u trenutku paljenja transformatora spojenog na vodiče grijača. Ispitivanje je napravljeno pod istim naponima koji su korišteni tijekom analize vatrootporne žbuke i termobetona (150V i 220V). Izmjerene jakosti struje na ampermetru tijekom oba mjerenja odgovarale su onima u slučaju osnovne analize (0,7A u slučaju žbuke i 1A u slučaju betona).

Točni cilj ovog dodatnog ispitivanja bio je odrediti krivulju temperaturne ovisnosti grijača o vremenu zagrijavanja te njegov specifični toplinski kapacitet. Rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku.

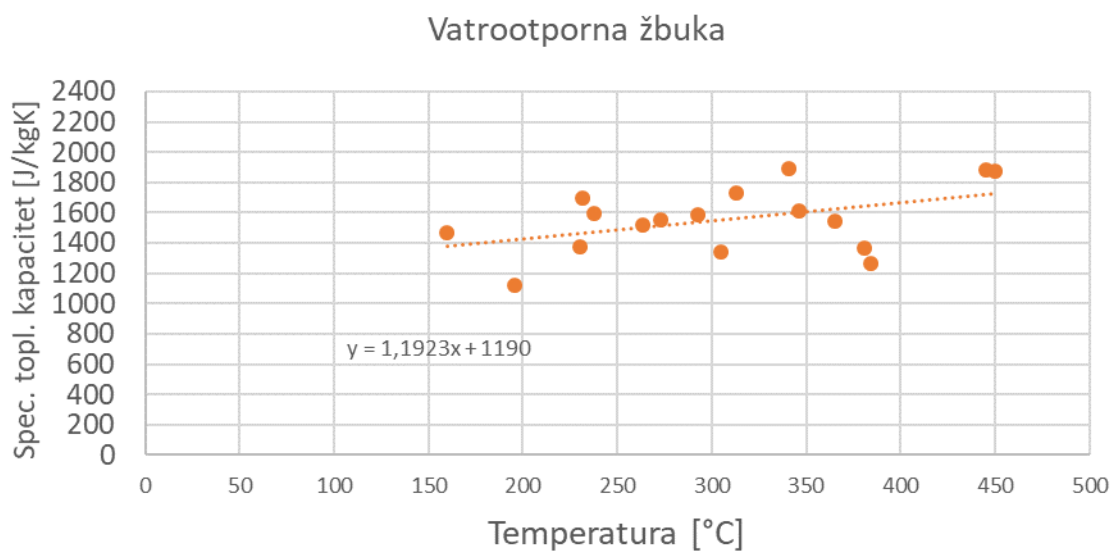


Slika 31. Krivulja ovisnosti temperature stijenke grijača o vremenu. Zagrijavanje pri 150V.

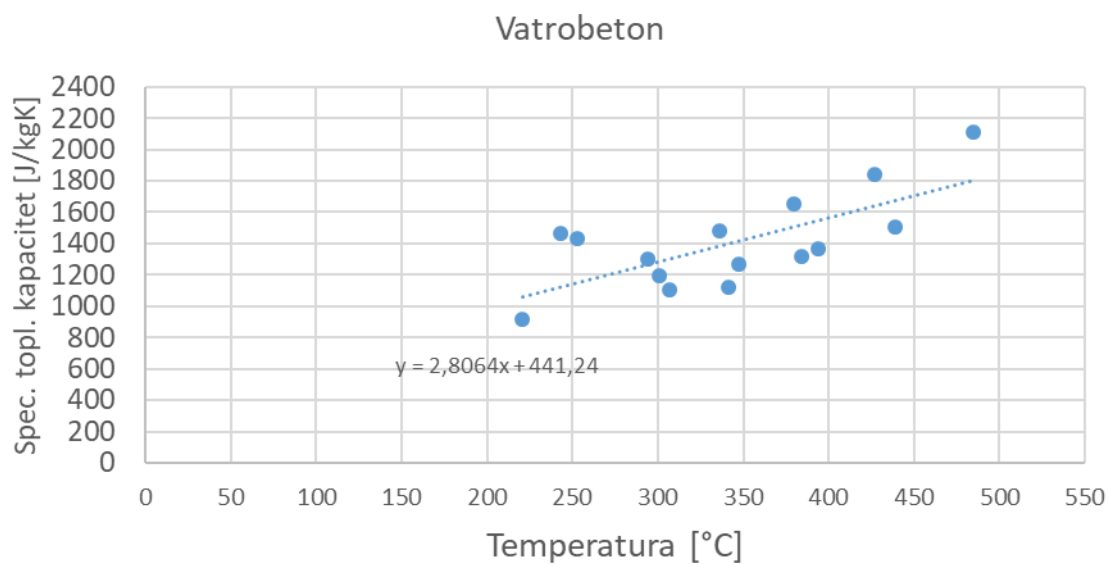
Tablica 7. Specifični toplinski kapacitet elektrogrijača

Temperatura [°C]	20	100	200	300	400
c_p [J/kgK]	1200	1250	1300	1400	1600

Rezultati dobiveni mjerenjem specifičnog toplinskog kapaciteta materijala vatrootporne žbuke i vatrobetona prikazani su u nastavku (Slika 32. i Slika 33.).



Slika 32. Specifični toplinski kapacitet vatrootporne žbuke u ovisnosti o temperaturi



Slika 33. Specifični toplinski kapacitet vatrobetona u ovisnosti o temperaturi

4. NUMERIČKA ANALIZA

U sklopu utvrđivanja termodinamičkih svojstava materijala poželjno je napraviti numeričku provjeru eksperimentalnih mjerenja kako bi se utvrdila ispravnost rezultata i zaključaka donesenih temeljem toga. Pristupajući rješavanju problema potrebno je odabrati valjani model prijelaza topline u sustavu. Cilj numeričke analize je potvrditi trend i zaključke dobivene na temelju rezultata mjerenja. Odstupanja su očekivana, zbog različitih faktora koji onemogućuju potpuno podudaranje rezultata ovih dviju metoda pri provođenju analize predstavljenog problema.

Numerička analiza predstavljenog problema provedena je u računalnom alatu ANSYS (Transient Thermal modul).

4.1. Opis analize

Tijekom numeričke analize prioritet je bio motrenje temperature uzorka pa je stoga ostatak komponenti izdvojen iz ovog postupka. Umjesto stvarnih komponenti koje sudjeluju u numeričkoj analizi uvedeni su adekvatni rubni uvjeti. Umjesto fizičkog sudjelovanja grijača u simulaciji predstavljen je razvoj temperature na unutarnjoj stijenci uzorka. Vrijednost te temperature dobivena je na temelju ranije odrađene eksperimentalne analize.

Postupak provjere eksperimentalnih rezultata temeljio se na praćenju dobivenih temperatura stijenke uzorka numeričkom analizom. Kao ulazni parametri u numeričkoj analizi bili su podaci iz eksperimentalne analize: specifični toplinski kapacitet i temperatura unutarnje stijenke uzorka te temperatura okolišnog zraka.

Rezultat numeričke analize je vremenski razvoj temperature na vanjskoj stijenci uzorka koji je uspoređen sa stvarnim vremenskim razvojem temperature stijenke mjerenim tijekom eksperimenta.

Tijekom svakog pojedinog mjerenja mijenjani su ispitni uvjeti (početne temperature i različiti scenariji grijanja). Stoga se u numeričkoj provjeri vodilo računa da specifični početni i rubni uvjeti svakog pokusa odgovaraju onima koji su u stvarnosti zabilježeni u laboratoriju. U nastavku slijedi matematički model na kojem se temelji numerički rješavač i detalji o izradi geometrije i postavkama rješavača.

4.2. Matematički model

Model prijenosa topline koji se koristi u numeričkoj metodi rješavanja zasniva se na temeljnoj jednadžbi provođenja topline u krutinama. Prema [16] polazna jednadžba provođenja topline u Kartezijevom koordinatnom sustavu, bez izvora topline glasi

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \quad (15)$$

u kojoj

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (16)$$

predstavlja temperaturnu provodnost (eng. thermal diffusivity) i izražava se u m²/s.

U cilindričnom koordinatnom sustavu, r, φ, z , jednadžba (15) poprima oblik

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{\Phi_v}{\rho c} \quad (17)$$

Prema [16] može se pretpostaviti dominantno širenje topline samo u smjeru polumjera uzorka r . Radi toga iščezavaju sljedeći članovi u prethodnoj diferencijalnoj jednadžbi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0; \quad & \text{i} \quad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = 0; \quad & \text{i} \quad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \varphi^2} = 0 \end{aligned}$$

te se ista transformira u oblik

$$\lambda(t) \left(\frac{\partial^2 \vartheta(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial r} \right) = \rho c(t) \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial t} \quad (18)$$

gdje je

- $\vartheta(r,t)$ - temperatura [°C],
- $\lambda(\vartheta)$ - toplinska provodnost [W/mK],
- ρ - gustoća materijala [kg/m³],
- c - specifični toplinski kapacitet materijala [J/kgK],
- t - vrijeme [s]
- r - koordinata ($0 \leq r \leq D/2$, D je vanjski promjer uzorka).

Koristeći eksplicitnu metodu prema [17], za izračun temperature određene ćelije u određenom vremenskom trenutku koristi se samo informacija o temperaturama susjednih ćelija što dovodi do jednostavne računalne sheme operacija:

(i) Za ćeliju u sredini modela (Slika 34.) vrijedi:

$$\vartheta'_m = F_0 \left[\frac{2(\lambda_{m-1,m} \cdot \vartheta_{m-1} + \lambda_{m+1,m} \cdot \vartheta_{m+1})}{\lambda_{m-1,m} + \lambda_{m+1,m}} + \vartheta_m \left(\frac{1}{F_0} - 2 \right) \right] \quad (19)$$

gdje je F_0 definiran kao

$$F_0 = \frac{(\lambda_{m-1,m} + \lambda_{m+1,m}) \cdot \Delta t}{2\rho c(\Delta r)^2} \quad (20)$$

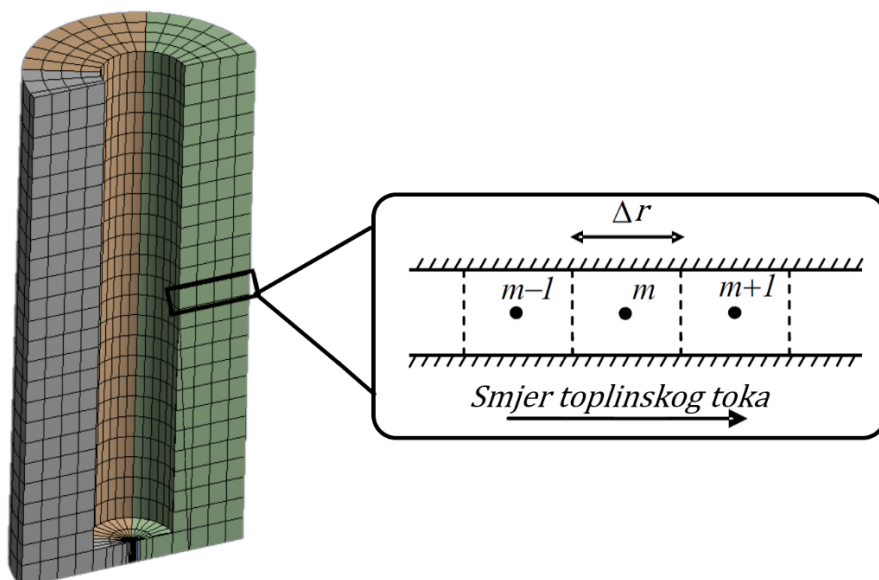
ϑ'_m je temperatura ćelije m u sljedećem vremenskom koraku, dok je $\lambda_{i,j}$ toplinska provodnost pri prosječnoj temperaturi ćelija i i j :

$$\lambda_{i,j} = \lambda \left(\frac{\vartheta_i + \vartheta_j}{2} \right). \quad (21)$$

Numerička stabilnost ove eksplicitne metode zahtijeva da je

$$\Delta t \leq \frac{\rho c(\Delta r)^2}{(\lambda_{m-1,m} + \lambda_{m+1,m})}. \quad (22)$$

Kako je dominantno širenje topline u radijalnom smjeru, prikazat će se takav isječak modela koji prikazuje ćelije numerirane prema jednadžbama (Slika 34.).



Slika 34. Diskretizacija sredine uzorka prema dominantnom širenju topline

(ii) Za rubnu ćeliju (Slika 35.) vrijedi:

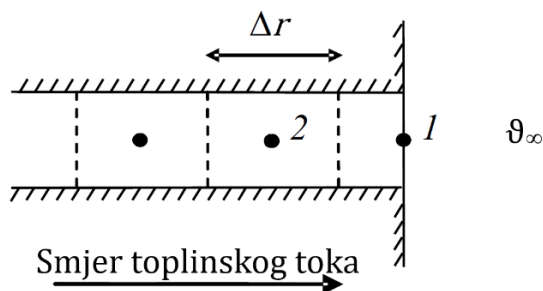
$$\vartheta'_m = 2F_0 \left[\vartheta_2 + \frac{\alpha \Delta r}{\lambda_1} \vartheta_\infty + \vartheta_1 \left(\frac{1}{2F_0} - 1 - \frac{\alpha \Delta r}{\lambda_1} \right) \right] + \omega \varepsilon \sigma [(\vartheta_\infty + 273)^4 - (\vartheta_1 + 273)^4] \frac{2\Delta t}{\rho c \Delta r} \quad (23)$$

gdje je F_0

$$F_0 = \frac{\lambda_1 \Delta t}{\rho c (\Delta r)^2},$$

- $\alpha(\vartheta)$ - koeficijent konvekcije [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$],
- ϑ_∞ - temperatura okolišnog zraka [$^\circ\text{C}$],
- ω - geometrijski faktor,
- ε - emisijski faktor,
- σ - Stefan-Boltzmannova konstanta [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$].

Grafički prikaz mreže na opisanom rubnom dijelu moguće je vidjeti na Slici 35.

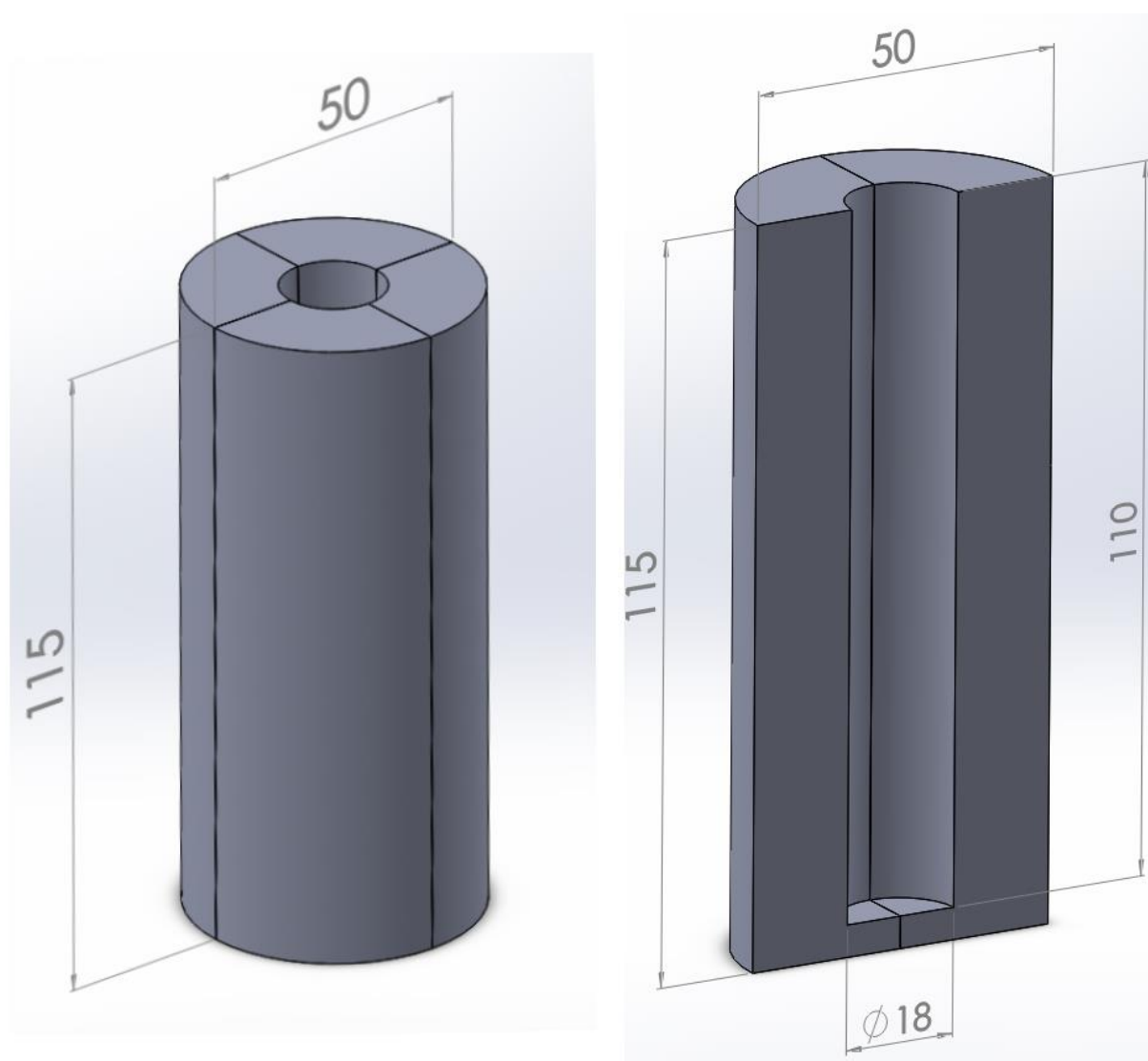


Slika 35. Diskretizacija modela na rubu uzorka

4.3. Izrada geometrije i mreže

Geometrija uzorka izrađena je u softverskom paketu Solidworks 2017 prema stvarnim dimenzijama uzorka izmjerenim u laboratoriju. Dimenzije ispitnog uzorka mogu se pogledati na tehničkom crtežu u Prilogu I.

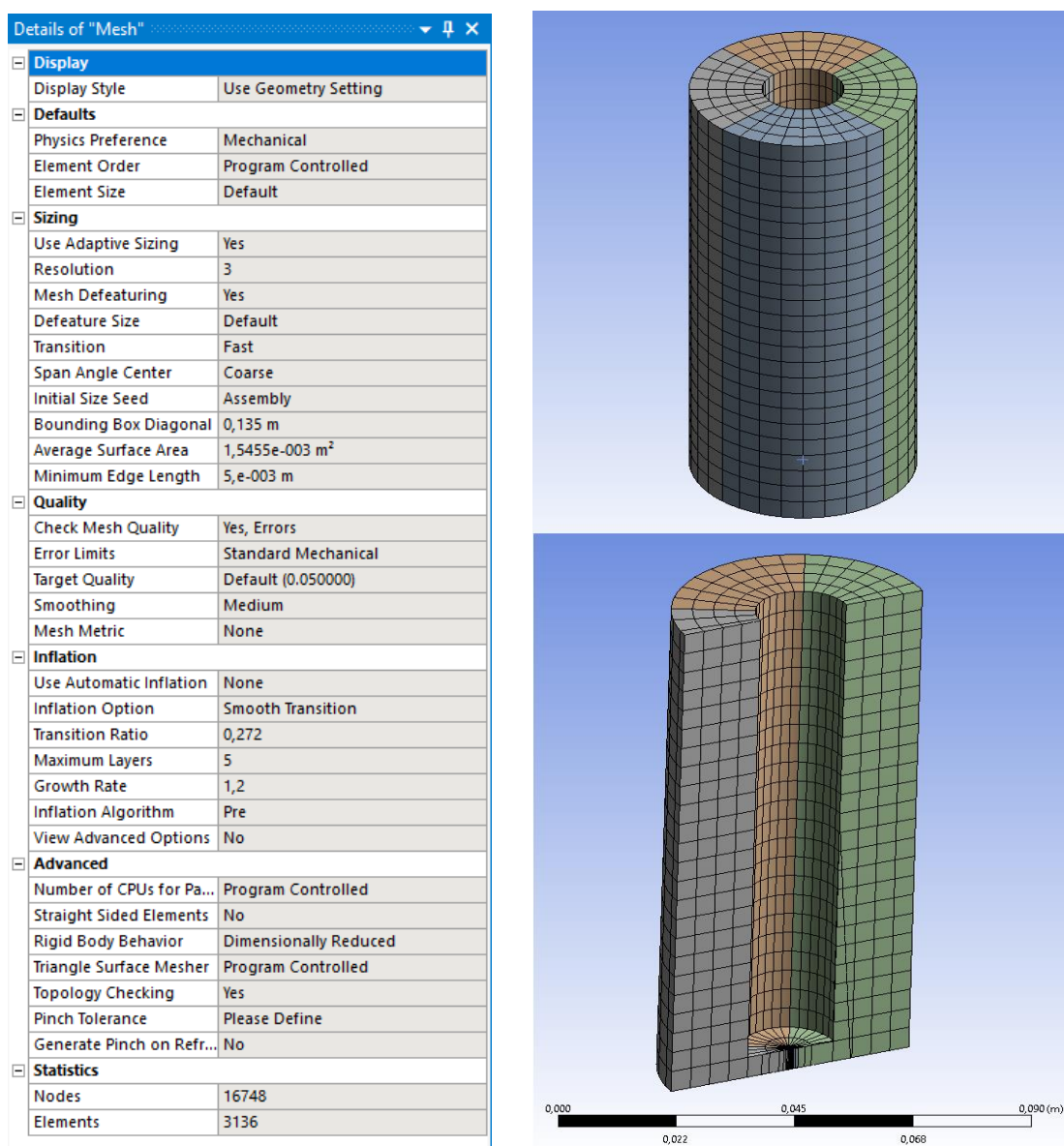
Tijekom ekstrudiranja modela pazilo se da uzorak bude simetrično podijeljen na 4 dijela kao što je vidljivo na Slici 36. Na ovaj način model je bio pravilno pripremljen za izradu mreže u sljedećem koraku. Iako je podijeljen na dijelove, uzorak se i dalje ponaša kao jedno kruto tijelo jer su dijelovi idealno spojeni.



Slika 36. Model ispitnog uzorka izrađenog u SolidWorks-u.

Nakon što je dio iz Solidworks-a uvezen u Mechanical modul ANSYS-a bilo je potrebno odrediti metodu izrade mreže (način podjele uzorka na sitnije dijelove). Pravilna podjela modela uzorka na djeliće skraćuje vrijeme potrebno za numeričku simulaciju i pogoduje ciljanoj analizi određenih dijelova uzorka. Na taj način može se preciznije odraditi analiza rubnih dijelova uzorka (unutarnja stijenka gdje je kontakt s grijačem i vanjska stijenka). Ciljana analiza dijelova u numeričkom modelu olakšava usporedbu sa stvarno izmjerenim temperaturama pomoću termoparova u eksperimentu.

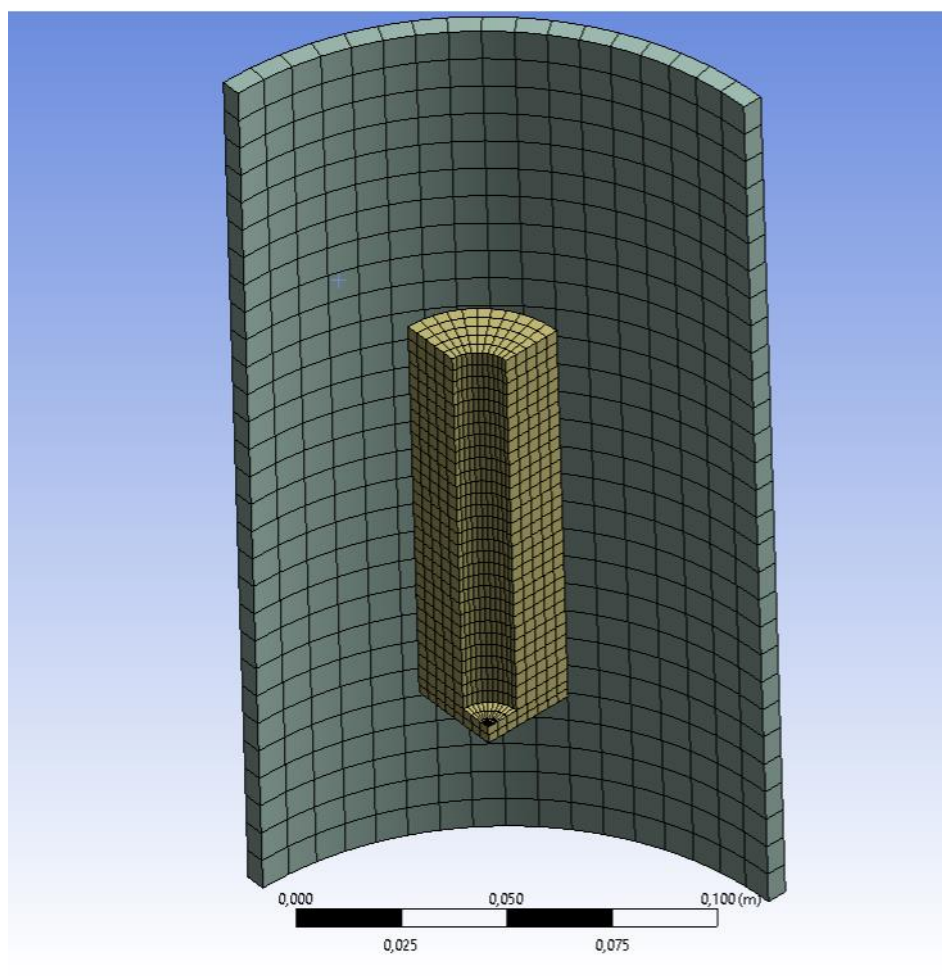
Za izradu mreže odabrana je heksagonalna metoda s dodatnom višezonskom podjelom. Na priloženoj grafici (Slika 37.) vidljiv je način na koji je napravljena mreža modela uzorka.



Slika 37. Detalji izrade mreže (lijevo). Prikaz mreže (desno).

Rezolucija mreže odabrana je najbolja moguća (najveći broj ćelija) u rasponu koji dopušta ANSYS-ov rješavač (maksimalno 500.000 ćelija).

Osim geometrije uzorka u numeričku analizu bilo je potrebno uključiti geometriju termoizolacijske posude za pravilno definiranje rubnog uvjeta zračenja. Kako je dominantni prijenos topline u radijalnom smjeru, za analizu je model uzorka i stijenke posude podijeljen na četvrtine kako bi se uštedilo na broju potrebnih računalnih operacija. Ispod je prikazana mreža podijeljenog uzorka i modela stijenke posude.



Slika 38. Mreža uzorka i stijenke posude

Tijekom izrade mreže i geometrije isprobano je više mogućih kombinacija uzorka i stijenke posude (više ploha u modelu, cijeli sustav uključen, itd.). Uključivanje ostalih stranica i ploha u simulaciju nije donosilo značajne promjene u rezultatima, a zahtijevalo je dodatni procesorski angažman. Stoga je kao optimalni rezultat izabrana kombinacija ploha vidljiva na Slici 38.

4.4. Rubni i početni uvjeti

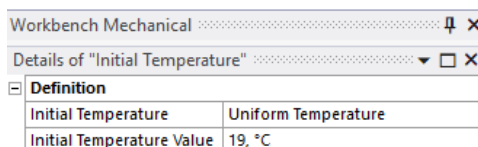
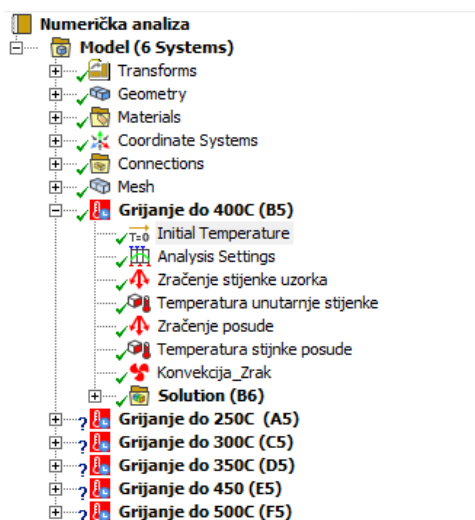
Rubni i početni uvjeti su preuzeti iz eksperimentalne analize te su primijenjeni u numeričkoj analizi kao ulazni parametri ili kao referentne vrijednosti za provjeru (promjenjiva temperatura vanjske stijenke uzorka).

Početni uvjeti

Temperatura cijelog sustava na početku mjerenja je jednake vrijednosti što znači da je u početnom trenutku sustav u stacionarnom stanju. U Prilogu II prikazana je tablica sa svim početnim temperatura tijekom mjerenja.

Početna temperatura (iz tablice rezultata eksperimenta) u ANSYS rješavaču primijenjena je se za cijeli sustav preko unosa „Initial Temperature“. U grafičkom prilogu u nastavku, na primjeru početne temperature od 19,1 °C , može se vidjeti način unosa početnog uvjeta.

Osim navedenog globalnog početnog uvjeta, informacija o početnim temperaturama pojedinih stijenki ili zraka sadržana je u promjenjivom rubnom uvjetu (nulti trenutak).



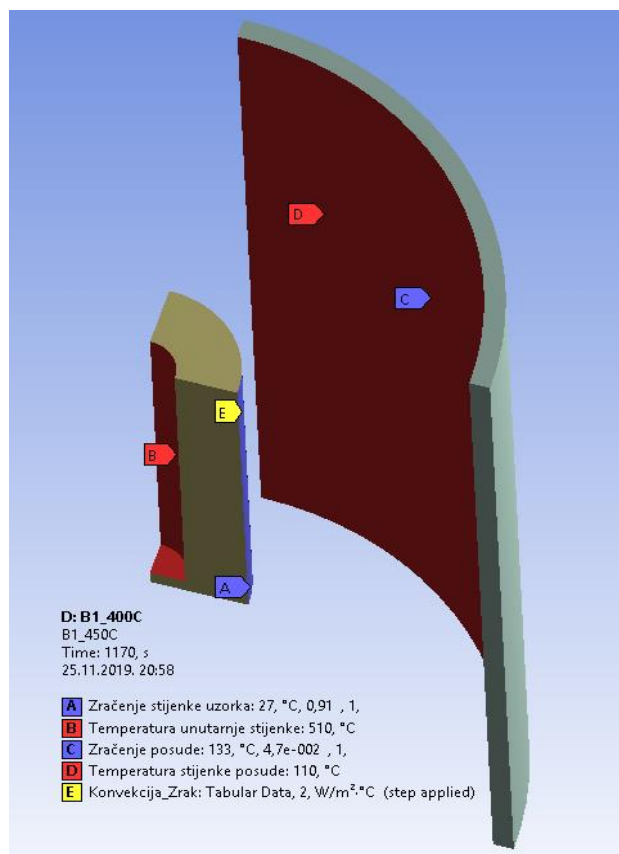
Slika 39. Zadavanje globalnog početnog uvjeta

Rubni uvjeti primijenjeni u numeričkoj analizi također su dobiveni iz rezultata eksperimentalne analize. Prema podacima o temperaturi grijača koja se posebno mjerila, uz korekcije je u numeričkom modelu na unutarnju stijenku primijenjen pridruženi promjenjivi rubni uvjet temperature stijenke. Nadalje, na isti način je prema rezultatima mjerenja temperature zraka u posudi (termoparovi mjere temperaturu zraka na dvije pozicije u posudi) primijenjen rubni uvjet temperature okolišnog zraka u numeričkoj analizi. Na Slici 39. moguće je vidjeti sve uvjete zadane u izborniku postavki rješavača:

- Temperatura unutrašnje stijenke uzorka
- Konvekcija sa stijenke uzorka prema zraku
- Zračenje stijenke uzorka prema stijenci posude
- Temperatura stijenke posude

U Prilogu II moguće je pogledati tablice svih podataka o temperaturama korištenim u numeričkoj analizi.

Na Slici 40. može se vidjeti način zadavanja spomenutih promjenjivih rubnih uvjeta temperature unutarnje stijenke uzorka i temperature okolišnog zraka (zraka u sustavu).

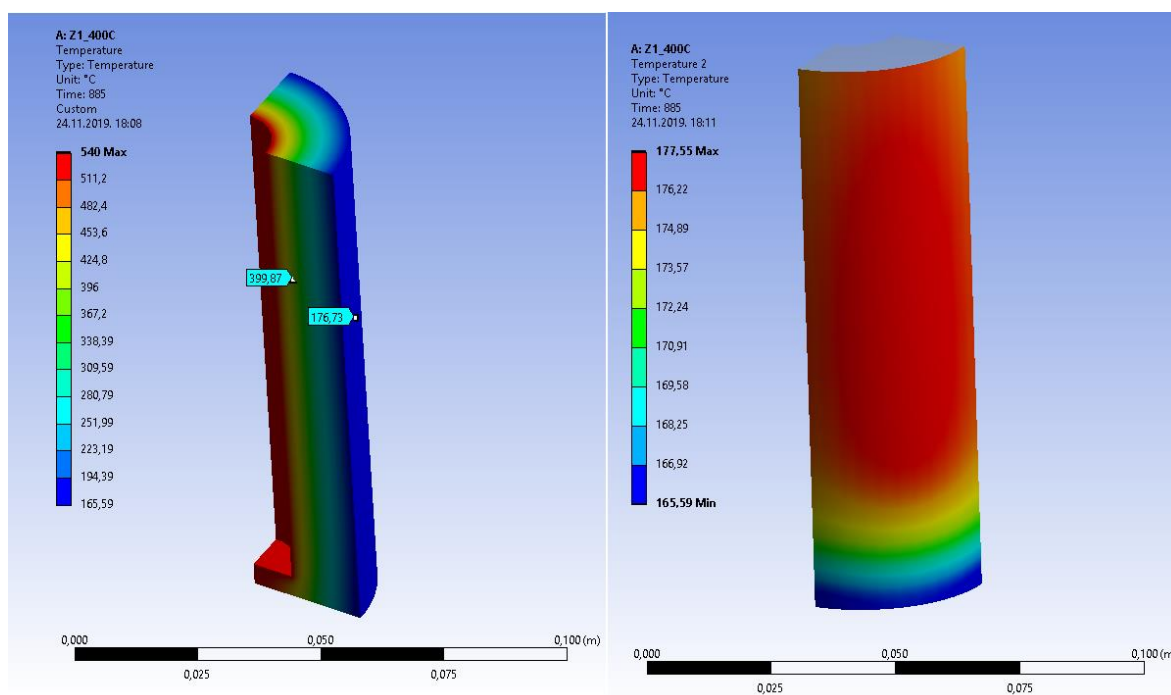


Slika 40. Zadavanje rubnih uvjeta (ANSYS Mechanical)

4.5. Rezultati numeričke analize

Prikaz rezultata biti će priložen za određene scenarije u obliku temperaturnih mapa, dok će krajnji prikaz rezultata biti dan na grafu, kako bi konačna usporedba bila preglednija.

Prvi uzorak vatrootporne žbuke zagrijavan je u nekoliko scenarija od kojih je ovdje za provjeru numeričkom analizom odabran scenarij zagrijavanja do 400°C (Slika 41.).



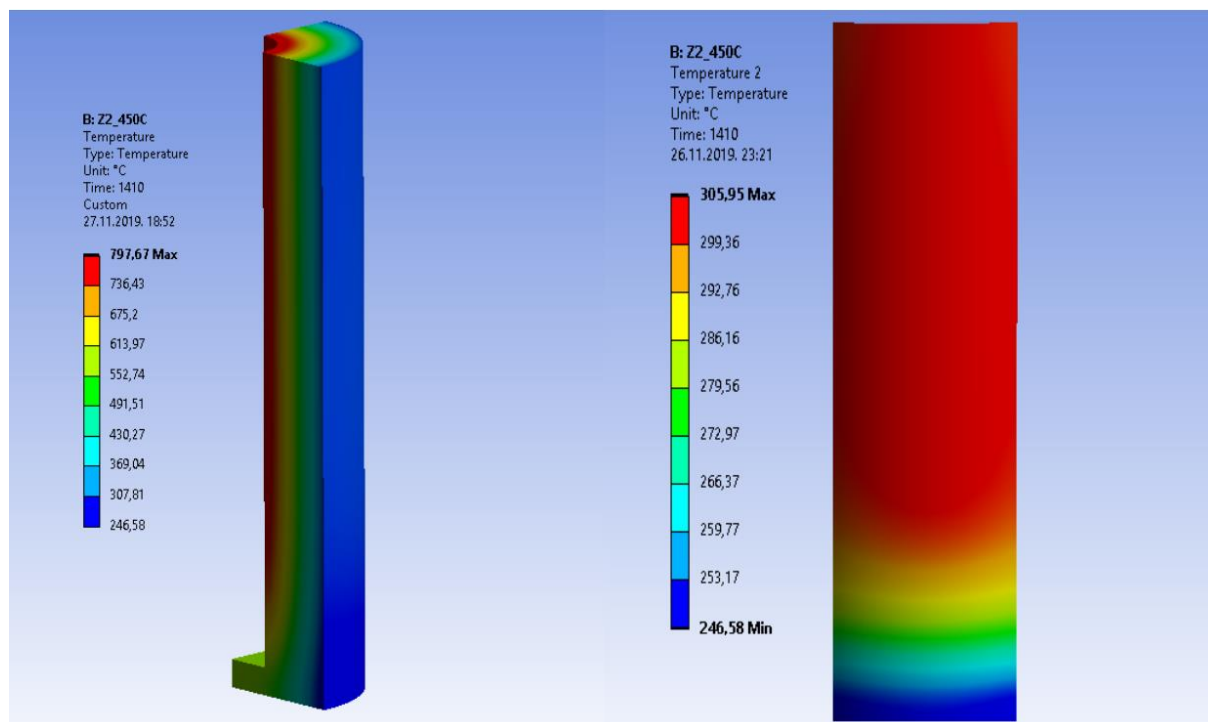
**Slika 41. Temperaturna mapa prvog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo).
Temperatura vanjske stijenske (desno).**

Prema priloženim slikama vidljivo je kako je zbog pozicije grijača na udaljenosti 5 mm od donjeg ruba uzorka temperaturna raspodjela tako orijentirana da je donji dio ostao najmanje zagrijan, odnosno najniže je temperature. To odgovara zapažanjima tijekom eksperimenta kada je i zrak u donjem dijelu posude bio hladniji (utjecaj strujanja zraka je zanemariv).

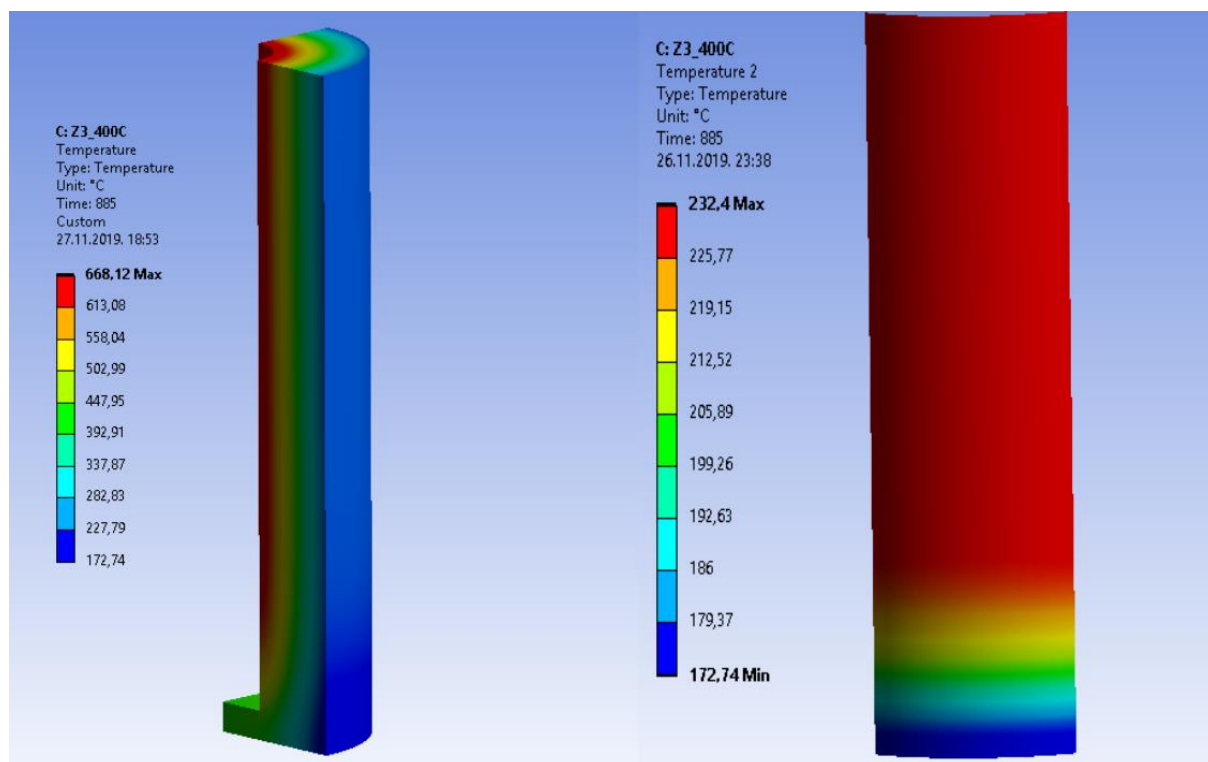
Scenarij grijanja koji je u eksperimentu proveden bez utjecaja vlage izabran je kao referentni scenarij provjere specifičnog toplinskog kapaciteta. Pritom je biran scenarij zagrijavanja uzorka na višu temperaturu, što je poželjno, jer numerički model u tom slučaju razvije dovoljno veliku razliku u odnosu na eksperimentalne rezultate, a broj računalnih operacija je u željenom graničnom intervalu.

Na sljedećoj stranici moguće je vidjeti rezultate numeričke analize vatrootporne žbuke (Slika 42. i Slika 43.).

Temperaturne mape vatrootporne žbuke

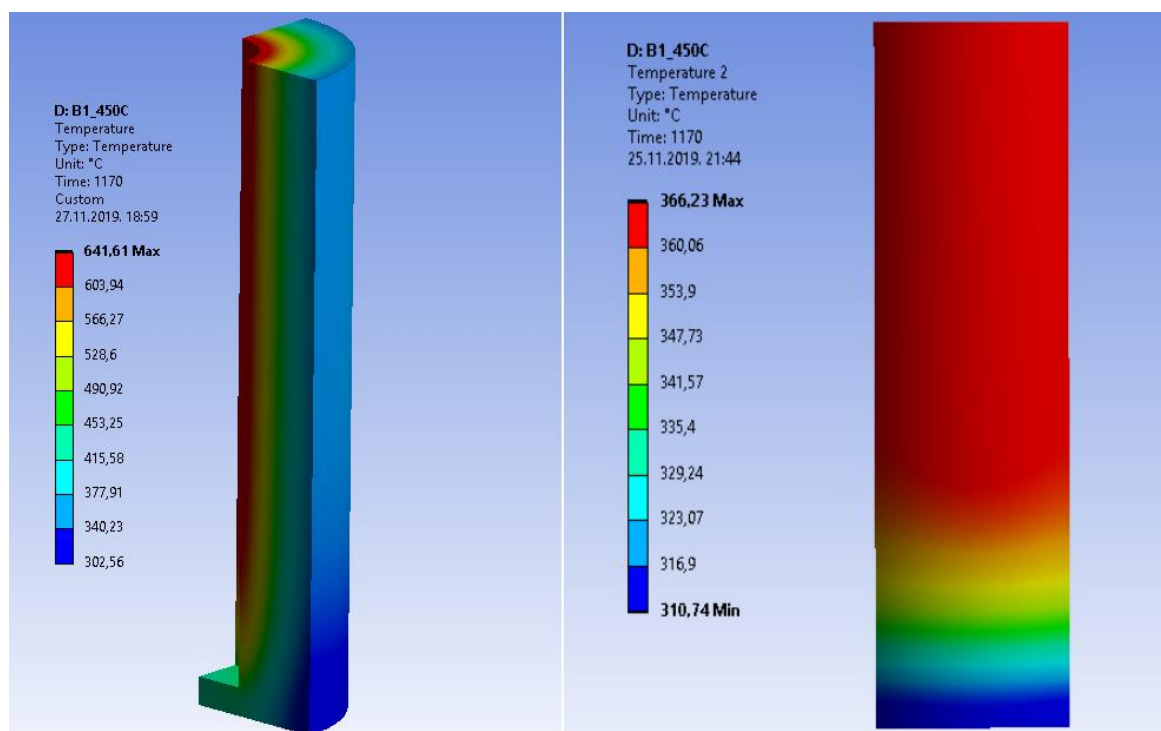


Slika 42. Temperaturna mapa drugog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).

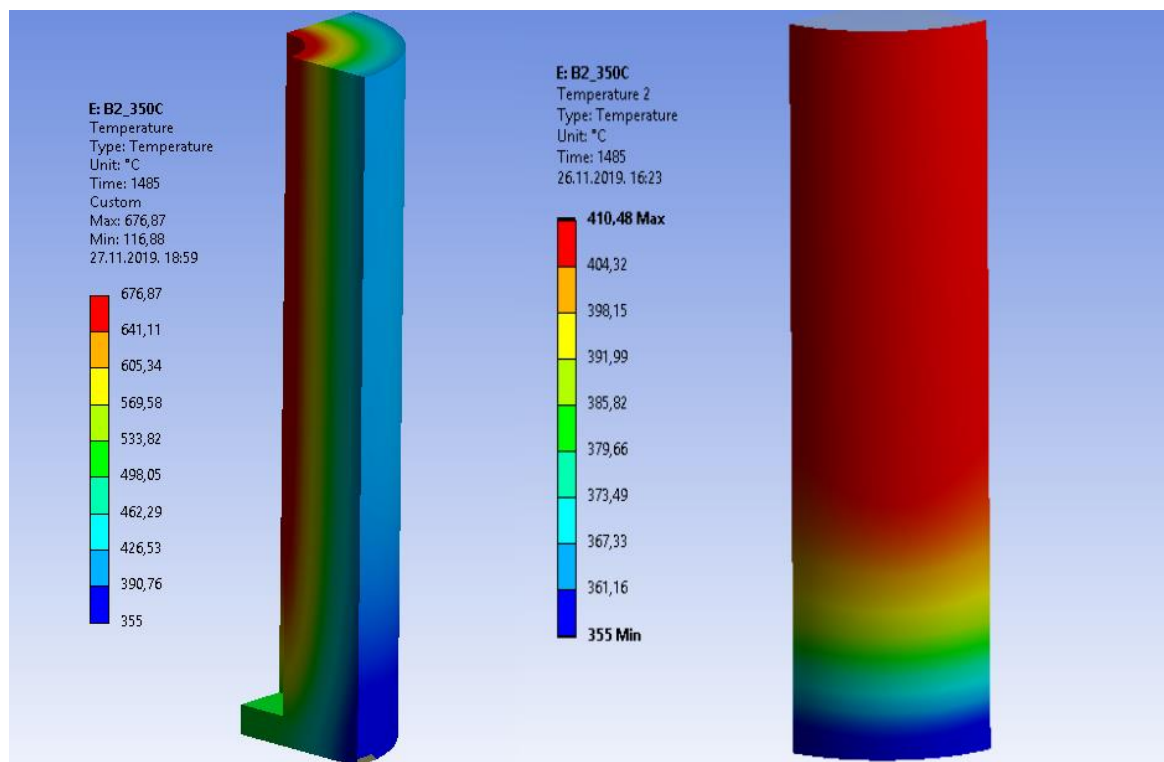


Slika 43. Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).

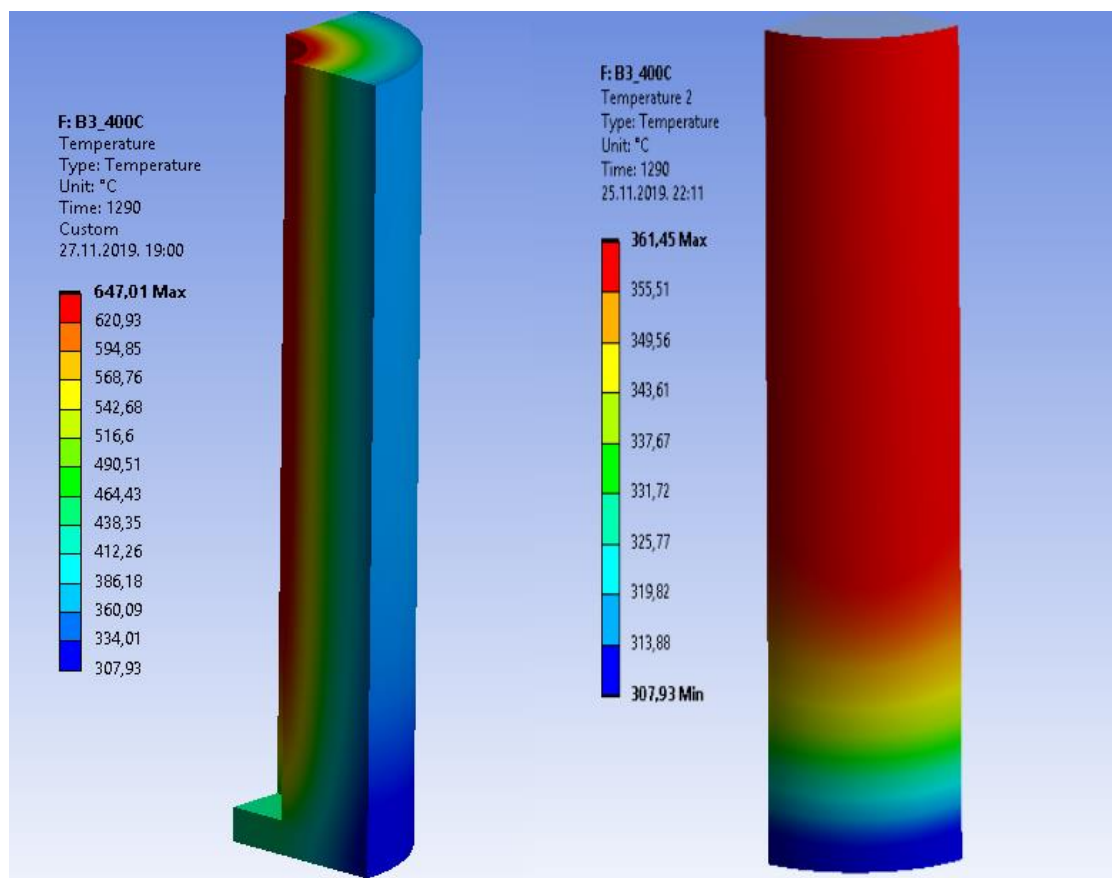
Temperaturne mape vatrobetona



Slika 44. Temperaturna mapa prvog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).



Slika 45. Temperaturna mapa drugog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).



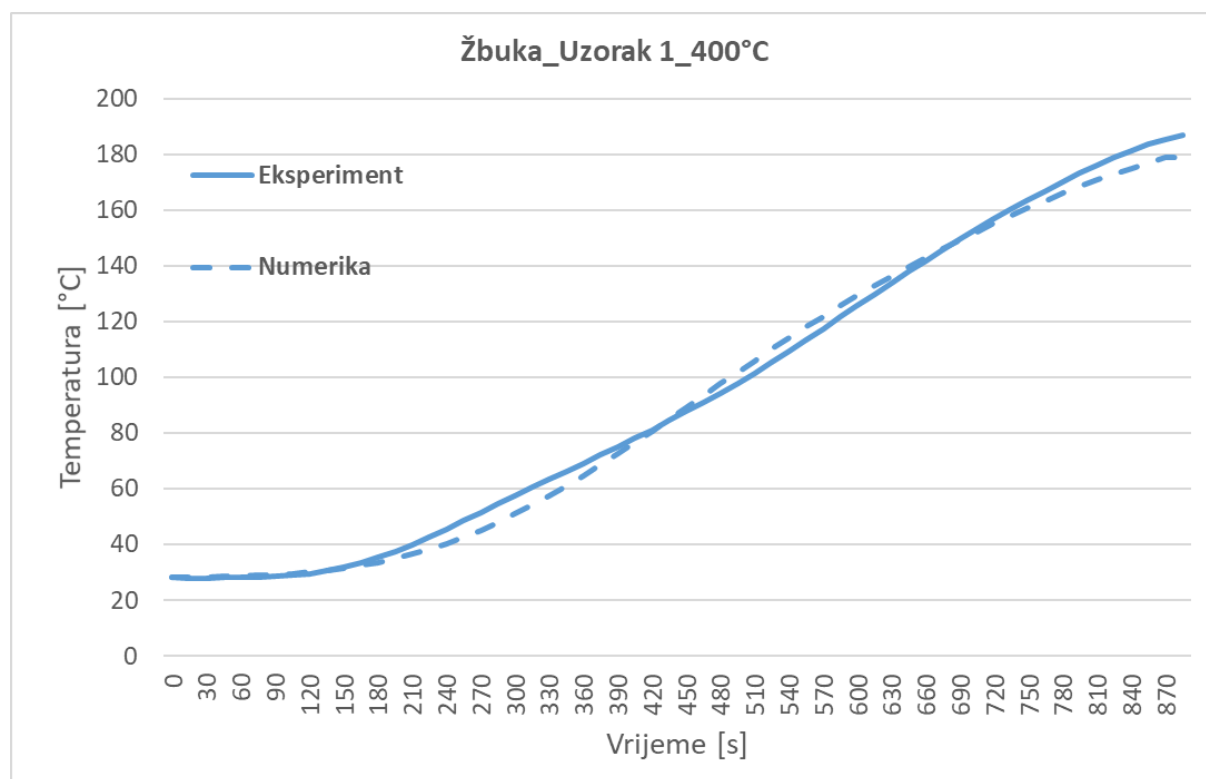
Slika 46. Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).

5. ANALIZA REZULTATA

Kako bi se utvrdila opravdanost korištenih metoda tijekom utvrđivanja specifičnog toplinskog kapaciteta materijala vatrootporne žbuke i vatrobetona potrebno je usporediti rezultate dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom.

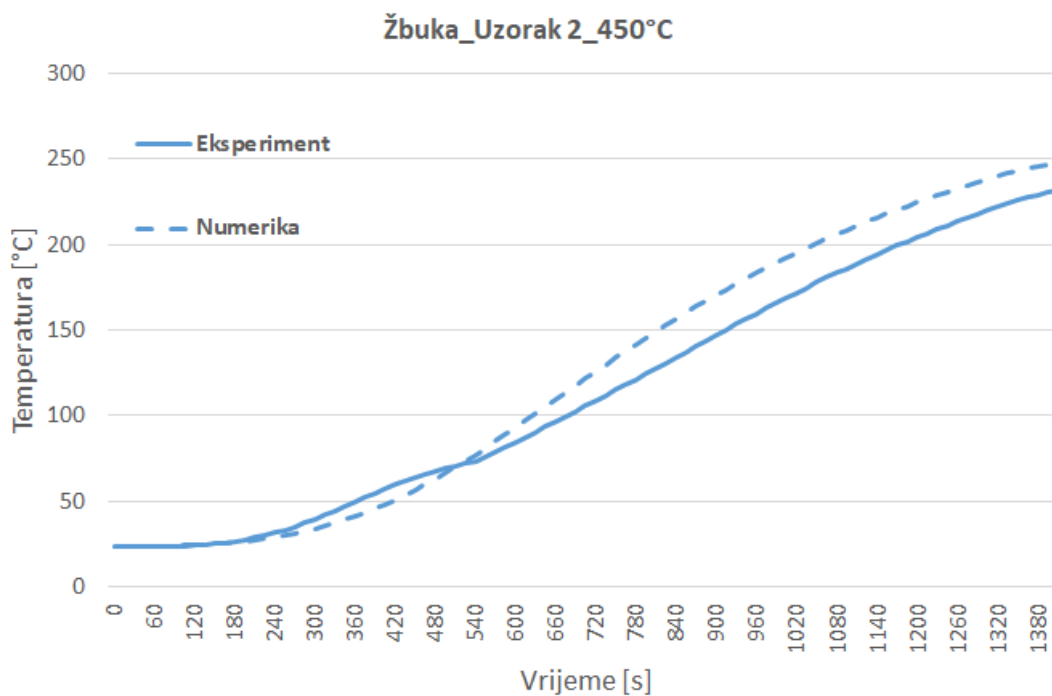
Temeljni kriterij usporedbe je krivulja temperature vanjske stijenke uzorka. U slučaju numeričke analize korišteni su ulazni parametri koji su dobiveni eksperimentom te je krajnji rezultat dobiven u obliku temperaturene mape u trenutku završetka procesa (npr. Slika 41. (desno)) i grafa ovisnosti temperature o vremenu. Na Slici 47. nalazi se prikaz opisane krivulje za slučaj eksperimenta (plavo) i numeričkog rješenja (crtkano plavo).

5.1. Vatrootporna žbuka

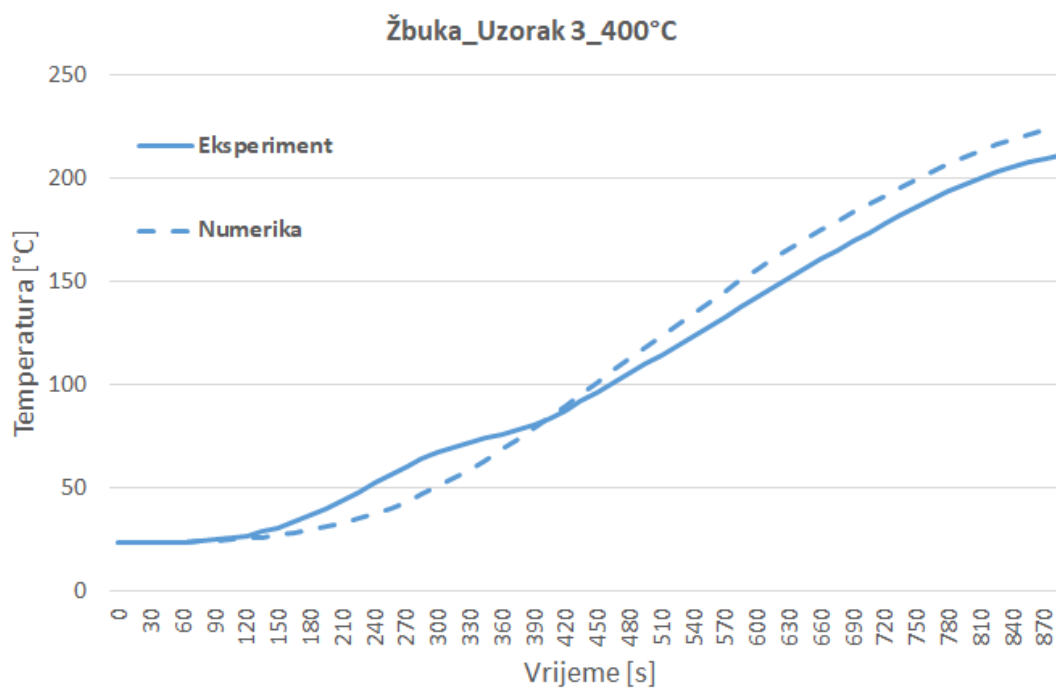


Slika 47. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, prvi uzorak

Prema priloženom grafičkom prikazu moguće je uočiti podudaranje rezultata eksperimenta i numeričke analize. Odstupanja koja su sve izraženija s povećanjem ukupne temperature u sustavu moguće je pripisati utjecaju vlage na mjerenja i poroznosti uzoraka koja je složena za primjenu u numeričkoj analizi. Na primjeru drugog i trećeg uzorka žbuke gdje je vidljiva stagnacija temperature opisana ranije, odstupanja dvaju rješenja su izraženija.



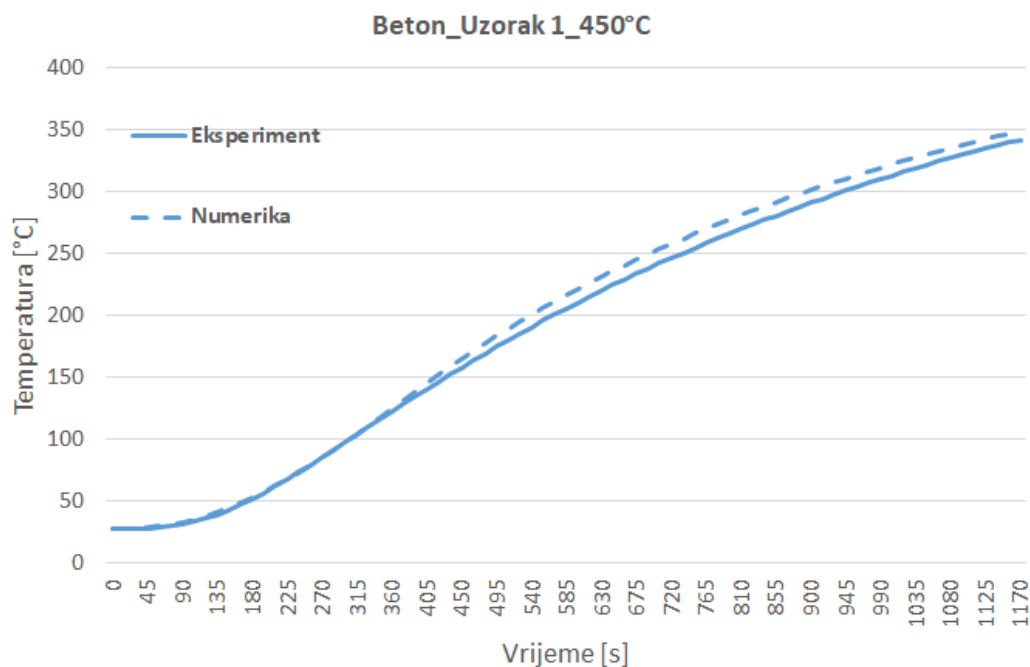
Slika 48. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, drugi uzorak



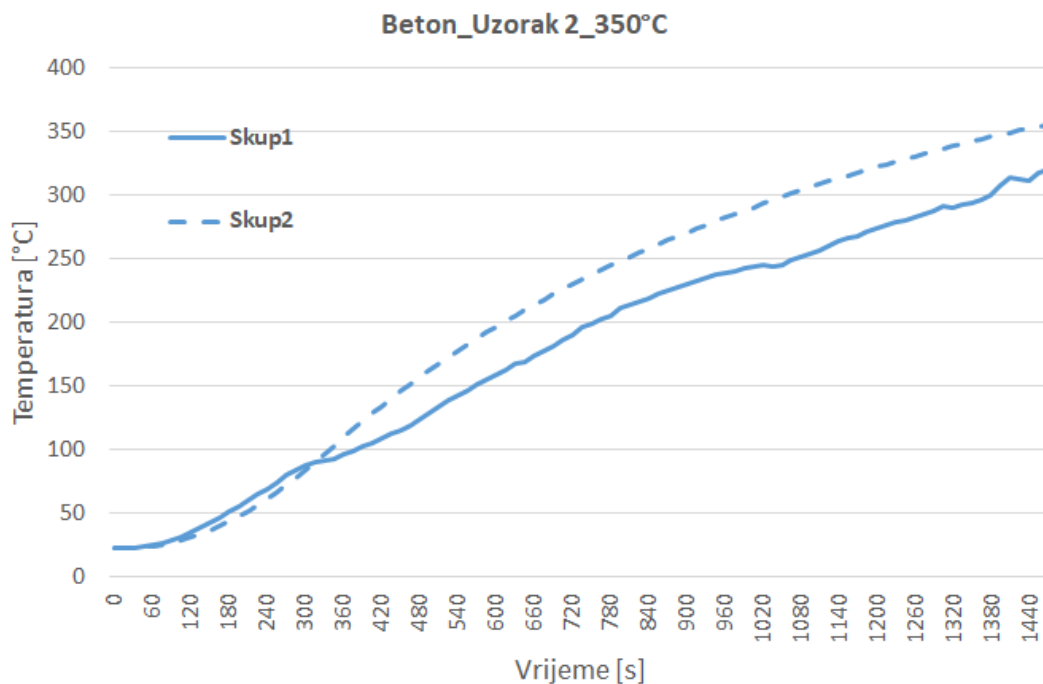
Slika 49. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, treći uzorak

5.3. Vatrobeton

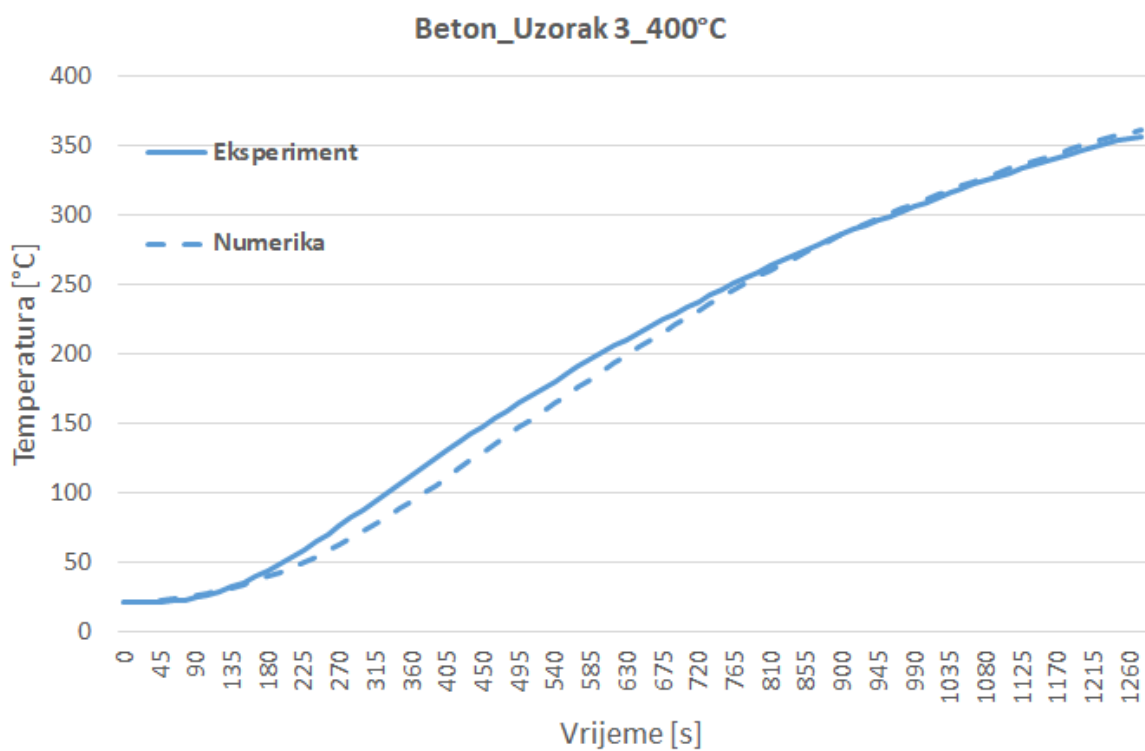
Na primjeru rezultata vatrobetona također je uočljivo poklapanje numeričkog rješenja s mjerenjima. Veća odstupanja vidljiva su na uzorku koji je sadržavao značajniji udio vodenog sadržaja (Slika 51.).



Slika 50. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, prvi uzorak



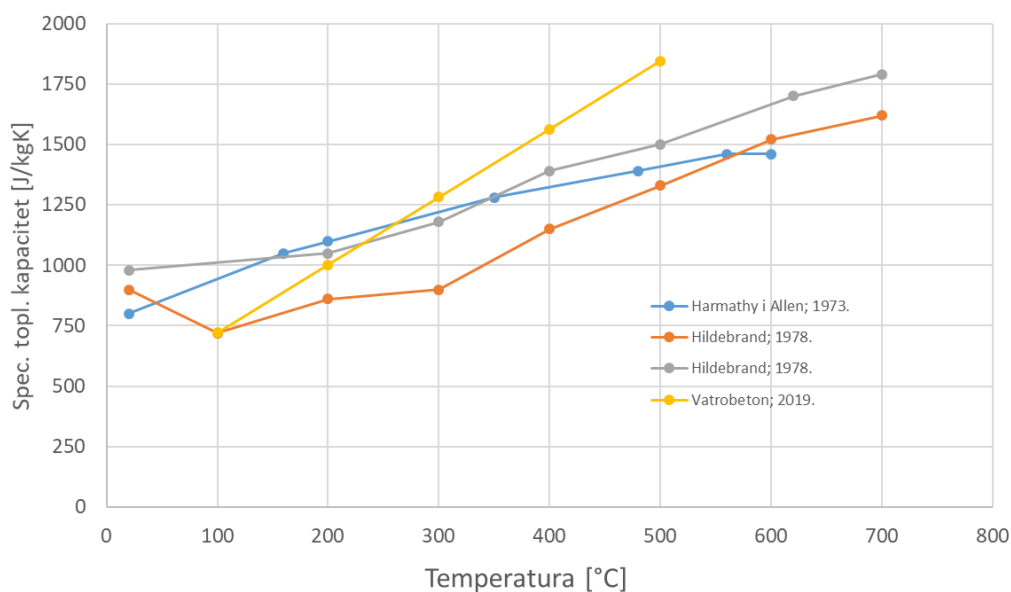
Slika 51. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, drugi uzorak



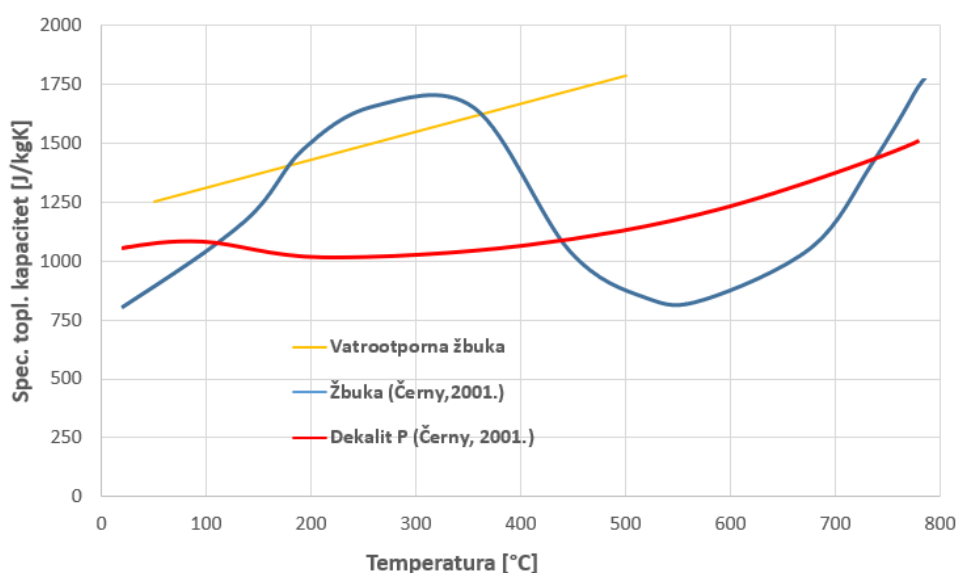
Slika 52. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, treći uzorak

5.5. Usporedba s literaturom

Rezultati mjerenja betona pronađeni u literaturi dobiveni su DSC metodom (vidi Poglavlje 2.2.1) koja s velikom točnošću ispituje specifični toplinski kapacitet tvari. Međutim, metoda korištena u ovom radu pokazuje rezultate sukladne onima iz [18] za temperaturni raspon od 150 do 450 °C (Slika 53.). Usporedba vatrootporne žbuke s rezultatima pronađenim u literaturi prikazana je na Slici 54.



Slika 53. Usporedba rezultata vatrobetona s literaturom



Slika 54. Usporedba rezultata vatrootporne žbuke s literaturom

6. ZAKLJUČAK

Utvrđeni rezultati specifičnog toplinskog kapaciteta materijala vatrootporne žbuke i vatrobetona pokazuju da je moguće mjeriti navedeno termodinamičko svojstvo na način opisan u ovom radu.

Odstupanja numeričke analize i eksperimentalnih mjerenja su prihvatljiva uzevši u obzir s jedne strane različite faktore koji su utjecali na preciznost mjerenja (nehomogenost materijala, nedosljednost položaja termoparova), a s druge strane nemoguću idealnu simulaciju numeričkom analizom.

Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti da se izmjereni specifični toplinski kapaciteti u eksperimentalnoj analizi s dovoljnom sigurnošću mogu primjenjivati u numeričkim analizama. Međutim, treba imati na umu da je u ovom radu numerički model zanemario utjecaj poroznosti u materijalu koja donosi određena odstupanja od stvarnih mjerenja.

Eksperimentalni dio analize bi za potpunu sigurnost trebalo obaviti DSC metodom koja bi sa sigurnošću mogla utvrditi krivulju specifičnog toplinskog kapaciteta.

U radu je potvrđena pojava povećanog specifičnog toplinskog kapaciteta u materijalu zbog postojanja određenog masenog sadržaja vode. Također, provjereni su promjenjivi početni i rubni uvjeti te se potvrđuje trend povećanog specifičnog toplinskog kapaciteta s povećanjem temperature.

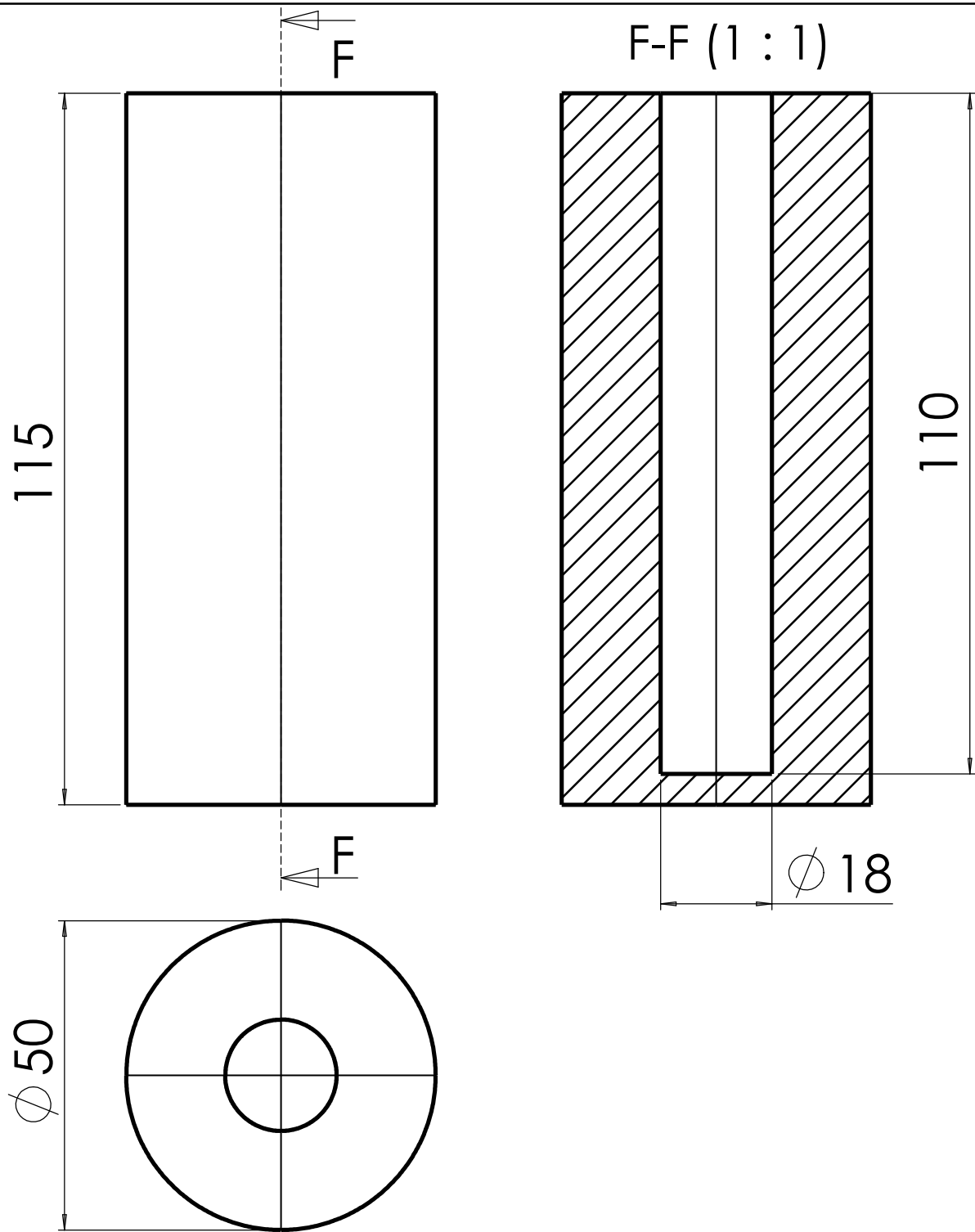
LITERATURA

- [1] Center of Fire Statistics of CTIF 2017
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Požar>; 12.11.2019.
- [3] <https://www.zus.hr/zastita-od-pozara>; 12.11.2019.
- [4] <https://www.vig.hr>; 12.11.2019.
- [5] Rahmanian, I., Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based systems, 2011
- [6] BS 476; Part 7; 1997.
- [7] Khaliq, W., Kodur, V., “High temperature mechanical properties of high strength fly ash concrete with and without fibers,”ACI Materials Journal, vol. 109, no. 6, pp. 665–674, 2012.
- [8] Rahmanian, I., Wang, Y., Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures A Combined Experimental and Numerical Approach, Acta Polytechnica Vol. 49 No. 1/2009
- [9] Rahmanian, I., Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based systems, 2011
- [10] Michael H. Chiu, Elmar J. Prenner; Differential scanning calorimetry: An invaluable tool for a detailed thermodynamic characterization of macromolecules and their interactions; J Pharm Bioallied Sci.; 2011 (39-59)
- [11] Ang, C.N., Wang,Y.C., The Effect of Water Movement on Specific Heat of Gypsum Plasterboard in Heatt Transfer Analysis Under Natural Fire Exposure. Construction and Building Materials, Vol.18 (str. 505–51), 2003.
- [12] Galović, A., Termodinamika I, FSB, Zagreb, 2016.
- [13] <https://www.samoborka.hr/upload/proizvodi/TUP-%20Vatrostop.pdf>; 14.11.2019.
- [14] <http://www.micom.hr/varijabilni-transformatori>; 17.11.2019.
- [15] <https://www.keysight.com/en/pd-1000001313%3Aepsg%3Apro-pn-34970A/data-acquisition-data-logger-switch-unit?cc=HR&lc=eng>; 17.11.2019.
- [16] Galović, A., Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2016.
- [17] Wang, H. B.: Heat Transfer Analysis of Components of Construction Exposed to Fire. Department of Civil Engineering and Construction, University of Salford, U.K., 1995.
- [18] Jansson, R., Measurement of thermal properties at elevated temperatures – Brandforsk project 328-031, 2004.

-
- [19] Černý, R., Toman, J., Determination of changes in thermal properties of building materials in the conditions of a fire, CIB World Building Congress, 2001.

PRILOZI

- I. Tehnički crtež ispitnog uzorka
- II. Tablice rezultata mjerenja
- III. CD-R disc



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao				
Razradio				
Crtao	28.11.2019	Roman Kuzmić		
Pregledao				
Napomena:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
				Kopija
Materijal: Beton/Žbuka			Masa:	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	ISPITNI UZORAK		1	Listova: 1
1:1	Crtež broj: RK-2019-01			List: 1

Design by CADLab

PRILOG II: Tablice rezultata mjerenja

Scan	Vrijeme	600					600_2					400					300					200				
		Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak1	Stijenska2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Stijenska2	Zrak	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenska
1	0	19.271	19.191	19.084	19.139	19.089	21.982	21.875	21.867	21.758	21.675	28.104	28.049	27.833	27.816	27.606	27.05	27.006	26.913	26.896	26.791	23.58	23.961	23.911	23.862	23.767
2	15	19.326	19.196	19.089	19.149	19.113	22.086	21.896	21.948	21.909	21.675	28.231	28.041	27.817	27.821	27.608	27.113	27.003	26.934	26.899	26.775	23.95	24.07	23.996	23.932	23.756
3	30	19.797	19.196	19.115	19.131	19.115	23.012	21.908	22.007	21.869	21.697	28.925	28.044	27.83	27.829	27.577	27.739	26.985	26.952	26.925	26.799	24.273	24.273	24.091	24.098	23.727
4	45	21.39	19.23	19.11	19.206	19.12	25.02	21.93	21.997	21.888	21.685	30.82	28.089	27.869	27.862	27.627	27.579	27.034	27.01	26.934	26.799	24.52	24.668	24.225	24.262	23.769
5	60	24.312	19.27	19.127	19.257	19.116	26.547	21.997	22.055	21.932	21.708	34.043	28.154	27.932	27.932	27.634	32.838	27.079	27.035	26.975	26.804	25.234	25.276	24.538	24.441	23.769
6	75	28.663	19.372	19.148	19.361	19.117	33.441	22.111	22.265	22.038	21.684	38.427	28.291	28.048	28.017	27.663	37.528	27.221	27.165	27.105	26.841	30.907	26.173	24.993	24.699	23.788
7	90	34.278	19.616	19.207	19.473	19.132	39.521	22.354	22.748	22.125	21.701	44.002	28.514	28.318	28.139	27.674	43.412	27.442	27.263	27.266	26.833	36.071	27.361	25.464	25.054	23.79
8	105	40.917	20.064	19.242	19.611	19.13	46.666	22.832	23.416	22.051	21.705	50.584	28.983	28.303	28.373	27.666	50.385	27.826	27.426	27.524	26.859	42.414	28.845	25.966	25.451	23.817
9	120	48.459	20.779	19.309	19.832	19.145	54.716	23.527	24.75	22.884	21.724	58.049	29.645	28.542	28.602	27.7	58.237	28.41	27.625	27.836	26.859	49.81	30.644	26.398	25.898	23.89
10	135	56.729	21.796	19.386	20.086	19.167	63.506	24.467	26.325	23.298	21.737	66.238	30.619	28.866	28.875	27.703	66.892	29.287	27.937	28.199	26.87	58.074	32.81	26.859	26.415	23.959
11	150	65.653	23.102	19.514	20.41	19.181	72.916	25.741	28.276	23.757	21.688	75.062	31.855	29.866	29.204	27.729	76.2	30.456	28.464	28.629	26.883	67.012	35.296	27.352	27.054	24.092
12	165	75.05	24.766	19.703	20.767	19.2	82.821	27.321	30.593	24.235	21.81	84.466	33.432	30.024	29.641	27.794	86.01	31.95	29.059	29.079	26.912	76.608	37.915	27.729	27.669	24.226
13	180	84.841	26.804	19.868	21.159	19.249	93.171	29.254	33.177	23.687	21.839	94.27	35.326	30.775	30.109	27.873	96.213	33.718	29.811	29.576	26.975	86.708	40.762	28.996	28.31	24.376
14	195	94.954	29.147	20.107	21.611	19.308	103.605	31.413	35.696	22.906	21.861	104.394	37.469	31.58	30.669	27.923	106.743	35.803	30.571	30.149	26.993	97.255	43.783	28.717	29.059	24.56
15	210	105.371	31.819	20.388	22.103	19.347	114.544	33.927	38.95	24.421	21.939	114.73	39.881	32.424	31.242	28.012	117.486	38.12	31.489	30.767	27.054	108.076	46.887	30.469	29.843	24.847
16	225	115.56	34.777	20.691	22.652	19.454	125.545	36.689	42.322	25.383	22.029	125.233	42.544	33.616	31.947	28.097	128.429	40.815	32.425	31.468	27.169	119.117	50.049	32.339	30.632	25.173
17	240	126.586	37.951	21.034	23.254	19.603	136.622	39.662	45.747	26.213	22.144	135.689	45.415	34.862	32.707	28.225	139.301	43.617	32.448	32.166	27.303	130.164	53.108	33.49	31.558	25.526
18	255	137.283	41.337	21.419	23.936	19.769	147.383	42.542	47.348	23.23	22.152	146.205	48.501	35.762	33.499	28.488	150.076	46.673	34.416	32.871	27.432	141.188	56.089	34.531	32.525	25.983
19	270	147.847	44.849	21.832	24.767	19.992	158.069	45.907	49.973	22.781	22.036	156.566	51.567	36.879	34.288	28.754	160.835	49.785	35.019	33.653	27.59	152.098	58.921	34.903	33.496	26.946
20	285	158.347	48.402	22.29	25.626	20.304	168.946	49.245	55.093	27.194	22.54	166.865	54.651	37.919	35.011	29.096	171.48	52.954	35.25	34.463	27.847	162.935	61.538	34.122	34.425	27.053
21	300	168.704	51.879	22.787	26.491	20.647	179.713	52.67	58.377	29.402	22.88	176.999	57.639	39.134	35.783	29.941	182.014	56.106	36.339	35.13	28.161	173.618	64.001	35.105	35.376	27.637
22	315	178.945	55.195	23.285	27.342	21.05	190.305	56.075	61.352	30.529	23.296	187.064	60.562	40.18	36.603	29.927	192.32	59.212	37.783	35.945	28.568	184.167	66.318	34.797	36.178	28.226
23	330	188.99	58.311	23.826	28.255	21.539	200.666	59.368	64.277	31.629	23.749	196.99	63.53	41.406	37.536	30.46	202.583	62.408	39.294	36.882	29.073	194.506	68.673	36.043	37.119	28.831
24	345	198.824	61.213	24.376	29.285	22.028	210.798	62.555	67.185	32.783	24.214	206.573	66.312	42.382	38.428	31.01	212.544	65.5	40.19	37.758	29.557	204.617	71.101	38.425	38.186	29.641
25	360	208.46	63.905	24.974	30.271	22.627	220.782	65.263	68.14	28.293	23.961	215.981	69.131	43.974	39.425	31.56	222.248	68.571	40.426	38.668	30.078	214.411	73.525	39.927	39.015	30.312
26	375	217.881	66.435	25.609	31.256	23.097	230.416	68.277	72.27	33.638	24.926	225.175	72.058	45.018	40.453	32.31	231.736	71.662	40.206	39.629	30.646	223.025	75.916	40.654	39.62	30.946
27	390	227.096	68.924	26.294	32.225	23.723	239.841	71.349	75.39	35.847	25.607	234.317	75.076	47.035	41.503	33.014	241.032	74.844	42.265	40.64	31.309	228.96	78.339	41.372	40.345	31.564
28	405	236.261	71.458	27.001	33.173	24.294	249.03	74.406	78.419	37.11	26.254	243.114	78.073	48.843	42.425	37.34	250.165	78.168	43.052	41.702	31.934	232.415	80.83	42.275	41.048	32.197
29	420	245.138	74.079	27.759	34.098	24.734	257.965	77.435	81.404	38.085	27.061	251.775	81.213	50.573	43.348	34.495	259.018	81.426	44.145	42.765	32.668	234.141	83.265	42.618	41.716	32.865
30	435	253.791	76.785	28.483	35.031	25.734	266.703	80.506	84.608	39.175	27.69	260.268	84.445	51.899	44.342	35.203	267.589	84.651	45.116	43.783	33.241	234.481	85.487	43.758	42.354	33.473
31	450	262.249	79.649	29.208	36.806	26.048	275.256	83.682	88.115	40.303	28.442	268.565	87.179	52.948	45.341	35.887	275.98	87.956	43.692	42.499	33.865	233.954	87.488	45.833	42.913	34.051
32	465	269.645	82.486	27.86	37.44	26.527	283.59	86.959	92.048	41.364	29.889	276.619	90.945	53.819	46.298	36.61	284.501	90.967	45.965	38.797	33.883	232.849	89.349	45.774	43.268	34.593
33	480	277.318	85.865	30.493	40.25	27.378	291.679	90.19	96.23	4																

		250										300										350										400										450										500									
		Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec																				
1	0	18.614	18.545	18.426	18.426	18.444	19.353	19.199	19.228	18.114	21.685	21.496	21.456	21.44	21.36	21.694	21.593	21.54	21.566	21.488	25.045	24.53	27.283	22.741	22.58	28.73	26.7	24.388	24.501	24.001																															
2	10	18.441	18.567	18.453	18.463	18.453	19.638	19.229	19.239	19.232	19.202	21.99	21.533	21.485	21.445	21.381	21.907	21.638	21.556	21.553	21.492	25.264	24.591	27.291	22.741	22.57	29.035	26.697	24.259	24.448	24.011																														
3	20	19.258	18.644	18.474	18.468	18.45	20.102	19.354	19.251	19.248	19.232	22.52	21.657	21.488	21.463	21.375	21.581	21.432	21.581	21.517	21.482	26.385	25.651	27.281	22.741	22.57	29.035	26.697	24.259	24.448	24.011																														
4	30	19.969	18.788	18.552	18.547	18.543	20.935	19.528	19.315	19.278	19.235	23.57	21.818	21.533	21.482	21.381	21.909	21.886	21.602	21.591	21.517	26.347	24.842	27.838	22.751	22.593	30.852	26.699	24.025	24.508	23.971																														
5	40	20.344	18.954	18.58	18.581	18.441	22.014	19.767	19.362	19.251	24.484	22.104	21.575	21.556	21.396	21.463	22.108	21.624	21.629	21.547	27.253	25.885	22.789	22.584	23.629	24.721	24.631	24.282	24.661	24.001																															
6	50	22.235	19.319	18.657	18.584	18.46	23.412	20.163	19.424	19.389	25.259	25.9	22.476	21.611	21.617	21.411	23.214	22.241	21.674	21.628	21.542	28.448	25.465	22.885	22.774	25.756	24.688	26.836	24.358	24.519	23.972																														
7	60	23.833	19.741	18.71	18.651	18.459	25.127	20.657	19.49	19.471	27.986	27.68	22.908	21.708	21.716	21.245	23.219	22.245	21.681	21.628	21.542	29.474	26.485	23.382	23.282	26.975	24.969	26.836	24.358	24.519	23.972																														
8	70	25.716	20.136	18.78	18.756	18.49	27.115	21.32	19.569	19.59	31.935	29.712	23.659	21.801	21.823	21.495	28.063	21.418	21.852	21.82	21.605	31.602	26.559	23.006	22.903	22.574	29.838	27.207	24.661	24.553	23.971																														
9	80	27.037	21.099	18.865	18.87	18.58	29.658	21.24	19.714	19.369	32.034	24.447	21.92	31.99	31.927	21.592	30.806	21.413	21.953	21.93	22.925	31.933	23.551	27.312	23.085	22.972	32.599	27.037	24.661	24.553	23.971																														
10	90	30.647	22.038	18.983	19.025	18.616	31.958	23.906	19.828	19.902	34.942	34.596	25.447	22.069	22.201	31.991	33.008	25.004	22.116	22.11	21.706	35.78	28.228	23.043	22.973	25.944	26.652	27.938	24.661	24.553	23.971																														
11	100	31.125	23.021	19.128	19.165	18.689	34.757	24.244	19.885	20.078	37.988	37.397	26.295	22.242	22.248	32.881	33.617	27.467	22.485	22.477	31.012	40.853	30.523	23.539	23.366	26.023	27.938	24.661	24.553	23.971																															
12	110	36.054	23.184	19.329	19.412	18.747	37.762	25.512	20.188	20.34	39.571	40.044	27.907	22.545	22.449	31.793	33.683	27.264	22.485	22.477	31.012	40.853	30.523	23.539	23.366	26.023	27.938	24.661	24.553	23.971																															
13	120	39.149	25.716	19.57	19.661	18.812	40.842	26.961	20.427	20.594	39.679	41.48	29.367	22.672	22.685	21.822	41.682	28.644	22.723	22.692	22.10	43.712	31.249	23.564	22.612	29.075	29.888	25.295	24.972	23.971																															
14	130	42.369	27.251	19.648	19.965	18.925	44.102	28.583	20.894	20.873	40.786	40.786	30.967	22.944	22.923	22.929	44.85	30.168	22.927	22.256	22.467	46.726	33.458	23.749	22.939	26.626	30.773	29.891	25.295	24.972																															
15	140	45.699	28.937	20.31	20.289	19.063	47.498	30.233	20.996	21.243	45.959	50.066	32.708	23.251	23.251	43.889	31.867	32.335	23.189	23.189	48.458	35.655	34.248	23.882	23.682	31.587	31.587	31.587	29.891	25.295	24.972																														
16	150	49.135	30.781	20.486	20.045	19.23	50.888	32.195	21.325	21.621	50.59	53.44	34.564	25.533	24.887	22.224	51.547	33.685	23.608	23.477	22.58	53.305	36.952	24.57	24.207	22.665	33.476	32.988	25.783	25.41	23.965																														
17	160	52.312	32.766	20.808	20.045	19.41	54.363	34.249	21.697	22.03	50.578	56.258	35.862	23.988	22.490	55.015	35.621	23.975	23.804	22.773	56.793	38.9	34.888	24.48	22.684	27.889	34.244	25.813	25.587	23.965																															
18	170	56.139	34.865	21.238	21.418	19.578	57.913	36.343	22.112	22.43	50.658	60.367	38.653	24.773	24.112	52.652	35.655	23.757	23.465	24.096	29.921	40.947	40.963	25.239	24.778	22.713	33.82	35.666	25.943	25.785																															
19	180	59.729	37.019	21.622	21.787	19.71	61.455	38.574	22.525	22.856	50.646	63.881	40.803	24.692	24.632	54.881	36.212	23.97	24.788	24.422	33.089	44.541	43.173	25.612	25.065	27.408	39.197	27.149	25.993	24.023																															
20	190	63.362	39.263	22.048	22.141	19.987	65.089	40.405	22.969	23.297	50.853	67.451	43.051	25.145	24.772	23.51	55.737	42.301	25.264	24.706	23.314	47.945	45.088	26.293	24.477	27.862	34.586	26.247	26.224	24.04																															
21	200	66.405	41.576	22.489	22.288	20.238	68.731	43.172	23.405	23.749	51.065	71.103	45.324	26.269	25.37	23.409	44.24	43.332	25.81	25.181	23.511	47.888	46.446	25.833	22.837	30.057	40.555	26.455	26.46	24.064																															
22	210	70.784	43.91	22.925	22.688	20.509	72.433	45.538	23.865	24.16	51.266	74.808	47.626	26.588	25.575	23.669	43.645	43.647	25.521	23.751	57.825	50.37	26.507	26.239	22.88	35.05	42.353	26.639	26.744	24.095																															
23	220	74.756	46.301	23.291	23.241	20.719	75.203	47.877	24.909	24.672	51.562	77.447	49.026	26.998	25.928	23.931	30.964	49.095	36.814	25.056	23.065	59.821	52.023	23.218	26.994	22.984	31.091	44.249	26.994	27.05	24.158																														
24	230	78.438	48.721	23.879	23.789	20.989	79.93	50.071	24.812	25.112	51.821	82.321	52.24	27.078	26.42	24.842	40.806	51.492	37.372	26.582	24.231	63.54	55.559</																																						

Scan	Vrijeme	250					300					350					400					450					500				
		Zbuka Centar	Zbuka Stjenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stjenka	Zbuka Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec
1	0	22,933	22,801	22,75	22,756	22,658	23,151	23,07	22,999	23,017	22,967	22,998	22,854	22,816	22,764	22,658	23,418	23,284	23,151	23,111	23,104	23,47	23,436	23,383	23,378	23,389	24,983	24,757	24,101	23,898	23,945
2	15	23,714	22,838	22,816	22,73	22,658	23,476	23,068	23,029	22,997	22,989	23,572	22,87	22,832	22,774	22,663	23,946	23,305	23,199	23,127	23,096	23,567	23,412	23,354	23,367	23,38	25,255	24,758	24,149	23,938	23,916
3	30	25,873	22,846	22,927	22,753	22,671	24,359	23,089	23,104	23,023	22,983	25,174	22,896	22,877	22,78	22,666	25,743	23,31	23,233	23,156	23,106	24,078	23,426	23,402	23,392	23,378	26,548	24,716	24,15	23,938	23,924
4	45	29,427	22,967	23,116	22,801	22,66	25,936	23,096	23,175	23,027	22,988	28	23,027	22,971	22,875	22,718	31,23	23,397	23,296	23,201	23,127	25,238	23,462	23,496	23,391	23,381	29,302	24,748	24,215	24,013	23,911
5	60	34,372	23,191	23,384	22,888	22,695	28,171	23,152	23,302	23,065	23,002	32,149	23,308	23,06	22,95	22,731	37,27	23,628	23,399	23,279	23,117	27,131	23,459	23,596	23,422	23,367	33,508	24,888	24,726	24,073	23,942
6	75	40,318	23,664	23,455	23,027	22,666	31,078	23,266	23,341	23,116	23,008	37,533	23,75	23,181	23,055	22,762	43,88	23,985	23,432	23,353	23,135	29,645	23,516	23,366	23,421	23,4	39,039	25,259	24,395	24,19	23,997
7	90	47,31	24,39	23,48	23,189	22,718	34,562	23,396	23,635	23,157	23,009	44,015	24,479	23,328	23,237	22,807	51,03	24,637	23,632	23,527	23,164	32,822	23,668	23,939	23,486	23,381	45,676	25,838	24,564	24,376	24,041
8	105	55,037	25,449	23,768	23,421	22,752	38,564	23,672	23,62	23,238	23,015	51,209	25,495	23,561	23,477	22,883	53,18	25,583	23,854	23,731	23,233	36,624	23,843	24,053	23,58	23,377	53,222	26,618	24,878	24,513	24,141
9	120	63,518	26,877	24,157	23,727	22,849	42,987	24,007	23,881	23,328	23,002	57,891	27,011	23,951	23,843	23,051	61,411	26,898	24,317	23,994	23,346	40,876	24,139	24,042	23,652	23,365	61,533	27,791	25,239	24,739	24,257
10	135	72,491	28,637	24,599	24,09	22,923	47,867	24,485	23,788	23,446	23,007	63,439	28,884	24,343	24,179	23,224	70,311	28,612	24,844	24,355	23,493	45,608	24,501	23,975	23,704	23,389	70,478	29,228	25,765	25,071	24,441
11	150	81,953	30,854	25,217	24,564	23,004	53,077	25,108	23,942	23,574	23,04	68,942	31,24	24,585	24,595	23,44	79,642	30,867	25,492	24,794	23,724	50,67	25,048	24,11	23,802	24,412	79,958	31,11	26,353	25,463	24,67
12	165	91,719	33,543	25,98	25,05	23,128	58,659	25,867	24,117	23,723	23,092	74,372	34,234	25,563	25,125	23,742	89,306	33,492	26,249	25,26	23,921	56,056	25,724	24,251	23,964	23,422	89,902	33,343	27,176	25,877	24,951
13	180	101,851	36,633	27,005	25,61	23,283	64,533	26,795	24,383	23,883	23,107	80,06	37,5	26,374	25,701	24,073	99,208	36,573	27,109	25,867	24,195	61,784	26,532	24,485	24,104	23,464	100,218	35,966	28,01	26,322	25,28
14	195	112,251	40,082	28,232	26,258	23,478	70,679	27,879	24,677	24,091	23,141	85,416	41,285	27,311	26,532	24,384	109,224	40,025	27,958	26,598	24,555	67,719	27,501	24,752	24,315	23,487	110,75	38,987	28,773	26,879	25,596
15	210	122,639	43,773	29,489	26,932	23,768	76,992	29,158	25,044	24,37	23,2	90,254	45,333	28,671	27,331	24,77	119,342	43,796	29,396	27,31	24,688	73,981	28,638	25,05	24,566	23,525	121,48	42,346	29,87	27,466	25,933
16	225	133,113	47,759	30,415	27,507	23,927	83,399	30,614	25,505	24,645	23,238	94,654	49,743	30,104	28,139	25,248	129,703	47,885	30,445	27,999	25,236	80,414	29,967	25,403	24,796	23,591	132,363	46,006	30,948	28,211	26,397
17	240	143,618	51,935	31,687	28,401	24,777	90,021	32,312	26,033	24,957	23,313	98,789	54,256	31,653	29,01	25,749	140,038	52,053	31,731	28,83	25,749	87,057	31,34	25,846	25,099	23,645	143,068	49,77	32,126	28,775	26,918
18	255	154,029	55,912	32,976	29,048	24,553	96,82	34,208	26,667	25,325	23,384	103,08	58,697	33,489	30,529	26,337	150,311	56,241	33,061	29,602	26,254	93,835	33,216	26,342	25,517	23,709	153,859	53,537	32,857	29,471	27,502
19	270	164,314	59,787	34,002	29,853	24,874	103,711	36,272	27,395	25,73	23,484	108,442	63,125	34,646	31,75	27,013	160,675	60,373	34,633	30,593	26,877	100,718	35,079	26,956	25,838	23,773	164,654	57,214	34,117	30,064	28,013
20	285	174,501	63,25	35,409	30,469	24,568	110,785	38,408	28,167	26,134	23,564	114,124	67,201	37,003	32,599	27,7	170,866	64,066	35,894	31,411	27,374	107,736	37,177	27,598	26,348	23,897	174,972	60,689	34,978	30,709	28,597
21	300	184,585	66,24	36,96	31,459	25,642	117,895	40,023	28,965	26,605	23,73	120,314	70,877	37,397	33,64	28,554	180,824	67,218	37,328	32,184	28,224	114,895	39,422	28,146	26,876	24,002	185,306	63,689	36,117	31,582	29,215
22	315	194,456	70,871	37,811	32,244	26,115	125,005	43,313	29,648	27,028	23,877	127,158	74,309	39,668	34,5	29,5	190,644	69,922	38,116	33,065	28,702	121,987	41,775	28,67	27,41	24,154	195,592	66,634	37,554	32,373	29,819
23	330	204,311	68,076	39,382	32,793	26,654	132,123	45,91	30,255	27,438	24,008	134,751	77,182	39,323	35,086	30,184	200,409	72,134	39,054	33,993	29,307	129,203	44,298	28,354	28,071	24,325	205,653	70,266	38,386	33,296	30,847
24	345	213,872	73,385	40,331	34,041	27,151	139,286	48,609	31,003	27,889	24,185	142,63	79,663	40,848	36,19	31,047	209,909	73,974	40,288	34,707	30,091	136,323	46,859	30,183	28,584	24,444	215,521	73,933	39,925	34,072	31,047
25	360	223,354	75,998	41,587	34,917	27,703	146,388	51,274	31,86	28,422	24,343	151,118	81,84	41,538	37,279	31,788	219,328	75,738	41,495	35,742	30,748	143,512	49,505	30,09	29,144	24,619	225,218	77,601	41,119	34,961	31,792
26	375	232,631	78,864	42,702	35,873	28,271	153,469	53,936	32,366	28,899	24,516	159,513	83,466	41,833	38,639	32,267	228,529	78,071	43,32	36,693	31,603	150,885	52,175	31,72	29,77	24,775	234,666	81,498	42,383	35,923	32,505
27	390	241,691	82,2	43,252	36,715	28,871	160,503	56,583	33,332	29,421	24,738	168,284	84,874	43,226	39,065	33,095	237,598	80,748	43,994	37,447	32,447	152,782	54,788	32,223	29,947	24,973	244,03	85,853	43,157	36,717	33,448
28	405	250,759	86,303	44,729	37,754	29,607	167,505	59,044	34,085	30,019	24,952	177,094	86,089	43,421	40,344	24,367	246,457	83,884	45,194	38,366	33,024	164,818	57,301	33,177	30,347	25,165	243,108	90,05	44,522	37,655	34,348
29	420	259,474	90,949	45,775	38,623	30,278	174,421	61,37	35,076	30,634	25,173	185,816	87,034	44,224	41,017	34,72	255,103	87,552	47,011	39,419	33,786	171,843	59,715	34,047	30,914	25,411	261,98	94,232	45,621	38,665	34,861
30	435	266,895	95,448	46,663	39,326	31,001	181,721	63,498	35,901	31,155	25,434	194,523	87,782	44,253	41,141	35,553	263,739	91,984	47,745	40,48	34,654	178,702	61,905	35,153	31,367	25,622	270,723	98,422	46,594	39,471	35,791
31	450	272,195	99,775	47,773	40,197	31,682	188,066	65,411	36,884	31,781	25,705	202,248	88,496	45,317	42,783	36,263	272,131	96,463	49,353	40,816	35,397	185,587	63,969	36,025	31,775	25,875	279,379	102,756	47,891	40,599	36,633
32	465	278,758	104,147	49,458	41,063	32,476	194,855	67,149	37,971	32,226	25,976	213,922	89,027	45,978	43,221	37,394	280,327	100,895	48,35	41,891	36,125	192,428	65,835	37,195	32,298	26,151	287,801	107,138	48,321	41,638	37,59
33	480	277,885	108,316	50,761	41,872	33,205	201,619	68,712	38,662	32,802	26,289	220,349	89,312	46,669	44,189	38,049	288,438	105,298	51,339	42,817	36,886	199,17	67,497	37,532	32,928	26,442	296,013	111,492	49,777	42,481	38,601
34	495	278,917	112,322	51,413	42,723	33,988	208,262	70,149	39,53	33,335	26,591	228,885	89,673	47,413	45,269	38,974	296,496	109,867	50,269	43,717	37,871	205,815	69,039								

Scan	Vrijeme	500										450					400					350_1					350_2					250																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
		Zbuka		Zbuka		Zrak1	Zrak2	Pec	Stijenka	Zbuka	Zbuka		Zrak1	Zrak2	Pec	Stijenka	Zbuka	Zbuka		Zrak1	Zrak2	Pec	Stijenka	Zbuka	Zbuka		Zrak1	Zrak2	Pec	Stijenka	Zbuka	Zbuka		Zrak1	Zrak2	Pec	Stijenka																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
		Centar	Stijenka	Centar	Stijenka						Centar	Stijenka						Centar	Stijenka						Centar	Stijenka						Centar	Stijenka					Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka	Centar	Stijenka																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	0	22,677	22,674	22,566	22,529	22,486	27,982	27,811	25,866	25,89	25,916																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Scan	Vrijeme	460				400				350				300				270								
		Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Pec Stijenka	Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka	Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka	Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka	Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka	
1	0	21,393	21,188	21,092	21,204	21,111	21,393	21,393	21,167	21,43	21,14	29,008	28,721	25,291	26,687	26,061	21,393	21,553	21,335	21,474	21,293	21,157	21,045	21,175	21,101	
2	15	21,399	21,191	21,077	21,207	21,117	21,399	21,399	21,184	21,413	21,171	28,969	28,761	25,733	28,777	26,049	21,399	21,507	21,342	21,499	21,345	21,19	21,157	21,055	21,201	21,1
3	30	23	21,23	21,087	21,196	21,14	23	21,448	21,24	21,469	21,155	29,015	28,815	25,85	28,809	26,05	23	21,498	21,335	21,482	21,319	21,273	21,273	21,095	21,353	21,079
4	45	25	21,301	21,133	21,338	21,123	25	21,672	21,289	21,752	21,156	29,528	28,923	25,948	28,871	26,051	25	21,583	21,338	21,593	21,343	21,479	21,279	21,152	21,697	21,088
5	60	28	21,575	21,192	21,841	21,123	28	22,197	21,36	22,441	21,155	30,818	29,295	26,044	29,227	26,017	28	21,94	21,406	22,055	21,323	21,814	21,814	21,211	22,254	21,094
6	75	30	22,18	21,322	22,885	21,138	30	23,135	21,45	23,738	21,184	32,914	30,073	26,191	30,202	25,975	30	22,612	21,533	23,044	21,336	28,993	22,303	21,268	23,103	21,074
7	90	34	23,197	21,411	24,467	21,129	34	24,524	21,7	25,584	21,187	35,707	31,372	26,427	31,283	25,998	34	23,787	21,699	24,602	21,327	29,9611	23,047	21,379	24,173	21,097
8	105	38	24,687	21,727	26,694	21,152	38	26,466	21,967	28,047	21,206	39,202	33,191	26,643	33,106	25,991	38	25,451	21,959	26,785	21,352	31,1064	23,928	21,546	25,522	21,07
9	120	43,367	26,69	22,063	29,463	21,185	43,367	28,977	22,291	31,079	21,218	43,367	35,583	26,937	35,201	26,025	43,367	27,7	22,279	29,594	21,422	32,6118	25,086	21,741	27,198	21,1
10	135	48,101	29,19	22,993	32,754	21,172	48,101	31,966	22,636	34,607	21,238	48,101	38,486	27,126	38,454	26,034	48,101	30,467	22,61	32,871	21,424	34,831	26,487	21,977	29,023	21,163
11	150	53,285	32,216	22,728	36,51	21,211	53,285	35,507	23,059	38,525	21,32	53,285	41,918	27,597	41,463	26,079	53,285	33,756	23,063	36,649	21,464	36,853	28,041	22,228	31,116	21,126
12	165	58,865	35,762	23,131	40,621	21,291	58,865	39,5	23,419	42,786	21,381	58,865	45,801	27,929	45,042	26,12	58,865	37,527	23,575	40,792	21,509	38,483	29,91	22,501	33,443	21,186
13	180	64,811	39,703	23,712	45,109	21,344	64,811	44,264	24,475	47,719	21,475	64,811	50,11	28,438	48,961	26,171	64,811	41,734	24,239	45,465	21,605	41,5519	31,963	22,748	35,899	21,192
14	195	71,001	44,056	24,233	49,949	21,437	71,001	49,065	24,925	52,749	21,57	71,001	54,819	28,925	53,268	26,276	71,001	46,367	24,777	50,404	21,738	44,5458	34,266	23,118	38,622	21,244
15	210	77,408	48,772	24,789	54,999	21,547	77,408	54,19	25,526	58,758	21,691	77,408	59,786	29,44	57,745	26,376	77,408	51,341	25,311	55,502	21,891	47,7711	36,747	23,415	41,448	21,261
16	225	83,99	53,757	25,607	60,254	21,712	83,99	59,055	26,05	63,484	21,852	83,99	65,035	30,263	62,626	26,527	83,99	56,587	25,63	60,88	22,025	51,298	39,46	23,766	44,439	21,292
17	240	90,728	59,037	26,092	65,66	21,916	90,728	64,538	26,816	69,098	21,991	90,728	70,557	31,012	67,619	26,691	90,728	62,046	26,397	66,416	22,196	55,0433	42,341	24,127	47,598	21,378
18	255	97,6	64,511	26,868	71,193	22,088	97,6	70,257	27,851	74,872	22,196	97,6	76,171	32	72,792	26,883	97,6	67,739	25,106	72,145	22,47	58,9836	45,372	24,379	50,831	21,444
19	270	104,577	70,187	27,745	76,874	22,323	104,577	76,073	28,474	80,627	22,432	104,577	82,069	32,783	78,066	27,138	104,577	73,569	28,106	77,91	22,646	63,1072	48,544	24,864	54,248	21,525
20	285	111,569	76,002	28,533	82,557	22,551	111,569	82,016	29,401	86,524	22,67	111,569	87,965	33,312	83,246	27,378	111,569	79,55	29,049	83,715	23,054	67,3842	51,834	25,466	57,749	21,602
21	300	117,734	81,89	29,7	88,277	22,832	117,734	87,989	29,481	92,341	22,913	118,676	93,933	34,711	88,565	27,65	117,734	85,513	30,038	89,511	23,351	71,825	55,25	26,013	61,287	21,663
22	315	124,843	87,81	30,825	94,031	23,118	124,843	94,019	31,421	98,242	23,238	125,718	100,023	35,591	94,168	27,962	124,843	91,603	31,072	95,376	23,804	76,4725	58,825	26,41	64,89	21,758
23	330	131,867	93,81	31,885	99,751	23,428	131,867	100,049	34,484	104,039	23,627	132,692	106,197	36,273	99,62	28,374	131,867	97,67	32,169	101,202	24,262	81,2058	62,466	27,149	68,571	21,918
24	345	138,802	99,805	33,113	105,478	23,836	138,802	106,149	33,765	109,91	24,085	139,683	112,461	36,733	105,125	28,814	138,802	103,727	33,28	107,083	24,847	86,0028	66,156	27,654	72,287	21,992
25	360	145,682	105,828	33,846	111,207	24,247	145,682	112,262	34,347	115,681	24,541	146,705	118,808	37,534	110,344	29,251	145,682	109,685	34,245	112,825	25,397	90,9129	69,933	28,255	76,047	22,155
26	375	152,4	111,826	35,092	116,775	24,717	152,4	118,446	35,769	121,488	25,132	153,546	125,052	38,722	115,995	29,701	152,4	115,726	35,799	118,586	26,01	95,9829	73,833	28,714	79,793	22,359
27	390	159,059	117,962	36,768	122,422	25,314	159,059	124,566	36,94	127,121	25,722	159,851	131,248	39,637	121,469	30,292	159,059	121,929	36,714	124,386	26,646	101,0737	77,749	29,401	83,543	22,549
28	405	165,655	124,142	37,673	127,869	25,93	165,655	130,656	38,13	132,729	26,337	166,594	137,245	40,802	126,821	30,881	165,655	128,809	38,652	129,836	27,402	106,1347	81,649	30,005	87,33	22,764
29	420	172,138	130,233	38,812	133,352	26,627	172,138	136,53	39,261	138,185	26,995	173,324	143,487	41,732	132,175	31,446	172,138	133,544	39,344	135,79	28,107	111,3307	85,639	30,662	91,146	22,997
30	435	178,529	136,201	40,409	138,659	27,224	178,529	142,375	40,212	143,555	27,692	179,347	149,006	42,62	137,125	32,19	178,529	139,128	40,216	141,297	28,805	116,5346	89,642	31,458	94,957	23,283
31	450	184,854	142,086	41,254	143,775	27,971	184,854	148,096	41,24	148,927	28,387	185,708	155,123	43,718	142,574	32,883	184,854	144,878	41,157	146,654	29,576	121,7137	93,629	32,292	98,732	23,596
32	465	191,047	147,81	42,214	148,884	28,593	191,047	153,698	42,909	154,093	29,107	192,099	161,268	45,059	147,51	33,599	191,047	150,565	42,597	151,907	30,433	126,9645	97,665	32,864	102,515	23,936
33	480	197,153	153,933	43,991	153,953	29,376	197,153	159,197	43,964	159,197	29,731	198,004	167,011	46,112	152,443	34,413	197,153	156,145	44,096	157,103	31,231	127	101,648	33,367	106,267	24,239
34	495	203,214	158,889	45,292	158,971	30,069	203,214	164,701	45,39	164,256	30,52	203,871	172,602	47,322	157,545	35,263	203,214	161,656	45,236	162,208	32,024	128	105,642	34,401	109,966	24,579
35	510	209,102	164,294	45,916	163,836	30,726	209,102	170,042	46,566	169,288	31,12	209,747	177,321	48,681	162,282	36,198	209,102	167,576	46,37	167,111	32,84	129	109,666	35,357	113,793	25,023
36	525	214,951	169,599	47,758	168,72	31,461	214,951	175,326	47,86	174,157	31,889	214,933	182,91	50,144	166,976	37,166	214,951	171,436	47,862	169,996	33,705	131,8874	113,696	35,843	117,523	25,438
37	540	220,645	174,8	48,791	173,527	32,037	220,645	180,599	49,006	178,959	32,451	220,886	187,612	51,92	171,764	38,245	220,645	176,25	48,697	174,743	34,493	136,6886	117,835	36,768	121,178	25,845
38	555	226,352	179,894	49,922	178,284	32,6	226,352	185,748	50,277	183,732	33,248	225,845	192,938	53,045	176,078	39,287	226,352	181,265	50,348	179,431	35,131	141,4968	121,98	37,749	124,802	26,288
39	570	231,857	184,844	51,572	182,873	33,206	231,857	190,792	52,003	188,38	34,003	231,32	197,47	54,75	180,473	40,431	231,857	186,296	51,456	184,15	35,803	146,2714	126,096	39,144	128,447	26,768
40	585	237,282	189,737	53,123	187,388	33,935	237,282	195,813	53,012	193,012	34,672	236,693	202,587	55,887	185,12	41,515	237,282	191,138	52,646	188,79	36,524	150,9485	130,128	39,236	131,952	27,248
41	600	242,732	194,536	55,664	191,989																					