



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Kozlik

**Istraživanje otpornosti na požar betona
spravljenog s otpadnim materijalima**

Zagreb, 2021.

Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima



UNIVERSITY OF ZAGREB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Martina Kozlik

**Research on fire resistance of concrete made
with eco-friendly components**

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc.dr.sc. Marije Jelčić Rukavine, dipl.ing.građ. te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./2021.

SADRŽAJ:

1	UVOD	10
2	CILJEVI RADA I HIPOTEZE.....	12
3	STANJE PODRUČJA.....	13
3.1	UTJECAJ PEPELA DRVNE BIOMASE NA SVOJSTVA BETONA	13
3.2	UTJECAJ VISOKIH TEMPERATURA NA SVOJSTVA BETONA	16
3.2.1	<i>Utjecaj visokih temperatura na cementnu pastu.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Utjecaj visokih temperatura na agregat</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Utjecaj visokih temperatura na toplinska svojstva betona</i>	<i>19</i>
3.2.3.1	gubitak mase	20
3.2.3.2	toplinska vodljivost.....	20
3.2.3.3	specifični toplinski kapacitet	21
3.2.4	<i>Utjecaj visokih temperatura na mehanička svojstva betona.....</i>	<i>21</i>
3.2.4.1	tlačna čvrstoća.....	21
3.2.4.2	vlačna čvrstoća.....	23
3.2.4.3	modul elastičnosti	23
3.2.4.4	odnos naprezanje-deformacija	24
3.2.5	<i>Utjecaj visokih temperatura na deformacijska svojstva</i>	<i>25</i>
3.2.5.1	toplinsko širenje betona	25
3.2.5.2	puzanje i prijelazna (engl. transient) deformacija.....	25
3.3	UTJECAJ POLIMERNIH VLAKNA NA SVOJSTVA BETONA	27
3.3.1	<i>Polipropilenska vlakna</i>	<i>27</i>
3.3.2	<i>Reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma</i>	<i>28</i>
3.3.2.1	Utjecaj RTPF-a na svojstva betona na sobnim temperaturama	29
3.3.2.2	Utjecaj RTPF-a na svojstva betona na visokim temperaturama	29
3.4	ZAKLJUČAK STANJA PODRUČJA.....	30
4	OPIS EKSPERIMENTALNOG RADA.....	31
4.1	MATERIJALI KORIŠTENI ZA SPRAVLJANJE BETONSKIH MJEŠAVINA	33
4.2	OSNOVNA SVOJSTVA ISTRAŽIVANIH BETONA U SVJEŽEM I OČVRSNULOM STANJU	36
4.3	IZLAGANJE BETONSKIH UZORAKA POŽARNIM TEMPERATURAMA	37
4.4	METODE ISPITIVANJA	39
4.4.1	<i>Određivanje promjene tlačne čvrstoće</i>	<i>39</i>
4.4.2	<i>Određivanje promjene modula elastičnosti</i>	<i>40</i>
4.4.3	<i>Određivanje plinopropusnosti</i>	<i>42</i>
4.4.4	<i>Određivanje promjene brzine prolaska ultrazvuka.....</i>	<i>44</i>

4.4.5	<i>Mjerenje širine pukotina optičkim mikroskopom.....</i>	46
4.4.6	<i>Promjena mase.....</i>	46
4.4.7	<i>Toplinska analiza metodom termogravimetrije</i>	46
5	REZULTATI ISPITIVANJA.....	48
5.1	MEHANIČKA SVOJSTVA	48
5.1.1	<i>Smanjenje tlačne čvrstoće.....</i>	48
5.1.2	<i>Smanjenje modula elastičnosti.....</i>	51
5.2	TRAJNOSNA SVOJSTVA	54
5.2.1	<i>Plinopropusnost.....</i>	54
5.2.2	<i>Smanjenje brzine prolaska ultrazvuka.....</i>	58
5.3	DODATNA SVOJSTVA POTREBNA ZA ANALIZU REZULTATA MEHANIČKIH I TRAJNOSNIH SVOJSTAVA	59
5.3.1	<i>Širine pukotina nakon toplinskog tretiranja uzoraka</i>	60
5.3.1	<i>Smanjenje mase.....</i>	66
5.3.2	<i>TGA analiza</i>	67
6	DISKUSIJA DOBIVENIH REZULTATA	69
6.1	MEHANIČKA SVOJSTVA	69
6.2	TRAJNOSNA SVOJSTVA	70
6.3	DODATNO ISPITANA SVOJSTVA.....	70
6.4	USPOREDBA REZULTATA S OSTALIM ISTRAŽIVANJIMA	71
7	OSNOVNI ZAKLJUČCI RADA.....	73
8	ZAHVALE	76
9	LITERATURA	77
10	PRILOZI.....	83
10.1	PRILOG 1 – POJEDINAČNI REZULTATI ISPITIVANJA TLAČNE ČVRSTOĆE	84
10.2	PRILOG 2 – POJEDINAČNI REZULTATI ISPITIVANJA STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI.....	85
10.3	PRILOG 3- POJEDINAČNI REZULTATI ISPITIVANJA PLINOPROPUSNOSTI.....	86
10.4	PRILOG 4 – POJEDINAČNI REZULTATI ISPITIVANJA BRZINE PROLASKA ULTRAZVUKA	89
10.5	PRILOG 5 – POJEDINAČNI REZULTATI MJERENJA ŠIRINA PUKOTINA	92
10.6	PRILOG 6 – POJEDINAČNI REZULTATI ISPITIVANJA SMANJENJA MASE	93

Popis slika:

Slika 1 Trend rasta emisije CO ₂ u cementnoj industriji [2]	10
Slika 2 Rast proizvodnje energije iz biomase u Europi [8]	13
Slika 3 Uzorci PDB-a: a) pepeo s dna peći, b) leteći pepeo krupnije frakcije, c) finiji leteći pepeo [7]	14
Slika 4 Toplinska nekompatibilnost cementne paste i agregata na visokim temperaturama [5]	16
Slika 5 Primjer posljedica eksplozivnog odlamanja armirano-betonskog elementa izloženog visokim temperaturama [15]	17
Slika 6 Toplinska vodljivost betona u ovisnosti o temperaturi [17]	20
Slika 7 Promjena specifičnog toplinskog kapaciteta betona u ovisnosti o temperaturi [17]	21
Slika 8 Tlačna čvrstoća u ovisnosti o temperaturi [18]	22
Slika 9 Vlačna čvrstoća betona u ovisnosti o temperaturi [18]	23
Slika 10 Modul elastičnosti betona u ovisnosti o temperaturi [18].....	24
Slika 11 Odnos naprezanje-deformacija betona izloženog različitim temperaturama [18].....	24
Slika 12 a) polipropilenska vlakna (PP), b) reciklirana polimerna vlakna od autoguma (RTPF) [25]	28
Slika 13 CEM I 42,5 R (lijevo), PDB (desno) [28]	33
Slika 14 Granulometrijski sastav CEM I 42,5 R i PDB	35
Slika 15 Granulometrijski sastav agregata [28].....	35
Slika 16 Monofilamentna PP vlakna (lijevo), RTPF (desno) [28].....	36
Slika 17 Položaj uzoraka u peći tijekom toplinskog tretiranja	38
Slika 18 Ciklus toplinskog tretiranja uzoraka	38
Slika 19 Ostvarene temperature u uzorku prvih 60 sati toplinskog tretiranja	39
Slika 20 Izgled loma uzorka nakon ispitivanja tlačne čvrstoće	40
Slika 21 Ciklusi za određivanje stabiliziranog statičkog modula elastičnosti prema metodi B	41

Slika 22 Postavljanje uzorka za ispitivanje modula elastičnosti.....	41
Slika 23 Uređaj za mjerenje plinopropusnosti.....	43
Slika 24 Komora u koju se stavlja uzorak za mjerenje plinopropusnosti	43
Slika 25 Čuvanje uzoraka u eksikatoru prije ispitivanja plinopropusnosti	44
Slika 26 Ispitivanje brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorak	45
Slika 27 Optički mikroskop (lijevo), mjerenje pukotina pomoću računalnog programa (desno)...	46
Slika 28 Priprema uzorka za provođenje toplinske analize	47
Slika 29 Priprema uzoraka za provođenje toplinske analize	47
Slika 30 Postavljanje uzorka u uređaj za provođenje toplinske analize.....	48
Slika 31 Ovisnost tlačne čvrstoće 1.grupe uzoraka i temperature toplinskog tretiranja uzoraka ...	49
Slika 32 Relativna tlačna čvrstoća 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja	49
Slika 33 Ovisnost tlačne čvrstoće 2.grupe uzoraka i temperature toplinskog tretiranja uzoraka ...	50
Slika 34 Relativna tlačna čvrstoća 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja	50
Slika 35 Modul elastičnosti 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja.....	51
Slika 36 Relativni modul elastičnosti 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja	52
Slika 37 Modul elastičnosti 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja.....	53
Slika 38 Relativni modul elastičnosti 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja	53
Slika 39 Koeficijenti plinopropusnosti 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi	55
Slika 40 Koeficijenti plinopropusnosti 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi	55
Slika 41 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 1.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi	56
Slika 42 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 1.grupu uzoraka u odnosu na referentnu mješavinu.....	56

Slika 43 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 2.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi	57
Slika 44 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 2.grupu uzoraka u odnosu na mješavinu M10-PDB	57
Slika 45 Brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke 1.grupe mješavina u ovisnosti o temperaturi	58
Slika 46 Relativno smanjenje brzine prolaska ultrazvuka za 1.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi.....	58
Slika 47 Brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke 2.grupe mješavina u ovisnosti o temperaturi	59
Slika 48 Relativno smanjenje brzine prolaska ultrazvuka za 2.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi.....	59
Slika 49 Maksimalne širina pukotina u ovisnosti o temperaturi za 1. grupu uzoraka	61
Slika 50 Maksimalne širina pukotina u ovisnosti o temperaturi za 2. grupu uzoraka	61
Slika 51 Širine pukotina za mješavinu M0 nakon izlaganja temperaturi od 400 °C	62
Slika 52 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 400 °C	62
Slika 53 Širine pukotina za mješavinu M30-PDB nakon izlaganja temperaturi od 400 °C	62
Slika 54 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 400 °C	63
Slika 55 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2PP nakon izlaganja temperaturi od 400 °C ...	63
Slika 56 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2RTPF nakon izlaganja temperaturi od 400 °C	63
Slika 57 Širine pukotina za mješavinu M0 nakon izlaganja temperaturi od 600 °C	64
Slika 58 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 600 °C	64
Slika 59 Širine pukotina za mješavinu M30-PDB nakon izlaganja temperaturi od 600 °C	64
Slika 60 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 600 °C	65
Slika 61 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2PP nakon izlaganja temperaturi od 600 °C ...	65
Slika 62 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2RTPF nakon izlaganja temperaturi od 600 °C	65
Slika 63 Smanjenje mase za 1. grupu u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja	66

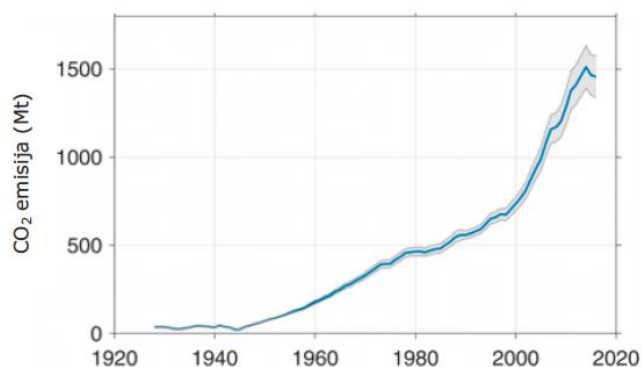
Slika 64 Smanjenje mase za 2.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja	67
Slika 65 Termogravimetrijska analiza uzoraka toplinski tretiranih na temperaturi od 400 °C	68
Slika 66 Termogravimetrijska analiza uzoraka toplinski tretiranih na 600 °C	68
Slika 67 Količina kalcijevog hidroksida u temperaturnom području 400-600 °C	69
Slika 68 Usporedba relativnih tlačnih čvrstoća betona.....	72
Slika 69 Usporedba relativnih modula elastičnosti betona	72

Popis tablica:

Tablica 1 Sastav projektiranih mješavina i svojstva u svježem i očvrnulom stanju	31
Tablica 2 Provedena ispitivanja betonskih mješavina	32
Tablica 3 Kemijski sastav komponenti	34
Tablica 4 Svojstva polimernih vlakana	36
Tablica 5 Kriteriji za kvalitetu betona prema plinopropusnosti betona [34].....	44
Tablica 6 Procjena kvalitete betona prema brzini ultrazvuka [36]	45

1 UVOD

Kontinuirani napredak tehnologije omogućio je značajan razvoj znanosti u pogledu istraživanja i otkrivanja novih materijala. Povećanjem svjetske populacije povećava se i opseg gradnje, a samim time i proizvodnja građevinskih materijala. Cement kao neizostavna komponenta betona čini značajan udio u proizvodnji materijala, no pri toj proizvodnji dolazi do velike potrošnje energije te značajne emisije stakleničkog plina CO₂ gdje emisija stakleničkih plinova približno iznosi 1kg po 1kg portlandskog cementa. U odnosu na druge industrije, cementna industrija doprinosi otprilike 7% od ukupne emisije CO₂ [1]. Budući da je beton jedan od najčešće korištenih materijala u gradnji, postoji velika potreba za unaprjeđenjem tog materijala na način da se klasičnom sastavu betona dodaju nekonvencionalni dodaci u cilju zadržavanja ili poboljšanja mehaničkih i trajnosnih svojstava betona, a sve sa svrhom smanjenja udjela cementa koji iziskuje veliku potrošnju energije te emisiju štetnih plinova.



Slika 1 Trend rasta emisije CO₂ u cementnoj industriji [2]

Jedan od načina smanjenja emisije CO₂ uzrokovane proizvodnjom cementa je upotreba miješanih cemenata gdje se dio portlandcementnog klinkera zamjenjuje nusproizvodima koji imaju slična reaktivna svojstva, a neki od njih su leteći pepeo nastao izgaranjem ugljena u termoelektranama te zgura koja se dobiva pri proizvodnji željeza. Osim smanjenja udjela portlandcementnog klinkera u proizvodnji, udio cementa može se smanjiti u sastavu betona zamjenom mineralnim dodacima koji mogu utjecati na svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju [1]. Imajući na umu probleme globalnog zatopljenja te gospodarenja obnovljivim izvorima energije, raste interes za istraživanjem tzv. otpadnih materijala kao novih dodataka u proizvodnji betona. Osim što primjena ekoloških komponenti može imati pozitivan utjecaj na

smanjenje potrebne energije pri proizvodnji cementa te smanjenje štetne količine emisije CO₂, također uporabom takvih komponenti smanjuju se troškovi odlaganja otpada kao i drugi potencijalno opasni problemi vezani uz odlaganje otpada. Unazad nekoliko godina istražuje se mogućnost upotrebe otpadnog pepela koji se dobiva tijekom proizvodnje energije uporabom drvene biomase kao zamjena udjela cementa u betonu. S obzirom na rastući broj energana na biomasu raste potencijal iskorištavanja otpada koji nastaje prilikom proizvodnje energije. Može se reći kako gledajući cijeli proces od samog utroška energije i utjecaja na okoliš u proizvodnji materijala pa sve do njegove ugradnje, održavanja i na kraju odlaganja, betoni koji u sebi sadrže tzv. ekološke komponente imaju pozitivan utjecaj na okolinu. Kako bi se te ekološke komponente mogle implementirati u proizvodnji betona potrebno je napraviti određena istraživanja kako bi se mogao odrediti njihov utjecaj na svojstva betona. [3]

Građevine su svakodnevno izložene raznim utjecajima i pojavama koje u određenoj mjeri mogu biti štetne. Jedna od takvih je i rizik od pojave požara u betonskim konstrukcijama. Iako se beton smatra negorivim materijalom, visoke požarne temperature mogu štetno utjecati na njegova svojstva [4]. Osim što može doći do degradacije mehaničkih svojstava betona, može doći i do pojave eksplozivnog odlamanja betona koja može izložiti armaturu visokim požarnim temperaturama na koje je osjetljiva te može doći do smanjenja poprečnog presjeka i u konačnici do oslabljivanja elementa. [5] Najučinkovitija i najjeftinija mjera smanjenja rizika od pojave eksplozivnog odlamanja je dodatak 2 kg/m³ industrijskih polipropilenskih vlakana. Nakon požara važno je ocijeniti mehanička i trajnosna svojstva betona kako bi se mogao donijeti zaključak o nosivosti opečarene konstrukcije te poduzimanju potrebnih mjera za njeno ojačanje [6].

U ovom radu analizirani su utjecaji dviju ekoloških komponenti a to su pepeo drvene biomase (PDB) kao zamjena za cement u količini do 30% na težinu te polimerna vlakna dobivena recikliranjem otpadnih automobilskih guma (RTPF) kao zamjena za polipropilenska vlakna u količini od 2 kg/m³. Fokus istraživanja stavljen je na ispitivanje mehaničkih i trajnosnih svojstava nakon djelovanja visokih temperatura od 600°C. Zaključci su doneseni temeljem analize rezultata ispitivanja: tlačne čvrstoće, statičkog modula elastičnosti, plinopropusnosti, brzine prolaska ultrazvuka, širine razvijenih pukotina, promjene mase te termogravimetrijske analize.

2 CILJEVI RADA I HIPOTEZE

Motivacija za izradu ovog rada bila je podizanje svijesti o štetnom utjecaju proizvodnje cementa na okoliš te rastući problem gospodarenja otpadom što zajedno čine aktualne probleme vezane za temu održivog razvoja, stoga su glavni ciljevi provedenih ispitivanja i analiza u sklopu ovog rada:

- 1) Istražiti mogućnost zamjene udjela cementa pepelom drvene biomase, a da se pritom ne naruše dodatno mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog visokim požarnim temperaturama
- 2) Istražiti utjecaj zamjene komercijalnih polipropilenskih vlakana s recikliranim polimernim vlaknima dobivenim iz otpadnih automobilskih guma te njihov utjecaj na preostala mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog visokim požarnim temperaturama

Temeljem navedenog postavljena je osnovna hipoteza ovog istraživačkog rada:

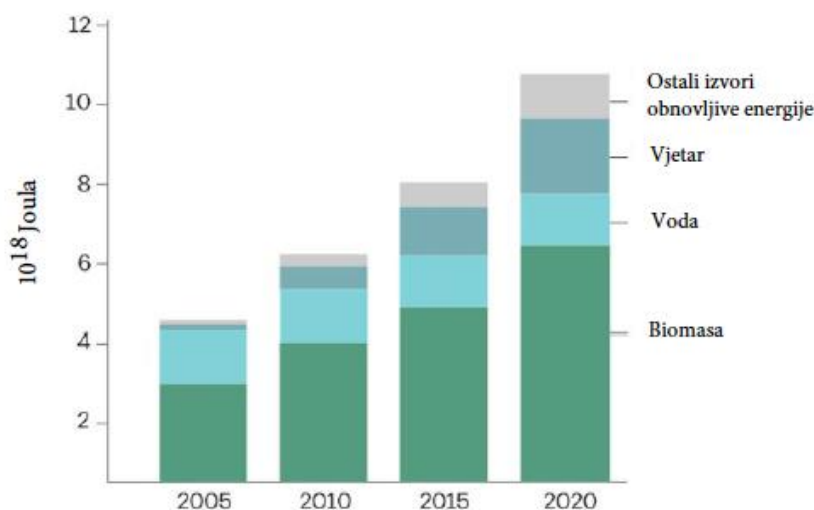
Zamjenom portland-cementa pepelom iz drvene biomase i polipropilenskih vlakana s polimernim vlaknima iz otpadnih guma neće se dodatno narušiti mehanička i trajnosna svojstva betona nakon djelovanja visokih temperatura u odnosu na obični beton.

Kako bi se navedeni dodaci mogli implementirati u proizvodnji betona te na taj način pridonijeti smanjenju ukupne potrošnje energije u proizvodnji betona te smanjenju štetnog utjecaja na okoliš bitno je provesti temeljita ispitivanja koja daju zadovoljavajuće rezultate u pogledu utjecaja na mehanička i trajnosna svojstva betona.

3 STANJE PODRUČJA

3.1 Utjecaj pepela drvene biomase na svojstva betona

Poticanjem iskorištavanja obnovljivih izvora energije pridonijelo je znakovitom povećanju broja energana na biomasu (Slika 2). Energane na krutu i plinovitu biomasu najznačajniji su obnovljivi izvori energije u Europskoj Uniji pa se predviđa kako će odigrati važnu ulogu u dostizanju europskih ciljeva u pogledu održivog razvoja do 2030. godine [7]. Ogromne količine otpada koje nastaju u drvenoj industriji predstavljaju izazovnu priliku gdje postoji mogućnost upotrebe tog otpada u proizvodnji materijala u području građevinarstva [3]. Drvni otpad smatra se ugljično neutralnim gorivom iz razloga što drvo apsorbira istu količinu ugljičnog dioksida tijekom rasta kao i tijekom izgaranja što mu daje prednost u odnosu na druge vrste biomase. Međutim, kod postupanja s pepelom na odlagalištima treba biti na oprezu s obzirom na to da može doći do onečišćenja zraka finim česticama pepela drvene biomase (PDB-a) nošenim vjetrom što može uzrokovati zdravstvene smetnje stanovnicima koji žive blizu odlagališta. Osim toga, u slučaju odlaganja PDB-a pojavljuje se problem onečišćenja podzemnih voda zbog izlučivanja teških metala iz PDB-a što u konačnici može iziskivati veće troškove odlaganja tog otpada.[7] Upravo se iz tih razloga u zadnjih nekoliko godina pojavio veliki interes za istraživanjem utjecaja otpadnog pepela nastao proizvodnjom energije uporabom drvene biomase na mehanička i trajnosna svojstva betona.



Slika 2 Rast proizvodnje energije iz biomase u Europi [8]

Svojstva PDB-a razlikuju se u ovisnosti o kvaliteti sirovine, tehnologiji izgaranja te o lokaciji na kojoj se sakupljaju sirovine za biomasu. S obzirom na raznolikost svojstva PDB-a potrebno je napraviti temeljna istraživanja kako bi se isti mogao sustavno ocijeniti u pogledu prikladnog korištenja kao zamjene cementa ili kao dodatka cementnim kompozitima. [9]

Ekološka prihvatljivost PDB-a kao potencijalno nove sirovine u industriji cementa i betona proizlazi iz sposobnosti cementne matrice da fizički i kemijski veže zagađujuće elemente (u ovom slučaju teške metale) unutar svoje strukture [10].

PDB se može podijeliti na pepeo s dna peći (*ložišni pepeo*) te na leteći pepeo koji se dijeli na finiju i krupniju frakciju (Slika 3) [7]. Prema nekim istraživanjima koncentracija teških metala (Zn, Cd, Pb, Hg) i organskih zagađivača (PCDD/F, PAH) veća je kod letećeg pepela u odnosu na ložišni što bi značilo kako svaka vrsta PDB-a zahtjeva drugačiju strategiju odlaganja. [10]



Slika 3 Uzorci PDB-a: a) pepeo s dna peći, b) leteći pepeo krupnije frakcije, c) finiji leteći pepeo [7]

S obzirom da neke vrste pepela drvene biomase pokazuju pucolanska svojstva dosad su provedena određena ispitivanja kako bi se moglo ocijeniti može li se PDB koristiti u proizvodnji betona kao zamjena udjela cementa. Rezultati su pokazali kako je djelovanje PDB-a slično kao djelovanju letećeg pepela koji se najviše koristi kao pucolanski dodatak. [9][11]

Prema procjenama [12] zamjena udjela cementa mogla bi smanjiti emisiju CO₂ dobivenu proizvodnjom cementa za otprilike 400 mil.tona godišnje što bi značilo da primjena PDB-a može unaprijediti održivost betona.

Ban i Ramli [11] proveli su ispitivanja vezana za korištenje PDB-a kao zamjene udjela cementa u svježem i očvrslom betonu. Ispitivanja su pokazala kako je potrebna veća količina vode za postizanje standardne konzistencije cementne paste što je posljedica veće specifične površine čestica pepela drvene biomase u odnosu na čestice cementa. Nadalje, zamjena udjela cementa PDB-om produljuje potrebno vrijeme za postizanje početnog i konačnog vremena vezivanja cementne paste. Što se tiče rezultata u očvrslom stanju, nekoliko istraživanja su dovela do sličnih rezultata kako zamjena udjela cementa s PDB-om u rasponima od 5% do 30% dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće betona u odnosu na referentni beton, bez obzira na vrijeme njegovanja. Udoeyo i suradnici [13] su došli do zaključka kako do smanjenja tlačne čvrstoće vjerojatno dolazi zbog toga što se čestice PDB-a ponašaju više kao punilo unutar cementne matrice nego kao vezivo.

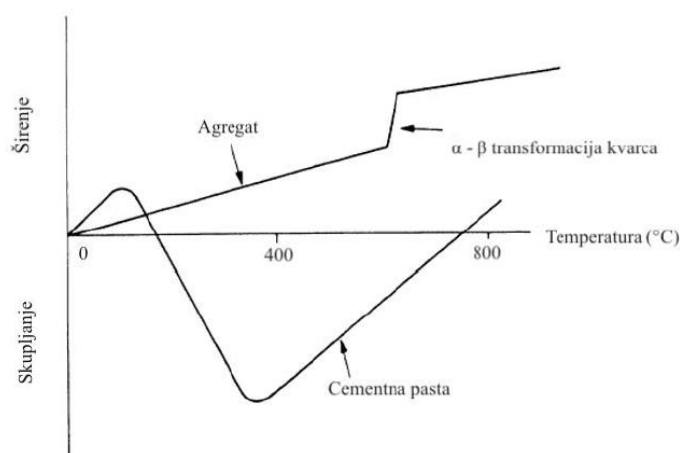
Teixeira i suradnici [9] proveli su istraživanja u području utjecaja PDB-a na svojstva betona kojima se došlo do rezultata kako u svježem stanju, u odnosu na referentnu mješavinu, betoni s dodatkom pepela drvene biomase imaju manju volumensku masu što se smatra posljedicom manje specifične težine pepela u odnosu na portland cement. Osim toga postoji i povećana potreba za vodom koja je izražena za betone s više od 10% zamjene cementa u odnosu na masu.

Istraživanja svojstava betona s PDB-om u očvrslom stanju dovela su do rezultata kako povećanje postotka PDB-a kao zamjene udjela cementa dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće u odnosu na referentni beton. Najbolji rezultati dobiveni su zamjenom od 10% PDB-a u odnosu na masu cementa, dok povećanje postotka zamjene cementa dovodi do lošijih rezultata u pogledu čvrstoće betona. Razlog tome je što se povećanjem udjela PDB-a povećava i poroznost betona što dovodi do smanjenja čvrstoće. Smanjenje čvrstoće može biti i rezultat smanjene pucolanske aktivnosti pepela drvene biomase u odnosu na onu letećeg pepela. [3] [9]

Navedena istraživanja pokazuju kako se PDB može koristiti kao zamjena udjela cementa u betonu, međutim, s obzirom na nedostatak provedenih istraživanja o utjecaju visokih temperatura na zamjenu cementa PDB-om gdje se prvenstveno promatra utjecaj na mehanička i trajnosna svojstva betona, ovaj rad nastoji poslužiti kao uvod i podloga za buduća istraživanja u tom području.

3.2 Utjecaj visokih temperatura na svojstva betona

Beton se klasificira kao anorganski i negorivi materijal pa je opće prihvaćeno mišljenje da visoke požarne temperature nemaju značajan utjecaj na svojstva betona. S obzirom da beton ima malu toplinsku vodljivost te relativno veliki specifični toplinski kapacitet od velike važnosti je njegova primjena u području zaštite konstruktivnih elemenata od materijala na koje požar nepovoljno djeluje, kao npr. čelik. Visoke temperature uzrokuju kemijske promjene, promjene sadržaja vlage u betonu te promjene u mikrostrukturi betona što rezultira smanjenjem čvrstoće i krutosti betona. Naprezanja koja se događaju zbog volumnih promjena dovode do pukotina u betonu. Najveći dio promjena događa se u cementnoj pasti, dok su promjene u agregatu znatno manje. Kod betona s malim vodocementnim omjerom, kao što su betoni visokih čvrstoća te samozbijajući beton, postoji opasnost od eksplozivnog odlamanja (Slika 5) pri izlaganju visokim temperaturama koje se događa zbog prevelikog tlaka u porama betona zbog isparavanja vlage. Eksplozivno odlamanje može dovesti do smanjenja poprečnog presjeka konstruktivnih elemenata te do izlaganja armature visokim temperaturama što može biti pogubno za nosivost konstrukcije budući da čelik gubi gotovo 50% čvrstoće na temperaturama višim od 500°C. Ne kompatibilnost cementne paste i agregata (Slika 4) kod izlaganja visokim temperaturama uzrokuje pukotine u betonu jer se zagrijavanjem zrna agregata šire, a cementna pasta skuplja. Utjecaji visokih temperatura na osnovne komponente betona - očvrsnulu cementnu pastu te na agregat detaljnije su opisani u poglavljima 3.2.1 i 3.2.2. [14]



Slika 4 Toplinska nekompatibilnost cementne paste i agregata na visokim temperaturama [5]



Slika 5 Primjer posljedica eksplozivnog odlamanja armirano-betonskog elementa izloženog visokim temperaturama [15]

3.2.1 Utjecaj visokih temperatura na cementnu pastu

U očvrstnuloj cementnoj pasti voda je prisutna kao evaporirana voda u kapilarnim i gel porama te kao kemijski vezana voda u hidratiziranim česticama cementa. Ravnotežno stanje vode cementne paste postiže se kada više nema kretanja vlage u cementnoj pasti, odnosno kada je vlažnost paste u ravnoteži s relativnom vlažnosti vanjskog okoliša. U normalnim uvjetima vanjskog okoliša, gubitak evaporirane vode iz očvrstnule cementne paste može potrajati nekoliko godina. Povišene temperature sklone su eliminaciji vode u porama te ubrzavaju procesa difuzije vode u očvrstnuloj cementnoj pasti. Pretpostavlja se da za temperature ispod 105°C nema velikog utjecaja na kemijski vezanu vodu, dok se voda u kapilarama i gel porama smanjuje u području između 40°C i 105°C. Nakon izlaganja temperaturama iznad 105°C dovoljno dugo vremena sva evaporirana voda izađe iz očvrstnule cementne paste. Na temperaturama iznad 105°C količina kemijski vezane vode u produktima hidratacije cementa se smanjuje. [14]

Harmathy [16] je proveo istraživanje na očvrstnuloj cementnoj pasti vodocementnog omjera 0.5 te došao do zaključka kako proces dehidracije započinje s evaporacijom vode te da dehidracija CSH gela kontinuirano raste na temperaturama od 105°C pa do 800°C. CSH gel se razlaže na komponente β -C₂S, β -CS i na vodu gdje se kalcijev hidroksid (Ca(OH)₂), formiran u procesu hidratacije cementa, razlaže na kalcijev oksid (CaO) i na vodu. Na temperaturi od 500°C približno 70% od reakcije dehidracije je dovršeno, a na temperaturi od oko 850°C CSH gel je potpuno dehidrirao. Brzina reakcije najveća je na temperaturama od 200°C i 700°C. Proces dehidracije kalcijevog hidroksida započinje na temperaturi od oko 400°C, a završava na

temperaturi od 600°C. Na temperaturi od 500°C ta reakcija se najbrže odvija. [14] Kalcijev hidroksid se u procesu dehidracije razlaže na kalcijev oksid (CaO) i vodu (H₂O). Kalcijev oksid koji je dobiven tijekom zagrijavanja procesom dehidracije kalcijevog hidroksida apsorbira vlagu tijekom hlađenja na zraku ili uslijed gašenja vodom. Spajanjem kalcijevog oksida (CaO) i vode (H₂O) dolazi do ponovnog stvaranja kalcijevog hidroksida, uz povećanje volumena od otprilike 44%. To širenje volumena uzrokuje dodatni razvoj pukotina i slabljenje strukture matrice. [17]

Poroznost očvrstnule cementne paste mijenja se kada je izložena visokim temperaturama. Harmathy je koristeći formule na osnovi Powersovog modela dobio vrijednosti poroznosti cementne paste u odnosu na visoke temperature koje su bile uvećane za otprilike 34% u temperaturnom području od 105°C do 900°C. Također se došlo do zaključka kako se pri povišenim temperaturama povećava veličina pora, a samim time i specifična unutarnja površina, što je posljedica progresivnog raspadanja strukture CSH gela kako napreduje dehidracija [14].

U nekim situacijama temperature mogu doseći takvu vrijednost koja može uzrokovati topljenje cementne paste. Na topljenje utječe kemijski sastav portlandcementsa. Općenito, topljenje portlandcementne paste započinje pri temperaturama od 1350°C [14].

3.2.2 Utjecaj visokih temperatura na agregat

Agregat čini 60 - 80 % ukupnog volumena betona te promjene u svojstvima agregata pri zagrijavanju mogu imati značajan utjecaj na ponašanje betona na povišenim temperaturama. Većina agregata dobivenih iz uobičajenih stijena sadrži unutarnje pore. Količina vode koju agregati mogu apsorbirati ovisi o veličini pora. Kod izlaganja betona visokim temperaturama voda koja je prisutna u agregatima može evaporirati. Većina agregata korištenih za dobivanje betona je stabilna na temperaturama od 500°C, osim silikatnih agregata, ostali ne podliježu promjenama i razlaganju na temperaturama manjim od 600°C. Pri visokim temperaturama agregati gube evaporiranu vodu dok određene vrste agregata podliježu endotermnom procesu kristalizacije što rezultira značajnom volumnom širenju. Toplinska stabilnost materijala pa i agregata mjeri se termogravimetrijskim ispitivanjem koje pokazuje promjenu mase u ovisnosti o temperaturi. Te promjene ukazuju na činjenicu da je razlaganje agregata popraćeno značajnom apsorpcijom topline [14].

S obzirom da se različite vrste agregata različito ponašaju pod djelovanjem visokih temperatura, u nastavku su spomenute najčešće korištene vrste agregata.

Silikatni agregati sadrže kvarc (SiO_2) koji podliježe raznim fizikalnim promjenama pri povišenim temperaturama. Najpoznatija od njih je reverzibilna endotermna kristalna transformacija α -kvarca u β -kvarc koja se postupno događa u temperaturnom razmaku između 500°C i 650°C , a najveću vrijednost dostiže pri temperaturi od 575°C . Pretpostavlja se da se promjene u masi događaju zbog dehidracije pojedinih mineralnih komponenti koje sadrže vodu.[14]

Dekarbonatizacija karbonatnih agregata ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) događa se na temperaturama između 600°C i 900°C gdje je značajna količina ugljikovog dioksida koja nastaje pri toj reakciji. Intenzitet reakcije ovisi o temperaturi, tlaku te o količini SiO_2 koja je prisutna u vapnencu. Prilikom hlađenja, kalcijev oksid veže se s vlažnošću iz zraka te se formira kalcijev hidroksid koji uzrokuje povećanje volumena od otprilike 44% što može uzrokovati pukotine i oštećenja betonskih elemenata. Glavni uzrok promjene mase kod karbonatnih agregata je razlaganje karbonata uz reakcije razlaganja komponenti.[14]

Laki agregati su iznimno postojani na visoke temperature koje mogu prelaziti i 800°C iz razloga što se proizvode na puno višim temperaturama, čak do 1600°C . S obzirom na niski koeficijent toplinskog istežanja i malu toplinsku provodljivost, smatraju se izdržljivima kod izlaganja visokim temperaturama. [14]

Ponašanje betonskih elemenata izloženim požaru ovisi djelomično o toplinskim, mehaničkim te deformacijskim svojstvima korištenog betona. S porastom temperature navedena svojstva mogu se znatno promijeniti, a ovise o sastavu betona. Toplinska svojstva betona definiraju intenzitet prijenosa topline u konstruktivnom elementu dok mehanička svojstva uvjetuju opseg degradacije betona. [18]

3.2.3 Utjecaj visokih temperatura na toplinska svojstva betona

Toplinska svojstva betona o kojima će ovisiti prijenos topline kod materijala, a u konačnosti prenešena toplina će utjecati na preostala mehanička i trajnosna svojstva, su: gubitak mase, toplinska vodljivost te specifični toplinski kapacitet. Navedena svojstva ovise ponajviše o vrsti agregata, vlažnosti te sastavu betona.

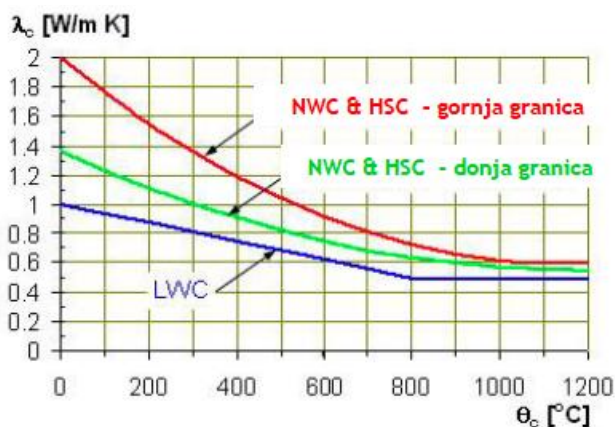
3.2.3.1 gubitak mase

Promjene u gustoći betona pri izlaganju visokim temperaturama uzrokovane su gubitkom mase, toplinskim širenjem te skupljanjem uslijed sušenja kao i difuzijom vode ili ispuštenih plinova (prilikom dekarbonatizacije), dehidracijom, topljenjem ili sinteriranjem. [14]

Zagrijavanjem betona dolazi do gubitka mase zbog evaporacije slobodne i vezane vode na temperaturama od 100 do 200 °C te gubitkom kemijski vezane vode na temperaturama iznad 100 °C. Na temperaturama između 400 i 500 °C dolazi do razlaganja kalcijevog hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a na temperaturama iznad 600 °C dolazi do dekarbonatizacije. Također promjene u gustoći betona kod izlaganja visokim temperaturama ovise i o vrsti agregata. [19]

3.2.3.2 toplinska vodljivost

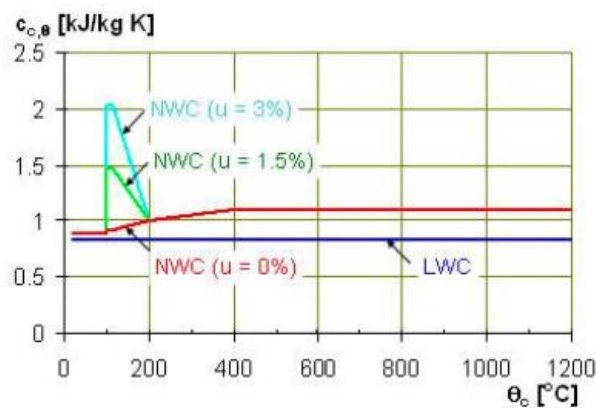
Toplinska vodljivost betona ovisi o različitim parametrima betona kao što su poroznost, vlažnost, gustoća, a s porastom temperature toplinska vodljivost betona pada. U nedostatku konkretnih vrijednosti za određenu vrstu betona, koriste se podaci dani u Eurokod-u 2, dijelu kojim se istražuje utjecaj visokih temperatura na betonske konstrukcije (HRN EN 1992-1-2) [20] gdje se razlikuje gornja i donja granicu toplinske vodljivosti betona za one normalnih čvrstoća kao i za one visokih čvrstoća. Razlike u toplinskim vodljivostima za različite vrste prikazane su na Slika 6.



Slika 6 Toplinska vodljivost betona u ovisnosti o temperaturi [17]

3.2.3.3 specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet betona najviše ovisi o vrsti agregata gdje je primjerice kod lakih agregata specifični toplinski kapacitet betona niži u odnosu na druge vrste. Također, specifični toplinski kapacitet ovisi i o količini vlage u betonu. Betoni sa većom količinom vlažnosti imaju veći specifični toplinski kapacitet u temperaturnom području gdje dolazi do isparavanja vode (100-200°C). Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta betona o temperaturi prikazana je na Slika 7.



Slika 7 Promjena specifičnog toplinskog kapaciteta betona u ovisnosti o temperaturi [17]

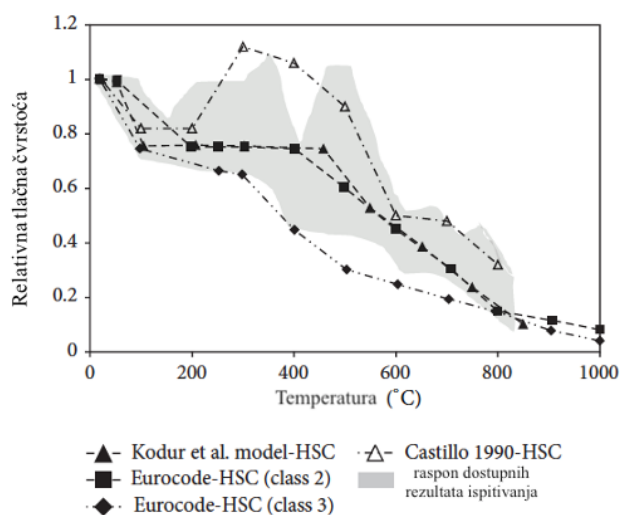
3.2.4 Utjecaj visokih temperatura na mehanička svojstva betona

Mehanička svojstva, koja su od glavnog značaja kod izlaganja betona visokim temperaturama su: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, modul elastičnosti te odnos naprezanja i deformacije pri tlačnom naprezanju. Ispitivanja mehaničkih svojstava na povišenim temperaturama obično se provode na uzorcima betona u obliku valjka. Za razliku od ispitivanja na sobnim temperaturama kod kojih je propisana veličina uzoraka prema normama, kod povišenih temperatura ispitivanja se provode na širokom rasponu veličina uzoraka zbog nedostatka normiranog postupka ispitivanja mehaničkih svojstava na povišenim temperaturama. [18]

3.2.4.1 tlačna čvrstoća

Promjena tlačne čvrstoće betona u ovisnosti o visokim temperaturama razlikuje se za betone normalnih čvrstoća te za betone visokih čvrstoća. Kod betona normalnih čvrstoća na tlačnu čvrstoću najviše utječu temperature do 400 °C. Betoni normalnih čvrstoća su propusniji u

odnosu na one visokih čvrstoća gdje dolazi do lakšeg oslobađanja pornih tlakova koji nastaju pri evaporaciji unutrašnje vlage. S druge strane, kod betona visokih čvrstoća koriste se različiti dodaci kao vezivo koji strukturu betona čine kompaktnijom i gušćom, osim toga, sadrže manju količinu kalcijevog hidroksida što pozitivno utječe na tlačnu čvrstoću betona na sobnim temperaturama. Problem kod ovakvih betona pri izlaganju visokim temperaturama je što im gušća i kompaktnija mikrostruktura ne dozvoljava difuziju unutrašnje vlage što dovodi do rasta pornih tlakova te pojave mikropukotina koje utječu na bržu degradaciju tlačne čvrstoće kao i povećanog rizika od eksplozivnog odlamanja [18]. Rezultati tlačnih čvrstoća razlikuju se u ovisnosti o vrsti betona, na Slika 8 grafički su prikazani rezultati relativnih tlačnih čvrstoća za betone visokih čvrstoća gdje se može vidjeti kako rezultati variraju za različite vrste betona.



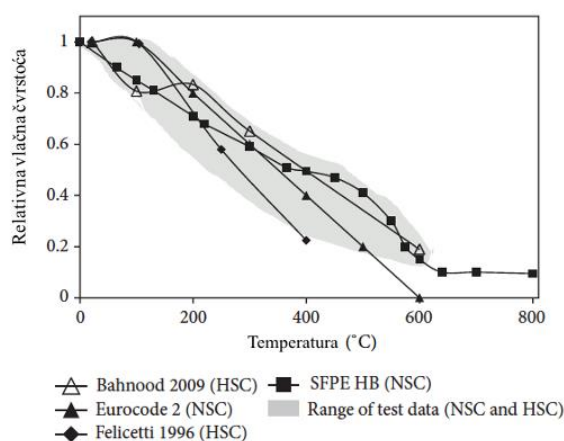
Slika 8 Tlačna čvrstoća u ovisnosti o temperaturi [18]

Čimbenici koji direktno utječu na tlačnu čvrstoću betona izloženog visokim temperaturama su njega betona, sadržaj vlage u trenutku ispitivanja te dodaci betonu. Također rezultati se mogu razlikovati u ovisnosti o načinu ispitivanja kao npr. različiti prirast temperature u vremenu te različiti postupci ispitivanja gdje razlikujemo ispitivanje tlačne čvrstoće u tzv. vrućem stanju te ispitivanje preostale tlačne čvrstoće nakon hlađenja uzoraka [18]. Također, razlike su u ovisnosti da li se ispituju uzorci koji su tijekom zagrijavanja bili mehanički opterećeni ili ne. S obzirom da nakon hlađenja uzoraka dolazi do dodatne degradacije betona, ispitivanjem preostale (rezidualne) tlačne čvrstoće nakon hlađenja uzoraka dobivaju se najmanje vrijednosti pa su ti podaci mjerodavni kod određivanja preostale nosivosti konstruktivnih elemenata izloženih požaru [17]. Podaci dani u Eurokodu (EN 1992-1-2) [20] odnose se na ispitivanje

uzoraka tzv. vrućem stanju pa su vrijednosti tlačnih čvrstoća veće u odnosu na uzorke kojima su ispitane tlačne čvrstoće nakon hlađenja.

3.2.4.2 vlačna čvrstoća

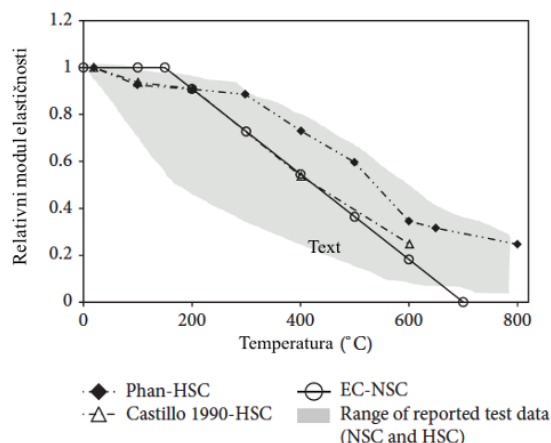
Poznato je kako je vlačna čvrstoća betona znatno manja od tlačne te se većinom zanemaruje u proračunu čvrstoća betona pri povišenim temperaturama. Međutim, u pogledu požarne otpornosti vlačna čvrstoća je važno svojstvo betona te se treba uzeti u obzir zato što o njoj ovisi pojava pukotina, a od još veće važnosti i mogućnost pojave eksplozivnog odlamanja. Podatak o vlačnoj čvrstoći betona visokih čvrstoća, koja varira u ovisnosti o izloženoj temperaturi, je ključan podatak kako bi se mogla predvidjeti pojava eksplozivnog odlamanja u betonskim elementima. [18] Na Slika 9 prikazane su relativne vlačne čvrstoće za betone normalnih i visokih čvrstoća.



Slika 9 Vlačna čvrstoća betona u ovisnosti o temperaturi [18]

3.2.4.3 modul elastičnosti

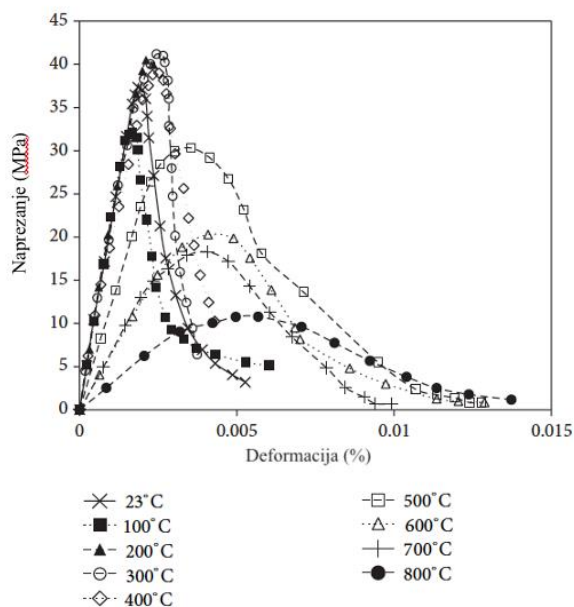
Do smanjenja modula elastičnosti betona dolazi zbog stvaranja i razvoja pukotina u betonu kod izlaganja visokim temperaturama kao rezultat unutarnjih naprezanja unutar i između komponenti betona (cementne paste i agregata), tlaka vodene pare, toplinskih naprezanja zbog razlike u temperaturama između različitih dijelova betona (vanjska površina i unutrašnjost), itd. [5] Modul elastičnosti betona izloženog visokim temperaturama može znatno varirati te najviše ovisi o vodocementnom omjeru, starosti betona, metodi njegovanja te o količini i vrsti agregata. Porastom temperature modul elastičnosti ima veći pad od tlačne čvrstoće te se razlikuje za različite vrste betona (Slika 10) [18].



Slika 10 Modul elastičnosti betona u ovisnosti o temperaturi [18]

3.2.4.4 odnos naprezanje-deformacija

Mehanički odziv betona obično se izražava preko odnosa naprezanje – deformacija, koji se često koristi kao ulazni podatak matematičkih modela za procjenu požarne otpornosti betonskih konstruktivnih elemenata. Općenito, zbog pada tlačne čvrstoće te porasta duktilnosti betona, nagib krivulje naprezanje-deformacija pada s porastom temperature (Slika 11). Tlačna čvrstoća betona ima značajan utjecaj na odnos naprezanja i deformacija na sobnoj temperaturi kao i na povišenim temperaturama [18].



Slika 11 Odnos naprezanje-deformacija betona izloženog različitim temperaturama [18]

3.2.5 Utjecaj visokih temperatura na deformacijska svojstva

Deformacijska svojstva betona na koje utječu visoke temperature su toplinsko širenje, puzanje betona te prijelazna deformacija (engl. *transient strain*), a najviše ovise o kemijskom sastavu, vrsti agregata te o kemijskim i fizikalnim reakcijama koje se odvijaju u betonu pri zagrijavanju. Općenito beton podliježe širenju kada je izložen visokim temperaturama [18].

3.2.5.1 toplinsko širenje betona

Toplinsko širenje betona poraste za otprilike 1,3% u rasponu od sobne sobne temeperature do 700 °C te ostaje konstantno do 1000 °C. Navedeni porast je značajan u temperaturnom području od 20 °C do 700 °C te se uglavnom događa zbog velikog toplinskog širenja od sastavnih komponenti. Toplinsko širenje betona je složenije kada se promatraju faktori koji tome doprinose, kao što su dodatne volumne promjene uzrokovane promjenama vlažnosti, kemijske reakcije (dehidracija, promjena sastava) te puzanje i pojava mikropukotina što rezultira neujednačenim toplinskim naprezanjima. U nekim slučajevima može doći i do toplinskog skupljanja kao rezultat evaporacije vode tijekom zagrijavanja. Eurokod [20] uzima više u obzir utjecaj vrste agregata na toplinsko širenje nego vrste samog betona. Beton koji sadrži silikatni agregat ima veće toplinsko širenje od onih koji sadrže karbonatne agregate.

Na toplinsko širenje betona također utječe tlačna čvrstoća kao i prisutnost vlakana u sastavu betona. Za betone visokih čvrstoća te vlaknima ojačanim betonima toplinsko širenje sporije raste na temperaturama između 600 °C i 800 °C, a nakon 800 °C se povećava. Sporiji rast u navedenom temperaturnom području pripisuje se gubitku kemijski vezane vode, a povećani rast se pripisuje tzv. omekšavanju betona te stvaranju mikropukotina. [18]

3.2.5.2 puzanje i prijelazna (engl. *transient*) deformacija

Deformacije u ovisnosti o vremenu kao što su puzanje i prijelazna deformacija dolaze do izražaja kod tlačnog naprezanja pri povišenim temperaturama. Puzanje betona je uzrokovano te ubrzano pri visokim temperaturama najviše zbog dva procesa, kretanja vlage iz cementne matrice te zbog dehidracije betona pri visokim temperaturama kao i zbog ubrzanja procesa raskidanja veza.

Prijelazna deformacija se pojavljuje tijekom prve faze zagrijavanja betona, a dalje se ne pojavljuje kod učestalog zagrijavanja. Izlaganje betona visokim temperaturama rezultira kompleksnim promjenama u količini vlažnosti te kemijskom sastavu cementne paste. Štoviše, zbog nekompatibilnosti toplinskog širenja između cementne paste i agregata i promjena u kemijskom sastavu dovodi do unutarnjih naprezanja i mikropukotina što rezultira prijelaznim naprezanjem u betonu. [18]

3.3 Utjecaj polimernih vlakna na svojstva betona

3.3.1 Polipropilenska vlakna

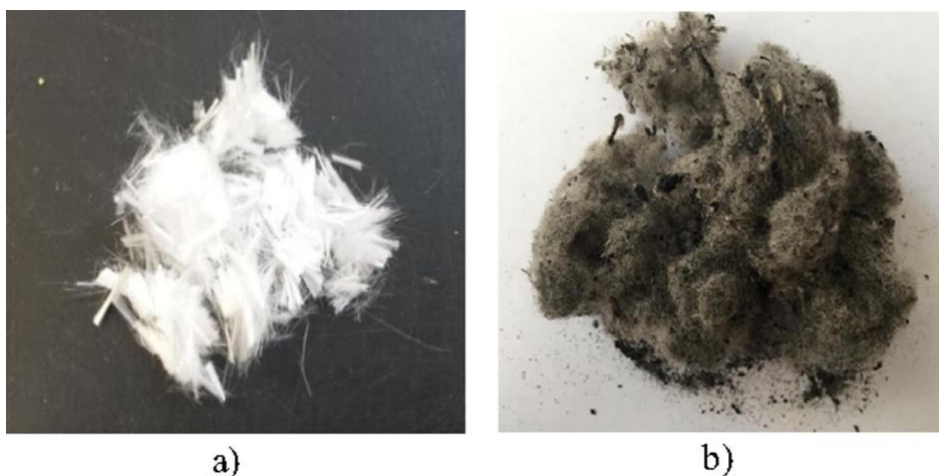
Korištenjem suvremenih betona kao što su samozbijajući betoni i betoni visokih čvrstoća koji se sve više primjenjuju u tunelima, mostovima velikih raspona, neboderima te ostalim značajnim građevinama dovelo je do spoznaje kako u slučaju izlaganja visokim temperaturama dolazi do pojave eksplozivnog odlamanja betona koja može značajno ugroziti nosivost i sigurnost građevine jer odlamanjem slojeva betona koji štite armaturu, ista je izložena visokim temperaturama na koje je izrazito osjetljiva. Uzrok eksplozivnom odlamanju je što navedene vrste betona imaju manji vodocementni omjer te manji udio pora, odnosno kompaktniju i gušću strukturu u odnosu na standardni beton. Povišene temperature uzrokuju povećani tlak u porama, a samim time i dodatna naprezanja u betonu. Kako bi se taj tlak smanjio, preporučuje se u mješavinama koristiti dodatak polipropilenskih (PP) vlakana (Slika 12a) u rasponu od 1-3 kg/m³ iz razloga što se PP vlakna počinju topiti na temperaturi od oko 170°C te na taj način stvaraju dodatne pore i mrežu kanalića koja ravnomjerno raspoređuje nastali pritisak u betonu, a samim time i smanjuje rizik od eksplozivnog odlamanja betona [21][22]. Kalifa i suradnici u svom radu navode kako PP vlakna imaju značajan doprinos u smanjenju eksplozivnog odlamanja pri doziranju od 0,9 kg/m³ [21].

Liu i suradnici [23] proveli su istraživanja o utjecaju polipropilenskih vlakana u sprječavanju eksplozivnog odlamanja te su došli do rezultata kako je topljenjem vlakana došlo do porasta ukupnog volumena pora. Također vlakna koja se tope mogu biti apsorbirana u porama. Ukupna poroznost ne pokazuje značajnu promjenu zbog topljenja PP vlakna, za razliku od utjecaja na umreženost pora koja se povećava s topljenjem vlakana. Glavnu ulogu kod plinopropusnosti uzorka pri povećanim temperaturama imaju povećana umreženost pora te nastale mikropukotine. Umreženost pora je izraženija za temperature ispod 300°C, a za temperature iznad 300°C veću ulogu kod plinopropusnosti imaju mikropukotine [21][23].

Osim što polipropilenska vlakna povoljno djeluju na smanjenje opasnosti od eksplozivnog odlamanja betona izloženog visokim temperaturama, također povoljno djeluju na neka svojstva betona koja nisu vezana uz visoke temperature. Polipropilenska vlakna doprinose smanjenju pukotina uslijed plastičnog skupljanja, sprječavaju segregaciju kod samozbijajućih betona te povoljno djeluju na pojavu oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. [24]

3.3.2 Reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma

U potrazi za alternativnim rješenjima kod eksplozivnog odlamanja betona kao i nastojanje smanjivanja problema odlaganja otpada, razvila se ideja o korištenju polimernih vlakana dobivenih recikliranjem od otpadnih automobilskih guma (RTPF)(Slika 12b). Dosad se otpad automobilskih guma uglavnom koristio kao gorivo u proizvodnji cementa. Jedan od glavnih izazova u korištenju RTPF-a je njihovo skladištenje, s obzirom da su iznimno zapaljive, a zbog toga što su relativno lagane mogu biti nošene vjetrom. RTPF u sastavu obično sadrži otprilike 60% PET (*poly(ethylene-terephthalate)*), 25% PA 66 (*polyamide 66*) te 15% PBT (*poly(butylene-terephthalate)*) uz mali doprinos čeličnih i gumenih vlakana. Za razliku od PP-a, RTPF se počinju topiti na višim temperaturama od oko 260°C. Polimernim vlaknima dobivenih iz otpadnih guma potrebno je ukloniti onečišćenja koja mogu imati utjecaj na svojstva betona. [25]



Slika 12 a) polipropilenska vlakna (PP), b) reciklirana polimerna vlakna od autoguma (RTPF) [25]

S obzirom da ne postoji normirani postupak za uklanjanje onečišćenja iz otpadnih guma te odvajanja zamršenih niti za proizvodnju RTPF-a većih razmjera u proizvodnji betona, za potrebe istraživanja osmišljena je (eng. *Screening technique*) korištenjem vibrirajućih sita kako bi se uklonile onečišćujuće čestice koja je opisana u radu Baričević et al [22].

Promjer recikliranih vlakna iz otpadnih guma kreće se u rasponu od 8,0 do 38,0 μm , dok ih je više od 80% kraće od 12 mm. Zbog svojih jedinstvenih dimenzija i geometrije, reciklirana vlakna mogu doprinijeti smanjenju opasnosti od eksplozivnog odlamanja betona izloženog visokim temperaturama.

3.3.2.1 Utjecaj RTPF-a na svojstva betona na sobnim temperaturama

Provedena ispitivanja [26] pokazala su utjecaj RTPF-a na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. Pokazalo se kako je potrebna veća količina superplastifikatora za postizanje određene konzistencije, odnosno s povećanjem količine vlakana, smanjuje se konzistencija svježeg betona. Također, moguća je i veća količina zahvaćenog zraka zbog toga što guma koja se zadržava na vlaknima ima hrapavu površinu koja nije polarne prirode pa odbija vodu.

Ispitivanja u [26] su pokazala kako dodavanje RTPF-a nema utjecaj na oslobođenu toplinu tijekom hidratacije. Osim toga, pokazao se i pozitivan utjecaj dodatka RTPF-a na rane deformacije pa je u odnosu na običan beton, beton s dodatkom RTPF-a imao manje autogeno skupljanje.

Rezultati ispitivanja [26] utjecaja na svojstva betona u očvrslom stanju su pokazali kako dodatak RTPF-a može utjecati na smanjenje tlačne čvrstoće zbog veće količine zahvaćenog zraka te fizikalnih svojstava gumenih čestica jer su manje kruta u odnosu na cementnu pastu. Kao i za tlačnu čvrstoću, rezultati ispitivanja pokazali su pad modula elastičnosti kod betona s dodatkom RTPF-a.

Pokazalo se [26] kako dodatak RTPF-a u sastav betona ima pozitivan utjecaj na otpornost na smrzavanje i odmrzavanje.

3.3.2.2 Utjecaj RTPF-a na svojstva betona na visokim temperaturama

Pokazalo se [27] kako dodatak 2 kg/m³ RTPF-a može poslužiti kao zamjena PP vlaknima za izbjegavanje eksplozivnog odlamanja kod betona izloženog visokim požarnim temperaturama, a da ne dođe do dodatne degradacije mehaničkih i trajnosnih svojstva betona zbog topljenja vlakana.

3.4 ZAKLJUČAK STANJA PODRUČJA

Provedena analiza stanja područja prikazana u prethodnim poglavljima pokazala je da:

- promjena mehaničkih i trajnosnih svojstva svojstava betona izloženog visokim požarnim temperatura ovisi o sastavu betona;**
- ne postoje znanstvena istraživanja u kojim se analizira utjecaj zamjene portland cementa PDB-om na svojstva u betona nakon djelovanja visokih požarnih temperatura;**
- postoje samo dva znanstvena članka kojima se istražuje utjecaj zamjene PP vlakana s RTPF-om na preostala mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog požaru.**

4 OPIS EKSPERIMENTALNOG RADA

U ovom radu, provedena su eksperimentalna ispitivanja kako bi se istražio utjecaj visokih temperatura na mehanička i trajnosna svojstva betona:

- 1) s različitim udjelima (do 30% na masu cementa) pepela drvene biomase kao zamjene za cement
- 2) s dodatkom 2 kg/m³ polimernih vlakana, polipropilenskih (PP) i recikliranih vlakana iz otpadnih autoguma (RTPF).

Za tu svrhu su projektirane betonske mješavine i napravljeni uzorci tijekom izrade završnog rada prikazanog u [28], a čiji sastav je prikazan u Tablica 1. Mješavine su projektirane na način da za isti vodovezivni omjer od 0.4, tlačna čvrstoća betona nakon 28 dana bude veća od 50 MPa uz ciljanu konzistenciju slijeganjem u rasponu od 160 do 210 mm (razred S4). Sastavi ispitanih betona te osnovna svojstva u svježem i očvrslulom stanju dana su u Tablica 1.

Tablica 1 Sastav projektiranih mješavina i svojstva u svježem i očvrslulom stanju

Oznaka mješavine		M0	M10-PDB	M10-PDB-2PP	M10-PDB-2RTPF	M30-PDB
Cement [kg]		475	428	428	428	333
v/v omjer		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Superplastifikator		2,4	4,4	4,8	4,8	4,8
PDB	% m _c	-	10	10	10	30
	kg/m ³	-	48	48	48	143
Polipropilenska vlakna [kg/m ³]		-	-	2,0	-	-
Reciklirana tekstilna vlakna [kg/m ³]		-	-	-	2,0	-
Agregat (0-4) [kg]		630	625	623	623	620
Agregat (4-8) [kg]		386	383	381	382	380

Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima

Agregat (8-16) [kg]	753	748	745	745	742
Svojstva u svježem stanju					
Volumenska masa [kg/dm ³]	2,46	2,50	2,48	2,49	2,45
Konzistencija slijeganjem [mm]	195	200	175	180	175
Sadržaj zraka [%]	1,7	1,6	1,3	2,0	2,9
Svojstva u očvrslom stanju					
Tlačna čvrstoća [MPa]	60 ± 0,86	56 ± 1,58	43,7 ± 1,26	53,5 ± 0,82	51,2 ± 0,73

Za potrebe ovog rada, izrađeni uzorci betonskih mješavina u starosti od 3 mjeseca toplinski su tretirani na odabranim temperaturama od 200, 400 i 600 °C. Sedam dana nakon hlađenja do sobne temperature, ispitana su im mehanička svojstva: tlačna čvrstoća i statički modul elastičnosti; trajnosna svojstva: plinopropusnost i brzina prolaska ultrazvuka te su ispitana i dodatna svojstva : širina pukotina, gubitak mase te toplinske promjene (metoda termogravimetrije) kako bi se ocijenio utjecaj korištenih komponenti na navedena svojstva. Navedena ispitivanja prikazana su u Tablica 2 uz pripadajuće norme i metode ispitivanja.

Tablica 2 Provedena ispitivanja betonskih mješavina

Broj	Ispitivanje	Mjerodavna norma/metoda	Starost	Uzorci
Mehanička svojstva				
1.	Promjena tlačne čvrstoća	HRN EN 12390-3:2019	90+ dana	Valjci Ø75mm, L=225 mm
2.	Promjena statičkog modula elastičnosti	HRN EN 12390-13:2013	90+ dana	Valjci Ø75mm, L=225 mm
Trajnosna svojstva				
3.	Promjena plinopropusnosti	Rilem-Cembureau metoda	90+dana	Valjci Ø100mm, L=50 mm

4.	Promjena brzine prolaska ultrazvuka	HRN EN 12504-4:2004	90+ dana	Valjci Ø75mm, L=225 mm
Dodatno ispitana svojstva				
5.	Mjerenje širine pukotina optičkim mikroskopom	vizualni pregled	90+ dana	Valjci Ø75mm, L=225 mm
6.	Promjena mase	-	90+ dana	Valjci Ø75mm, L=225 mm
7.	Toplinska analiza	termogravimetrijska analiza (TGA)	90+dana	Valjci Ø75mm, L=225 mm

Dodatno su ispitana navedena svojstva i na uzorcima koji nisu bili izloženi visokim temperaturama kako bi se utvrdila njihova promjena nakon toplinskog djelovanja.

Materijali korišteni za spravljanje betonskih mješavina

Za spravljanje betonskih mješavina korišteni su sljedeći materijali: cement CEM I 42,5 R (Slika 13 *lijevo*) i dodatak pepela drvene biomase (PDB) iz bioenergane Udbina (Slika 13 *desno*), agregat, voda iz gradskog vodovoda te superplastifikator na bazi modificiranih polikarboksilnih etera.



Slika 13 CEM I 42,5 R (lijevo), PDB (desno) [28]

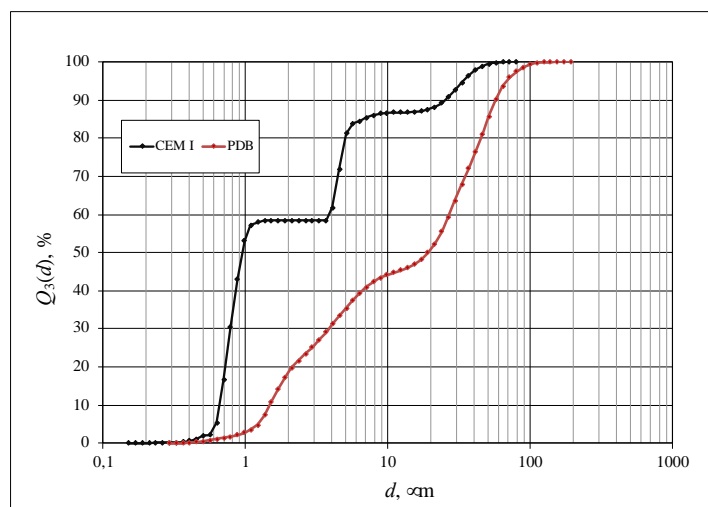
S obzirom da pojedine vrste PDB-a ne pokazuju pucolanska svojstva u Tablica 3 prikazan je kemijski sastav korištenog PDB-a u usporedbi sa cementom CEM I 42,5 R.

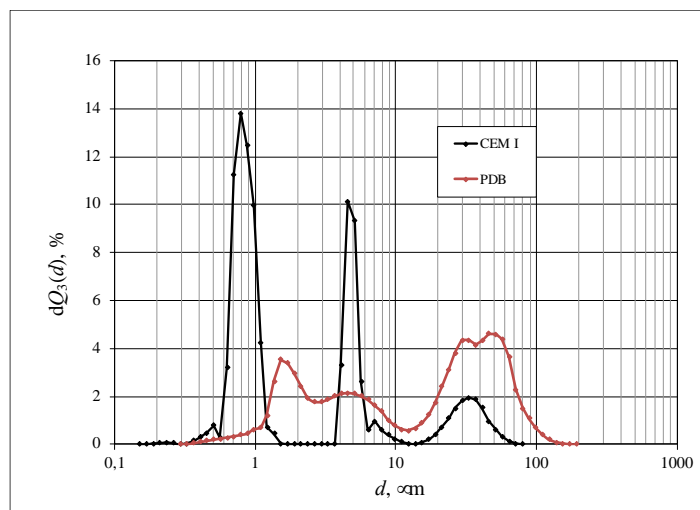
Tablica 3 Kemijski sastav komponenti

Komponenta	CEM I 42,5 R	PDB
P ₂ O ₅	0,217	1,97
Na ₂ O	0,846	0,57
K ₂ O	1,25	8,10
CaO	59,8	57,93
MgO	2,01	6,17
Al ₂ O ₃	4,94	3,14
TiO ₂	0,231	0,13
Fe ₂ O ₃	3,15	2,10
SiO ₂	21,88	18,19
SO ₃	3,33	1,70
Gubitak žarenjem (950 °C)	3,6	8,3

Kemijski sastav prikazan u Tablica 3 među ostalim komponentama prikazuje i sadržaj oksida koji su nužni za odvijanje pucolanske reakcije kao što su silicijev dioksid (SiO₂), aluminijev oksid (Al₂O₃) te željezov oksid (Fe₂O₃). U odnosu na cement CEM I 42,5 R sadržaj navedenih oksida u PDB-u je manji pa je tako sadržaj silicijev dioksida manji za 16,8%, aluminijevog oksida za 36,4% te željezovog oksida za 33,3% što upućuje na slabiju pucolansku reakciju u odnosu na cement.

Na Sliku 14 prikazan je granulometrijski sastav korištenog cementa i PDB-a.

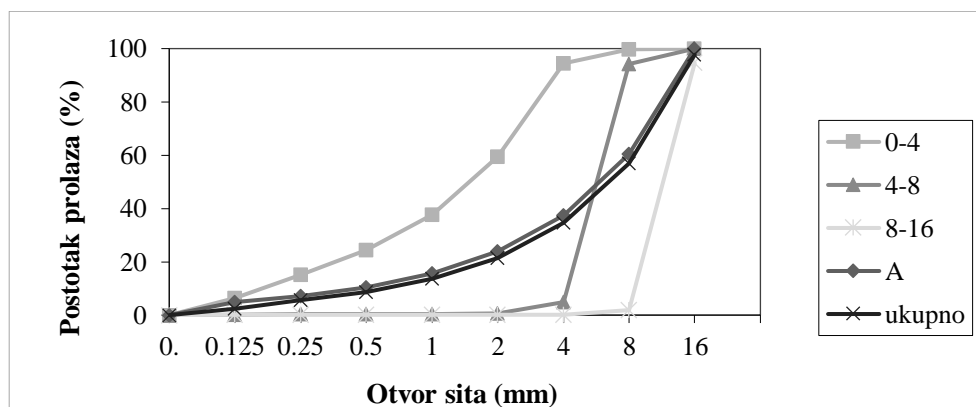




Slika 14 Granulometrijski sastav CEM I 42,5 R i PDB

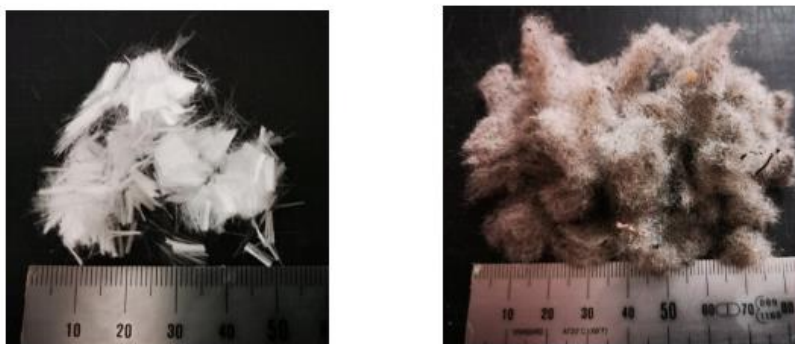
Iz priloženih grafova granulometrijskog sastava čestica cementa može se uočiti nedostatak veličine čestica u rasponu 1-3,5 µm.

U svim betonskim mješavinama koristio se drobljeni dolomit frakcija 0/4, 4/8 i 8/16 mm čiji se granulometrijski sastav može vidjeti na Slika 15.



Slika 15 Granulometrijski sastav agregata [28]

U dvjema mješavinama korištena su polimerna vlakna i to u jednoj, komercijalna monofilamentna polipropilenska vlakna (oznaka mješavine M10-PDB-2PP) koja su prikazana na Slika 16 (lijevo), a u drugoj mješavini korištena su polimerna vlakna dobivena reciklažom otpadnih guma - RTPF (oznaka mješavine M10-PDB-2RTPF) prikazana na Slika 16 (desno).



Slika 16 Monofilamentna PP vlakna (lijevo), RTPF (desno) [28]

Vrsta i svojstva korištenih polimernih vlakana prikazana su u Tablica 4.

Tablica 4 Svojstva polimernih vlakana

Vrsta vlakna	Duljina (mm)	Gustoća (g/cm ³)	Sastav	Temperatura taljenja
Monofilamentna PP vlakna	6	0,91	100% PP	~ 160°C
Reciklirana vlakna iz otpadnih guma (RTPF)	8.4 ± 3.8	1,32	oko 60%PET, 25% PA 66 i 15% PBT	~ 260°C

4.1 Osnovna svojstva istraživanih betona u svježem i očvrslulom stanju

Iz rezultata prikazanih u Tablica 1 može se vidjeti kako se povećanjem udjela PDB-a kao i dodatkom polimernih vlakana smanjuje konzistencija betona što potvrđuju rezultati literaturnih navoda kako povećanje udjela navedenih materijala zahtjeva veću potrebu za dodavanjem vode ili superplastifikatora [9][11][26].

Gustoća betonskih mješavina u svježem stanju ne razlikuje se previše. U odnosu na referentnu mješavinu gustoća u svježem stanju mješavine koja sadrži 10% PDB-a veća je za 1,6%, dok je kod mješavine s 30% PDB-a gustoća manja za 0,4%.

Kod mješavine koja sadrži 2% polipropilenskih vlakna i 10% PDB-a gustoća u svježem stanju je veća za 0,8% u odnosu na referentnu mješavinu, a kod mješavine sa 2% recikliranih polimernih vlakana i 10% PDB-a gustoća je veća za 1,2%. Može se zaključiti kako korišteni materijali u sastavu betona ne utječu na znatnu promjenu gustoće betona.

Također se može uočiti kako je kod mješavine s 30% zamjene cementa PDB-om sadržaj zraka veći za 41,3% u odnosu na referentnu mješavinu, dok je kod mješavine koja sadrži 10% PDB-a i 2% RTPF-a sadržaj zraka veći za 17,6%.

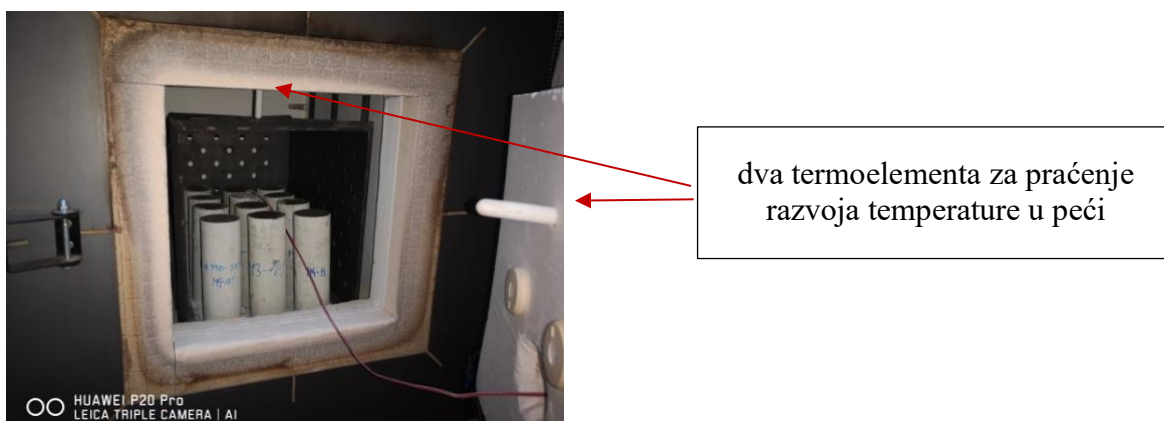
Rezultati ispitivanja mješavina u očvrslulom stanju pokazuju kako se s povećanjem udjela zamjene cementa PDB-om smanjuje tlačna čvrstoća, tako je kod mješavina s 10% udjela PDB-a tlačna čvrstoća manja za 6,7% u odnosu na referentnu mješavinu, a kod mješavina s 30% PDB-a tlačna čvrstoća je manja za 14,6%.

Pad tlačne čvrstoće očituje se i kod mješavina s polipropilenskim te recikliranim polimernim vlaknima gdje je tlačna čvrstoća mješavina koje sadrže 10% PDB-a i 2% polipropilenskih vlakana manja za 27,1%, a kod mješavina s 10% PDB-a i 2% recikliranih polimernih vlakana tlačna čvrstoća je manja za 10,8% u odnosu na referentnu tlačnu čvrstoću.

Rezultati tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka slažu se s već prethodno provedenim ispitivanjima različitih istraživača gdje je došlo do pada tlačne čvrstoće korištenjem PDB-a, PP-a i RTPF-a. [3][9][11][26]

4.2 Izlaganje betonskih uzoraka požarnim temperaturama

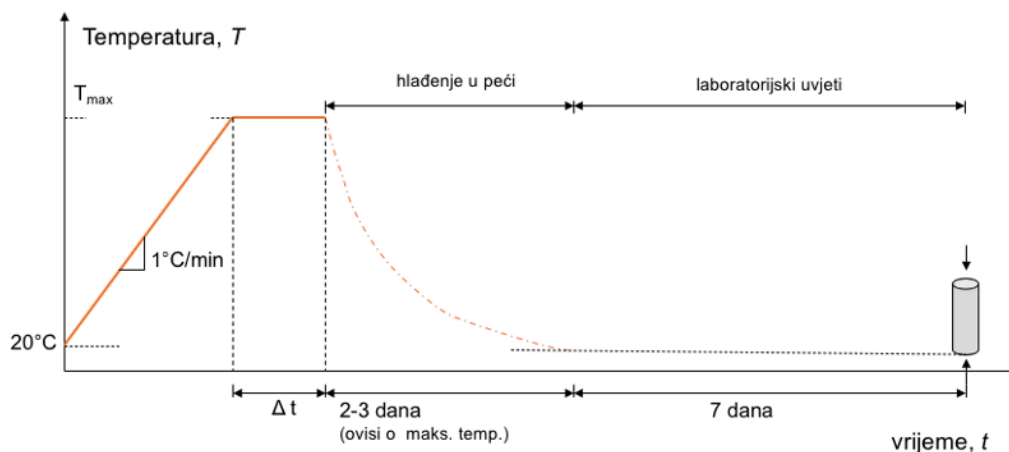
Uzorci starosti veće od 90 dana toplinski su tretirani prema preporukama RILEM HTC 200 [29] kako bi se eksplozivno pucanje uzoraka dovelo na najmanju moguću mjeru zbog smanjenog sadržaja vlažnosti uzoraka. Dolomitni agregat stabilan je do temperature od oko 760 °C, a budući da je cilj analize doprinos cementne paste i PDB-a na smanjenje svojstava, maksimalna temperatura toplinskog tretiranja je 600 °C. Za tu svrhu korištena je električna peć snage 40 kW s dimenzijama radnog prostora 400x600x400 mm i maksimalno mogućom temperaturom u peći u iznosu od 1400°C. Električna peć opremljena je s dva termoelementa tipa NiCr-Ni, rezolucije 1,0°C koji prate razvoj temperature u peći. Navedeni termoelementi ugrađeni su u pomičnom prednjem dijelu (vratima peći) i u gornjem dijelu peći (Slika 17). U jednom ciklusu zagrijavanja tretirano je 12 uzoraka od kojih je jedan služio za praćenje razvoja temperature u betonu.



Slika 17 Položaj uzoraka u peći tijekom toplinskog tretiranja

Ciklus toplinskog tretiranja (Slika 18) uzoraka odvijao se u 3 koraka:

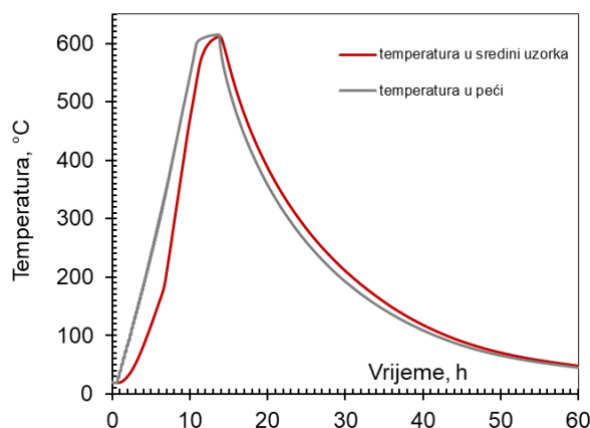
1. uzorci se zagrijavaju do maksimalne određene temperature brzinom od $\Delta T/\Delta t = 1^\circ\text{C}/\text{min}$ (unutar peći)
2. maksimalno postignuta temperatura u peći se zadržava sve dok se ne postignu stacionarni uvjeti po poprečnom presjeku uzorka, odnosno kako bi se ostvarila jednolika temperatura u cijelom uzorku
3. prirodno hlađenje uzoraka u zatvorenoj peći do sobne temperature (cca 20°C) kako bi se izbjegla pojava dodatnih mikropukotina uzrokovanih toplinskim naprezanjima ili apsorpcija vlage koja bi vodila daljnjem razaranju uzoraka.



Slika 18 Ciklus toplinskog tretiranja uzoraka

Vrijeme hlađenja u peći ovisilo je o maksimalno postignutoj temperaturi. Nakon hlađenja na sobnu temperaturu, uzorci su čuvani u laboratorijskim uvjetima sljedećih 7 dana. Prema Hertz

[6], tijekom hlađenja betona na sobnu temperaturu očekuje se daljnja degradacija svojstva gdje se najveći pad očekuje tjedan dana nakon izlaganja visokoj temperaturi. Na Slika 19 prikazan je primjer ostvarene temperature tijekom zagrijavanja na 600 °C te prirodnog hlađenja u peći u prvih 60 sati ciklusa.



Slika 19 Ostvarene temperature u uzorku prvih 60 sati toplinskog tretiranja

4.3 Metode ispitivanja

4.3.1 Određivanje promjene tlačne čvrstoće

Ispitivanje preostale tlačne čvrstoće uzoraka provedeno je prema normi HRN EN 12390-3:2009 [30] nakon zagrijavanja uzoraka na ciljanoj temperaturi te neposrednog hlađenja na sobnu temperaturu. Dimenzije uzoraka valjaka 75 x 225 mm su izabrane prema preporukama RILEM Technical Committee 129-MHT:1995 [31].

Za svaku mješavinu i svaku temperaturu (200, 400 i 600 °C) ispitana su po 4 uzorka. Kako bi se odredila promjena (smanjenje) tlačne čvrstoće nakon zagrijavanja na pojedinu temperaturu u odnosu na početnu, iz svake su mješavine ispitana po 4 uzorka koja nisu toplinski tretirana.

Tlačna čvrstoća ispitana je pomoću hidraulične preše (proizvođača Toni Technik) s maksimalnim unosom sile od 3000 kN i brzinom prirasta opterećenja od 0,5 MPas⁻¹ za uzorke koji se nisu zagrijavali i uzorke nakon zagrijavanja na temperaturama 200 i 400 °C. Za uzorke koji su toplinski tretirani na 600 °C, ispitivanja su provedena na hidrauličnoj preši (proizvođača, također Toni Technik) s maksimalnim unosom sile od 200 kN i brzinom prirasta opterećenja od 0,5 MPas⁻¹ (Slika 20). Uzorci su postavljeni na sredinu preše kako bi se opterećenje ravnomjerno rasporedilo. Opterećenje se nanosi jednoliko između 0,2 i 1,0 MPa/s, a kao rezultat

se bilježi najveća sila pri kojoj je došlo do sloma uzorka. Tlačna čvrstoća dobije se prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A} [N/mm^2]$$

gdje je: f_c – tlačna čvrstoća betona [N/mm^2]

F – maksimalna sila u trenutku sloma [N]

A – površina uzorka [mm^2]



Slika 20 Izgled loma uzorka nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

4.3.2 Određivanje promjene modula elastičnosti

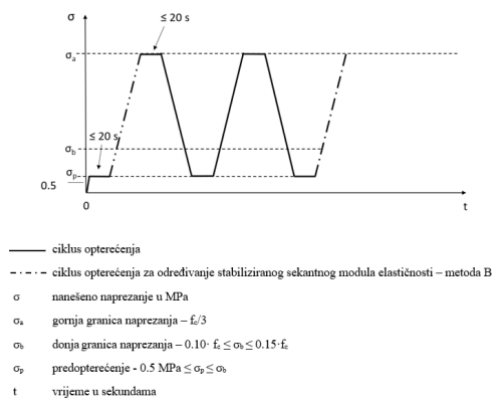
Modul elastičnosti ispitan je prema normi HRN EN 12390-13:2013 [32] po metodi B. Ciklusi ispitivanja prikazani su na Slika 21. Za određivanje modula elastičnosti korištena je hidraulična preša (proizvođača Toni Technik) s maksimalnim unosom sile od 3000 kN (Slika 22), a za određivanje promjene modula nakon 600 °C zbog veće osjetljivosti uzoraka korišten je okvir hidraulične preše s maksimalnim unosom sile od 200 kN. Ispitivanje se provodi tako da se na uzorak postavi okvir s dva ekstenziometra koja su međusobno odmaknuta za 100 mm. Uzorak se zatim postavlja u prešu te se opterećuje od 0,5 MPa do trećine tlačne čvrstoće koja je prethodno ispitana na jednom uzorku od svake mješavine. Opterećenje se provodi u 3 ciklusa prikazanim na Slika 21 gdje se gornja i donja granica opterećenja zadržavaju po 20 sekundi, a razlika mjerenih deformacija tijekom zadržavanja opterećenja ne bi se trebala razlikovati za više od 20%. Sekantni modul elastičnosti izračunava se prema izrazu:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} [MPa]$$

gdje je: E_c – sekantni modul elastičnosti [MPa]

$\Delta\sigma$ – razlika naprezanja (1/3 tlačne čvrstoće i 0,5 MPa)

$\Delta\varepsilon_s$ – razlika srednjih vrijednosti dilatacija koje odgovaraju gore navedenim naprezanjima



Slika 21 Ciklusi za određivanje stabiliziranog statičkog modula elastičnosti prema metodi B



Slika 22 Postavljanje uzorka za ispitivanje modula elastičnosti

4.3.3 Određivanje plinopropusnosti

Ispitivanje plinopropusnosti provodi se prema Rilem-Cembureau metodi [33]. Ispitivanje je potrebno provoditi u prostoriji s kontroliranom temperaturom zraka koja se treba kretati u rasponu od $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ bez pretjerane cirkulacije zraka u blizini opreme za ispitivanje kako ne bi imala utjecaj na rezultate ispitivanja. Oprema se sastoji od komore u koju se uzorak stavlja i tlači (Slika 24) te uređaja za mjerenje plinopropusnosti koji čine manometar i cjevčice ispunjene sapunastom tekućinom (Slika 23), a međusobno su povezani s izvorom plina (plinskom bocom). Uzorci oblika valjka promjera 100 mm i visine 50 mm prije ispitivanja sušeni su do konstantne mase te čuvani u posebnim posudama kako ne bi upili dodatnu vlagu (Slika 25). Kroz stlačeni uzorak pušta se plin te se mjeri vrijeme prolaska plina (dušik) kroz uzorak pri različitim tlakovima. Za svaku mješavinu ispitana su po 3 uzorka, a za svaki uzorak izvršena su po 3 mjerenja na 3 različita tlaka. Kod mjerenja plinopropusnosti uzoraka nakon toplinskog tretiranja, veličina tlaka ovisila je o maksimalnoj temperaturi na koju su uzorci bili izloženi pa je za temperature veće od 200°C bio primijenjeni manji tlak zbog veće osjetljivosti uzoraka. Koeficijent plinopropusnosti određuje se prema izrazu:

$$K_i = \frac{2P_a \cdot Q_i \cdot L \cdot \mu}{A(P_i^2 - P_a^2)} [m^2]$$

gdje je:

P_a - atmosferski tlak (Pa)

Q_i - protok plina kroz uzorak (m^3/s)

L - visina uzorka (m)

μ - dinamička viskoznost plina (Pa)

A - površina uzorka preko koje prolazi plin (m^2)

P_i - naneseni tlak plina kroz uzorak (Pa)

Protok Q_i dobije se iz izraza:

$$Q_i = \frac{V_i}{t_i} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

gdje je:

V_i - mjerni volumen cjevčice (m^3)

t_i - srednje vrijeme prolaska (s)



Slika 23 Uređaj za mjerenje plinopropusnosti



Slika 24 Komora u koju se stavlja uzorak za mjerenje plinopropusnosti



Slika 25 Čuvanje uzoraka u eksikatoru prije ispitivanja plinopropusnosti

U Tablica 5 prikazani su kriteriji prema kojima se može pretpostaviti kvaliteta betona u ovisnosti o plinopropusnosti betona.

Tablica 5 Kriteriji za kvalitetu betona prema plinopropusnosti betona [34]

Koeficijent plinopropusnosti (m ²)	Kvaliteta betona
$< 10^{-18}$	Dobra
$10^{-18} - 10^{-16}$	Srednja
$>10^{-16}$	Slaba

4.3.4 Određivanje promjene brzine prolaska ultrazvuka

Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa ispituje se prema normi HRN EN 12504-4:2004 [35] na uzorcima oblika valjka promjera 75 mm i visine 225 mm. Ispitna oprema za određivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa sastoji se od odašiljača i prijemnika ultrazvučnih valova te elektroničkog uređaja na koji su spojeni odašiljač i prijemnik. Za potrebe mjerenja korišten je ultrazvučni uređaj tipa Tico proizvođača Proceq iz Švicarske sa sondama frekvencije 150 Hz. Sonde su tijekom ispitivanja postavljene na suprotnim stranama valjkastog uzorka (Slika 26) te su izvršena po 3 mjerenja za svaki uzorak. Vrijeme prolaska impulsa (t) kroz uzorak betona

duljine (l) je vremenski interval od trenutka kada impuls napusti odašiljač do trenutka kada impuls stigne do prijemnika. Nakon mjerenja brzine prolaska ultrazvuka, na istim uzorcima je provedeno ispitivanje statičkog modula elastičnosti. Brzina ultrazvuka dobije se pomoću izraza:

$$v = \frac{l}{t} \left[\frac{m}{s} \right]$$

gdje je:

v - brzina ultrazvuka (m/s)

l - duljina uzorka (m)

t - vrijeme prolaska impulsa (s)



Slika 26 Ispitivanje brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorak

Prema dobivenoj brzini ultrazvuka može se procijeniti kvaliteta betona, odnosi između brzine ultrazvuka i kvalitete betona dani su u Tablica 6.

Tablica 6 Procjena kvalitete betona prema brzini ultrazvuka [36]

Brzina ultrazvuka (m/s)	Kvaliteta betona
> 4500	Odlična
3500 - 4500	Dobra
3000 - 3500	Upitna

2000- 3000	Slaba
< 2000	Jako slaba

4.3.5 Mjerenje širine pukotina optičkim mikroskopom

Mjerenje širine pukotina provedeno je na betonskim mješavinama nakon zagrijavanja na temperaturama od 400 i 600 °C kako bi se utvrdio utjecaj visokih temperatura na širinu nastalih pukotina. Od svake mješavine ispitan je po jedan uzorak na određenoj temperaturi. Nakon toplinskog tretiranja koje je prethodno opisano te hlađenja do sobne temperature proveo se vizualni pregled pukotina optičkim mikroskopom marke Olympus SZX10 (Slika 27 *lijevo*) kojim su pukotine snimljene, a pomoću računalnog programa analysIS izmjerene su širine pukotina kako bi se utvrdio utjecaj visokih temperatura na stvaranje i širinu pukotina.



Slika 27 Optički mikroskop (lijevo), mjerenje pukotina pomoću računalnog programa (desno)

4.3.6 Promjena mase

Promjena mase kao posljedica zagrijavanja uzoraka na visokim temperaturama dobivena je kao rezultat mjerenja mase betonskih uzoraka prije i nakon toplinskog tretiranja. Uzorci su vagani laboratorijskom digitalnom vagom s preciznošću od 0,001 g.

4.3.7 Toplinska analiza metodom termogravimetrije

Termogravimetrija (TGA) se često primjenjuje u području ispitivanja cementa kako bi se kvantificirala kemijski vezana voda, kalcijev karbonat te portlandit ili slična veziva kao što su leteći pepeo ili zgura. Pomoću TGA analize mogu se identificirati amorfni produkti hidratacije.

Minerali uočeni u cementnom sastavu međusobno se uspoređuju te služe kao referentna baza podataka prilikom identifikacije određenih procesa. Minerali i produkti hidratacije podliježu raznim toplinskim reakcijama: dehidraciji, dekarbonatizaciji, oksidaciji, razlaganju te fazama prijelaza ili topljenju i sl. Navedene reakcije su uglavnom povezane s promjenom mase ili otpuštanjem topline. Temperatura na kojoj se pojedine reakcije odvijaju karakteristična je za pojedine minerale i produkte hidratacije. Kod provođenja TGA analize pripremljeni uzorak praha cementne matrice podliježe zagrijavanju tijekom kojeg se bilježi gubitak mase. [37] Uzorci betona koji su prethodno zagrijani na temperaturama od 400 i 600 °C te ohlađeni na sobnoj temperaturi, lome se (Slika 28 *lijevo*), zatim se cementi kamen odvaja od agregata (Slika 28 *desno*) te se usitnjava u prah (Slika 29). Za potrebe provođenja jedne TGA analize potrebno je dozirati praškasti uzorak mase od 50 µg koji se zatim postavlja u uređaj za provođenje analize (Slika 30).



Slika 28 Priprema uzorka za provođenje toplinske analize



Slika 29 Priprema uzorka za provođenje toplinske analize



Slika 30 Postavljanje uzorka u uređaj za provođenje toplinske analize

5 REZULTATI ISPITIVANJA

U ovom dijelu rada prikazani su dobiveni rezultati provedenih ispitivanja kojima se želi pokazati utjecaj visokih požarnih temperatura na mehanička i trajnosna svojstva ispitanih betonskih mješavina. Rezultati su prikazani na način da se analiziraju dvije grupe:

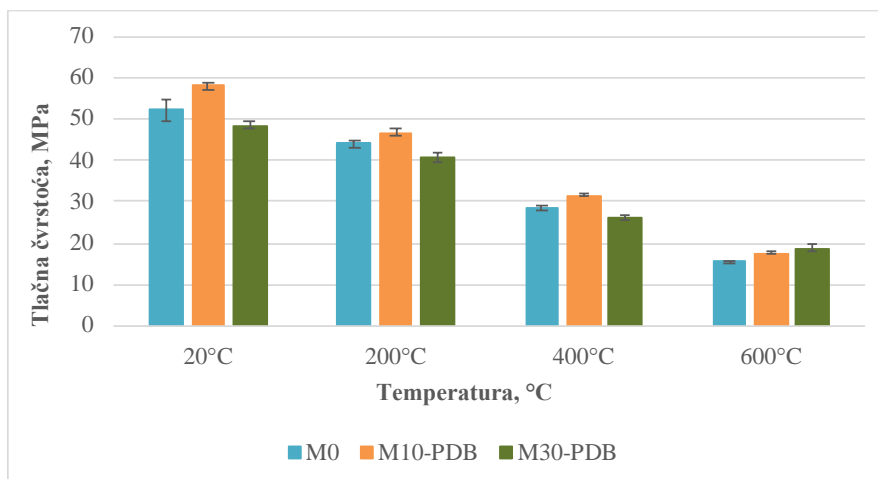
1. Grupa: referentni beton i beton s 10% i 30% PDB kako bi se ocijenio utjecaj zamjene cementa na svojstva
2. Grupa : beton s 10%PDB, beton s 10%PDB i 2% PP, beton s 10% PDB i 2% RTPF

Rezultati ispitivanja su prikazani srednjom vrijednosti i apsolutnom devijacijom temeljem ispitivanja 3 ili 4 uzorka za svaku mješavinu i svaku temperaturu te relativnim odnosom svojstva dobivenih na određenoj temperaturi u odnosu na svojstva na sobnoj temperaturi. Pojedinačne vrijednosti rezultata ispitivanja su prikazane u tablicama u Prilozima 1-6 .

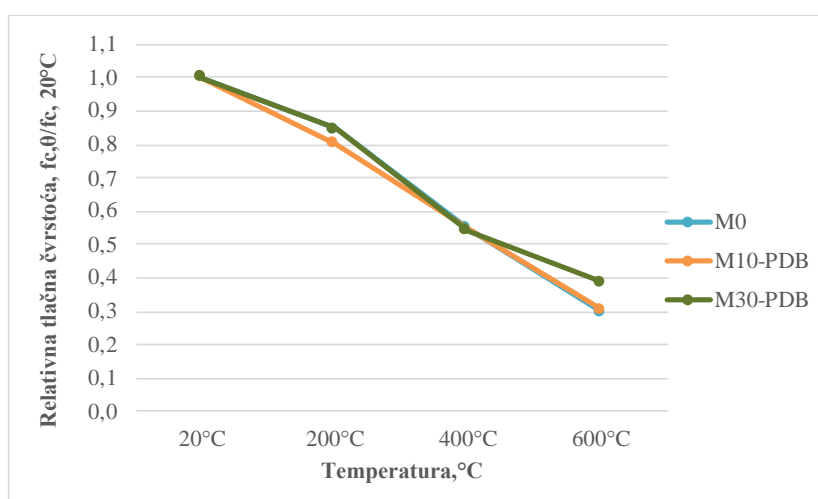
5.1 Mehanička svojstva

5.1.1 Smanjenje tlačne čvrstoće

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prije (20 °C) i nakon toplinskog tretiranja (200 – 600 °C) uzoraka grafički su prikazani na Slika 31 za prvu grupu uzoraka , a na Slika 32 prikazane su relativne tlačne čvrstoće 1. grupe uzoraka.



Slika 31 Ovisnost tlačne čvrstoće 1.grupe uzoraka i temperature toplinskog tretiranja uzoraka



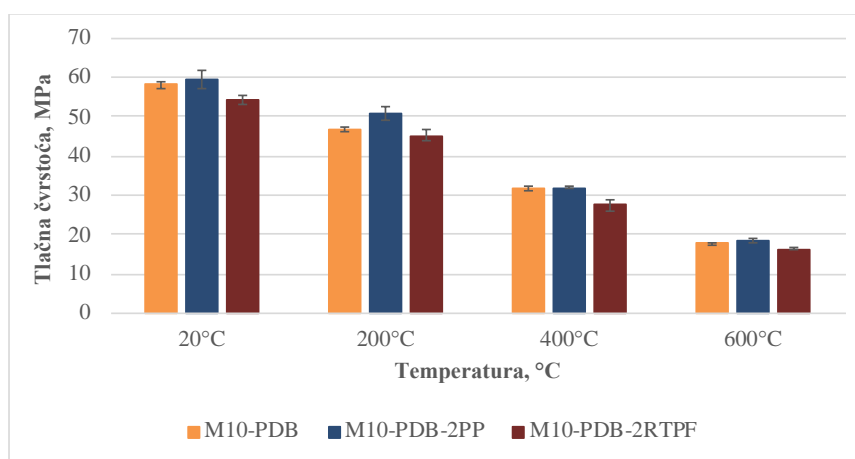
Slika 32 Relativna tlačna čvrstoća 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja

U prvoj grupi uzoraka, na temperaturi od 200 °C, mješavina s 10% PDB-a ima tlačnu čvrstoću veću za 5,99% u odnosu na referentnu mješavinu, a mješavina s 30% PDB-a ima tlačnu čvrstoću manju za 7,2% u odnosu na referentnu mješavinu. Na temperaturi od 400 °C sličan je trend odnosa tlačnih čvrstoća mješavina u odnosu na referentnu dok je na temperaturi od 600 °C mješavina s 30% PDB-a imala najveću tlačnu čvrstoću, veću za 20,5% u odnosu na referentnu mješavinu.

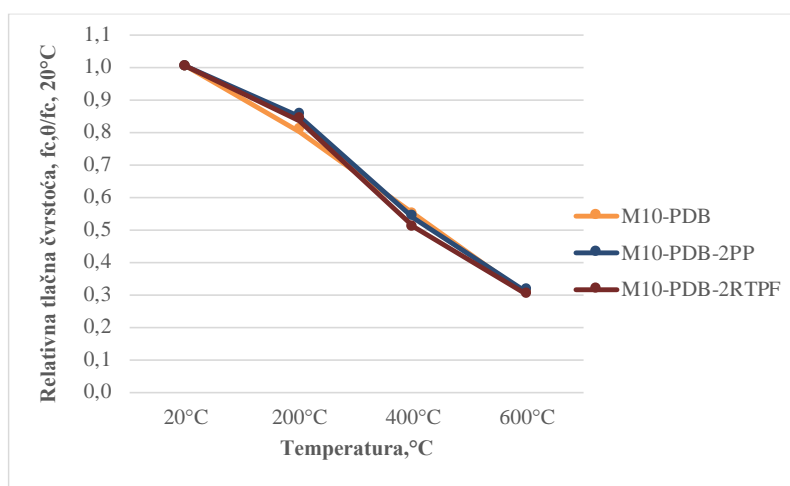
Na Slika 32 može se vidjeti kako mješavina s 30% PDB-a pokazuje najmanji pad tlačne čvrstoće. U temperaturnom području između 20 i 400 °C rezultati se gotovo poklapaju s

referentom mješavinom, dok je na temperaturi od 600 °C mješavina s 30% PDB-a zadržala najveću čvrstoću. Referentna mješavina i mješavina s 10% PDB-a imaju pad tlačne čvrstoće od skoro 70%, dok je pad tlačne čvrstoće mješavine s 30% PDB-a manji te iznosi 60,9%.

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prije (20 °C) i nakon toplinskog tretiranja (200 – 600 °C) uzoraka grafički su prikazani na Slika 33 za drugu grupu uzoraka, a na Slika 34 prikazane su relativne tlačne čvrstoće druge grupe uzoraka, a detaljnije u tablicama u prilogu.



Slika 33 Ovisnost tlačne čvrstoće 2.grupe uzoraka i temperature toplinskog tretiranja uzoraka



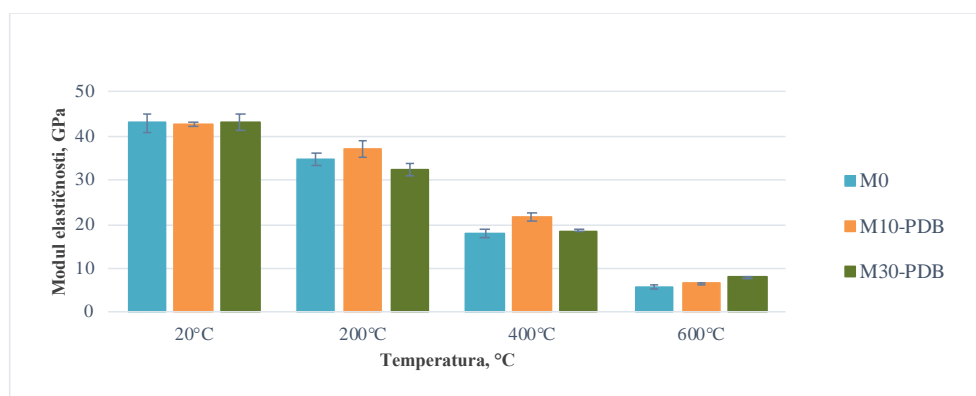
Slika 34 Relativna tlačna čvrstoća 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja

U drugoj grupi uzoraka, na svim temperaturama praćen je isti trend odnosa tlačnih čvrstoća mješavina gdje je najbolje rezultate pokazala mješavina s 10% PDB-a i 2% PP-a s tlačnom čvrstoćom većom od referentne mješavine.

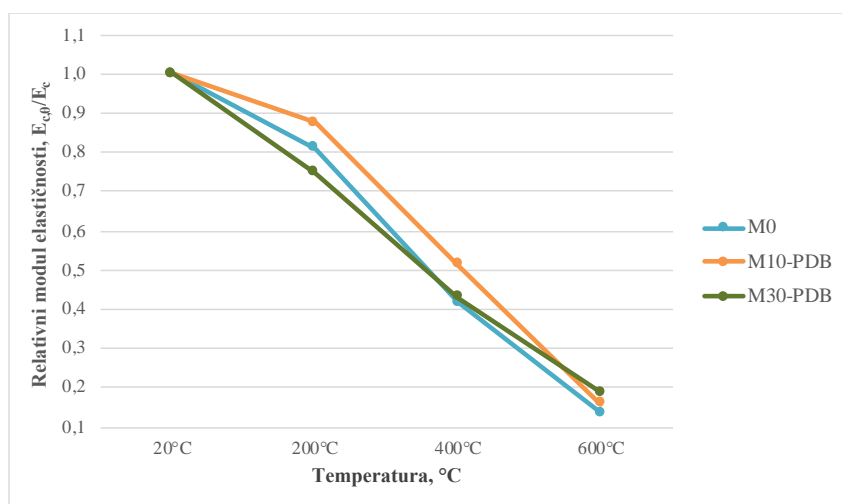
Na Slika 34 može se vidjeti kako polipropilenska vlakna (PP) i reciklirana polimerna vlakna od otpadnih guma (RTPF) nemaju veliki utjecaj na tlačnu čvrstoću betona izloženog visokim temperaturama gdje se rezultati mješavina s vlaknima gotovo podudaraju s rezultatima referentne mješavine bez vlakana zbog malog volumena polimernih vlakana u betonu koji iznosi 0,22% ukupnog volumena betona za polipropilenska vlakna, a 0,15% za reciklirana polimerna vlakna od otpadnih guma (RTPF).

5.1.2 Smanjenje modula elastičnosti

Rezultati ispitivanja modula elastičnosti prije (20 °C) i nakon toplinskog tretiranja (200 – 600 °C) uzoraka grafički su prikazani na Slika 35 za prvu grupu uzoraka, a na Slika 36 prikazani su relativni moduli elastičnosti prve grupe uzoraka.



Slika 35 Modul elastičnosti 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja



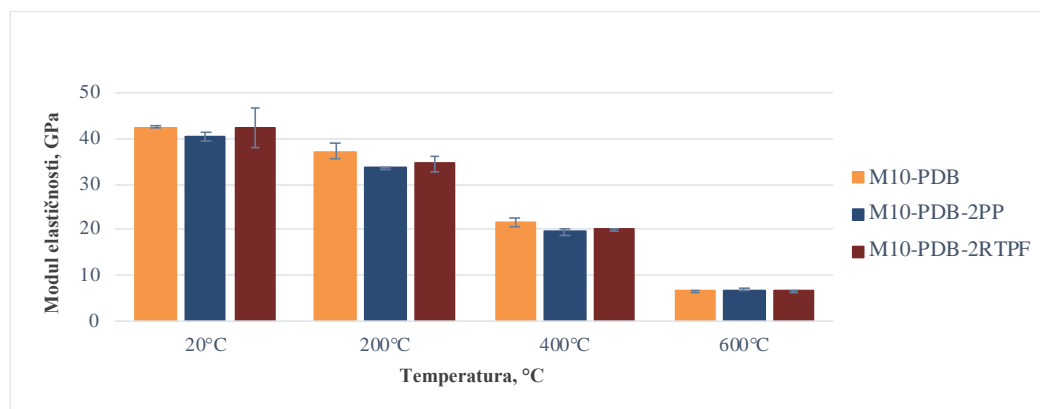
Slika 36 Relativni modul elastičnosti 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja

Graf pokazuje sličan trend pada kao i kod tlačne čvrstoće gdje se može uočiti smanjenje modula elastičnosti svih mješavina s porastom temperature koje je izraženije u odnosu na smanjenje tlačne čvrstoće što ukazuje na veću osjetljivost pri izlaganju visokim temperaturama.

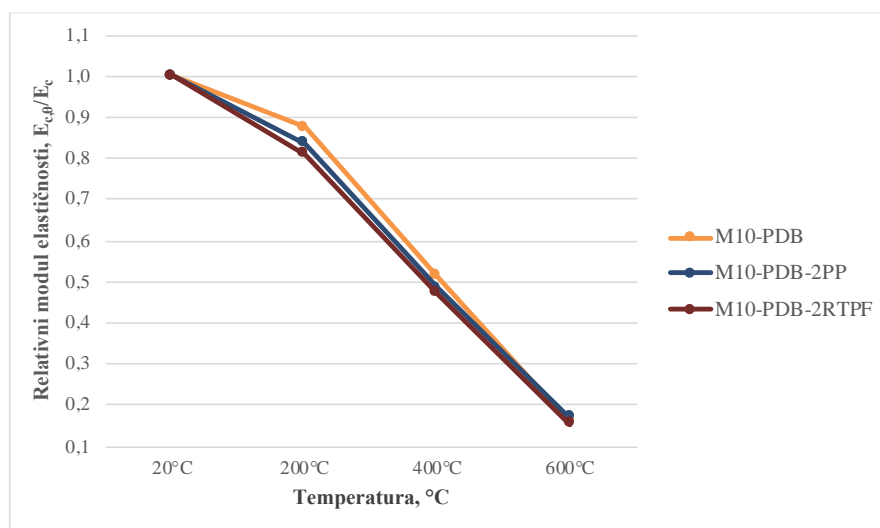
Moduli elastičnosti netretiranih uzoraka iznose od 40,24 do 44,37 GPa, odnosno razlikuju se unutar 10 %. Sličan trend se pojavljuje i nakon tretiranja na višim temperaturama. Na temperaturi od 400 °C sve mješavine bilježe značajan pad modula elastičnosti od gotovo 50%. Na pad modula elastičnosti betona tijekom izlaganja visokim temperaturama utječe stvaranje mikropukotina kao rezultat naprezanja između cementne paste i agregata kao i stvaranje tlaka u porama pri evaporaciji vlage u betonu.

Rezultati prikazani na Slika 36 pokazuju kako mješavina s 10% udjela PDB-a pokazuje nešto bolje rezultate pada modula elastičnosti u odnosu na referentnu mješavinu gdje pad modula elastičnosti za mješavinu M10-PDB iznosi 12,4% na temperaturi od 200 °C te 48,8% na temperaturi od 400 °C, za razliku od referentne mješavine koja na temperaturi od 200 °C bilježi pad 19,1% te na temperaturi od 400 °C pad modula elastičnosti od 58,4%. Mješavina s 30% PDB-a pokazuje slične rezultate u odnosu na referentnu mješavinu pa se može zaključiti da zamjena cementa do 30 % PDB-om neće negativno utjecati na promjenu modula nakon izloženosti visokim požarnim temperaturama do 600 °C.

Rezultati ispitivanja modula elastičnosti prije (20 °C) i nakon toplinskog tretiranja (200 – 600 °C) uzoraka grafički su prikazani na Slika 37 za drugu grupu uzoraka, a na Slika 38 prikazani su relativni moduli elastičnosti druge grupe uzoraka.



Slika 37 Modul elastičnosti 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja



Slika 38 Relativni modul elastičnosti 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja

Rezultati prikazani na Slika 38 prikazuju sličan trend kao i kod tlačne čvrstoće, odnosno može se zaključiti kako topljenje polimernih vlakana ne utječu na daljnju degradaciju modula elastičnosti i nakon što su uzorci izloženi temperaturama na kojima se vlakna otapaju.

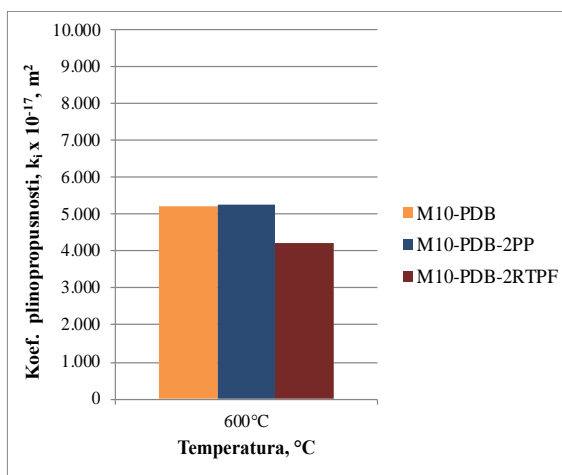
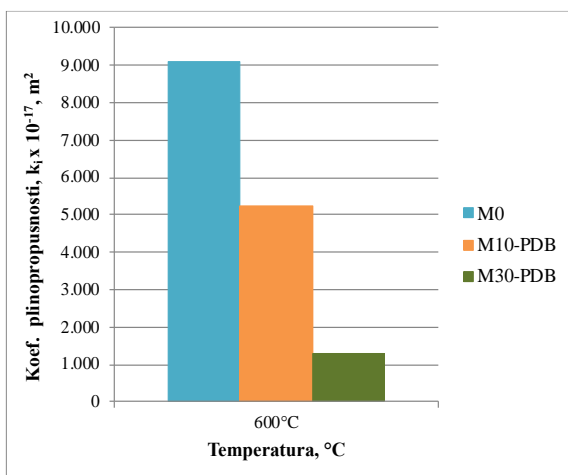
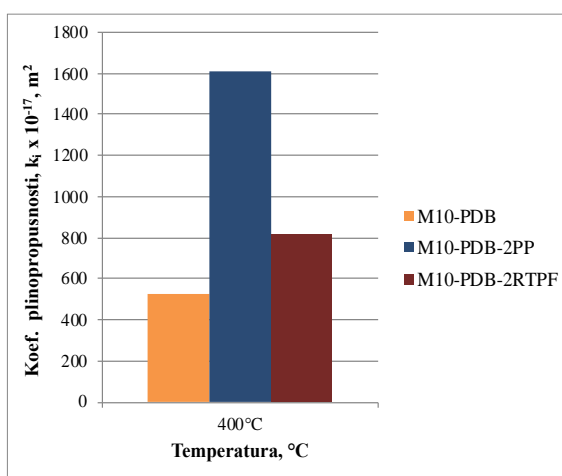
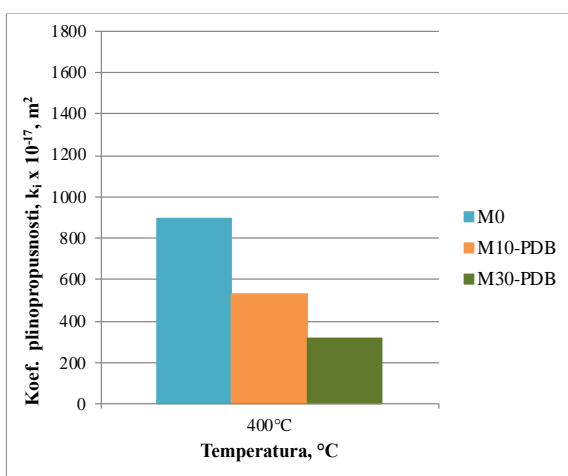
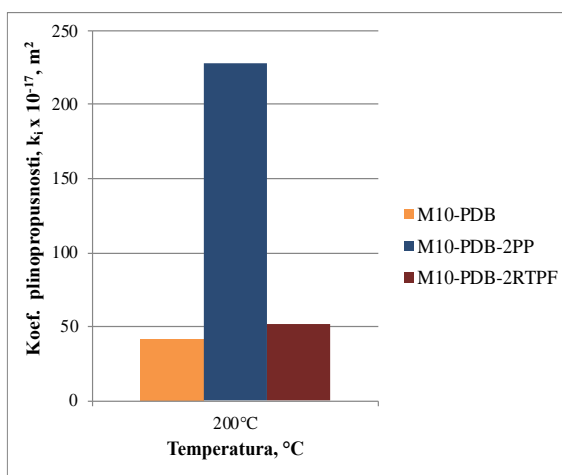
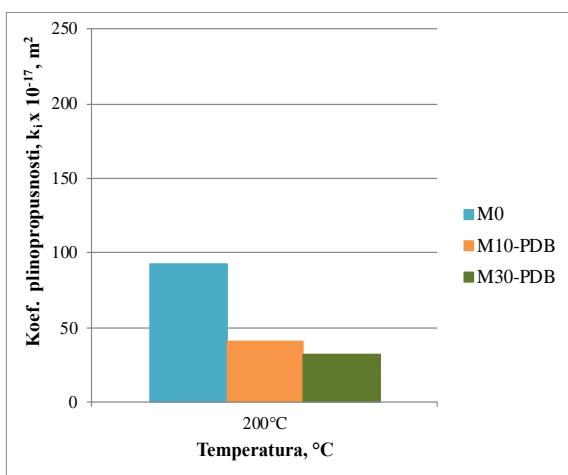
5.2 Trajnosna svojstva

5.2.1 Plinopropusnost

Rezultati ispitivanja plinopropusnosti uzoraka nakon toplinskog tretiranja (200-600°C) grafički su prikazani na Slika 39 za prvu grupu uzoraka i Slika 40 za drugu grupu uzoraka. Na Slika 41 prikazani su rezultati relativnog koeficijenta plinopropusnosti mješavina prve grupe uzoraka, a na Slika 42 prikazani su rezultati relativnog koeficijenta plinopropusnosti mješavina prve grupe uzoraka u odnosu na referentnu mješavinu. Na Slika 43 prikazani su rezultati relativnog koeficijenta plinopropusnosti mješavina druge grupe uzoraka, a na Slika 44 prikazani su rezultati relativnog koeficijenta plinopropusnosti mješavina druge grupe uzoraka u odnosu na mješavinu bez vlakana oznake M10-PDB.

U prvoj grupi uzoraka može se vidjeti kako mješavine s udjelom PDB-a pokazuju manju propusnost u odnosu na referentnu mješavinu nakon izlaganja visokim temperaturama što u konačnici povoljno utječe na trajnost betona. Na Slika 41 se to jasno može vidjeti gdje je izražen relativni koeficijent propusnosti za prvu grupu mješavina te se može vidjeti kako mješavina s 30% PDB-a ima izražen pad koeficijenta plinopropusnosti u temperaturnom području između 400 °C i 600 °C.

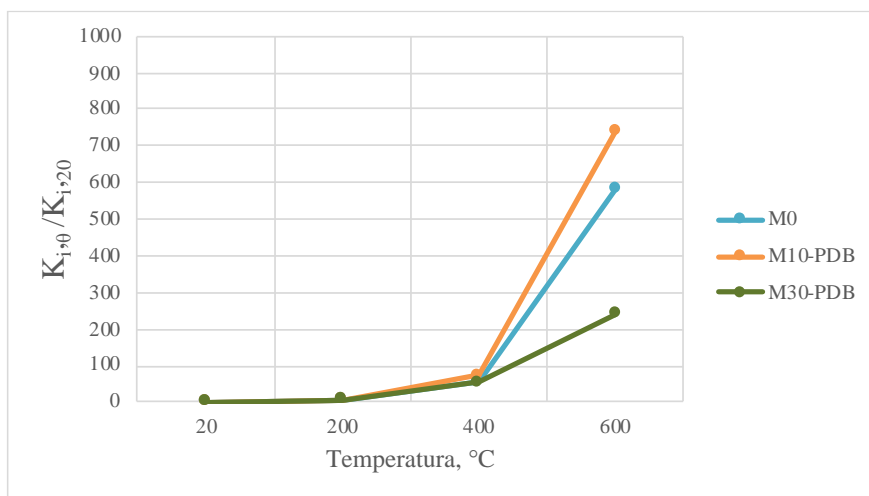
Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima



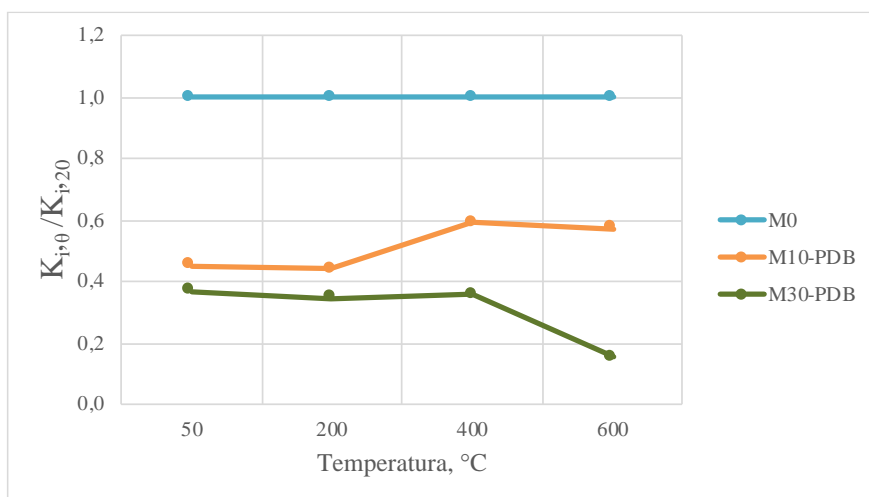
Slika 39 Koeficijenti plinopropusnosti 1.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi

Slika 40 Koeficijenti plinopropusnosti 2.grupe uzoraka u ovisnosti o temperaturi

Prema Tablica 5 u poglavlju 4.3.3 u kojoj su prikazani kriteriji za ocjenu stanja kvalitete betona prema mjerenoj plinopropusnosti, može se vidjeti kako dobiveni rezultati ukazuju da betonske mješavine već na temperaturi od 200 °C imaju slabu kvalitetu.

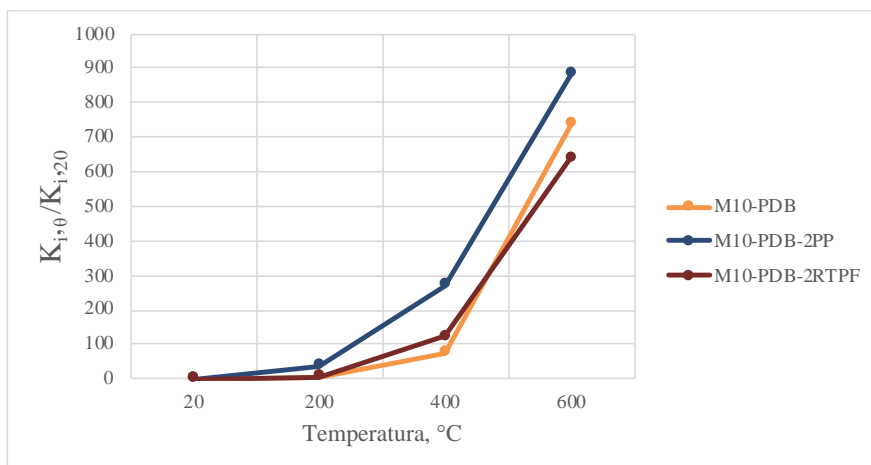


Slika 41 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 1.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi

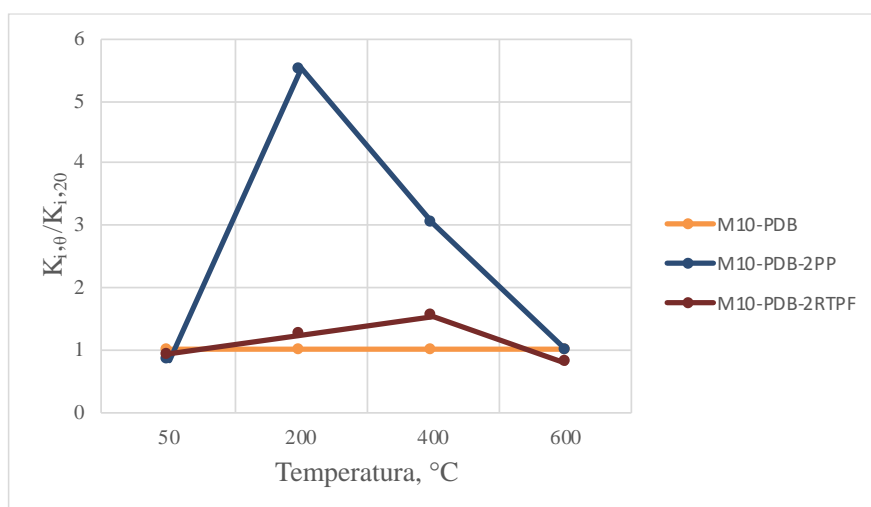


Slika 42 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 1.grupu uzoraka u odnosu na referentnu mješavinu

Rezultati na Slika 42 pokazuju pad koeficijenta plinopropusnosti za mješavine s udjelom PDB-a u odnosu na referentnu mješavinu. U temperaturnom području do 200 °C mješavine s udjelom od 10% i 30% PDB-a imaju sličan trend koji se počinje mijenjati na temperaturama višim od 200 °C. Mješavina s udjelom od 30% PDB-a pokazuje najveći pad koeficijenta plinopropusnosti koji na temperaturi od 600 °C pada za više od 80% u odnosu na referentnu mješavinu.



Slika 43 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 2.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi

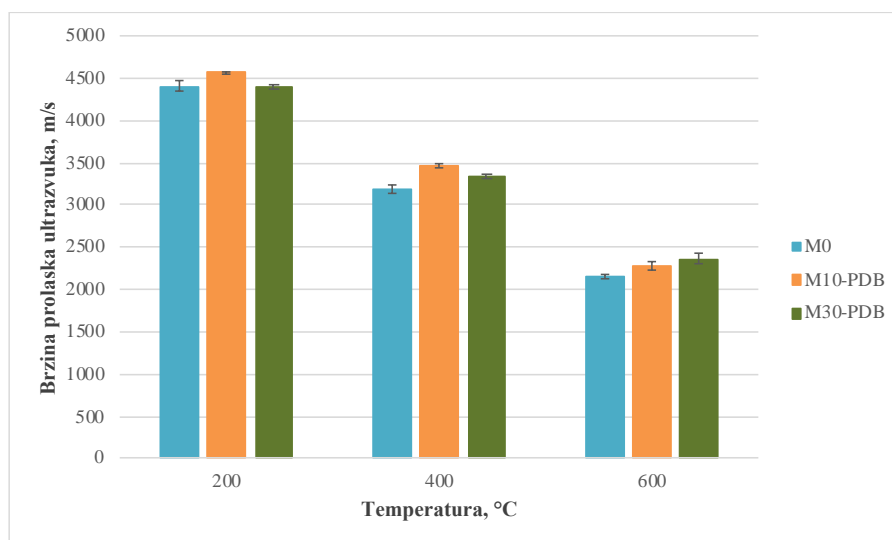


Slika 44 Relativni koeficijent plinopropusnosti za 2.grupu uzoraka u odnosu na mješavinu M10-PDB

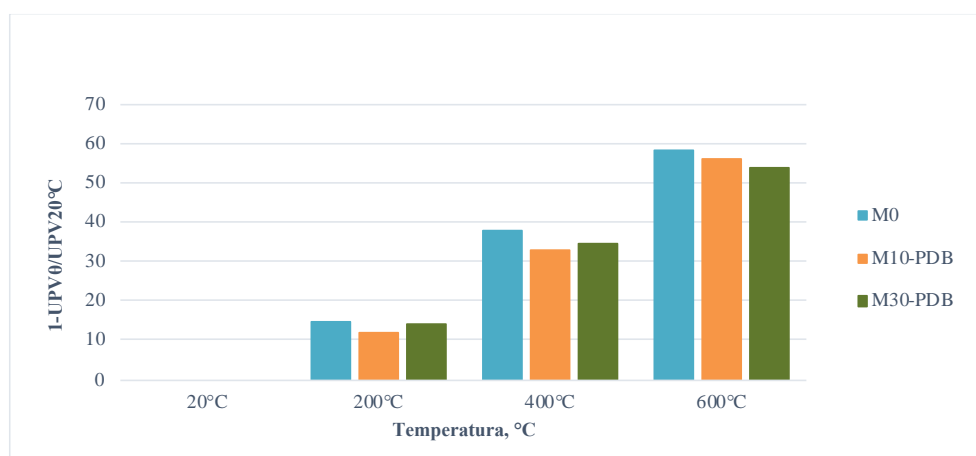
Rezultati na Slika 44 prikazuju mješavine s udjelom PP i RTPF vlaknima u odnosu na mješavinu bez polimernih vlakna gdje se može uočiti značaj porast plinopropusnosti na temperaturi od 200 °C kod mješavine s polipropilenskim vlaknima jer se ona tope na temperaturi od oko 160°C te stvaraju dodatne pore, dok se kod druge mješavine s recikliranim polimernim vlaknima bilježi rast plinopropusnosti na temperaturi od 400 °C jer se takva vlakna tope na višim temperaturama. U odnosu na polipropilenska vlakna, reciklirana polimerna vlakna manje utječu na plinopropusnost betona što se može objasniti većom količinom zaostalih komadića gume koja se nisu otopila.

5.2.2 Smanjenje brzine prolaska ultrazvuka

Rezultati ispitivanja prolaska ultrazvuka kroz uzorke nakon toplinskog tretiranja (200 – 600 °C) prikazani su na Slika 45 za prvu grupu uzoraka, a na Slika 46 prikazano je relativno smanjenje brzine prolaska ultrazvuka za prvu grupu uzoraka, a detaljnije u tablicama u prilogu.

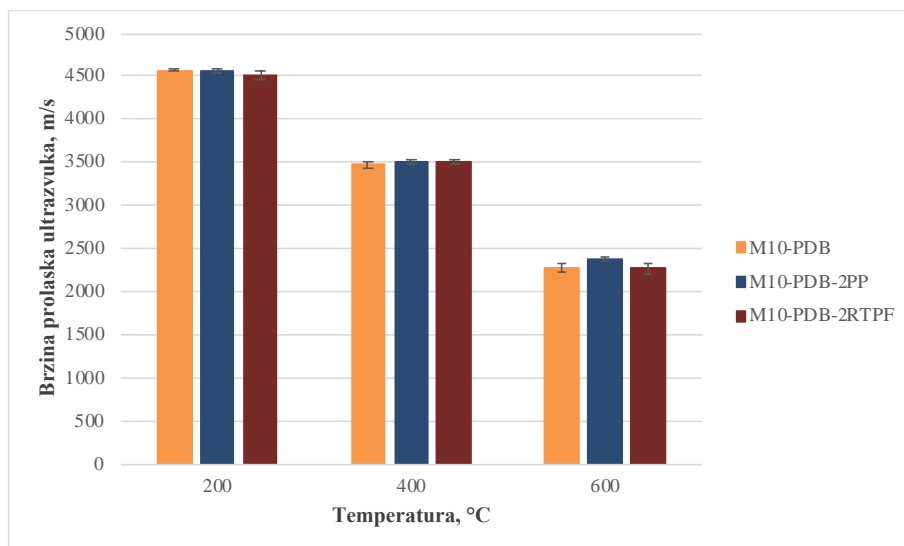


Slika 45 Brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke 1. grupe mješavina u ovisnosti o temperaturi

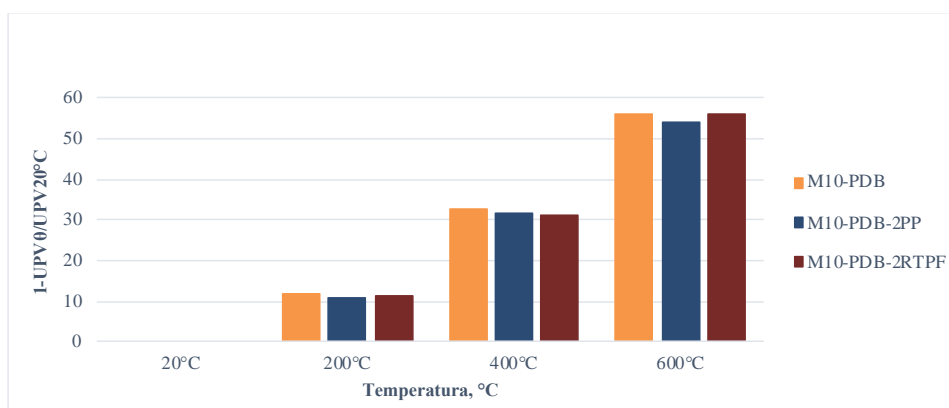


Slika 46 Relativno smanjenje brzine prolaska ultrazvuka za 1. grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi

Rezultati ispitivanja prolaska ultrazvuka kroz uzorke nakon toplinskog tretiranja (200 – 600 °C) prikazani su na Slika 47 za drugu grupu uzoraka, a na Slika 48 prikazano je relativno smanjenje brzine prolaska ultrazvuka za drugu grupu uzoraka, a detaljnije u tablicama u prilogu.



Slika 47 Brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke 2.grupe mješavina u ovisnosti o temperaturi



Slika 48 Relativno smanjenje brzine prolaska ultrazvuka za 2.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi

Određivanje brzine prolaska ultrazvučnog vala kroz beton može poslužiti kao nerazorna metoda kojom se utvrđuju oštećenja uzrokovana visokom temperaturom, a također i za određivanje pojave pukotina i šupljina kao posljedice djelovanja visoke temperature na materijal. Smanjenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa može ukazivati na pojavu pukotina u materijalu i povećanje poroznosti. Prema Tablica 6 u poglavlju 4.3.4 može se procijeniti preostala kvaliteta betona izloženog visokim temperaturama. Na temperaturi od 400 °C brzina ultrazvuka svih ispitanih mješavina kreće se od 3000 do 3500 m/s što spada u kategoriju upitne kvalitete. Na temperaturi od 600 °C brzina prolaska ultrazvuka pada ispod 2500 m/s što ukazuje na slabu kvalitetu betona iz čega slijedi kako je takav beton potrebno sanirati ili ojačati.

5.3 Dodatna svojstva potrebna za analizu rezultata mehaničkih i trajnosnih svojstava

Dodatna svojstva (širine pukotina, gubitak mase te toplinske promjene) su ispitana kako bi se bolje protumačili dobiveni rezultati mehaničkih i trajnosnih svojstava. Ispitivanja su provedena samo u temperaturnom području 400-600 °C iz razloga što u tom temperaturnom području rezultati mehaničkih i trajnosnih svojstava pokazuju drugačiji trend u odnosu na temperaturno područje 200-400 °C.

5.3.1 Širine pukotina nakon toplinskog tretiranja uzoraka

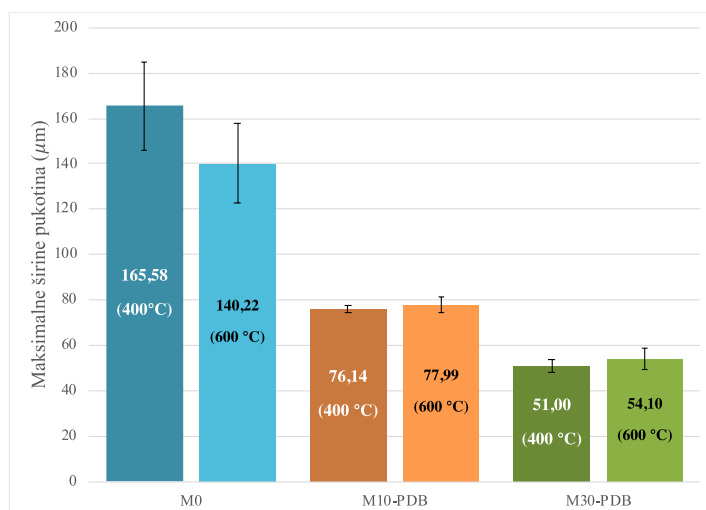
Izlaganje visokim temperaturama dovodi do pojave unutarnjih naprezanja unutar strukture betona kao rezultat tlaka vodene pare te toplinskog naprezanja zbog razlike u toplinskoj kompatibilnosti cementnog kamena i agregata. S obzirom da je dehidracija betona kao i formiranje pukotina izraženije na temperaturama višim od 200 °C, uzorci betonskih mješavina toplinski su tretirani na temperaturama od 400 °C i 600 °C nakon čega je proveden vizualni pregled gdje su se golim okom mogle uočiti pukotine debljine vlasi. Kako bi se bolje mogla vidjeti razlika u nastalim pukotinama na uzorcima, na svakom uzorku su na više mjesta izmjerene pukotine optičkim mikroskopom. U nastavku ovog teksta prikazane su slike pukotina prve i druge grupe mješavina, dok je na Slika 49 i Slika 50 grafički prikaz maksimalnih širina pukotina uzoraka koje su dobivene kao prosječna vrijednost mjerenja širina pukotina uzoraka na više mjesta.

Uspoređujući slike pukotina uzoraka s udjelom PDB-a u odnosu na referentnu mješavinu i na temperaturi od 400 °C (Slika 51, Slika 52, Slika 53) i 600 °C (Slika 57, Slika 58, Slika 59) jasno se može vidjeti kako su se kod uzoraka s udjelom PDB-a pojavile manje pukotine u odnosu na referentnu mješavinu.

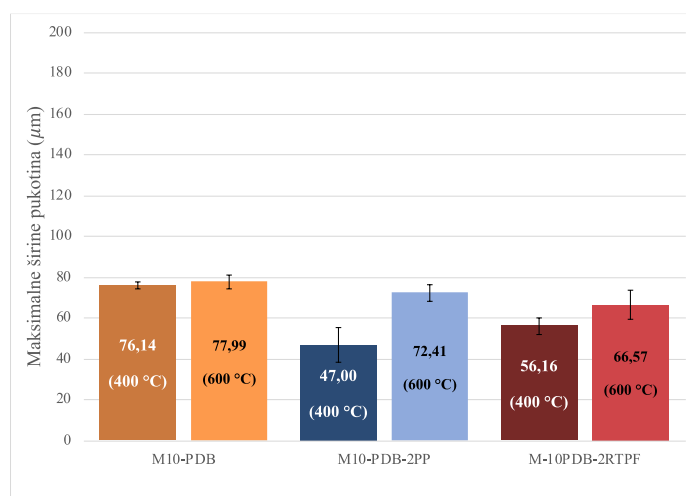
Na temperaturi od 400 °C mješavine s 10% PDB-a imaju pukotine manje za 54%, a mješavine s 30% PDB-a za 69% manje pukotine u odnosu na referentnu mješavinu. Na temperaturi od 600 °C razlike u širini pukotina su kod mješavina s 10% PDB-a za 44%, a kod mješavine s 30% PDB-a za 61% manje u odnosu na referentnu mješavinu što pokazuje kako zamjena udjela cementa s pepelom drvne biomase povoljno utječe kod stvaranja pukotina nakon izlaganja visokim temperaturama.

U drugoj grupi mješavina gdje su dodana PP i RTPF vlakna, na temperaturi od 400 °C pukotine mješavina s polimernim vlaknima su manje u odnosu na referentnu, dok se na temperaturi od 600 °C širine pukotina ne razlikuju previše. S obzirom da vlakna topljenjem na visokim temperaturama stvaraju unutarnje kanale koji pomažu kod pritiska vlage koji se stvara kod povišenih temperatura, može se vidjeti kako dodatak polimernih vlakana ne utječe na pojavu većih pukotina.

Na Slika 49 prikazani su rezultati izmjerenih maksimalnih širina pukotina prve grupe uzoraka na temperaturama od 400 i 600 °C, a na Slika 50 prikazani su rezultati maksimalnih širina pukotina druge grupe uzoraka na temperaturama od 400 i 600 °C.

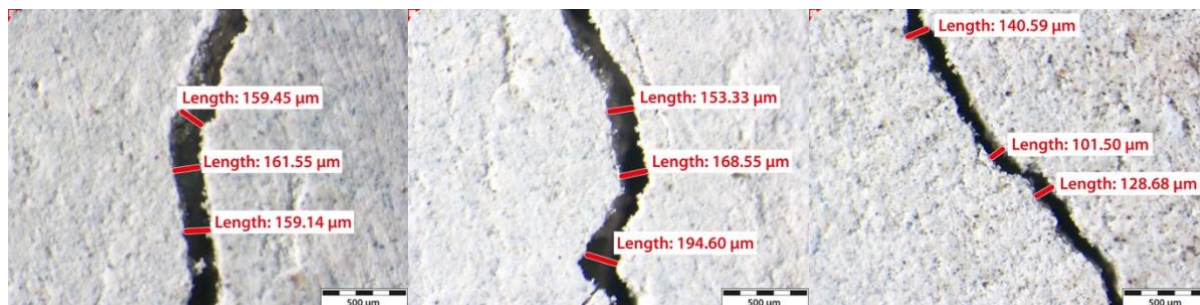


Slika 49 Maksimalne širina pukotina u ovisnosti o temperaturi za 1.grupu uzoraka

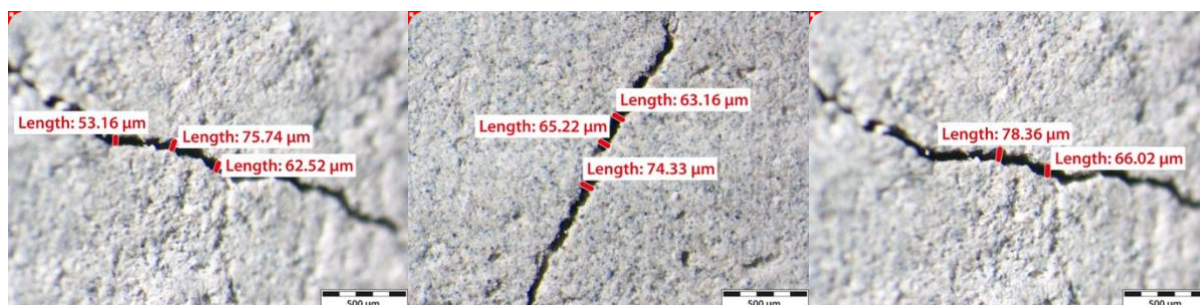


Slika 50 Maksimalne širina pukotina u ovisnosti o temperaturi za 2.grupu uzoraka

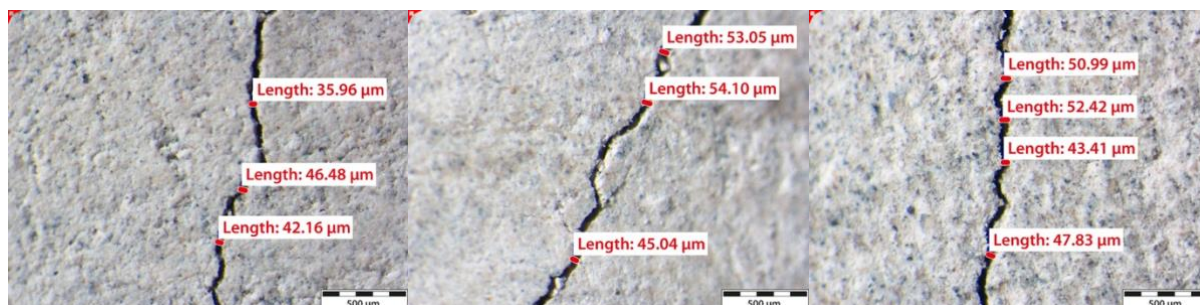
Na Slika 51, Slika 52 i Slika 53 prikazane su pukotine uzoraka prve grupe mješavina nakon izlaganja temperaturi od 400 °C.



Slika 51 Širine pukotina za mješavinu M0 nakon izlaganja temperaturi od 400 °C

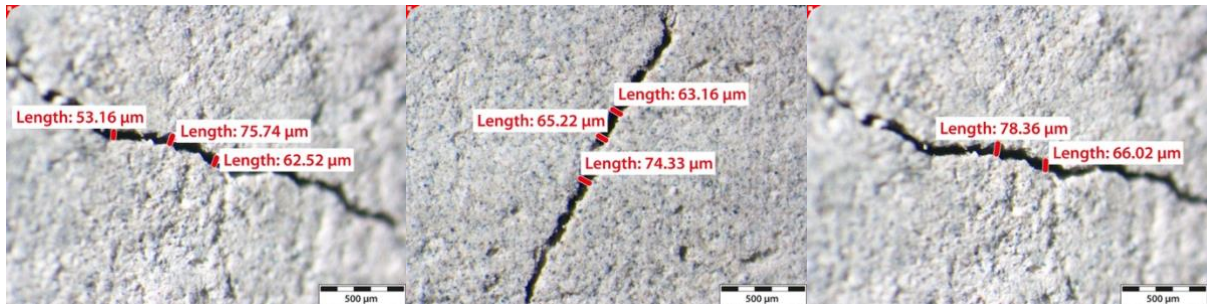


Slika 52 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 400 °C

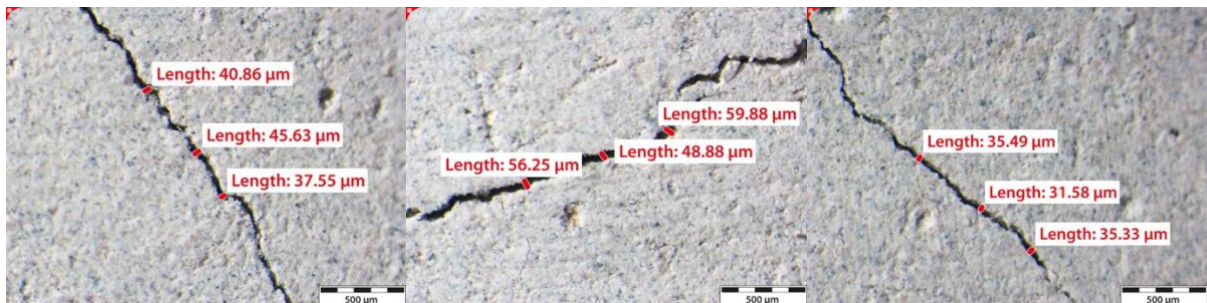


Slika 53 Širine pukotina za mješavinu M30-PDB nakon izlaganja temperaturi od 400 °C

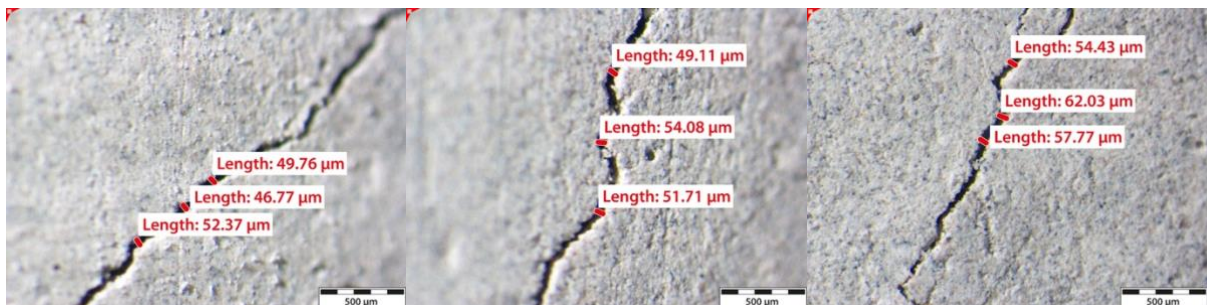
Na Slika 54, Slika 55 i Slika 56 prikazane su pukotine druge grupe mješavina nakon izlaganja temperaturi od 400 °C.



Slika 54 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 400 °C

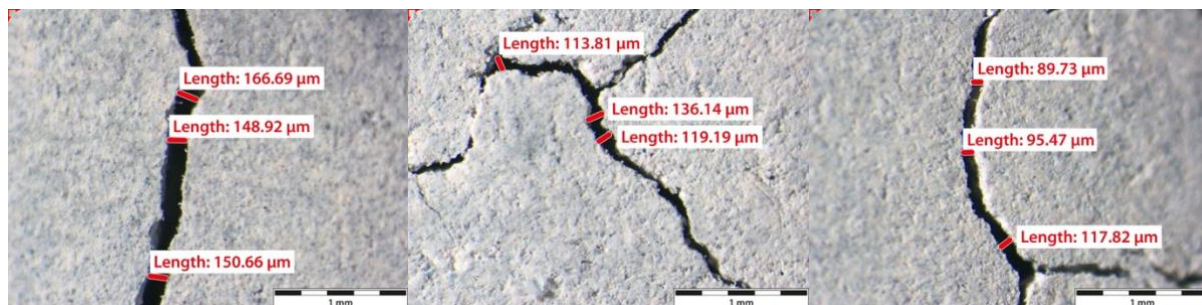


Slika 55 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2PP nakon izlaganja temperaturi od 400 °C

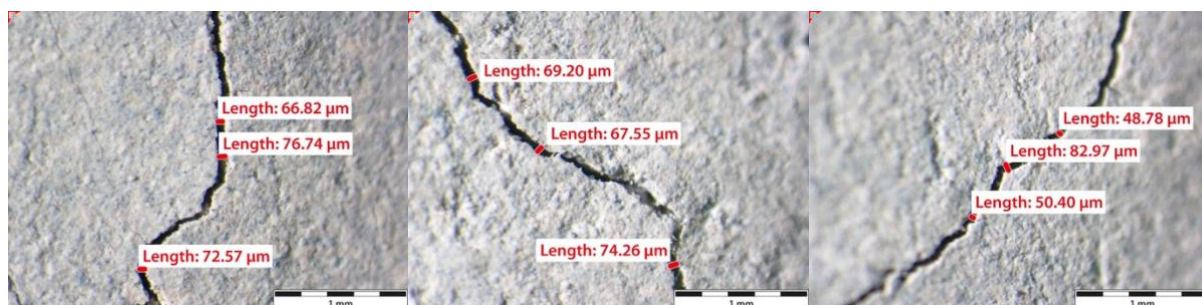


Slika 56 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2RTPF nakon izlaganja temperaturi od 400 °C

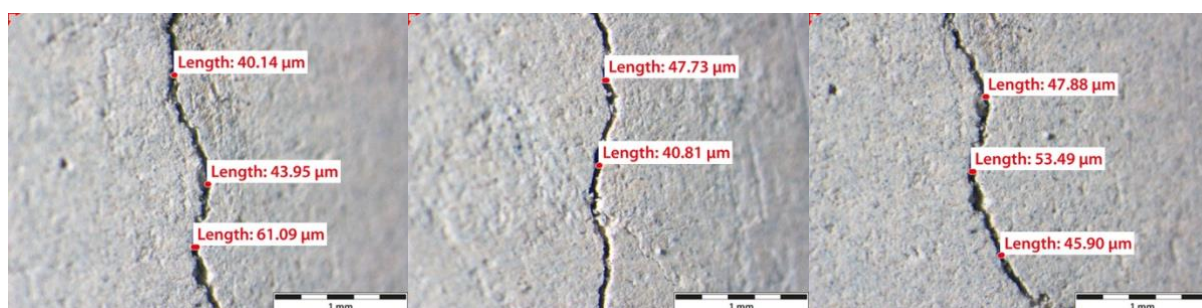
Na Slika 57, Slika 58 i Slika 59 prikazane su pukotine prve grupe mješavina nakon izlaganja temperaturi od 600 °C.



Slika 57 Širine pukotina za mješavinu M0 nakon izlaganja temperaturi od 600 °C

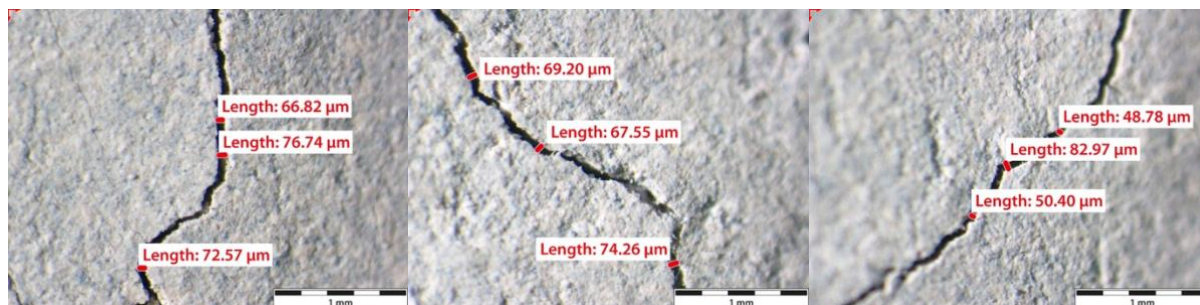


Slika 58 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 600 °C

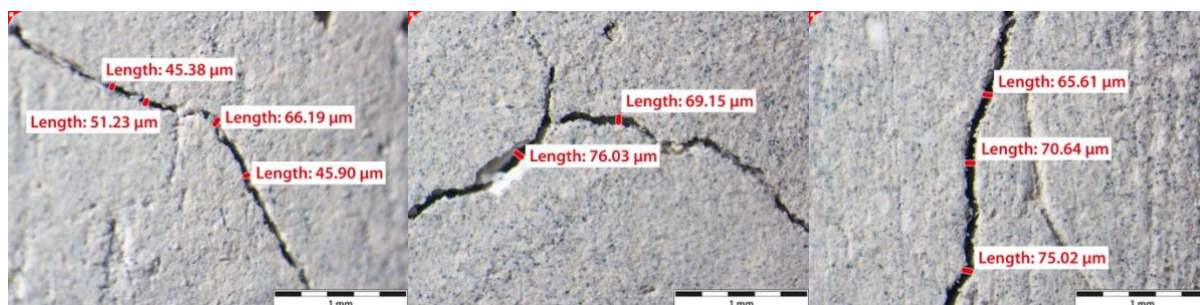


Slika 59 Širine pukotina za mješavinu M30-PDB nakon izlaganja temperaturi od 600 °C

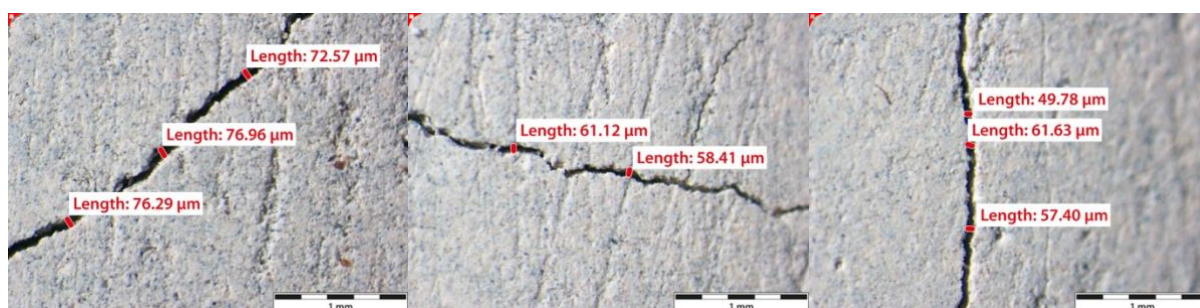
Na Slika 60, Slika 61 i Slika 62 prikazane su pukotine druge grupe mješavina nakon izlaganja temperaturi od 600 °C.



Slika 60 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB nakon izlaganja temperaturi od 600 °C



Slika 61 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2PP nakon izlaganja temperaturi od 600 °C

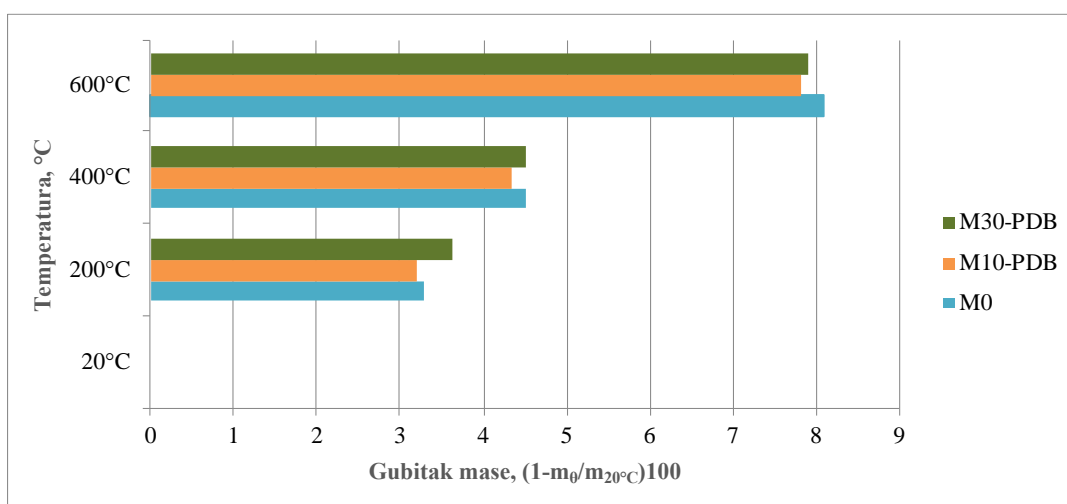


Slika 62 Širine pukotina za mješavinu M10-PDB-2RTPF nakon izlaganja temperaturi od 600 °C

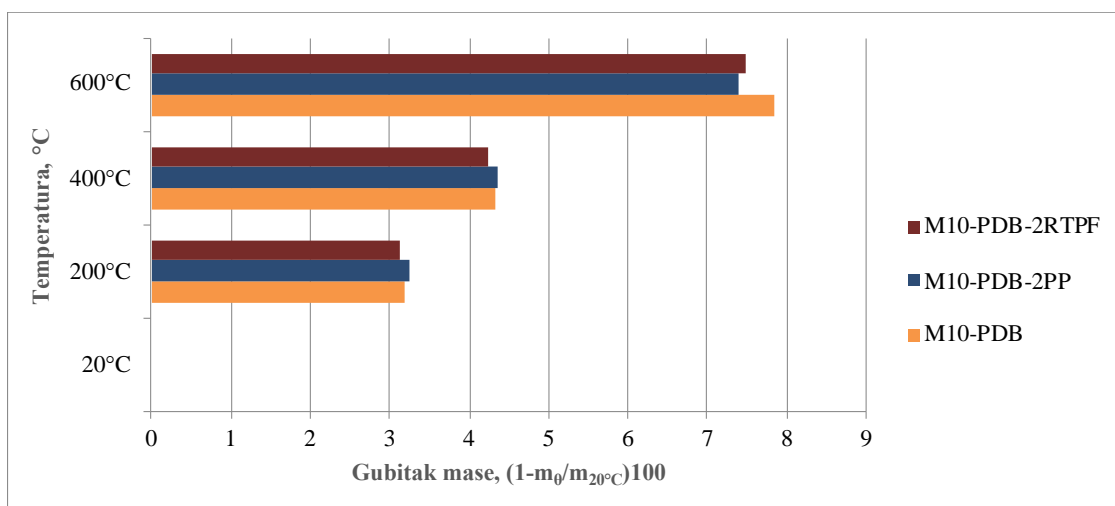
5.3.1 Smanjenje mase

Rezultati ispitivanja promjene mase uzoraka nakon toplinskog tretiranja grafički su prikazani na Slika 63 za prvu grupu uzoraka te na Slika 64 za drugu grupu uzoraka, a detaljnije su prikazani u tablicama u prilogu.. Graf prikazuje gubitak mase uzoraka s porastom temperature kod svih mješavina.

Sve ispitane mješavine u pogledu gubitka mase, koja je najvećim dijelom uzrokovana gubitkom vode te raspadom kalcijevog hidroksida tijekom zagrijavanja betona, pokazuju slično ponašanje u cijelom temperaturnom području. Beton u sebi sadrži kapilarnu vodu, fizički vezanu vodu (gel vodu) te kemijski vezanu vodu u CSH gelu te kalcijevom hidroksidu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), među kojima kapilarna i fizički apsorbirana voda zauzimaju veći udio u masi cementne paste te se zagrijavanjem na temperaturu od 200 °C i više ta voda izlazi iz betona. Kemijski vezana voda je dio produkata hidratacije te se ne može odstraniti iz betona sve dok ne dođe do kemijskog razlaganja kalcijevog hidroksida što se događa na višim temperaturama. Iz grafa na Slika 63 može se vidjeti kako se gubitak mase kreće od 3 do 8% u području od 200 do 600 °C, također može se uočiti kako je veći gubitak mase na temperaturama između 400 i 600 °C gdje je gubitak mase na temperaturi od 600 °C u odnosu na temperaturu od 400 °C veći za 45% kod prve grupe mješavina. Na Slika 64 prikazane su slične vrijednosti gubitka mase za drugu grupu uzoraka što ukazuje kako topljenje vlakana nije značajno utjecalo na gubitak mase. Prema Bažantu [14] u temperaturnom području 400-600 °C dolazi do raspada kalcijevog hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).



Slika 63 Smanjenje mase za 1.grupu u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja

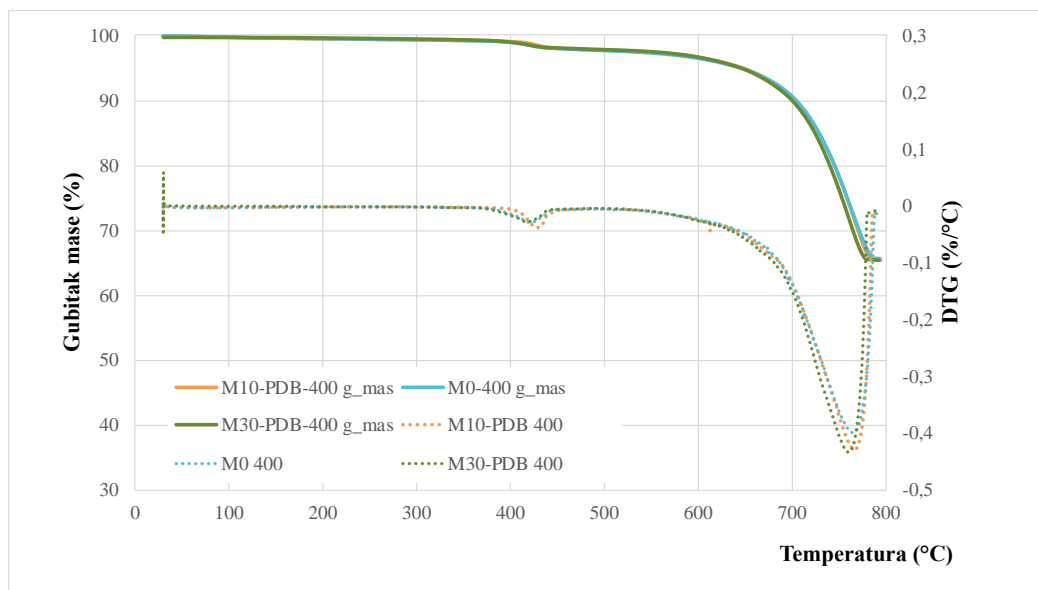


Slika 64 Smanjenje mase za 2.grupu uzoraka u ovisnosti o temperaturi toplinskog tretiranja

5.3.2 TGA analiza

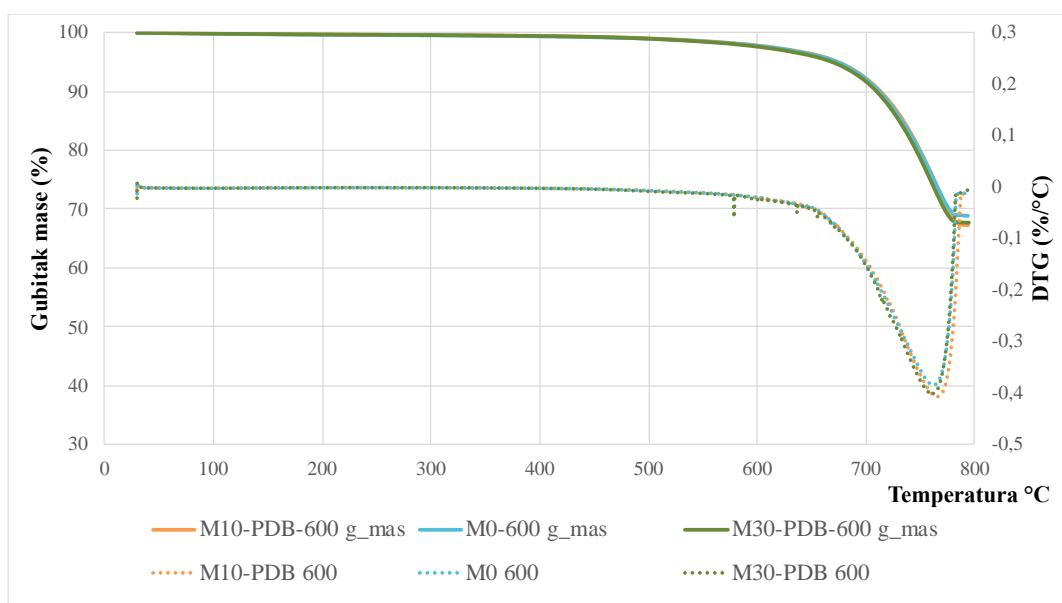
TGA analiza uzoraka provedena je za prvu grupu uzoraka u temperaturnom području 400-600 °C kako bi se utvrdila količina kalcijevog hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) u mješavinama s PDB-om te bolje pojasnili dobiveni rezultati mehaničkih i trajnosnih svojstava. Kako je navedeno u [14], na temperaturnom području od 400-600, C raspada se kalcijev hidroksid na kalcijev oksid i vodu. Uslijed hlađenja, kalcijev oksid se spaja s vlagom iz okoline te ponovno nastaje kalcijev hidroksid uz povećanje volumena od 44% što uzrokuje dodatnu degradaciju betona. Termogravimetrijskom analizom i određivanjem količine kalcijevog hidroksida u pojedinim mješavinama nastojalo se bolje objasniti ponašanje betona s PDB-om u pogledu rezidualnih mehaničkih i trajnosnih svojstava.

Na Slika 65 prikazani su rezultati TGA analize uzoraka izloženih na temperature do 400 °C.



Slika 65 Termogravimetrijska analiza uzoraka toplinski tretiranih na temperaturi od 400 °C

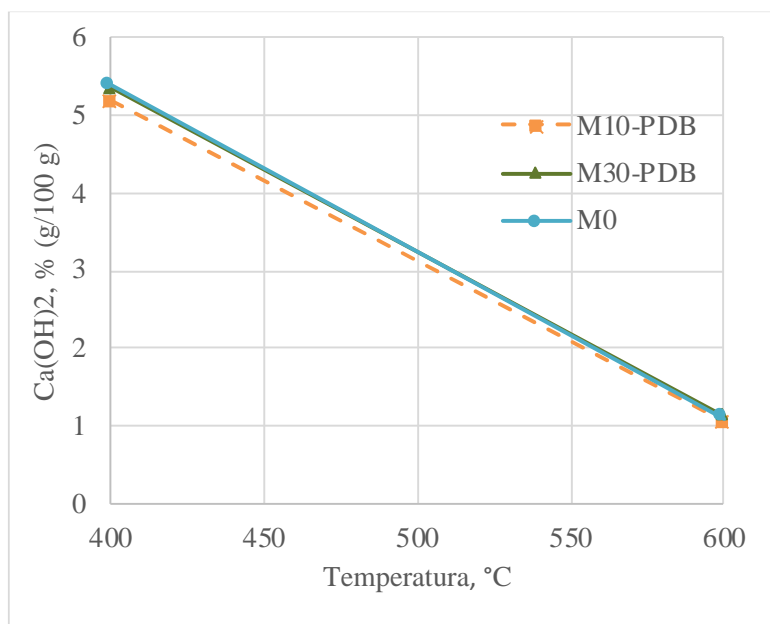
Na Slika 66 prikazani su rezultati TGA analize uzoraka izloženih na temperature do 600 °C.



Slika 66 Termogravimetrijska analiza uzoraka toplinski tretiranih na 600 °C

Na Slika 67 prikazane su količine kalcijevog hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dobivene TGA analizom na temperaturama od 400 do 600 °C u mješavinama prve grupe uzoraka. Izračunate količine upućuju na to da su količine kalcijevog hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) u svim mješavinama gotovo iste

pa su tako zamjenom cementa s PDB-om do 30% dobivena ista svojstva kao i kod referentne mješavine.



Slika 67 Količina kalcijevog hidroksida u temperaturnom području 400-600 °C

6 DISKUSIJA DOBIVENIH REZULTATA

Temeljem rezultata prikazanih u poglavlju 5 u ovom poglavlju provedena je diskusija dobivenih rezultata ispitivanja o utjecaju PDB-a i RTPF-a na mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog požarnim temperaturama.

6.1 Mehanička svojstva

Razlaganje kalcijevog hidroksida (Ca(OH)_2) na temperaturama višim od 400 °C dovodi do značajnijeg pada tlačne čvrstoće i modula elastičnosti na tim temperaturama što su i pokazali rezultati ispitivanja betonskih mješavina. Međutim, rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti pokazali su kako zamjena cementa s PDB-om ne narušava dodatno mehanička svojstva betona gdje su mješavine s 30% PDB-a pokazale manji pad tlačne čvrstoće kao i manji pad modula elastičnosti u odnosu na referentnu mješavinu što znači da zamjena udjela cementa u betonu s pepelom drvne biomase može poboljšati ponašanje betona na visokim temperaturama. Također se pokazalo kako dodatak polimernih vlakana u betonskim mješavinama nije dodatno narušio tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti s obzirom da se radi o

malom postotku volumena vlakana u odnosu na ukupan volumen betona (0,22% za PP, 0,15% za RTPF).

Iz rezultata pada modula elastičnosti u objema grupama betonskih mješavina može se uočiti kako je do značajnijeg pada modula elastičnosti došlo u temperaturnom području od 200 °C do 600 °C što je karakteristično za betone visokih čvrstoća. Brza degradacija modula elastičnosti ukazuje na to da povišene temperature utječu na značajno oštećenje mikrostrukture betonskih uzoraka.

6.2 Trajnosna svojstva

Mješavine s udjelom PDB-a također su pokazale bolja trajnosna svojstva u odnosu na referentnu mješavinu gdje se ispitivanjem plinopropusnosti betonskih mješavina došlo do rezultata kako mješavina s 30% PDB-a ima pad koeficijenta plinopropusnosti na temperaturama između 400 °C i 600 °C što povoljno utječe na trajnost betona jer je smanjen rizik od prodora agresivnih tvari u već oštećenu, strukturu betona. Iako su mješavine s dodatkom polimernih vlakana očekivano, imale veći koeficijent plinopropusnosti, pokazalo se kako njihov dodatak betonskoj mješavini ne utječe negativno na mehanička svojstva betona.

Ispitivanje brzine prolaska ultrazvuka betonskih mješavina nakon izlaganja visokim temperaturama nerazorna je i brza metoda koja može okvirno dati podatke o kvaliteti betona. Rezultati ovog ispitivanja pokazali su kako su sve ispitane mješavine pokazale upitnu kvalitetu na temperaturama od 400 °C te slabu kvalitetu betona na temperaturama od 600 °C iz čega proizlazi kako se taj beton ne može više koristiti te bi bilo potrebno provesti ocjenu stanja te po mogućnosti radove sanacije.

6.3 Dodatno ispitana svojstva

S obzirom da u temperaturnom području od 400 do 600 °C rezultati mehaničkih i trajnosnih svojstava mješavina s PDB-om prate drugačiji trend u odnosu na područje od 200 do 400 °C gdje su se bolja svojstva pokazala kod mješavina s 30% PDB-a, dodatno su ispitana svojstva (širine pukotina, gubitak mase, toplinska analiza) na temperaturama od 400 i 600 °C kako bi se bolje protumačili dobiveni rezultati mehaničkih i trajnosnih svojstava.

Poznato je kako je dehidracija betona kao i razlaganje kalcijevog hidroksida (Ca(OH)_2) izraženo na temperaturama višim od $400\text{ }^\circ\text{C}$ što su i pokazali rezultati mjerenja gubitka mase gdje je gubitak mase svih uzoraka bio najveći u tom temperaturnom području.

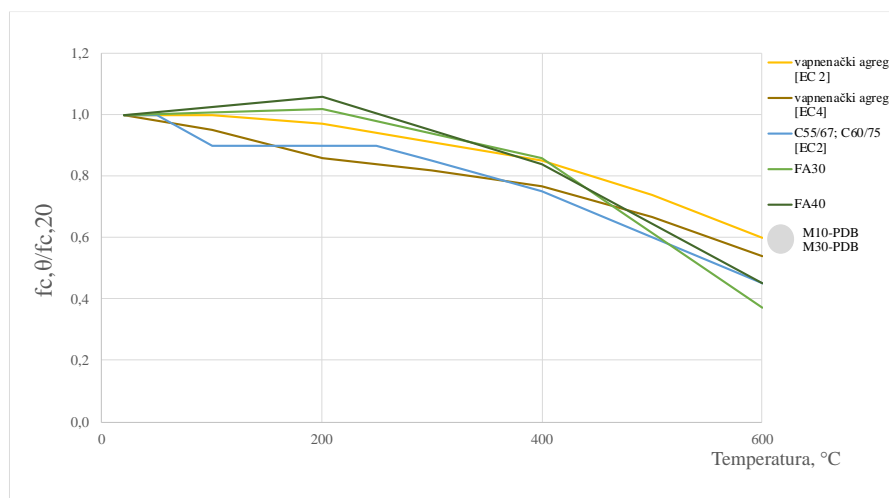
Razlaganje kalcijevog hidroksida također utječe na pojavu pukotina, osim toga do pojave pukotina dolazi i zbog nekompatibilnosti cementne paste i agregata. Mješavine betona s udjelom PDB-a pokazale su bolje rezultate gdje su pukotine manje za 50-60% u odnosu na referentnu mješavinu što bi značilo da zamjena udjela cementa pepelom drvene biomase povoljno utječe na smanjenje razvoja i širenja pukotina pri izlaganju visokim temperaturama, što se može povezati i s time da su čestice PDB-a veće od čestica cementa (vidjeti Slika 14), što čini porozniju strukturu sučeljka između cementne matrice i agregata pa samim time kod izlaganja požarnim temperaturama manja je nekompatibilnost između komponenti betona. Bolja mehaničkih i trajnosnih svojstava mješavina s PDB-om u odnosu na referentnu mješavinu mogu se također povezati s manjom širinom razvijenih pukotina.

Termogravimetrijska analiza je pokazala slične rezultate kod mješavina s 10% i 30% PDB-a u odnosu na referentnu mješavinu gdje nema velike promjene u količini kalcijevog hidroksida što ukazuje na činjenicu da su se zamjenom cementa s PDB-om dobila gotovo ista svojstva kao i kod referentne mješavine.

6.4 Usporedba rezultata s ostalim istraživanjima

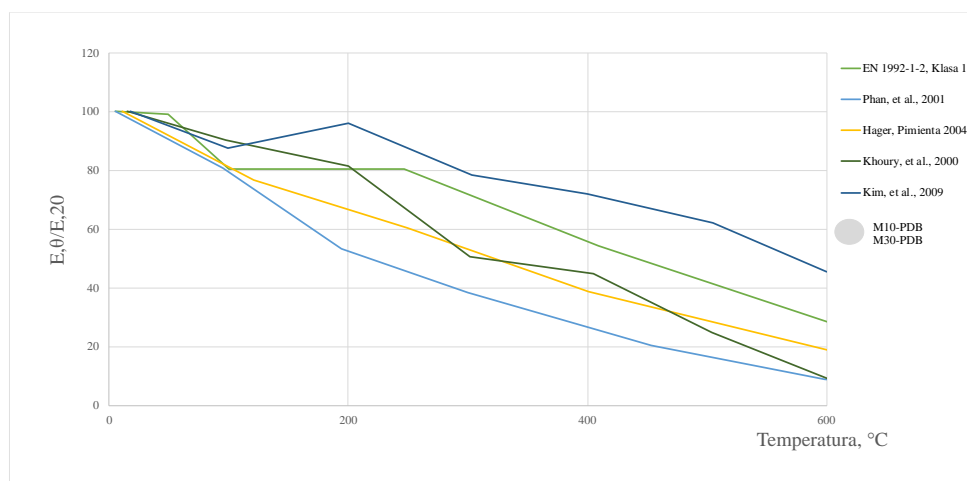
S obzirom da dosad nisu provedena slična ispitivanja rezidualnih svojstava betona s udjelom pepela drvene biomase, na Slika 68 prikazana je usporedba rezultata relativnih tlačnih čvrstoća betonskih mješavina s udjelom pepela drvene biomase s podacima iz Eurokoda (EN 1992-1-2 i EN 1994-1-2) za beton s vapnenačkim agregatom normalne tlačne čvrstoće te s betonskim mješavinama s udjelom letećeg pepela (tlačne čvrstoće: 49,1 MPa za FA30 i 55,6 MPa za FA40) prema rezultatima prikazanim u radu [38]. Treba naglasiti da postoji razlika u metodama ispitivanja, gdje uzorci ispitivani u vrućem stanju prema Eurokodu imaju nešto veće tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke s udjelom pepela drvene biomase koji su ispitani nakon hlađenja te postoji razlika u obliku uzoraka, gdje uzorci s udjelom letećeg pepela oblika kocke imaju veću tlačnu čvrstoću u odnosu na uzorke s PDB-om koji su oblika valjka. Pad tlačnih čvrstoća betonskih mješavina s udjelom PDB-a je veći u odnosu na druge rezultate, a s obzirom na

razliku u metodama ispitivanja i uzorcima, rezultati se ne mogu direktno uspoređivati već služe kao pregled dobivenih rezultata u odnosu na druga ispitivanja.



Slika 68 Usporedba relativnih tlačnih čvrstoća betona

S obzirom da dosad nisu provedena ispitivanja rezidualnih svojstava betona s udjelom pepela drvene biomase, na Slika 69 prikazana je usporedba rezultata relativnih modula elastičnosti betonskih mješavina s udjelom pepela drvene biomase s podacima iz Eurokoda (EN 1992-1-2) za beton klase 1 te s betonima visokih čvrstoća iz prethodno provedenih ispitivanja prema [4]. S obzirom da postoji razlika u metodama ispitivanja i uzorcima, rezultati se ne mogu direktno uspoređivati već služe kao pregled dobivenih rezultata u odnosu na druga ispitivanja. Iz grafa se može uočiti kako dobiveni rezultati ne odstupaju previše u odnosu na ostale rezultate.



Slika 69 Usporedba relativnih modula elastičnosti betona

7 OSNOVNI ZAKLJUČCI RADA

Kontinuirani rast proizvodnje materijala u području građevinarstva zahtjeva sve veću pažnju na utjecaj koji ta proizvodnja ima na okoliš. Cementna industrija kao najznačajnija u ovom području iziskuje velike utroške energije pri proizvodnji kao i velike količine emisije stakleničkih plinova. Veliki istraživački napor se ulaže na smanjenju utjecaja proizvodnje cementa na okoliš na način da se smanjuje udio čistog portland-cementa u samoj proizvodnji ili smanji udio cementa u sastavu betona dodavanjem mineralnih dodataka.

S obzirom na problem odlaganja otpada raste interes za istraživanjem otpadnih materijala kao zamjena za osnovne komponente u proizvodnji betona.

S druge strane, globalno zatopljenje utječe na porast svakodnevnog rizika pojave požara u uporabnom vijeku armirano-betonskih konstrukcija. Iako je beton negoriv materijal s dobrim svojstvima toplinske difuzivnosti, visoke temperature utječu na različite fizikalne i kemijske promjene u betonu koje nadalje utječu na promjenu mehaničkih i trajnosnih svojstva nakon hlađenja. Određivanje rezidualnih svojstava betona nakon djelovanja predstavlja prvi korak za procjenu stanja armirano-betonskih elemenata nakon djelovanja požara.

Temeljem analize stanja područja koja je detaljno dana u poglavlju 3 zaključeno je da ne postoje znanstvena istraživanja u kojima se analizira utjecaj zamjene portland cementa PDB-om na mehanička i trajnosna svojstva betona nakon izlaganja visokim požarnim temperaturama, dok je utjecaj zamjene PP vlakana s RTPF-om na preostala mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog požaru prikazan u samo dva znanstvena članka s konferencija.

U ovom radu provedeno je ispitivanje preostale tlačne čvrstoće, statičkog modula elastičnosti, plinopropusnosti, brzine prolaska ultrazvuka, mjerenje širine pukotina te termogravimetrijske analize nakon izlaganja betonskih uzoraka visokim požarnim temperaturama. Eksperimentalno ispitivanje je detaljno opisano u poglavlju 4.3.

Rezultati istraživanja detaljno su obrađeni u poglavlju 5, a diskusija rezultata u poglavlju 6, a osnovno se može sažeti kako slijedi:

- Mjerenje širine nastalih pukotina na uzorcima koji su bili izloženi visokim temperaturama pokazalo je da mješavine s udjelom PDB-a do 30% na temperaturama do 600 °C imaju manje pukotine do 60% u odnosu na referentnu mješavinu pa se može reći kako dodatak PDB-a povoljno utječe na stvaranje pukotina, dok mješavine s PP i

RTPF vlaknima na temperaturi od 400 °C imaju manje pukotine, a na temperaturama od 600 °C pukotine se ne razlikuju puno u odnosu na referentnu mješavinu. Manje pukotine su posljedica poroznijeg sučeljka betona s PDB-om koji omogućuje relaksaciju naprezanja zbog skupljanja cementne paste i istovremenog širenja agregata tijekom izloženosti visokim temperaturama. Ovo zapažanje je utjecalo na mehanička i trajnosna svojstva.

- Tlačna čvrstoća: mješavine s udjelom PDB-a do 30% imaju veću preostalu tlačnu čvrstoću do 10% u odnosu na referentnu mješavinu; tlačna čvrstoća mješavina s PP i RTPF vlaknima ne razlikuje se znatno u odnosu na referentnu mješavinu pa se može zaključiti da topljenje vlakana u betonu na visokim temperaturama zanemarivo utječe na tlačnu čvrstoću zbog malog volumena u odnosu na ukupni volumen betona (0,22% za PP i 0,15% za RTPF)
- Modul elastičnosti: zamjena cementa do 30% PDB-om ne utječe negativno na preostali modul elastičnosti nakon izlaganja požarnim temperaturama; mješavine s PP i RTPF vlaknima pokazuju slične rezultate u odnosu na referentnu mješavinu pa se može zaključiti kako topljenje polimernih vlakana ne utječe na daljnju degradaciju modula elastičnosti i nakon izlaganja požarnim temperaturama
- Plinopropusnost: mješavine s udjelom PDB-a do 30% pokazuju značajan pad koeficijenta plinopropusnosti (nakon temperatura od 400 do 600 °C i to do 80%) u odnosu na referentnu mješavinu; mješavine s PP i RTPF vlaknima imaju veću propusnost u odnosu na mješavine bez vlakana što je rezultat topljenja vlakana na visokim temperaturama, no pokazalo se da i veća plinopropusnost ne utječe na dodatno na mehanička svojstva betona
- Brzina prolaska ultrazvuka: nakon izlaganja visokim požarnim temperaturama sve mješavine pokazuju značajan pad brzine prolaska ultrazvuka što ukazuje na slabu kvalitetu betona iz čega slijedi kako je potrebno na neki način sanirati takav beton

Na osnovu dobivenih rezultata može se izvesti osnovni zaključak da :

zamjena cementa s udjelom PDB-a do 30% i RTPF-a u količini do 2 kg/m³ povoljno djeluje na mehanička i trajnosna svojstva betona u odnosu na beton spravljen s konvencionalnim komponentama.

Dakle, prikazanim eksperimentalnim istraživanjem u ovom radu je potvrđena unaprijed postavljena hipoteza ovog rada.

Primjena ekoloških komponenti kao što su PDB i RTPF može imati pozitivan utjecaj na smanjenje potrebne energije pri proizvodnji cementa te u konačnici i na smanjenje štetne količine emisije CO₂. Osim toga uporabom takvih komponenti smanjuju se troškovi odlaganja otpada kao i drugi potencijalno opasni problemi vezani uz odlaganje otpada. Općenito se može reći kako su rezultati ovog istraživanja pokazali da upotrebom otpadnih materijala (PDB i RTPF) u sastavu betona ne narušavamo dodatno njegova svojstva nakon izlaganja požaru u odnosu na obični beton, a doprinosimo održivosti proizvodnje betonske industrije.

8 ZAHVALE

Prvenstveno bih htjela zahvaliti svojoj mentorici, doc.dr.sc. Mariji Jelčić Rukavina na pruženoj prilici i povjerenju za rad na ovom znanstvenom istraživanju kao i na ukazanom strpljenju, stručnom vodstvu i pruženim korisnim savjetima pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se Miri i Zvezdani Matuzić na posvećenom vremenu, pruženoj pomoći i ugodnoj atmosferi u radu u laboratoriju.

9 LITERATURA

- [1] D. Bjegović and N. Štirmer, *Teorija i tehnologija betona*. 2015.
- [2] “Cement emission.” <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>.
- [3] Rapeti Muralidhar and E. T. Chakripani, “Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Fibre Reinforced Concrete,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V4, no. 12, pp. 605–611, 2015, doi: 10.17577/ijertv4is120443.
- [4] I. Hager, “AN OVERVIEW OF CONCRETE MODULUS OF ELASTICITY EVOLUTION WITH IFireSS – International Fire Safety Symposium,” no. April, 2015.
- [5] “FIB 46_ Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment .pdf.” .
- [6] K. D. Hertz, “Concrete strength for fire safety design,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 57, no. 8, pp. 445–453, 2005, doi: 10.1680/mac.2005.57.8.445.
- [7] B. Milovanović, N. Štirmer, I. Carević, and A. Baričević, “Pepeo drvene biomase kao sirovina u betonskoj industriji.” .
- [8] “Europes biomass production.” <https://www.vox.com/science-and-health/2019/3/4/18216045/renewable-energy-wood-pellets-biomass>.
- [9] E. R. Teixeira, A. Camões, and F. G. Branco, “Valorisation of wood fly ash on concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 145, no. December 2018, pp. 292–310, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.028.
- [10] I. Carević, N. Štirmer, M. Trkmić, and K. K. Jurić, “Leaching characteristics of wood biomass fly ash cement composites,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 23. pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/app10238704.
- [11] C. B. Cheah and M. Ramli, “The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 7, pp. 669–685, 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.02.002.
- [12] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, no. February, pp. 2–26, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

- [13] F. F. Udoeyo, H. Inyang, D. T. Young, and E. E. Oparadu, "Potential of Wood Ash as an Additive in Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, 2006.
- [14] Z. P. Bažant and M. F. Kaplan, *Concrete at high temperatures*. 1996.
- [15] "concrete spalling." <https://www.promat-tunnel.com/en/advices/fire-protection/the-effect-of-fire-test-page>.
- [16] T. Z. Harmathy, "Thermal properties of concrete at elevated temperatures," *ASTM J. Mater.*, 1970.
- [17] M. Jelčić Rukavina, "Prezentacija iz kolegija Zaštita od požara."
- [18] V. Kodur, "Properties of concrete at elevated temperatures," *ISRN Civ. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/468510.
- [19] "Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling," *fib Bull.*, no. 38, pp. 68–70.
- [20] "Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-2:Opća pravila - Proračun konstrukcija na djelovanje požara."
- [21] P. Kalifa, G. Chéné, and C. Gallé, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 10, pp. 1487–1499, 2001, doi: 10.1016/s0008-8846(01)00596-8.
- [22] F. P. Figueiredo, S. S. Huang, H. Angelakopoulos, K. Pilakoutas, and I. Burgess, "Effects of Recycled Steel and Polymer Fibres on Explosive Fire Spalling of Concrete," *Fire Technol.*, vol. 55, no. 5, pp. 1495–1516, 2019, doi: 10.1007/s10694-019-00817-9.
- [23] X. Liu, G. Ye, G. De Schutter, Y. Yuan, and L. Taerwe, "On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 4, pp. 487–499, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.11.010.
- [24] G. A. Khoury and B. Willoughby, "Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour," *Mag. Concr. Res.*, vol. 60, no. 2, pp. 125–136, 2008, doi: 10.1680/macr.2008.60.2.125.
- [25] A. Baricevic, M. Pezer, M. Jelcic Rukavina, M. Serdar, and N. Stirmer, "Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete," *Constr.*

- Build. Mater.*, vol. 176, pp. 135–144, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.229.
- [26] “Baričević et al. - 2018 - Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties.” .
- [27] M. Jelčić Rukavina, A. Baričević, M. Serdar, and M. Grubor, “Study on mechanical and durability properties of concrete with RTPPF after high temperature exposure,” *Proc. 2nd Int. Conf. CoMS 2020/21*, vol. 2, 2021.
- [28] V. Žvorc, “Svojstva betona visoke čvrstoće s pepelom iz drvene biomase,” 2019.
- [29] U. Schneider *et al.*, “Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures-modelling and applications : PGeneral presentation,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 9, pp. 841–853, 2007, doi: 10.1617/s11527-007-9285-2.
- [30] “HRN EN 12390-3:2009 - Ispitivanje očvrnuloga betona - 3.dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka.”
- [31] U. Schneider, “Compressive strength for service and accident conditions,” *Mater. Constr.*, vol. 28, no. 181, pp. 410–414, 1995.
- [32] “HRN EN 12390-13:2013 - Ispitivanje očvrnuloga betona - 13.dio: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku.”
- [33] Anon, “Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of the gas permeability of concrete by the Rilem-Cembureau method,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 32, no. 217, pp. 176–178, 1999.
- [34] H. Beushausen and L. Fernandez Luco, “No Title,” in *Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability*, .
- [35] “HRN EN 12504-4:2004 - Ispitivanje betona - 4.dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa.”
- [36] A. M. Neville, *Properties of concrete, 4th edition*. Longman Group Limited, 1995.
- [37] J. W. DAUGHERTY, D. E. LACEY, and P. KORTY, *Problems in aerial application: I. Some biochemical effects of lindane and dieldrin on vertebrates*, vol. 62, no. 10. 1962.
- [38] C. S. Poon, S. Azhar, M. Anson, and Y. L. Wong, “Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated

temperatures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 9, pp. 1291–1300, 2001, doi:
10.1016/S0008-8846(01)00580-4.

SAŽETAK:

Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima

Martina Kozlik

Podizanjem svijesti o globalnom zatopljenju koje je najvećim dijelom posljedica emisije velike količine ugljikova dioksida (CO₂), pokušavaju se razviti strategije koje bi pomogle u borbi protiv rastućeg trenda globalnog zatopljenja. U području građevinarstva, najveći dio emisije CO₂ otpada na proizvodnju cementnog klinkera potrebnog za proizvodnju betona koji je, poslije vode, najčešće korišten materijal. Kako bi se smanjio štetan utjecaj od proizvodnje betona, nastoji se smanjiti udio cementa na način da se cement mijenja mineralnim dodacima s ciljem zadržavanja ili poboljšanja svojstava betona. Nadalje, potiče se i istražuje uporaba otpadnih materijala kao zamjena za cement i za ostale komponente betona.

U ovom radu provedeno je eksperimentalno istraživanje utjecaja pepela dobivenog iz drvene biomase (kao zamjene udjela cementa) i dodatka recikliranih polimernih vlakana iz otpadnih guma (zamjena za industrijska polipropilenska vlakna) na mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog visokim požarnim temperaturama do 600 °C. Navedena svojstva predstavljaju ulazne parametre za procjenu stanja armirano-betonskih elemenata nakon djelovanja požara. Ispitan je utjecaj visokih temperatura na sljedeća svojstva: tlačnu čvrstoću, statički modul elastičnosti, plinopropusnost, brzinu prolaska ultrazvuka, širinu razvijenih pukotina, promjenu mase te termogravimetrijsku analizu. Usporedbom s konvencionalnim betonom, rezultati pokazuju da se uporabom lokalno dostupnih otpadnih materijala u betonu dobiju komparativna ili bolja svojstva betona nakon djelovanja požara što opravdava njihovo šire korištenje u betonskoj industriji .

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, reciklirana polimerna vlakna, visoke temperature, mehanička i trajnosna svojstva

ABSTRACT:

Research on fire resistance of concrete made with eco-friendly components

Martina Kozlik

With raising awareness of global warming, which is largely due to the emission of large amounts of CO₂, certain attempts were made to develop strategies that would help combat the growing trend of global warming. In the field of modern construction industry, most of the CO₂ emissions come from production of cement clinker needed for the production of concrete which, after water is the most commonly used material. In order to reduce the harmful impact of concrete production, some efforts are made to reduce the amount of cement by replacing the cement with mineral additives in order to retain or improve the properties of the concrete. Furthermore, the use of waste materials as a substitute for cement and other concrete components is encouraged and investigated.

This paper presents an experimental study of the influence of ash obtained from wood biomass (as a substitute for cement) and the addition of recycled polymer fibers from waste rubber (a substitute for industrial polypropylene fibers) on the mechanical and durability properties of concrete when exposed to elevated temperatures up to 600 °C. These properties represent the input parameters for assessing the condition of reinforced concrete elements after the fire exposure. After the heat treatment of concrete specimens, the following testing were carried out: compressive strength, static modulus of elasticity, gas permeability, ultrasonic pulse velocity, crack width, mass loss and thermal analysis. The results show that by using the investigated locally available waste materials in concrete, comparative or better properties of concrete are obtained after the fire exposure

Key words: wood biomass ash, recycled polymer fibers, elevated temperatures, mechanical and durability properties

10 PRILOZI

Popis priloga:

PRILOG 1 - Pojedinačni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

PRILOG 2 - Pojedinačni rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti

PRILOG 3 - Pojedinačni rezultati ispitivanja plinopropusnosti

PRILOG 4 - Pojedinačni rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvuka

PRILOG 5 - Pojedinačni rezultati mjerenja širina pukotina

PRILOG 6 - Pojedinačni rezultati ispitivanja smanjenja mase

10.1 PRILOG 1 – Pojedinačni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka uzorka	Temperatura	1.uzorak	2.uzorak	3.uzorak	4.uzorak	Srednja vrijednost	Apsolutna devijacija
M10-PDB-2PP	20°C	63,20	56,28	58,03	60,64	59,54	2,38
	200°C	51,27	53,06	47,79	50,38	50,63	1,54
	400°C	31,59	31,66	32,04	32,49	31,95	0,32
	600°C	18,92	17,62	18,60	18,51	18,41	0,40
M10-PDB-2RTPF	20°C	55,72	52,53	55,04	52,95	54,06	1,32
	200°C	47,74	45,69	44,21	43,04	45,17	1,55
	400°C	24,61	28,31	27,64	29,08	27,41	1,40
	600°C	16,37	-	16,42	15,85	16,21	0,24
M0	20°C	57,06	50,63	49,47	50,91	52,02	2,52
	200°C	43,23	42,79	44,61	45,44	44,02	1,01
	400°C	28,70	27,56	28,56	29,40	28,56	0,50
	600°C	15,13	15,70	15,86	15,78	15,62	0,24
M10-PDB	20°C	57,13	59,75	57,37	57,99	58,06	0,85
	200°C	46,01	47,17	45,66	47,80	46,66	0,83
	400°C	30,66	32,18	31,77	32,07	31,67	0,50
	600°C	17,29	17,83	17,42	18,25	17,70	0,34
M30-PDB	20°C	49,19	46,80	47,97	49,15	48,28	0,89
	200°C	42,17	41,80	40,13	39,29	40,85	1,14
	400°C	27,23	26,13	25,74	25,67	26,19	0,52
	600°C	17,69	19,45	18,60	19,58	18,83	0,68

10.2 PRILOG 2 – Pojedinačni rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti

Oznaka uzorka	Temperatura	1.uzorak	2.uzorak	3.uzorak	Srednja vrijednost	Apsolutna devijacija
M10-PDB-2PP	20°C	40,60	41,34	38,78	40,24	0,97
	200°C	33,56	33,77	-	33,66	0,10
	400°C	18,50	19,68	20,27	19,48	0,65
	600°C	6,66	6,80	7,03	6,83	0,13
M10-PDB-2RTPF	20°C	48,95	37,36	41,17	42,49	4,30
	200°C	31,85	34,94	36,57	34,45	1,73
	400°C	20,39	19,56	20,18	20,04	0,32
	600°C	-	6,65	6,33	6,49	0,16
M0	20°C	39,78	45,33	43,70	42,94	2,10
	200°C	35,53	35,86	32,83	34,74	1,28
	400°C	17,55	16,52	19,52	17,86	1,10
	600°C	6,02	6,13	5,33	5,83	0,33
M10-PDB	20°C	41,87	43,03	42,56	42,49	0,41
	200°C	38,30	38,89	34,44	37,21	1,85
	400°C	20,31	22,14	22,80	21,75	0,96
	600°C	6,94	6,67	6,84	6,82	0,10
M30-PDB	20°C	44,87	46,90	41,33	43,10	1,77
	200°C	31,19	34,51	31,05	32,25	1,50
	400°C	19,04	18,41	18,29	18,58	0,31
	600°C	8,27	7,86	8,11	8,08	0,15

10.3 PRILOG 3- Pojedinačni rezultati ispitivanja plinopropusnosti

MJEŠAVINA	50°C			
	KOEf. PLIN., m ²		KOEf. PLIN. x 10 ⁻¹⁷ , m ²	
	srednja vrijednost	aps.dev	srednja vrijednost	aps.dev
M0	1,30E-16	1,04E-17	13,0	1,04
M10-PDB	5,32E-17	2,96E-18	5,3	0,30
M30-PDB	5,42E-17	4,17E-18	5,4	0,42
M10-PDB-2PP	6,51E-17	2,94E-18	6,5	0,29
M-10PDB-RTPF	7,09E-17	7,06E-18	7,1	7,06

MJEŠAVINA	200°C			
	KOEf. PLIN., m ²		KOEf. PLIN. x 10 ⁻¹⁷ , m ²	
	srednja vrijednost	aps.dev	srednja vrijednost	aps.dev
M0	9,32E-16	9,08E-17	93,2	9,08
M10-PDB	4,12E-16	6,52E-18	41,2	0,65
M30-PDB	3,21E-16	5,89E-17	32,1	5,89
M10-PDB-2PP	2,27E-15	1,50E-16	227,4	15,00
M10-PDB-RTPF	5,13E-16	7,26E-17	51,3	7,26

Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima

MJEŠAVINA	50°C			
	KOEUF. PLIN., m ²		KOEUF. PLIN. x 10 ⁻¹⁷ , m ²	
	srednja vrijednost	aps.dev	srednja vrijednost	aps.dev
M0	1,20E-16	2,26E-17	12,0	2,26
M10-PDB	6,84E-17	1,15E-17	6,8	1,15
M30-PDB	4,76E-17	5,44E-19	4,8	0,05
M10-PDB-2PP	6,35E-17	5,71E-18	6,4	0,57
M10-PDB-RTPF	6,93E-17	3,87E-18	6,9	0,39

MJEŠAVINA	400°C			
	KOEUF. PLIN., m ²		KOEUF. PLIN. x 10 ⁻¹⁷ , m ²	
	srednja vrijednost	aps.dev	srednja vrijednost	aps.dev
M0	8,95E-15	1,42E-15	895,5	142,26
M10-PDB	5,30E-15	2,05E-16	530,1	20,52
M30-PDB	3,21E-15	1,02E-17	321,1	1,02
M10-PDB-2PP	1,61E-14	1,12E-15	1607,3	111,85
M10-PDB-RTPF	8,19E-15	6,95E-16	819,2	69,55

Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima

MJEŠAVINA	50°C			
	KOEf. PLIN., m ²		KOEf. PLIN. x 10 ⁻¹⁷ , m ²	
	srednja vrijednost	aps.dev	srednja vrijednost	aps.dev
M0	2,20E-16	2,16E-17	22,0	2,16
M10-PDB	8,56E-17	6,21E-18	8,6	0,62
M30-PDB	7,13E-17	8,29E-18	7,1	0,83
M10-PDB-2PP	4,98E-17	6,21E-18	5,0	0,62
M10-PDB-RTPF	5,78E-17	1,15E-17	5,8	1,15

MJEŠAVINA	600°C			
	KOEf. PLIN., m ²		KOEf. PLIN. x 10 ⁻¹⁷ , m ²	
	srednja vrijednost	aps.dev	srednja vrijednost	aps.dev
M0	9,10E-14	1,09E-14	9100,7	1089,93
M10-PDB	5,22E-14	1,66E-15	5217,9	166,20
M30-PDB	1,31E-14	7,30E-16	1306,5	72,98
M10-PDB-2PP	5,26E-14	1,07E-15	5258,4	107,02
M10-PDB-RTPF	4,22E-14	2,87E-15	4221,7	286,59

10.4 PRILOG 4 – Pojedinačni rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvuka

200°C					
M10-PDB-2PP	prije	5.057,47	5.141,53	5.147,81	5.133,95
	poslije	4.489,80	4.583,25	4.569,07	4.580,14
	preostalo	0,888	0,891	0,888	0,892
	sr.vr. i aps.dev.	0,890		0,002	
M10-PDB-2RTPF	prije	5.090,35	5.057,79	5.092,92	5.166,02
	poslije	4.467,74	4.496,96	4.493,95	4.604,27
	preostalo	0,878	0,889	0,882	0,891
	sr.vr. i aps.dev.	0,885		0,005	
M10-PDB	prije	5.180,19	5.184,51	5.214,23	5.156,13
	poslije	4.575,77	4.588,22	4.577,21	4.548,70
	preostalo	0,88	0,88	0,88	0,88
	sr.vr. i aps.dev.	0,882		0,002	
M0	prije	5.155,67	5.105,27	5.144,64	5.184,27
	poslije	4.312,01	4.362,62	4.392,76	4.522,53
	preostalo	0,84	0,85	0,85	0,87
	sr.vr. i aps.dev.	0,854		0,01	
M30-PDB	prije	5.153,49	5.047,77	5.123,06	5.096,80
	poslije	4.423,15	4.344,04	4.399,41	4.384,45
	preostalo	0,86	0,86	0,86	0,86
	sr.vr. i aps.dev.	0,859		0,00	

Istraživanje otpornosti na požar betona spravljenog s otpadnim materijalima

400°C					
M10-PDB-2PP	prije	5.130,99	5.089,85	5.194,84	5064,8
	poslije	3.478,78	3.498,10	3.565,52	3496,5
	preostalo	0,678	0,687	0,686	0,7
	sr.vr. i aps.dev.	0,685		0,004	
M10-PDB-2RTPF	prije	5.108,04	5.143,52	5.060,76	5152,2
	poslije	3.478,78	3.498,10	3.565,52	3496,5
	preostalo	0,681	0,680	0,705	0,7
	sr.vr. i aps.dev.	0,686		0,009	
M10-PDB	prije	5.117,57	5.148,30	5.171,45	5200,8
	poslije	3.425,79	3.491,65	3.461,06	3507,4
	preostalo	0,669	0,678	0,669	0,7
	sr.vr. i aps.dev.	0,673		0,003	
M0	prije	5.108,99	5.169,45	5.135,43	5154,5
	poslije	3.120,03	3.162,80	3.277,83	3208,8
	preostalo	0,611	0,612	0,638	0,6
	sr.vr. i aps.dev.	0,621		0,010	
M30-PDB	prije	5.037,99	5.070,25	5.133,61	5096,8
	poslije	3.300,15	3.303,73	3.327,91	3375,6
	preostalo	0,655	0,652	0,648	0,7
	sr.vr. i aps.dev.	0,654		0,004	

600 °C					
M10-PDB-2PP	prije	5.121,46	5.114,79	5.130,00	5.091,47
	poslije	2.376,97	2.402,82	2.310,01	2.398,26
	preostalo	0,464		0,450	0,471
	sr.vr. i aps.dev.	0,462		0,01	
M10-PDB-2RTPF	prije	5.124,04	5.051,67	5.209,05	5.221,61
	poslije	2.200,86	#DIV/0!	2.325,21	2.318,28
	preostalo	0,430		0,446	0,444
	sr.vr. i aps.dev.	0,440		0,007	
M10-PDB	prije	5.205,27	5.199,69	5.214,43	5.161,21
	poslije	2.306,00	2.330,77	2.173,69	2.321,38
	preostalo	0,443	0,448	0,417	0,450
	sr.vr. i aps.dev.	0,439		0,011	
M0	prije	5.146,14	5.155,81	5.192,67	5.245,17
	poslije	2.132,96	2.110,09	2.176,20	2.160,17
	preostalo	0,414	0,409	0,419	0,412
	sr.vr. i aps.dev.	0,414		0,00	
M30-PDB	prije	5.104,62	5.088,47	5.079,05	5.040,91
	poslije	2.278,85	2.436,55	2.335,22	2.409,12
	preostalo	0,45		0,46	0,48
	sr.vr. i aps.dev.	0,461		0,011	

10.5 PRILOG 5 – Pojedinačni rezultati mjerenja širina pukotina

400°C - maksimalne širine pukotina (μm)					
Oznaka uzorka/mjerenje	1	2	3	sr.vr.	aps. dev.
M0	161,55	194,6	140,59	165,58	19,35
M10-PDB	75,74	74,33	78,36	76,14	1,48
M30-PDB	46,48	54,1	52,42	51,00	3,01

600°C - maksimalne širine pukotina (μm)					
Oznaka uzorka/mjerenje	1	2	3	sr.vr.	aps. dev.
M0	166,69	136,14	117,82	140,22	17,65
M10-PDB	76,74	74,26	82,97	77,99	3,32
M30-PDB	61,09	47,73	53,49	54,10	4,66

400°C - maksimalne širine pukotina (μm)					
Oznaka uzorka/mjerenje	1	2	3	sr.vr.	aps. dev.
M10-PDB	75,74	74,33	78,36	76,14	1,48
M10-PDB-2PP	45,63	59,88	35,49	47,00	8,59
M10-PDB-2RTPF	52,37	54,08	62,03	56,16	3,91

600°C - maksimalne širine pukotina (μm)					
Oznaka uzorka/mjerenje	1	2	3	sr.vr.	aps. dev.
M10-PDB	76,74	74,26	82,97	77,99	3,32
M10-PDB-2PP	66,19	76,03	75,02	72,41	4,15
M10-PDB-2RTPF	76,96	61,12	61,63	66,57	6,93

10.6 PRILOG 6 – Pojedinačni rezultati ispitivanja smanjenja mase

200 °C					
M10-PDB-2PP	prije	2,3585	2,3861	2,3864	2,4057
	poslije	2,2823	2,3151	2,2966	2,3334
	preostalo	0,968	0,970	0,962	0,970
	sr.vr. i aps.dev.	0,968		0,003	
M10-PDB-2RTPF	prije	2,3694	2,3706	2,3864	2,4061
	poslije	2,2937	2,2966	2,3116	2,3317
	preostalo	0,968	0,969	0,969	0,969
	sr.vr. i aps.dev.	0,969		0,000	
M10-PDB	prije	2,4056	2,3848	2,4152	2,3908
	poslije	2,3277	2,3059	2,3401	2,3165
	preostalo	0,968	0,967	0,969	0,969
	sr.vr. i aps.dev.	0,968		0,00	
M0	prije	2,41	2,4237	2,406	2,3904
	poslije	2,3325	2,342	2,3278	2,3114
	preostalo	0,968	0,966	0,967	0,967
	sr.vr. i aps.dev.	0,967		0,00	
M30-PDB	prije	2,3784	2,3923	2,3919	2,3904
	poslije	2,2895	2,3050	2,3078	2,3049
	preostalo	0,96	0,96	0,96	0,96
	sr.vr. i aps.dev.	0,964		0,00	

400 °C					
M10-PDB-2PP	prije	2,3889	2,3789	2,377	2,4
	poslije	2,2852	2,2764	2,274	2,3
	preostalo	0,957	0,957	0,957	1,0
	sr.vr. i aps.dev.	0,957		0,000	
M10-PDB-2RTPF	prije	2,3822	2,39	2,371	2,4
	poslije	2,278	2,2872	2,2718	2,3
	preostalo	0,956	0,957	0,958	1,0
	sr.vr. i aps.dev.	0,958		0,001	
M10-PDB	prije	2,3831	2,3918	2,4007	2,4
	poslije	2,2764	2,2911	2,2971	2,3
	preostalo	0,955	0,958	0,957	1,0
	sr.vr. i aps.dev.	0,957		0,001	
M0	prije	2,3976	2,4009	2,4208	2,4
	poslije	2,2862	2,2923	2,3148	2,3
	preostalo	0,954	0,955	0,956	1,0
	sr.vr. i aps.dev.	0,955		0,001	
M30-PDB	prije	2,3652	2,3929	2,3985	2,4
	poslije	2,2441	2,2716	2,2817	2,3
	preostalo	0,949	0,949	0,951	1,0
	sr.vr. i aps.dev.	0,950		0,001	

600 °C					
M10-PDB-2PP	prije	2,3716	2,3694	2,4026	2,3836
	poslije	2,206	0	2,2217	2,2001
	preostalo	0,930		0,925	0,923
	sr.vr. i aps.dev.	0,926		0,00	
M10-PDB-2RTPF	prije	2,3884	2,353	2,4023	2,3733
	poslije	2,206	0	2,2217	2,2001
	preostalo	0,924		0,925	0,927
	sr.vr. i aps.dev.	0,925		0,001	
M10-PDB	prije	2,3958	2,4151	2,3976	2,3923
	poslije	2,1979	2,2197	2,2211	2,2099
	preostalo	0,917	0,919	0,926	0,924
	sr.vr. i aps.dev.	0,922		0,003	
M0	prije	2,4121	2,4029	2,401	2,4145
	poslije	2,2115	2,2026	2,2079	2,2306
	preostalo	0,917	0,917	0,920	0,924
	sr.vr. i aps.dev.	0,919		0,002	
M30-PDB	prije	2,3824	2,3771	2,3578	2,3765
	poslije	2,1843	2,166	2,1839	2,186
	preostalo	0,92		0,93	0,92
	sr.vr. i aps.dev.	0,921		0,004	