

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Marija Bezinović, Ketii Kristović

**Ekološki mortovi za sanaciju povijesnih građevina**

Zagreb, 2019.

*Ovaj je rad izrađen na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Ane Baričević, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.*

## **SADRŽAJ**

1.	UVOD.....	1
2.	OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA.....	3
3.	O POVIJESNIM GRAĐEVINAMA I VAPNENIM MORTOVIMA.....	4
3.1	Sanacija povijesnih građevina .....	4
3.2	Mehanizmi degradacije povijesnih građevina .....	5
3.3	Materijali za sanaciju.....	9
3.3.1	Vapno .....	9
3.3.2	Pucolani .....	12
4.	PEPEO IZ DRVNE BIOMASE.....	14
5.	EKSPERIMENTALNI RAD .....	18
5.1	MATERIJALI .....	19
5.2	SASTAV MJEŠAVINA .....	22
5.2.1	Sastavi veziva .....	22
5.2.2	Sastavi pasta .....	22
5.2.3	Sastavi mortova .....	22
5.3	PRIPREMA I NJEGOVANJE UZORAKA .....	23
5.3.1	Priprema veziva .....	23
5.3.2	Priprema pasta .....	25
5.3.3	Priprema mortova .....	25
5.4	METODE ISPITIVANJA .....	26
5.4.1	Određivanje veličine čestica air-jet metodom .....	28
5.4.2	Određivanje sadržaja slobodne vode .....	29
5.4.3	Ispitivanje početka i kraja vezivanja .....	30
5.4.4	Ispitivanje postojanosti volumena .....	33

---

5.4.5	Određivanje konzistencije svježeg morta .....	34
5.4.6	Određivanje gustoće svježeg morta.....	35
5.4.7	Određivanje udjela pora u svježem mortu.....	36
5.4.8	Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće očvrstnulog morta .....	36
5.4.9	Određivanje koeficijenta kapilarne upojnosti mortova.....	38
5.5	ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	40
5.5.1	Ispitivanje veziva.....	40
5.5.2	Ispitivanja pasta.....	45
5.5.3	Ispitivanja mortova.....	48
6.	KLASIFIKACIJA PREMA HRN EN 459-2:2010.....	61
7.	ZAKLJUČAK.....	64
	ZAHVALE .....	66
	LITERATURA.....	67
	POPIS SLIKA .....	70
	POPIS TABLICA.....	72
	PRILOZI.....	74
	SAŽETAK.....	78
	SUMMARY .....	79

---

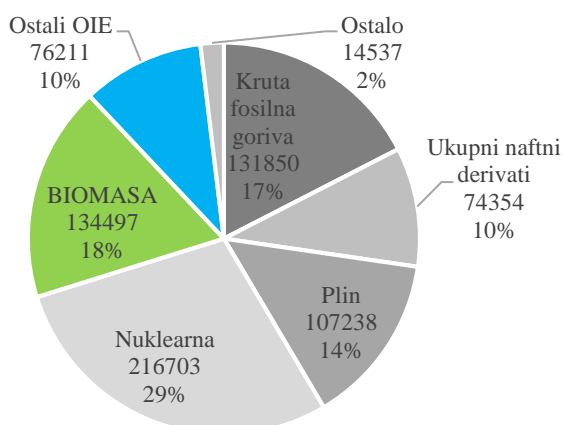
## 1. UVOD

Sanacije povijesnih građevina izuzetno su kompleksni zahtjev za projektanta i izvođača sanacijskih radova. Očuvanje povijesnih vrijednost uz istovremeno zadovoljenje trenutnih propisa često su nepomireni zahtjevi. Razvoj industrijske proizvodnje doveo je do znatnog unapređenja svojstava građevinskih materijala, kako u pogledu mehaničkih svojstava tako i trajnosti. Međutim, upravo opisano predstavlja izazov za sanaciju povijesnih građevina zbog nekompatibilnosti tradicionalnih i novih materijala. Za dugotrajnu sanaciju, bez negativnih posljedica za građevinu, ključan je pravilan odabir sanacijskih materijala. Kako bi se to postiglo potrebno je posjedovati dovoljno znanja prvo o mehanizmima degradacije samih materijala, a zatim i o utjecaju sanacije na buduće ponašanje građevine. Konzervatorski pristup sanaciji povijesnih građevina ima ključni utjecaj na uspjeh.

Istovremeno, povećana industrijska proizvodnja i povećan broj stanovnika na Zemlji, dovodi do sve veće potrošnje prirodnih resursa te povećane proizvodnje otpada. Zbog toga se danas teži uporabi obnovljivih izvora energije u cilju očuvanja okoliša. Prema direktivi 2009/28/EZ [1] Europske unije, cilj je povećati uporabu obnovljivih izvora energije za 20% do 2020. godine.

Republika Hrvatska se svojim članstvom u Europskoj uniji obvezala na prihvaćanje europskog klimatsko-energetskog paketa koji obuhvaća i Direktivu 2009/28/EZ o poticanju uporabe energije iz obnovljivih izvora. Prema tome, Hrvatska je preuzela obvezu povećanja uporabe energije iz obnovljivih izvora za 20% do 2020. godine, što je i više nego bliska budućnost.

Jedan od takvih izvora energije svakako je i biomasa koja, prema podacima *Eurostata* [2] za 2016. godinu, zauzima drugo mjesto u proizvodnji primarne energije u zemljama članicama Europske unije što se može vidjeti na slici 1.



Slika 1. Doprinos biomase u ukupnoj proizvodnji primarne energije u zemljama članicama EU u 2016. [2]

Trend povećanog korištenja biomase kao obnovljivog izvora energije doveo je do povećanja broja bioenergana u Hrvatskoj i Europskoj uniji, posebice onih na drvenu biomasu. Nadalje, to je rezultiralo generiranjem velikih količina pepela iz drvene biomase (PDB-a), koji nastaje kao nusproizvod prilikom izgaranja drvene biomase.

Prema godišnjem izvještaju HROTE-a [3] o povlaštenim proizvođačima električne energije, na dan 31.prosinca 2018.godine, u Hrvatskoj se nalazi 28 elektrana na biomasu instalirane snage 58,22 MW. Ako se uzme u obzir da postoje postrojenja na drvenu biomasu koja energiju proizvode za tehnološke potrebe industrijskih pogona, i kao takva nisu u bazi HROTE-a, broj bioenergana je znatno veći, a samim time i količina pepela nastalog izgaranjem biomase. Postroženje zakona o zaštiti okoliša rezultira većim troškovima zbrinjavanja otpada i često strogim zahtjevima o kontroliranim odlagalištima, pa se sve veći broj proizvođača otpada opredjeljuje za recikliranje i ponovnu upotrebu materijala. Građevinska industrija je prepoznala potencijal primjene PDB-a, a istraživanja provedena u Hrvatskoj temelje se većinom na primjeni PDB-a kao zamjeni dijela cementa [4].

Zbog nekompatibilnih svojstava, u sanaciji povijesnih građevina zahtjeva se uporaba materijala na bazi vapna bez cementa. Budući da su dosadašnjim istraživanjima [42,43,44] uočene sličnosti u kemijskim sastavima hidrauličnog vapna i PDB-a, u radu će se napraviti istraživanje u cilju karakterizacije PDB-a prema normi HRN EN 459-2:2010. Dodatno će se istražiti mogućnosti primjene PDB-a iz hrvatskih bioenergana kao veziva u sanacijskim mortovima za povijesne građevine. Posljednje predstavlja značajan iskorak u dosadašnjim istraživanjima, s obzirom na ograničen broj istraživanja [42,43,44] koja primjenom PDB nastoje proizvesti sanacijski materijal „povijesnih“ svojstava. Iskoristi će se kemijski sastav PDB, te u kombinaciji s letećim pepelom dobivenim iz ugljena, proizvesti ekološki mort za sanaciju povijesnih građevina.

## **2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA**

Opći cilj ovog rada je prvenstveno podignuti svijest o važnosti zbrinjavanja pepela nastalog kao otpad tijekom izgaranja drvene biomase. Istovremeno, zbog sve većeg broja povijesnih građevina koje je potrebno sanirati zbog dotrajavanja, javlja se potreba za pronalaženjem optimalnog sastava morta koji će osigurati kvalitetnu i dugotrajnu sanaciju tih građevina.

U većini dosadašnjih ispitivanjima fokus je bio stavljen na istraživanje utjecaja PDB-a na svojstva cementnih kompozita. Upravo zbog malog broja provedenih istraživanjima na mortovima s pepelom drvene biomase bez cementa, cilj ovog rada je pripremiti ekološki mort niskog ugljičnog otiska za sanaciju povijesnih građevina. Budući da se kao osnovno vezivo u mortovima povijesnih građevina koristilo hidraulično vapno te je uočena sličnost u kemijskim sastavima hidrauličnog vapna i PDB-a, za pripremu vapnenih mortova traženih svojstava primijeniti će se povijesne recepture dostupne u literaturi.

Specifični ciljevi rada uključuju:

- a) odabir vrste PDB-a, uzimajući u obzir kemijski sastav istog
- b) izradu alternativnog veziva kombinacijom PDB-a i letećeg pepela iz ugljena
- c) očvršćivanje ekološkog morta odabirom pravilnog udjela PDB-a i letećeg pepela iz ugljena

Sukladno navedenoj problematici, predmetu i objektu istraživanja, postavljene su sljedeće hipoteze:

1. Moguće je pripremiti alternativno vezivo, odabirom pravilnog udjela PDB-a i letećeg pepela iz ugljena, za pripremu morta za sanaciju povijesnih građevina bez dodatka cementa.
2. Tehnologija sagorijevanja i podrijetlo biomase utječu na kemijski sastav PDB-a, a što se reflektira kroz promjenu udjela CaO, SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i količinu slobodnog kalcijevog hidroksida. Udjeli navedenih spojeva direktno utječu na primjenjivost PDB-a u alternativnom vezivu i mogućnost očvršćivanja ekoloških vapnenih mortova.

### **3. O POVIJESNIM GRAĐEVINAMA I VAPNENIM MORTOVIMA**

#### **3.1 Sanacija povijesnih građevina**

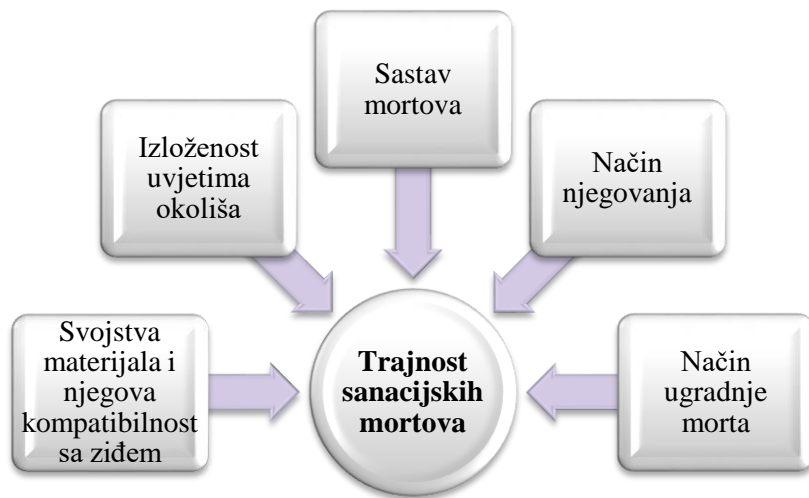
Očuvanje povijesnih zidanih građevina ima kulturni i povijesni značaj, kao i značajnu ekonomsku i ekološku vrijednost. Međutim, stalne promjene u materijalima i konstrukcijskim tehnikama dovele su do udaljavanja od povijesne prakse gradnje zidanih građevina. Upravo zbog toga analiza ponašanja zidanih konstrukcija dobiva sve više pažnje u znanstvenoj zajednici[5] [6] [7].

Do oštećenja povijesnih građevina najčešće dolazi zbog prirodnih procesa starenja i trošenja uslijed atmosferskih utjecaja te zbog ljudskog faktora. Vrlo je bitno pravovremeno uočiti znakove oštećenja kako bi se spriječilo daljnje propadanje građevine. Zbog toga se sve veći naglasak stavlja na provođenje preventivnih pregleda i mjera u cilju očuvanja građevina [8]. Time se sprječavaju opsežni i često invazivni radovi sanacije koji su ujedno i vrlo skupi. Za razliku od novih građevina, kod kojih je glavni cilj održavanja uglavnom zadržati funkcionalnost građevine, kod povijesnih građevina pažnja nije usmjerena samo na funkcionalnost, već i na očuvanje materijala zbog njihovog kulturnog značaja[9]. Očuvanje i obnavljanje povijesnih građevina je disciplina koja zahtijeva stručnu obuku i potpuno razumijevanje svih elemenata tih građevina kako bi se osiguralo njihovo učinkovito održavanje [10].

Ukoliko je sanacija povijesnih građevina neizbježna, potrebno je odabrati rješenje koje će dugoročnom osigurati cjelovitost građevine uzimajući u obzir kompatibilnost materijala i tehnika izvođenja s postojećom građevinom [9]. Odabir takvih rješenja je rijetko jednostavan posao i zahtijeva analizu svih čimbenika koji mogu utjecati na uspješnost sanacije. Ta analiza uključuje proučavanje originalnih materijala korištenih u gradnji, okoline u kojoj se građevina nalazi i mikroklima koja utječe na ugrađene materijale. Za pravilan odabir sanacijskog materijala potrebno je poznavati i mehanizme propadanja istih kako bi se predvidjelo njihovo ponašanje u budućnosti i osigurala uspješna sanacija[10].

Maurenbrecher[11] izdvaja pet faktora koji utječu na trajnost sanacijskih mortova kako je prikazano na slici 2. Osim odabira adekvatnog materijala, podjednako je važna i njegova pravilna ugradnja i njegovanje. Predviđena trajnost zidanih građevina je između 50 i 100 godina, dok je predviđena trajnost njihovih mortova minimalno 30 godina. Poželjno bi bilo da trajnost tih mortova bude također između 50 i 100 godina[12] kako bi kroz cijeli životni vijek tvorili homogenu cjelinu.





Slika 2. Faktori koji utječu na trajnost sanacijskih mortova [9]

### 3.2 Mehanizmi degradacije povijesnih građevina

Pod pojmom degradacije podrazumijevaju se procesi i reakcije koje utječu na svojstva materijala, građevnih dijelova ili cjelokupnog sustava, na način da se isti više ne ponašaju kako je predviđeno. Ti se procesi i reakcije, ovisno o vrsti materijala, različito manifestiraju. Najčešći oblici njihove manifestacije su promjena boje materijala, raspucavanje, oštećenja površine, mrvljenje itd. [13].

Općenito, uzroke oštećenja zidanih građevina možemo podijeliti na tri kategorije[14]:

1. Oštećenja uzrokovana lošim projektnim rješenjem i izvođenjem građevine
2. Uvjeti izloženosti i uporabe građevine
3. Neadekvatni popravci, čišćenja i održavanja

Bernard M Feilden u svojoj knjizi „*Conservation of historic buildings*” [15] ističe kako povijesne građevine najčešće propadaju uslijed djelovanja različitih prirodnih i ljudskih faktora.

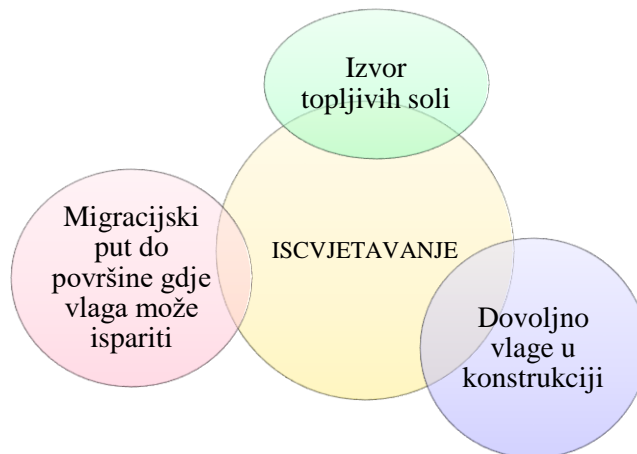
Najveća oštećenja povijesnih građevina nastaju prilikom prirodnih nepogoda kao što su potresi, vulkanske erupcije, uragani, poplave, klizišta, itd. Osim prirodnih nepogoda, ostali prirodni utjecaji koji uzrokuju trošenje povijesnih građevina su vlaga u svim svojim oblicima (kiša, led, snijeg, podzemna voda), sunčeva svjetlost, temperatura, vjetar i radijacija. Ovi utjecaji su manjeg intenziteta, ali gotovo svakodnevno djeluju na građevine.

Ljudsko djelovanje ima velik utjecaj na trajnost građevina. Pod ljudskim djelovanjem podrazumijevaju se svi postupci u fazi projektiranja, izvođenja i održavanja građevina koji mogu dovesti do prerane degradacije građevina. Zanemarivanje i ignoriranje vidljivih problema, u kombinaciji sa vandalizmom i nepoštivanjem povijesne gradnje, može se izdvojiti kao najčešći razlog propadanja povijesnih građevina koji je uzrokovan ljudskim djelovanjem [15].

Anne E Grimmer [16] je definirala 22 najčešća mehanizma degradacije zidanih građevina te je predložila moguće načine njihove sanacije. Budući da su ovim radom analizirani mortovi za ziđe, u nastavku će biti predstavljeni mehanizmi degradacije vezani za takve mortove.

Upijanje vode je zasigurno jedan od najčešćih uzroka oštećenja zidanih građevina koje za posljedice ima eflorescenciju, stvaranje kiselina te širenje i/ili bubrenje vapna. Također, upijanje vode utječe i na otpornost morta na smrzavanje i odmrzavanje [14]. Nadalje, upijanje vode je u direktnoj vezi sa trajnošću morta i, kako navodi Mohamed Sutan [17], što je veće upijanje vode, to je trajnost morta manja. Dobra mješavina morta je ona čije je upijanje vode manje od 10% po ukupnoj masi morta.

Eflorescencija ili iscvjetanje soli nastaje kada se topljive soli iz unutarnjih slojeva zidanih ili kamenih konstrukcija uz pomoć vlage transportiraju na njihovu površinu gdje, u procesu sušenja, nastaju nakupine kristala soli. Izvor topljivih soli je različit. One mogu biti sastavni dio materijala od kojih je građevina napravljena ili unesene u njenu strukturu iz okoline. Također, eflorescencija može biti uzrokovana i solima koje ostaju na površini zidova nakon njihovog tretiranja agresivnim kiselinama i nedovoljnog ispiranja. Najčešće se radi o solima klorida i nitrata. Soli klorida često su prisutne kod građevina u pomorskim predjelima gdje u ziđe ulaze pod djelovanjem morske vode ili nošeni vjetrom. Osim toga, izvor klorida može biti i soljenje cesta i nogostupa zbog sprječavanja poledice tijekom zimskih mjeseci. Soli nitrata ulaze u ziđe najčešće iz gnojiva koje se nalazi u tlu u okolini građevine. Posrednik u prenošenju topivih soli je voda, pa je njihovo pojavljivanje vezano za putove vode kroz samu konstrukciju [16] [14]. Kako bi došlo do iscvjetavanja, moraju biti zadovoljena tri sljedeća uvjeta prikazana na slici 2. Ukoliko nije zadovoljen jedan od navedena tri uvjeta, do iscvjetavanja neće doći. S toga, zaštita konstrukcije od iscvjetavanja temelji se na eliminaciji jednog od ova tri uvjeta [18].



Slika 3. Uvjeti potrebni za iscvjetavanje [26]

Elder [19] navodi kako i temperatura kojoj je zida izloženo utječe na stupanj iscvjetavanja na način da, što je veća temperatura zraka, a time i zida, veći je i stupanj iscvjetavanja.

Iscvjetavanje se najčešće manifestira u obliku bijelih, sivih ili žućkastih mrlja na površini zida (slika 4). Osim što takve mrlje nagrđuju izgled građevine, iscvjetavanje najčešće nema većih posljedica, budući da je stupanj razaranja ovog mehanizma degradacije vrlo mali. U većini slučajeva mrlje se mogu jednostavno ukloniti vodom i mekanim četkama [14]. Ukoliko se radi o netopljivim solima, potrebno je upotrijebiti neke invazivnije metode poput pjeskarenja [19].



Slika 4. Iscvjetavanje soli na površini zidane građevine [12]

Pojava iscvjetavanja na zidanim građevinama ukazuje na to da je voda pronašla put ulaska u strukturu građevine i treba poslužiti kao upozorenje kako ne bi nastava još veća šteta. Iscvjetavanje, također, može ukazivati i na nakupine soli ispod površine zida, odnosno na pojavu subeflorescencije [16].

Subiscvjetavanje (subeflorescencija ili kriptoflorescencija) je skriveno nakupljanje topljivih soli u porama opeke, kamena ili žbuke tijekom isparavanja vlage iz građevine. Čestim izmjenama vlaženja i sušenja, koncentracija kristala soli se povećava i, kada volumen tih kristala dosegne volumen pora, dolazi do pojave velikih unutarnjih pritisaka koji uzrokuju značajna oštećenja u obliku ljuštenja, mrvljenja i bubrenja površine kako je prikazano na slici 5. [20].



*Slika 5. Posljedice subeflorescencije na zidanoj građevini [21]*

Česti mehanizam degradacije koji se pojavljuje kod zidanih građevina je izluživanje vapna. Izluživanje vapna je proces koji nastaje kada vlaga, koja se kreće kroz materijal ili po njegovoj površini, uzrokuje uklanjanje topljivih komponenti iz njega. Najosjetljivije komponente veziva na otapanje su kalcijev hidroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) i kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Voda otapa te komponente i zbog toga materijal gubi čvrstoću te nestaje iz spojeva što rezultira lokalnim koncentracijama naprezanja i slabljenjem zidnih elemenata. Ovaj mehanizam degradacije se može prepoznati po bijelom talogu kalcijevog hidroksida na površini zida i istovremenom gubitku materijala iz spojeva zidnih elemenata kako je vidljivo na slici 6. [22][23].



*Slika 6. Izluživanje vapna [12]*

Do degradacije zida, posebice u hladnim područjima, može doći i zbog procesa smrzavanja i odmrzavanja koji su u direktnoj vezi s prisutnošću vlage u mortu. Ukoliko vlaga u mortu nije prisutna, neće ni doći do ovog mehanizma degradacije. Uslijed kristalizacije, unutar morta dolazi do stvaranja velikih vlačnih naprezanja i ukoliko ta naprezanja prekorače vlačnu čvrstoću morta, može doći do njegovog oštećenja i ispiranja, kako je prikazano na slici 7. Najsigurniji način zaštite zida od ovakvih oštećenja je sprječavanje ulaska vode u materijal. Pri tome, podjednaku važnost imaju odabir materijala s obzirom na njegova svojstva, kao što su upijanje vode i brzina evaporacije, te konstruktivna rješenja zaštite zida od vlage. [24]



*Slika 7. Oštećenja zida uslijed smrzavanja i odmrzavanja [21]*

### **3.3 Materijali za sanaciju**

Vezirom nazivamo sve materijale koji služe spajanju različitih građevinskih materijala, što je omogućeno njihovim svojstvom da pri određenim uvjetima i određenim kemijskim reakcijama očvrstnu. Za izradu sanacijskih mortova uglavnom se koriste dvije vrste veziva [9]:

- nehidraulična veziva, kao što je zračno vapno,
- hidraulična veziva, poput hidrauličnog vapna i cementa.

#### *3.3.1 Vapno*

Vapno je vezivo koje se koristi još od antičkih vremena, a dobiva se od karbonatnih stijena. Sam proces proizvodnje vapna je relativno jednostavan i najprimitivniji oblici njegove proizvodnje u peći za žarenje datiraju iz 2000.godine prije Kr., iako postoje i starija nalazišta uporabe vapnenih mortova. Procvat upotrebe vapna događa se za vrijeme Rimskog carstva, kada su Rimljani sva ondašnja znanja o vapnu podigli na sasvim novu razinu i razvili vezivo koje se sastojalo od vapna, pijeska i vode, a kasnije i sa dodatkom vulkanskog pijeska [25]. Propašću Zapadnog Rimskog Carstva u srednjem vijeku, izgubljen je recept za izradu hidrauličnih veziva. Tek u 15.stoljeću se opet usavršila receptura, koja otkrićem portland cementa u 18. stoljeću vapno pada u drugi plan.

Zbog povećane mehaničke čvrstoće i relativno kratkog vremena vezivanja koje omogućuje bržu gradnju, portland cement se, odmah nakon otkrića, počeo intenzivno koristiti kao vezivo u mortovima i betonima. Međutim, ubrzo se uočilo da cement nije pravilan odabir za sanaciju povijesnih građevina. Budući da su, kako je već istaknuto, povijesne građevine uglavnom od zidanih elemenata povezanih mortovima na bazi vapna, kao glavni problem korištenja cementnih mortova u sanacijama povijesnih građevina ističe se njihova kemijska nekompatibilnost s vapnenim mortovima. Osim toga, cementni mortovi su manje propusni te, za razliku od vapnenih mortova, imaju visok modul elastičnosti zbog čega se ne mogu prilagoditi deformacijama zida. Također, velika tlačna čvrstoća cementnih mortova, koja se inače navodi kao njihova glavna odlika, postaje još jedna mana tih mortova kada se oni koriste u sanaciji povijesnih građevina, budući da je i do nekoliko puta veća od čvrstoće vapnenih mortova koja iznosi svega nekoliko MPa. Zbog tih razlika u tlačnim čvrstoćama, stvaraju se dodatna naprezanja na granicama starog i sanacijskog materijala koja mogu dovesti do stvaranja novih pukotina koje zatim postaju nova mjesta ulaska štetnih tvari u strukturu zida, što u konačnici dovodi do daljnje degradacije same građevine [26]. Zahtjev za kompatibilnošću postojećih i sanacijskih materijala dovodi do sve češće upotrebe vapna kao veziva kod sanacije povijesnih građevina [27].

Vapnom nazivamo čitav niz proizvoda koji se dobivaju procesima kalcinacije i/ili hidratacije vapnenca ( $\text{CaCO}_3$ ). Kalcinacija je proces koji se odvija u peći na visokim temperaturama između  $1000^\circ\text{C}$  i  $1400^\circ\text{C}$  uslijed kojeg dolazi do niza fizikalno-kemijskih promjena u sirovini, pri čemu nastaje živo vapno ( $\text{CaO}$ ):



Hidratacijom živog vapna, tj. reakcijom oksida iz živog vapna sa dovoljnom količinom vode, dolazi do pretvorbe oksida u hidrokside. Ovakvu vrstu vapna nazivamo gašenim ili hidratiziranim i kao takvo se najčešće primjenjuje u građevinarstvu [28].



Prema hrvatskoj normi HRN EN 459-1, građevno vapno dijelimo u dvije glavne skupine kako je i prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Podjela vapna prema HRN EN 459-1 [26]

ZRAČNA VAPNA	Kalcitno vapno (CL)
	Dolomitno vapno (DL)
HIDRAULIČNA VAPNA	Prirodno hidraulično vapno (NHL)
	Formulirano vapno (FL)
	Hidraulično vapno (HL)

Hidraulična vapna su mješavina kalcijevih oksida sa silikatima i kalcijevim aluminatima, a karakteriziramo ih hidrauličnim modulom tj. omjerom živog vapna (CaO) u ukupnom sadržaju kiselih sastojaka ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Udio oksida je zaslužan za proces karbonatizacije, dok silikati i aluminati tvore reakcije s vodom i zaslužni su za hidraulička svojstva [27] [28].

Vrijednosti hidrauličkih modula nekih vrsta vapna prikazani su u tablici 2, a približan kemijski sastav hidrauličnog vapna u tablici 3.

Tablica 2. Hidraulički modul vapna [25]

VRSTA VAPNA	HIDRAULIČNI MODUL
Obično vapno	6-10
Hidraulično vapno	3-6
Hidraulično vapno visoke otpornosti	2-3

Tablica 3. Kemijski sastav hidrauličnog vapna [25]

	Hidraulično vapno
CaO	58 - 60 %
$\text{SiO}_2$	5 - 20 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2 - 7 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1 - 3 %
Gubitak žarenjem (LOI)	6 - 22 %

U hidraulična vapna, kako je i prethodno prikazano u tablici 1, ubrajamo prirodno hidraulično vapno (NHL), formulirano vapno (FL) i umjetno hidraulično vapno (HL). NHL je čisto vapno, bez ikakvih primjesa, koje se proizvodi kalcinacijom vapnenca uz dodatak gline. Ovakva vrsta vapna ima sposobnost vezivanja i očvršćivanja na zraku i pod vodom, pri čemu njegova hidraulična svojstva ovise samo o kemijskom sastavu sirovine iz koje je dobiven. FL je mješavina zračnog vapna, najčešće kalcitnog (CL), i/ili NHL-a uz dodatak hidrauličnog ili pucolanskog materijala, stoga također ima sposobnost očvršćivanja na zraku i pod vodom. HL je vapno sa dodatkom cementa, troske visoke peći, letećeg pepela, vapnenačkog filera ili ostalih prikladnih materijala. Ima hidraulična svojstva, a karbonatizacija pridonosi procesu očvršćivanja [27] [29].

Hidraulična vapna klasificiramo u razrede ovisno o njihovim tlačnim čvrstoćama nakon 28 dana. U tablici 4 prikazana je podjela HL-a na tri osnovna razreda. Oznake se sastoje od kratice podvrste vapna,

što je u ovom slučaju HL, i broja koji predstavlja minimalnu tlačnu čvrstoću koja je zadovoljena nakon 28 dana.

*Tablica 4. Podjela HL-a [26]*

Razred HL-a	Oznaka vapna	Minimalna tlačna čvrstoća nakon 28 dana [MPa]
Hidraulično vapno 2	HL 2	2
Hidraulično vapno 3,5	HL 3,5	3,5
Hidraulično vapno 5	HL 5	5

Osnovnu sirovinu hidrauličnog vapna, koje je najčešće u upotrebi, čini hidratizirano vapno sa dodacima pucolanskog porijekla [28].

### *3.3.2 Pucolani*

Pucolani su silikatni ili silikatno aluminijski materijali koji, sami po sebi, imaju mala ili nikakva cementna svojstva, ali koji će, u fino usitnjenom obliku uz prisutnost vlage, kemijski reagirati s kalcijevim hidroksidom čime se dobivaju spojevi koji imaju cementna svojstva. Jednostavnije rečeno, pucolani su fini praškasti materijali koji se mogu dodati vapnenim ili cementnim mortovima kako bi im se povećala trajnost i, u slučaju vapnenih mortova, osiguralo očvršćivanje [30].

Pucolanski materijali mogu biti prirodnog i umjetnog podrijetla. Kroz povijest su se koristili dodaci organskog podrijetla kao što su bjelanci, bikova krv, razna biljna ulja, životinjske masti itd., koji su osiguravali potrebnu obradivost čime se olakšalo njihovo nanošenje. Za vrijeme Rimskog carstva uporaba pucolana u mortovima postaje uobičajena, budući da se uočilo njihovo pozitivno djelovanje na reološka i mehanička svojstva mortova. Ispitivanjem povijesnih mortova pokazalo se da su najzastupljeniji pucolani vulkanskog porijekla, te glina i opekarska prašina [31] [32]. U današnje vrijeme, jedan od najčešće korištenih takvih materijala je leteći pepeo dobiven izgaranjem ugljena.

Leteći pepeo je fino usitnjeni ostatak koji nastaje izgaranjem ugljena koji se transportira dimnim plinovima te se skuplja elektrostatičkim filtrom. To je mješavina različitih čestica koje su pretežno sfernog oblika pa imaju veliku specifičnu površinu. Prema mineralnom sastavu, sastoji se uglavnom od staklene faze, mulita, kvarca, hematita, magnetita i male količine neizgorelih čestica ugljika [33].

Leteći pepeo poboljšava svojstva betona i morta kao što su potreba za vodom, obradivost, vrijeme vezivanja, tlačna čvrstoća te trajnost morta i betona. Osim što poboljšava svojstva svježeg i/ili



očvrstnulo morta i betona, leteći pepeo može smanjiti ekonomske troškove nabave materijala, s obzirom da se njegovom uporabom reduciraju količine veziva u mješavinama. [34]

Pucolanska aktivnost letećeg pepela rezultat je prisutnosti značajnih udjela  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . U mješavinama vapna i letećeg pepela, vapno reagira sa oksidima iz letećeg pepela pri čemu nastaju spojevi poput kalcijevog silikata i kalcijevog aluminata koji u reakciji sa vodom stvaraju hidrate odgovorene za razvoj čvrstoće [35]. Naktode i suradnici [35] [32] ističu kako, u mješavinama vapna i letećeg pepela, treba biti minimalno 50% hidratiziranog vapna, kako bi mješavina bila učinkovita. Osim toga, Basumajumdar i suradnici [36] navode da je da je pucolanska reakcija između  $\text{Ca(OH)}_2$  i letećeg pepela vrlo spora u odnosu na proces hidratacije Portland cementa.

#### 4. PEPEO IZ DRVNE BIOMASE

Potreba za alternativnim i obnovljivim izvorima energije raste sukladno donošenju strogih zakona i strategija o očuvanju okoliša i energije. Jedan od alternativnih izvora energije koji se sve češće koristi u svrhe proizvodnje električne i toplinske energije biomasa, čija valorizacija predstavlja ne samo ekonomsku prednost već i znatno smanjeni utjecaj CO<sub>2</sub> na okoliš [37]. Biomasa je po definiciji biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede, šumarstva i srodnih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, kao i biorazgradivi dio industrijskog i komunalnog otpada [38]. Drvna biomasa smatra se ugljično-neutralnim gorivom jer prilikom izgaranja otpušta istu količinu CO<sub>2</sub> koju tijekom životnog ciklusa apsorbira te ima prednost pred drugim vrstama biomase zbog manje proizvodnje otpadaka. Predstavlja značajan potencijal, kako u svijetu tako i u Republici Hrvatskoj, gdje je 48 % teritorija prekriveno šumom [39].

Biomasa trenutno doprinosi između 8 % do 15 % u ukupnoj svjetskoj energetskej zalihi topline, električne energije i transportnih goriva, a smatra se da će se taj broj povećavati budući da trenutni scenariji teže ekološki učinkovitoj proizvodnji energije i smanjenju emisije stakleničkih plinova. Očekivan je rast upotrebe drvene biomase i do 200% do kraja 2030 [37] [40].

Povećano korištenje drvene biomase rezultira i povećanim količinama pepela koji nastaje kao nusprodukt izgaranja, a kao jedna od mogućnosti održivog gospodarenja pepelom istražuje se upravo njegoa primjena u građevinskoj industriji [39].

Leteći pepeo iz ugljena već ima široku primjenu u građevinskoj industriji te se zbog sve češćeg korištenja biomase umjesto ugljena kao goriva, nametnulo pitanje primjene pepela nastalog izgaranjem biomase kao dodatka betonima i mortovima. Da bi se to postiglo, potrebno je poznavati fizikalna i kemijska svojstva pepela iz drvene biomase (PDB), koja značajno ovise o brojnim čimbenicima kao što su vrsta drvene biomase, tehnologija izgaranja. Razumijevanje osnova o PDB-u ključno je za razvoj odgovarajuće ocjene kvalitete te procjene njegove primjene u raznim kompozitima [41].

Kvaliteta i kvantiteta PDB-a značajno varira. Prema tome, količina proizvedenog pepela po jediničnoj masi izvorne biomase se kreće od oko 2% za usitnjeno drvo do 15% za rižine ljuske. Neovisno o vrsti drvene biomase koja se koristi, proizvedeni pepeo možemo podijeliti u dvije glavne skupine: pepeo s dna peći (eng. *bottom ash*) koji se sakuplja pod rešetkom komore za izgaranje te leteći pepeo (eng. *fly ash*), koji se prikuplja u ciklonskim separatorima (ako je riječ o krupnijim frakcijama letećeg pepela) ili na vrećastim i elektrostatskim filterima (ako je riječ o finijim frakcijama letećeg pepela). Omjeri količina pepela s dna peći (ložišta) te letećeg pepela prvenstveno ovise o tehnologiji izgaranja koja se u energani koristi [39] [42]. Najčešći načini izgaranja koji se koriste kod drvene biomase su izgaranje u fluidiziranom sloju te izgaranje na rešetki [39].

Već su dokazane primjene PDB-a kao mineralnog dodatka i punila u cementnim kompozitima, kako u RH tako i u svijetu [43]. Rezultati istraživanja Saraber-a [41] obuhvaćaju neke od osnovnih svojstava cementnih pasta i mortova sa PDB-om. U svježem stanju primijećeno je brže vezivanje u usporedbi s referentnim pastama bez PDB-a, te veća potreba za vodom za postizanje standardne konzistencije. Rasprostiranje je značajno manje, što se može pripisati morfologiji čestica i fenomenu lažnog vezivanja. Rezultati ispitivanja [5] u očvrslom stanju nakon 28 i 91 ukazuju i na sporiji prirast čvrstoća ovakvih mješavina.

Budući da se u ovom radu ispituju vapneni mortovi za sanaciju povijesnih građevina, u nastavku je prikazan utjecaj pepela iz različitih biomasa na svojstva vapnenih mortova (u svježem i očvrslom stanju) prema dostupnoj literaturi.

Almeida i suradnici [44] istražili su mogućnost primjene pepela nastalog mljevenjem rižinih ljuski u vapnenim mortovima za povijesne građevine. Za tu svrhu pripremili su mortove u kojima je dio zračnog vapna (AL) zamijenjen pepelom rižinih ljuski, različite finoće mliva, s omjerima veziva i agregata 1:2. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava ukazali su na porast savojne i tlačne čvrstoće te modula elastičnosti morta s porastom finoće mliva rižinih ljuski. Osim toga, dokazan je i pozitivan učinak pepela rižinih ljuski na kapilarno upijanje mortova. Mortovi u kojima je korištena najfinija frakcija pepela rižinih ljuski imaju koeficijent kapilarnog upijanja za 40% manji od referentne mješavine morta u kojoj taj pepeo nije korišten.

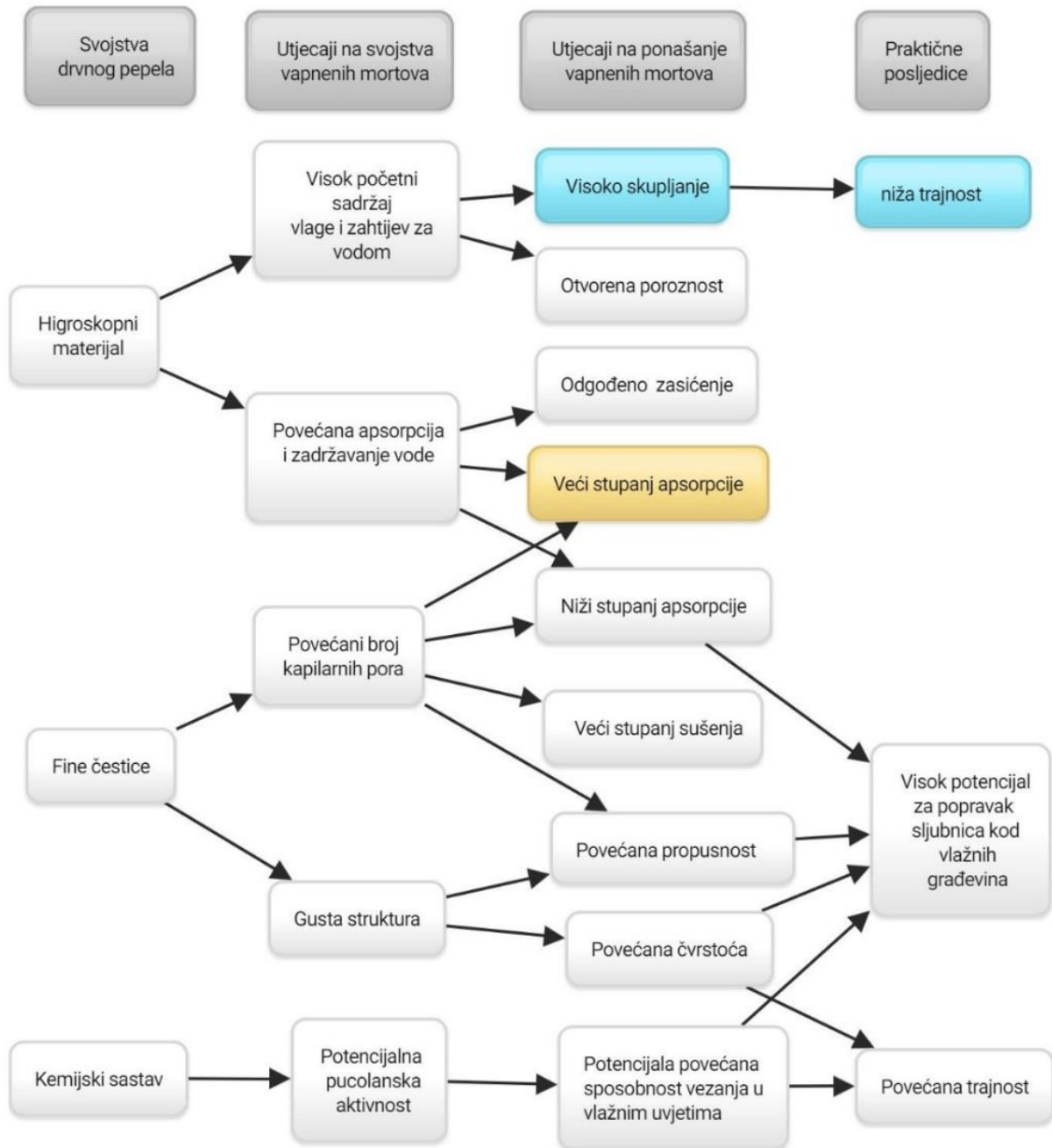
Istraživanja [8] koja su provedena na sanacijskim vapnenim mortovima sa dvije vrste veziva, NHL i zračnim vapnom, uz dodatak prirodnih organskih materijala, rezultirala su zaključkom o pozitivnom utjecaju organskih dodataka na tlačnu čvrstoću mortova [45].

Pavlikova i suradnici [46] ispitivali su svojstva mortova u kojima je kao osnovno vezivo korišten hidrat vapna, a kao zamjenska veziva metakaolin i PDB. Oba zamjenska veziva odabrana su na temelju njihovih kemijskih sastava koji se odlikuju visokim sadržajem  $\text{SiO}_2$ , i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava morta, pri starost od 28 i 365 dana, pokazali su pozitivan učinak i metakaolina i PDB-a na tlačnu čvrstoću. Povećana tlačna čvrstoća morta u kojima su korišteni metakaolin i PDB prepisuje se C-S-H i C-S-A-H- u, koji su produkti pucolanske reakcije između metakaolina, PDB i hidrata vapna. Nadalje, prema rezultatima ispitivanja kapilarnog upijanja, zaključeno je da se koeficijent apsorpcije povećava s povećanjem poroznosti morta [46].

Fort i suradnici [47] istražili su mogućnost zamjene dijela vapna PDB-om u vapnenim mortovima za povijesne građevine. U tu svrhu pripremili su pet mješavina morta u kojima su kalcinirano vapno (CL) zamijenili sa PDB-om u različitim omjerima, maksimalno do 50 % mase vapna. Kao preduvjet za kompatibilnost tih veziva sa tradicionalnim materijalima, naveli su veličinu čestica PDB-a te njihov

kemijski sastav s dominantnim udjelom  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Iako rezultati ispitivanja gustoće i poroznosti, nisu pokazali velike razlike između pojedinih mješavina, rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava pri starosti morta od 28 i 90 dana, pokazali su da porast količine PDB-a u mortu utječe na znatan porast njegove tlačne i vlačne čvrstoće. Primjerice, tlačna čvrstoća morta, u kojem je čak 50% mase vapna zamijenjeno PDB-om, pri starosti od 28 dana, je približno 3 puta veća od tlačne čvrstoće morta s 0% PDB-a. Nadalje, rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja, pokazali su da, povećanjem udjela PDB-a, povećava se i vrijednost koeficijenta apsorpcije. Budući da to povećanje iznosi otprilike 5% za mješavinu s 50% PDB-a, u odnosu na onu s 0% PDB-a, može se zaključiti da su razlike gotovo zanemarive [47].

Fusade i suradnici [48] istražili su primjenu PDB-a kao zamjenu dijela agregata u različitim udjelima kod mortova sa prirodnim hidrauličnim vapnom (NHL) i zračnim vapnom (AL). Zaključili su da zahvaljujući higroskopnosti PDB-a, mortovi apsorbiraju veću količinu vode. Iako upijaju veću količinu vode, imaju i povećanu sposobnost sušenja. Zbog sadržaja sitnih čestica iz PDB-a mortovi su imali gušću strukturu što je dovelo do većeg udjela kapilara, a samim time i do veće otvorene poroznosti i propusnosti vodene pare. Gušća struktura mortova te pucolanska aktivnost PDB-a rezultirala je i povećanim tlačnim čvrstoćama. Sve navedeno je moguće regulirati mijenjajući udio PDB-a u mortovima, a kao optimalna količina PDB-a navedena je srednja vrijednost od 20 – 40 %, dok povećane vrijednosti od 70 – 100 % imaju negativne efekte kao što je veliko skupljanje uslijed sušenja. Na slici 8 prikazani su njihovi zaključci o utjecajima PDB-a na svojstva mortova. Plava boja se odnosi na zračna vapna, a žuta na mortove sa sadržajem PDB-a od 70 – 100 %. Vidljivo je da se, ukoliko se kao osnovno vezivo koristi zračno vapno i visoki v/v omjer, dobiva vapneni mort sa izraženim skupljanjem, što u konačnici rezultira nižom trajnosti morta. Također, može se zaključiti da finoća mliva samog PDB-a ima znatan utjecaj na čvrstoću morta i njegova trajnosna svojstva, posebice propusnost.



Slika 8. Utjecaji PDB-a na svojstva morta [44]

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

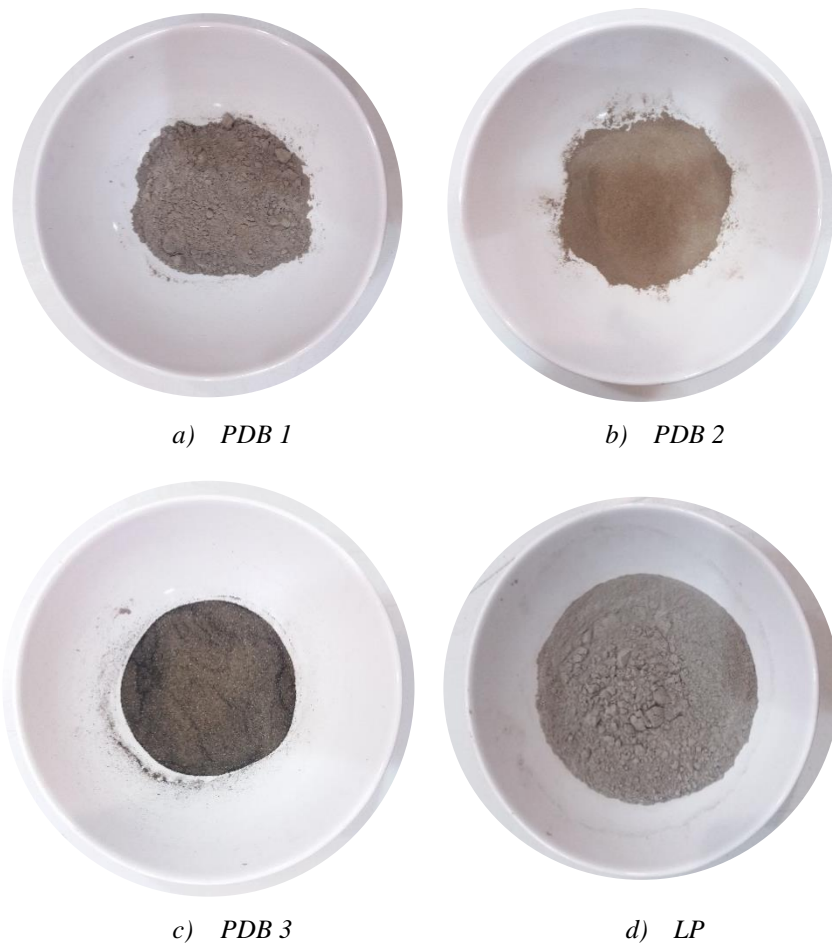
U eksperimentalnom radu pripremljene su mješavine veziva, pasta i mortova uzimajući u obzir kemijski sastav PDB-a i LP s ciljem pronalaska njihovog optimalnog omjera za primjenu u sanacijskim mortovima. Ukupno je pripremljeno 12 mješavina veziva, 8 mješavina pasta i 11 mješavina mortova čija su svojstva ispitana u skladu s trenutno važećim normama. Da bi se vezivo klasificiralo kao hidraulično vapno nužno je da zadovoljava sve kriterije definirane normom HRN EN 459-1, prikazane u tablici 5. Definirani kriteriji odnose se na svojstva veziva (kemijski i granulometrijski sastav, sadržaj slobodne vode), svojstva pasta (postojanost volumena i vrijeme vezivanja), te svojstva morta u svježem stanju (sadržaj zraka) i očvrslom stanju (tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana).

Tablica 5. Kriteriji za hidraulično vapno prema HRN EN 459-1

NAPOMENA	SVOJSTVO		KRITERIJ ZA HIDRAULIČNO VAPNO		
			HL 2	HL 3.5	HL 5
Vezivo	SO <sub>3</sub>		≤ 3	≤ 3	≤ 3
	Ca(OH) <sub>2</sub>		≥ 10	≥ 8	≥ 4
	Veličina čestica -ostatak po masi (%)	0,09 mm	≤ 15	≤ 15	≤ 15
		0,2 mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Sadržaj slobodne vode (%)		≤ 2	≤ 2	≤ 2
Pasta	Postojanost volumena	Alternativna metoda (mm)	≤ 20	≤ 20	≤ 20
	Vrijeme vezivanja [h]	Početak	> 1	> 1	> 1
		Kraj	≤ 15	≤ 15	≤ 15
Mort	Sadržaj zraka (%)		≤ 25	≤ 25	≤ 25
	Tlačna čvrstoća [MPa]	Nakon 7 dana	--	--	≥ 2
		Nakon 28 dana	≥ 2 do ≤ 7	≥ 3,5 do ≤ 10	≥ 5 do ≤ 15

## 5.1 MATERIJALI

U eksperimentalnom radu, kao vezivo za pripremu pasta i mortova, korištena su tri PDB-a različitog podrijetla pogona i različitog kemijskog sastava uz dodatak letećeg pepela dobivenog izgaranjem ugljena, koji su prikazani na slici 9. Pepeli drvene biomase korišteni za potrebe ovog rada, oznaka PDB 1, PDB 2 i PDB 3, proizvedeni su u bioenerganama u Glini, Udbini i Varaždinu, kao što je prikazano u tablici 6. Leteći pepeo (oznake LP) nastao izgaranjem ugljena proizveden je u TE Plomin. Fizikalna i kemijska svojstva PDB-a i letećeg pepela prikazani su u tablici 6.



*Slika 9. Veziva*

Tablica 6. Fizikalna i kemijska svojstva veziva

	Jedinice	<b>PDB 1</b>	<b>PDB 2</b>	<b>PDB 3</b>	<b>LP</b>
Podrijetlo		<b>BE Glina</b>	<b>BE Udbina</b>	<b>BE Varaždin</b>	<b>TE Plomin</b>
pH vrijednost (eluat)	-	13,48	13,18	12,99	12,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mas. %	1,95	1,91	1,61	1,29
Na <sub>2</sub> O	mas. %	1,07	0,52	2,24	2,25
K <sub>2</sub> O	mas. %	16,28	7,75	5,29	2,20
CaO	mas. %	49,33	56,53	23,80	6,67
MgO	mas. %	3,70	6,74	4,27	2,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas. %	2,86	3,43	10,62	29,00
TiO <sub>2</sub>	mas. %	0,13	0,14	0,67	0,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas. %	2,01	2,26	4,32	7,09
SiO <sub>2</sub>	mas. %	18,05	18,98	45,40	68,21
SO <sub>3</sub>	mas. %	4,62	1,73	1,78	0,77
Gubitak žarenjem (LOI)	mas. %	18,6	2,9	3,4	9,0

Za pripremu mortova korišten je CEN Standard pijesak koji je proizveden u skladu sa zahtjevima norme EN 196-1 prikazan na slici 10. To je umjetni proizvod koji se sastoji od nekoliko različitih frakcija pijeska. Sve frakcije su proizvedene industrijskim putem, prosijane te zatim pomiješane u određenim udjelima. Veličine zrna ovog agregata kreću se između 0,08 i 2,00 mm, a maksimalan sadržaj vlage iznosi 0,2%.

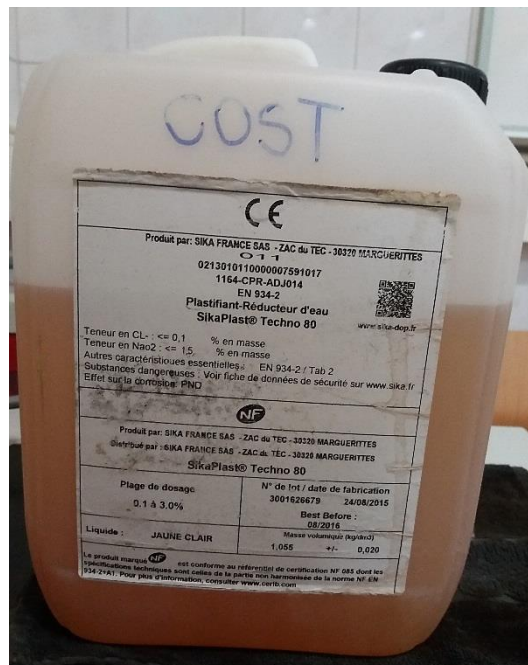
Prema normi HRN EN 459-2, za spremanje pasta i mortova, koristila se pitka voda koja se čuvala u spremnicima gdje se njena temperatura održavala na  $20 \pm 2$  °C.

Kako bi se poboljšala obradivost mortova, a time i olakšala njihova ugradnja, od kemijskih dodataka korišten je plastoerant SikaPlast Techno 80 prikazan na slici 11. SikaPlast Techno 80 je tekući dodatak na bazi polikarboksilata koji se dodaje u vodu za pripremu žbuka, mortova ili betona. Gustoća mu iznosi 1,05 kg/dm<sup>3</sup>, a pH vrijednost 4,5. Preporučeno doziranje je u rasponu od 0,1 % do 3% mase veziva, ovisno o obradivosti koja se želi postići.





Slika 10. CEN Standard pijesak



Slika 11. SikaPlast Techno 80

## 5.2 SASTAV MJEŠAVINA

### 5.2.1 Sastavi veziva

Pripremljene su po četiri vrste veziva za svaki od korištenih PDB-ova. Svaka vrsta veziva se razlikuje po udjelu PDB-a koji se smanjuje od 100% na 75, 50 i 25 % pri čemu je smanjena količina PDB-a nadomještena letećim pepelom iz ugljena. U tablici 6 prikazano je dvanaest pripremljenih vrsta veziva.

Tablica 7. Vrste veziva

Vrsta veziva (%)	Oznaka veziva											
	PDB1				PDB2				PDB3			
PDB	100	75	50	25	100	75	50	25	100	75	50	25
LP	0	25	50	75	0	25	50	75	0	25	50	75

### 5.2.2 Sastavi pasta

Ukupno je pripremljeno 8 mješavina pasta, po četiri mješavine za PDB 1 i PDB 2, kao što je prikazano u tablici 8. Mješavine pasta s drvnim pepelom oznake PDB 3 nisu pripremljene budući da su rezultati kemijske analize pokazali da je udio slobodnog kalcijevog hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) u istome izrazito nizak, zbog čega bi vezivanje takvih mješavina bilo neadekvatno. Prilikom spravljanja pasti, veziva sa 4 različita omjera PDB-a i LP-a dozirani su u količinama od 500 g, u skladu sa normom HRN EN 459-2, Količina vode za pojedinu pastu određena je na temelju ispitivanja standardne konzistencije.

Tablica 8. Mješavine pasta

Oznaka veziva	Vrsta veziva (%)		Vezivo (g)	Voda (g)	v/v
	PDB	LP			
PDB1	100	0	500	350,5	0,70
	75	25	500	265,3	0,53
	50	50	500	243,3	0,49
	25	75	500	210,0	0,42
PDB2	100	0	500	300,0	0,60
	75	25	500	250,0	0,50
	50	50	500	225,0	0,45
	25	75	500	190,0	0,38

### 5.2.3 Sastavi mortova

Mješavine mortova pripremljene su s istim mješavinama veziva prethodno prikazanim u tablici 7, CEN Standard pijeskom i vodom. Omjer veziva i agregata je 1:1,5, a količina vode se određivala zasebno za

svaku mješavinu na način da se postigne zahtijevano rasprostiranje morta od  $(185\pm 3)$  mm, kako je propisano normom HRN EN 495-2. Također, u svim mješavinama koristio se kemijski dodatak Sika Techno 80 u količini od 1% na masu veziva. Ukupno je pripremljeno 11 mješavina mortova čiji su sastavi prikazani u tablici 9.

Tablica 9. Sastavi mortova

KOLIČINE KOMPONENTI ZA 3,304 L							
	Vrste veziva (%)		Vezivo (g)	Agregat (g)	Voda (g)	Plastoerant (g)	v/v
	PDB	LP					
PDB1	100	0	2635,0	3952,6	1844,5	26,4	0,70
	75	25	2605,3	3907,9	1563,1	26,1	0,60
	50	50	2576,2	3864,3	1284,5	25,8	0,50
	25	75	2547,8	3821,7	1122,3	25,5	0,44
PDB2	100	0	2725,1	4087,6	1907,6	27,3	0,70
	75	25	2670,7	4006,1	1602,4	26,7	0,60
	50	50	2618,5	3927,8	1277,5	26,2	0,49
	25	75	2568,3	3852,5	1036,8	25,7	0,40
PDB3	100	0	2320,8	3481,1	1489,0	23,2	0,64
	75	25	2329,6	3507,8	1217,5	23,3	0,52
	50	50	2338,5	3507,8	1040,3	23,4	0,44

### 5.3 PRIPREMA I NJEGOVANJE UZORAKA

#### 5.3.1 Priprema veziva

Prije samog miješanja PDB-a i letećeg pepela iz ugljena, PDB je prosijan na sijačici prikazanoj na slici 12. Budući da je uočeno da u svakom PDB-u ima krupnih otpadaka, poput komadića drveta ili ugljena, koje nemaju vezivna svojstva i nisu prihvatljivi za uporabu, provedeno je sisanje kroz sito veličine otvora 0,25 mm. Ukupan odbačeni materijal za sva tri pepela tj. materijal koji nije prošao kroz sito veličine otvora 0,25 mm prikazan je na slici 13. Ostaci na situ veličine otvora 0,25 mm za pojedinu vrstu PDB-a prikazani su na slici 14. Najfinije čestice uočene su kod PDB 1, dok najviše ugljena sadrži pepeo oznake PDB 3. Prosijani PDB-ovi su zatim pomiješani i homogenizirani sa letećim pepelom iz ugljena u omjerima prikazanim u tablici 7.



*Slika 12. Sijačica*



*Slika 13. Ukupan odbačeni materijal*



*a) PDB 1*



*b) PDB 2*



*c) PDB 3*

*Slika 14. Ostatak na situ 0,25 mm*

### *5.3.2 Priprema pasta*

Sve mješavine pasta pripremljene su u miješalici prikazanoj na slici 15. Prvo se u miješalicu ulije voda, a zatim se pažljivo dodaje izvagana količina veziva. Trenutak kada se pomiješaju vezivo i voda bilježi se kao nulto vrijeme, u odnosu na koje se vrši svako daljnje mjerenje vremena. Miješanje započinje na niskoj brzini i traje 90 sekundi. Nakon toga slijedi pauza od 30 sekundi, tijekom koje je potrebno ručno ukloniti svu pastu sa stijenki miješalice i vratiti je u zonu miješanja. Miješanje se zatim nastavlja na višoj brzini idućih 90 sekundi. Ukupno vrijeme miješanja iznosi 3 minute.

Nakon miješanja, paste se pažljivo ugrađuju u kalupe za ispitivanje normirane konzistencije, početka i kraja vezivanja i postojanosti volumena. Između pojedinih ispitivanja kalupi sa ugrađenim pastama čuvaju se u vlažnoj komori na temperaturi od  $(20 \pm 2)$  °C i relativnoj vlažnosti zraka od 90%.



*Slika 15. Miješalica za pripremu paste*

### *5.3.3 Priprema mortova*

Miješanje mortova obavljeno je u miješalici prikazanoj na slici 16. U miješalicu se prvo ulije voda u koju je prethodno dodan plastoerant. Nakon čega se dodaju vezivo i agregat. Miješanje traje ukupno 4 minute. Nakon početnog miješanja na nižoj brzini koje traje 60 sekundi, slijedi pauza od 60 sekundi u kojoj je potrebno ručno ukloniti sav materijal sa stijenki miješalice i vratiti ga u zonu miješanja. Zatim, u idućih 120 sekundi, miješanje se odvija na višoj brzini.





*Slika 16. Miješalica za pripremu morta*

Nakon miješanja i ispitivanja svojstava u svježem stanju, mortovi se ugrađuju u kalupe oblika prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm uz lagano ručno vibriranje. Ispunjeno je 9 kalupa po mješavini koji su potrebni za ispitivanja u očvrslom stanju. Kod mješavina mortova sa PDB-om 2 i PDB-om 3, uočeno je znatno izdvajanje vode prilikom ugrađivanja. Ipak, veću količinu vode koja se u početku izdvoji, nakon određenog vremena, cca 15 minuta, mortovi ponovo upiju. Nakon ugradnje, kalupi se prekrivaju nepropusnim materijalom kako bi se spriječila evaporacija vode iz uzoraka.

Uzorci mortova sa PDB-om 1 i PDB-om 2 raskalupljeni su nakon 24 sata, dok su uzorci s PDB-om 3 raskalupljeni nakon 72 sata zbog sporog vezivanja. Odmah po raskalupljanju, uzorci su uskladišteni u komore za njegovanje. Po 6 uzoraka od svake mješavine, koji su namijenjeni za ispitivanje tlačne čvrstoće morta nakon 7 i 28 dana, stavljeni su u vlažnu komoru gdje su njegovani na temperaturi od  $(20 \pm 2)$  °C i relativnoj vlažnosti zraka od 90%. Po tri uzorka od svake mješavine, namijenjenih za ispitivanje kapilarnog upijanja, stavljeni su u kondicioniranu komoru gdje su čuvani 21 dan na temperaturi od  $(20 \pm 2)$  °C i relativnoj vlažnosti zraka od 60%, kako je propisano normom HRN EN 1015-18.

#### **5.4 METODE ISPITIVANJA**

Budući da je jedan od ciljeva ovog rada klasificirati pepeo iz drvene biomase kao hidraulično vapno, sva ispitivanja veziva, pasta i mortova provedena su u skladu sa trenutno važećom normom za ispitivanje građevnog vapna HRN EN 459-2 :2015, kako je navedeno niže u tablicama 10, 11, 12 i 13. Također, kao što je već prije u ovom radu naglašeno, upijanje vode je jedno od najvažnijih svojstava mortova za zide i u direktnoj je vezi s njihovom trajnošću. Zbog toga se u ovom radu, uz navedena ispitivanja,

provelo i ispitivanje kapilarnog upijanja na mortovima u skladu sa normom HRN EN 1015-18. Dodatno, za potrebe klasifikacije PDB-a kao hidraulično vapno, za uzorke sva tri PDB-a i LP su obavljene kemijske analize sadržaja oksida, pH vrijednosti, gubitka žarenjem (LOI) i slobodnog kalcijevog hidroksida.

Tablica 10. Metode ispitivanja veziva

SVOJSTVO	NORMA
Određivanje veličine čestica	HRN EN 459-2:2015
Određivanje količine slobodne vode	HRN EN 459-2:2015

Tablica 11. Metode ispitivanja pasta

SVOJSTVO	NORMA
Ispitivanje postojanosti volumena	HRN EN 459-2:2015
Određivanje početka i kraja vezivanja	HRN EN 459-2:2015

Tablica 12. Metode ispitivanja mortova u svježem stanju

SVOJSTVO	NORMA
Ispitivanje rasprostiranja	HRN EN 1015-3:2000
Određivanje gustoće	HRN EN 1015-6:2000
Mjerenje temperature svježeg morta	HRN U.M1.032
Sadržaj pora	HRN EN 459-2.2015

Tablica 13. Metode ispitivanja mortova u očvrslom stanju

SVOJSTVO	NORMA	UZORCI		
		Oblik	Dimenzije	Broj uzoraka
Tlačna čvrstoća	HRN EN 196-1:2016	Prizma	40x40x160 mm	3 uzorka po mješavini
Kapilarno upijanje	HRN EN 1015-18	Prizma	40x40x160 mm	3 uzorka po mješavini

#### 5.4.1 Određivanje veličine čestica air-jet metodom

Ova metoda se može koristiti za određivanje veličine nakupina vrlo finih čestica, a odnosi se na hidraulično vapno, sve vrste vapna s hidrauličnim svojstvima i živo vapno prema EN 459-1:2010.



Slika 17. Uređaj za prosijavanje air jet metodom

Ispitivanje se provodi na uređaju za prosijavanje prikazanom na slici 17 u koji se stavljaju sita promjera 200 mm, a veličine otvora 0.005, 0.01, 0.02, 0.048 i 0,09 mm. Prije početka ispitivanja potrebno je izvagati svako sito zasebno na vagi s točnošću od 0,01 g. Zatim se izvaže prikladna količina veziva, cca. 50 grama, također s točnošću od 0,01 g. Izvagana masa uzorka označava se kao  $m_{15}$ . Sito veličine otvora 0.005 mm postavi se u uređaj za prosijavanje i na njega oprezno prebaciti sav ispitni uzorak, pazeći da se prilikom prebacivanja uzorka ne izgubi na masi.

Nakon zatvaranja poklopca, uključi se uređaj za prosijavanje. Na početku ispitivanja treba voditi računa da se mlaznica pravilno rotira. Ukoliko se materijal uhvati za poklopac, potrebno je nježno lupiti po sredini poklopca gumenim ili plastičnim čekićem. Ako se pak stvore nakupine materijala, treba zaustaviti uređaj za prosijavanje i pomoću mekane četkice razbiti nakupine, pazeći pri tome da materijal ne prođe kroz sito.

Nakon 3 minute sisanja uređaj za prosijavanje se zaustavi i pažljivo izvadi sito. Sav ostatak na situ potrebno je prebaciti u prikladnu posudu koristeći mekanu četkicu i izvagati s točnošću od 0,01 g. Krajnja masa ostatka na situ označava se kao  $m_{16}$ .



Sijanje i mjerenje se ponovi sa ostalim sitima, idući od sita manjeg otvora prema situ najvećeg otvora. Masa ostatka na svakom situ označava se sa  $m(P_{\text{otvor sita}})$  i izražava se u postotku, a određuje se kao:

$$m(P_{\text{otvor sita}}) = \frac{m_{16}}{m_{15}} \times 100\% \quad (3)$$

#### 5.4.2 Određivanje sadržaja slobodne vode

Količina slobodne vode određena je u skladu s normom HRN EN 459-2, poput metode koja se koristi za određivanje sadržaja slobodne vode u građevnom vapnu.

Oprema za ispitivanje sastoji se od peći za sušenje prikazane na slici 18 koja može ostvariti i održati temperaturu od  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , digitalne vage s točnošću od 0,01 g i porculanskih posudica.

Potrebno je izvagati između  $(5 \pm 0,1)$  g i  $(10 \pm 0,1)$  g veziva sa točnošću od 0,01 g. Uzorak se zatim stavlja u peć za sušenje gdje se suši do konstantne mase na temperaturi od  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Vrijeme sušenja je ograničeno na cca. 2 sata. Porculansku posudu u kojoj se nalazi uzorak nakon vađenja iz peći, potrebno je prekriti odgovarajućim materijalom kako bi se spriječilo upijanje vodene pare i ugljikova dioksida iz zraka. Uzorak se, nakon hlađenja ponovo izvaže.

Sadržaj slobodne vode izražava se kao  $\text{H}_2\text{O}$  u masenom udjelu i određuje se kao:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{(m_5 - m_6)}{m_5} \times 100\% \quad (4)$$

gdje je:

$m_5$ - masa uzorka prije sušenja, u gramima

$m_6$ - masa uzorka nakon sušenja, u gramima



Slika 18. Peć za sušenje

Na slici 19 prikazano je 12 vrsta veziva pripremljenih za određivanje sadržaja slobodne vode.



*Slika 19. Uzorci veziva sa određivanjem sadržaja slobodne vode*

#### *5.4.3 Ispitivanje početka i kraja vezivanja*

Vrijeme vezivanja označava prijelaz vapnene paste iz tekućeg stanja u kruto, ali još bez čvrstoće, a definira se početkom i krajem. Kada dođe do početka vezivanja, pasta gubi obradivost, odnosno dolazi do gubitka konzistencije što otežava njenu ugradnju. S druge strane, kraj vezivanja označava vrijeme potrebno za potpuno skrućivanje paste. Taj je trenutak važan radi procjene vremena u kojem započinje razvoj čvrstoće i krutosti.

Vrijeme vezivanja određuje se promatranjem penetracije igle u vapnenu pastu standardne konzistencije, sve dok ista ne dosegne propisanu vrijednost prema normi HRN EN 459-2:2015.

Vapnena pasta standardne konzistencije ima propisanu otpornost na penetraciju standardnog valjka. Zahtijevana količina vode za takvu pastu se određuje probnim penetracijama na pastama s različitim sadržajem vode.

##### *5.4.3.1 Ispitivanje standardne konzistencije*

Prema normi HRN EN 459 - 2: 2015 laboratorij u kojem se pripremaju i ispituju uzorci treba se održavati na temperaturi od  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  i relativnoj vlažnosti zraka ne manjoj od 50%. Temperatura i relativna vlažnost zraka u laboratoriju moraju se mjeriti berem jednom dnevno tijekom ispitivanja. Temperatura veziva, vode i uređaja koji se koriste za izradu uzoraka se treba, također održavati na  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ .

Ispitivanje se provodi pomoću Vicatovog aparata sa standardnim valjkom dužine barem 45 mm i promjera  $(10\pm 0,05)$  mm prikazanim na slici 20. Vapnena pasta se ugrađuje u Vicatov kalup koji treba biti napravljen od tvrde gume, plastike ili mesinga. Kalup mora biti oblika valjka ili krnjeg stošca dubine  $(40\pm 0,2)$  mm i unutarnjeg promjera  $(75\pm 10)$  mm, a staklena pločica šira od kalupa najmanje 2,5 mm.

Za određivanje mase veziva koristi se vaga s točnošću mjerenja od  $\pm 1$ g,. Za miješanje paste koristi se miješalica sukladno s normom HRN EN 196-1: 2016.

Potrebno je izvagati 500 g veziva s točnošću od 1 g. Određena količinu vode, npr. 125 g izvaže se direktno u zdjeli miksera ili ju je potrebno izmjeriti pomoću menzure ili birete i staviti je u zdjelu miksera. Vezivo se dodaje u vodu polagano, pazeći da ne dođe do gubitaka na masi. Vrijeme dodavanja treba biti između 5 i 10 s. Trenutak kada se doda svo vapno u vodu uzima se kao nulto vrijeme od kojeg se obavljaju sva daljnja mjerenja vremena. Odmah nakon dodavanja veziva potrebno je pokrenuti miješalicu. Miješanje pasta obavlja se prema postupku koji je objašnjen u točki 5.3.2 Po završetku miješanja, pasta se pažljivo ugrađuje u kalup koji se prethodno postavljen na staklenu pločicu, bez zbijanja ili vibriranja. Potrebno je ukloniti višak paste sa vrha kalupa tako da gornja površina kalupa ostane ravna.

Odmah nakon kalibriranja valjka, kalup i staklena ploča se prebace na Vicatov aparat i pozicioniraju centrično ispod valjka. Valjak se polagano spusti dok se ne ostvari kontakt sa pastom. Nakon toga potrebno je brzo otpustiti pokretne dijelove uređaja i dopustiti da valjak vertikalno penetrira u centar uzorka kako je prikazano na slici 20. Otpuštanje valjka treba se dogoditi 4 min  $\pm$  10 s nakon nultog vremena. Skala se očita kada se valjak zaustavi ili nakon 30 s od otpuštanja valjka, koji god trenutak je raniji. Očitavanje na skali predstavlja udaljenost između dna valjka i staklene ploče.

Ispitivanja se provode na pastama s različitim sadržajem vode sve dok se ne pronade ona pasta kod koje udaljenost od dna valjka do staklene ploče iznosi  $(6 \pm 2)$  mm. Kada se postigne ta vrijednost, treba zabilježiti sadržaj vode u toj pasti sa točnošću od 0,5%, kao količinu vode potrebnu za dobivanje paste standardne konzistencije.



*Slika 20. Ispitivanje standardne konzistencije paste*

#### *5.4.3.2 Ispitivanje početka i kraja vezivanja*

Valjak na Vicatovom aparatu zamjeni se s iglom dužine 45 mm i promjera  $(1,13 \pm 0,05)$  mm. Nakon postavljanja igle, potrebno je kalibrirati Vicat-ov aparat s iglom i postaviti iglu u početni položaj.

Vicat-ov kalup se ispuni pastom standardne konzistencije i postavi na staklenoj ploči u vlažnu komoru unutar koje je ostvarena temperatura od  $(20 \pm 2)$  °C i relativna vlažnost ne manja od 90%. Nakon prikladnog vremena, primjerice 15 minuta, kalup i staklena ploča prebace se na Vicatov aparat centrično ispod igle. Daljnji postupak ispitivanja je isti kao kod ispitivanja sa valjkom.

Skala se očita kada se penetracija igle zaustavi ili nakon 30 s od početka penetracije, koji god trenutak je raniji. Očitavanje na skali predstavlja udaljenost dna igle i staklene ploče. Ispitivanje treba ponavljati na istom uzorku u različitim točkama čija je međusobna udaljenost, kao i udaljenost od ruba kalupa, minimalno 10 mm, u odgovarajućim vremenskim razmacima, npr. 15 min. U vremenima između ispitivanja, uzorci se čuvaju u vlažnoj komori. Potrebno je zabilježiti vrijeme mjereno od nultog vremena u kojem udaljenost dna igle i staklene ploče iznosi  $(6 \pm 3)$  mm kao početak vezivanja paste s točnošću od 5 min.

Za ispitivanje kraja vezivanja potrebno je obrnuti ispunjeni kalup koji se koristio za određivanja vremena početka vezivanja na njegovu staklenu ploču tako da se ispitivanje vremena kraja vezivanja izvodi na strani uzorka koji je originalno u kontaktu sa staklenom pločom, kako je prikazano na slici 21. Potrebno je ponoviti postupak penetracija kao kod ispitivanja početka vremena vezivanja s povećanim vremenskim intervalima između pojedinih penetracija, npr. 30 min.

Vrijeme zabilježeno sa točnošću od 15 minuta i mjereno u odnosu na nulto vrijeme, kada penetracija igle u uzorak iznosi samo 0,5 mm, predstavlja kraj vezivanja paste.



*Slika 21. Ispitivanje kraja vezivanja*

#### *5.4.4 Ispitivanje postojanosti volumena*

Ispitivanje postojanosti volumena provodi se na Le Chatelierovim prstenovima prikazanim na slici 22 kao kod ispitivanja cementa prema normi EN 196-3: 2016 s određenim modifikacijama. Povećanje razmaka ticala Le Chatelierovih prstenova indikator je povećanja volumena vapnene paste.



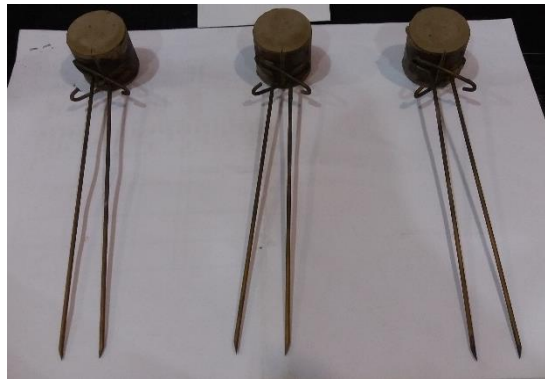
*Slika 22. La Chatelierovi prstenovi*

Le Chatelierov prsten treba biti izrađen od nehrđajućeg čelika i treba imati prorez tako da se ticala mogu nesmetano širiti. Potrebno je imati i par pokrivnih pločica od nepropusnog i nekorodirajućeg materijala

kao što su staklene pločice. Minimalna masa staklenih pločica je 75 g. Po potrebi može se nanijeti dodatna mala masa na staklene pločice kako bi se zadovoljila težina od 75 g.

Potrebno je pripremiti pastu normirane konzistencije i ispuniti tri kalupa potpuno, ali labavo i lagano nabiti uzorke kako bi se spriječio ulazak zraka. Nakon toga treba izmjeriti početnu udaljenost (A) između indikatorskih točaka sa točnošću od 1 mm i odmah prebaciti uzorke u parnu komoru u kojoj voda snažno vrije. Tijekom ispitivanja kalupi se podvrgavaju stalnom djelovanju pare pri atmosferskom tlaku unutar perioda od  $(180 \pm 10)$  min. Nakon tog perioda, kalupi se izvade iz parne komore i ohlade na sobnoj temperaturi te se na kraju izmjeri udaljenost (B) između indikatorskih točaka. Na slici 23 prikazani su kalupi neposredno prije mjerenja udaljenosti (B) indikatorskih točaka.

Rezultat ispitivanja se izražava kao razlika (B-A) u mm s točnošću od 1 mm.



*Slika 23. Uzorci paste nakon kuhanja na pari*

#### *5.4.5 Određivanje konzistencije svježeg morta*

Konzistencija svježeg morta određuje se pomoću stolića za protresanje prikazanog na slici 24, kako je propisano normom HRN EN 1015-3 2000. Osim stolića za protresanje, oprema za ispitivanje sastoji se i od kalupa krnjeg stošca visine e 60 mm i štapa za nabijanje dužine 200 mm.

Prije samog ispitivanja, potrebno je navlažiti stolić za protresanje i kalup vodom. Kalup se postavi na sredinu stolića i puni svježim mortom u dva nivoa. Svaki nivo se zbija štapom po 10 puta. Kada se ispunijeli kalup, potrebno je izravnati gornju površinu morta i, unutar 15 sekundi, podignuti kalup vertikalno. Nakon toga, izaziva se rasprostiranje morta okretanjem ručice na stoliću za protresanje 15 puta. Na kraju ispitivanja se mjeri promjer rasprostiranja morta u dva međusobno okomita smjera, kako je prikazano na slici 25. Srednja vrijednost dvaju promjera izražava se kao veličina rasprostiranja morta.



*Slika 24. Oprema za ispitivanje konzistencije svježeg morta*



*Slika 25. Mjerenje konzistencije svježeg morta*

#### *5.4.6 Određivanje gustoće svježeg morta*

Gustoća svježeg morta određuje se sukladno normi HRN EN 1015-6 2000.

Na početku ispitivanja, potrebno je izvagati posudu poznatog volumena ( $V$ ), u ovom slučaju  $1 \text{ dm}^3$ . Početna masa posude označava se sa  $m_1$ . Zatim se posuda puni svježim mortom koji se zbija na vibro stolu do potpune zbijenosti. Nakon što se posuda ispunji mortom do vrha, potrebno ju je ponovo izvagati i odrediti masu ugrađenog morta s točnošću od  $1 \text{ g}$ . Krajnja masa posude označava se s  $m_2$ .

Gustoća svježeg morta izračunava se prema sljedećem izrazu:



$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5)$$

#### *5.4.7 Određivanje udjela pora u svježem mortu*

Količina pora u svježem mortu određena je pomoću porometra prikazanog na slici 26, a prema postupku danom u normi HRN EN 459-2 2015. Posuda porometra ispunjena se svježim mortom i zatim poklopi. U poklopcu porometra nalazi se tlačna komora poznatog volumena u kojoj se može postići određeni pritisak pomoću pumpe. Kada se posuda zatvori, prostor između uzorka i poklopca se ispunjava vodom. Zatim se otvori ventil na poklopcu porometra što uzrokuje raspodjelu pritiska unutar pora u uzorku. Tada se na manometru, koji se nalazi također na poklopcu porometra, može očitati udio pora u uzorku. Sadržaj pora u svježem mortu izražava se u postotku s točnošću od 0,5%.



*Slika 26. Porometar*

#### *5.4.8 Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće očvrstnalog morta*

Savojna i tlačna čvrstoća morta ispituju se na preši prikazanoj na slici 27. Ispitivanje se provodi prema normi za određivanje čvrstoće cementa HRN EN 196-1 2016.





Slika 27. Preša za ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće morta

Čvrstoće morta se ispituju na uzorcima oblika prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Prvo se na prizmama određuje savojna čvrstoća i pri tom ispitivanju se dobiju po dvije polovice od svake prizme na kojima se zatim ispituju tlačne čvrstoće. Kako bi se osigurala točnost rezultata, ispitivanje se provodi na po tri uzorka prizme od svake mješavine.

Prije samog ispitivanja, potrebno je izmjeriti sve tri dimenzije svakog uzorka i to na način da se svaka dimenzija izmjeri na tri mjesta. Konačne dimenzije uzoraka dobivaju se kao srednje vrijednosti od triju mjerenja.

Ispitivanje savojne čvrstoće morta započinje pozicioniranjem uzorka prizme na dva oslonca oblika valjka čija međusobna udaljenost iznosi 100 mm. Kada se uzorak pozicionira, pomoću preše se podigne kako bi se ostvario kontakt s trećim valjkom kojim se opterećenje nanosi po sredini uzorka. Uzorak se postavlja na prešu tako da se opterećenje nanosi u smjeru okomitom na smjer ugrađivanja morta u kalupe. Ispitivanje se provodi tako da se tlačna sila nanosi po sredini uzorka konstantnom brzinom od 0,5 kN/s do loma. Sila pri kojoj dođe do loma uzorka, zabilježi se kao sila loma.

Savojna čvrstoća morta izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (6)$$

gdje je :  $R_f$  – savojna čvrstoća mort, u MPa

$F_f$  – sila opterećenja po sredinu uzorka u trenutku loma, u N

$b$  – dimenzija kvadratnog presjeka prizme, u mm

$l$  – udaljenost između oslonaca, u mm

Nakon ispitivanja savojne čvrstoće slijedi ispitivanje tlačne čvrstoće na polovicama prizmi. Polovice se postavljaju na prešu između dviju pločica dimenzija 40 x 40 mm, preko kojih se uzorci opterećuju tlačnom silom. Sila se nanosi konstantnom brzinom od 1 kN/s do loma.

Tlačna čvrstoća morta izražava se kao:

$$R_C = \frac{F_c}{1600} \quad (7)$$

gdje je :  $R_C$ - tlačna čvrstoća morta, u MPa

$F_c$  – sila loma, u N

1600 – površina preko koje se nanosi opterećenje (40 mm x 40 mm), u mm.

#### *5.4.9 Određivanje koeficijenta kapilarne upojnosti mortova*

Kapilarno upijanje morta ispituje se na uzorcima oblika prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm, prema normi HRN EN 459-2.

Nakon 21 dan njegovanja uzoraka u kondicioniranoj komori, uzorci se pripremaju za ispitivanje kapilarnog upijanja. Prije početka ispitivanja, potrebno je zabrtviti prizme sa svake strane po dužini nepropusnim materijalom, u ovom slučaju dvokomponentnom epoksidnom smolom. Epoksidna smola nanosi se mekanom četkicom u dva sloja, kako bi se osigurala nepropusnost uzoraka. Nakon otprilike 24 sata, kada se premazani uzorci osuše, potrebno ih je slomiti po pola, tako da se od svake prizme dobiju po dvije polovice približnih dimenzija 40 x 40 x 80 mm. Tako prepolovljeni uzorci se zatim stave u sušionik gdje se suše do konstantne mase na temperaturi od  $(60 \pm 5)$  °C. Konstantna masa je postignuta kada pad mase, između dva uzastopna vaganja udaljena 24 sata, nije veći od 0,2%. Kada se postigne konstantna masa, ta masa uzoraka bilježi se kao početna masa ( $M_0$ ). Zbog neravne plohe loma, kako bi se osigurao zahtijevani položaj uzorka tijekom ispitivanja, uzorci su smješteni u plastične čaše kako je prikazano na slici 28.



Slika 28. Uzorci za ispitivanje kapilarne vodoupojnosti mortova

Ispitivanje se provodi na način da se ploha loma svake polovice uzorka uroni u vodu. Visinu stupca vode od 5 do 10 mm, potrebno je održavati tijekom cijelog vremena ispitivanja. Trenutak kada se uzorci urone u vodu, bilježi se kao vrijeme početka ispitivanja. Kako bi se spriječila evaporacija vode iz uzoraka, tijekom provođenja ispitivanja potrebno je uzorke prekriti nepropusnim materijalom. Uzorci se važu nakon 10 minuta (M1), 90 minuta (M2) te nakon 24 sata (M3) od početka ispitivanja. Prije samog vaganja, uzorke je potrebno posušiti krpom, kako bi se uklonio višak vode s njihove površine. Osim toga, nakon 24 sata, uzorci se prepolove po dužini i izmjeri se dubina prodora vode u sredini uzorka.

Za sve vrste mortova, osim restauracijskih mortova, koeficijent kapilarne upojnosti određuje se kao:

$$C = 0,1(M2 - M1) \text{ [kg/m}^2 \text{ min}^{0,5}] \quad (8)$$

gdje je: M1- masa uzorka nakon 10 minuta ispitivanja, u kg

M2 – masa uzorka nakon 90 minuta ispitivanja, u kg

Za restauracijske mortove, koeficijent kapilarne upojnosti određuje se kao:

$$C = 0,625 (M3 - M0) \text{ [kg/m}^2] \quad (9)$$

gdje je: M0 – masa suhog uzorka prije početka ispitivanja, u kg

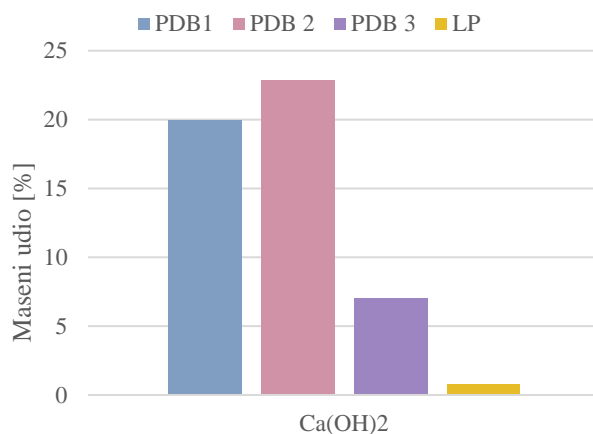
M3 – masa uzorka nakon 24 sata od početka ispitivanja, u kg

## 5.5 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

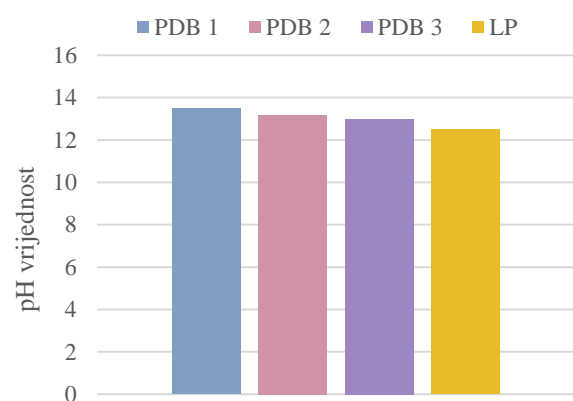
### 5.5.1 Ispitivanje veziva

#### 5.5.1.1 Kemijske analize pepela

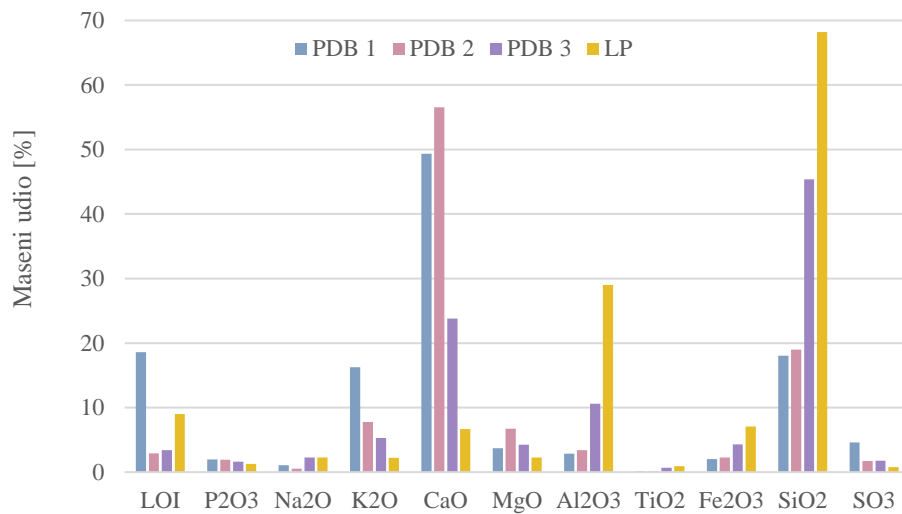
Na slici 29 prikazane su usporedbe sadržaja portlandita, pH vrijednosti te kemijskih sastava za sva tri PDB-a i LP. Pepeo sa najvećim masenim udjelom slobodnog kalcijevog hidroksida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) je PDB 2, kako je i vidljivo na slici 29a. Slijedi ga PDB 1 sa nešto manjom vrijednosti, dok PDB 3 ima izrazito nisku vrijednost. Na slici 29b uočavamo da nema značajnih varijacija u pH vrijednosti za tri PDB-a i LP. Sve vrijednosti su u rasponu od 12,5 do 13,5. Kao PDB sa najvećom pH vrijednosti pokazao se PDB 1, dok najmanju vrijednost ima PDB 3. Na slici 29c prikazani su maseni udjeli pojedinih kemijskih spojeva PDB-a i LP. Usporedbom dobivenih rezultata sa podacima kemijskog sastava hidrauličnog vapna prikazanog u tablici 3, zaključujemo da je PDB koji je najbliži hidrauličnom vapnu PDB 2. Vrijednosti  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  su unutar preporučenih granica za HL, dok je gubitak žarenjem (LOI) nešto manji od preporučene vrijednosti. Slijedi ga PDB 1 koji ima sniženi udio  $\text{CaO}$  u odnosu na PDB 2, ali zadovoljava sve ostale uvjete za HL. PDB 3 ima izrazito nisku vrijednost masenog udjela  $\text{CaO}$ , i to više od upola manju od preporučene vrijednosti za HL, ali u usporedbi sa PDB1 i PDB 2 ima povećane udjele  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Niži udio  $\text{Ca(OH)}_2$  te izražen udio  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  kod PDB 3 ukazuju da je on kemijskim sastavom sličniji LP.



a) Sadržaj slobodnog kalcijevog hidroksida



b) pH vrijednost

c) *Kemijski sastav*

Slika 29. Usporedba PDB-a i letećeg pepela iz ugljena prema: a) sadržaju slobodnog kalcijevog hidroksida, b) pH vrijednosti, c) kemijskom sastavu

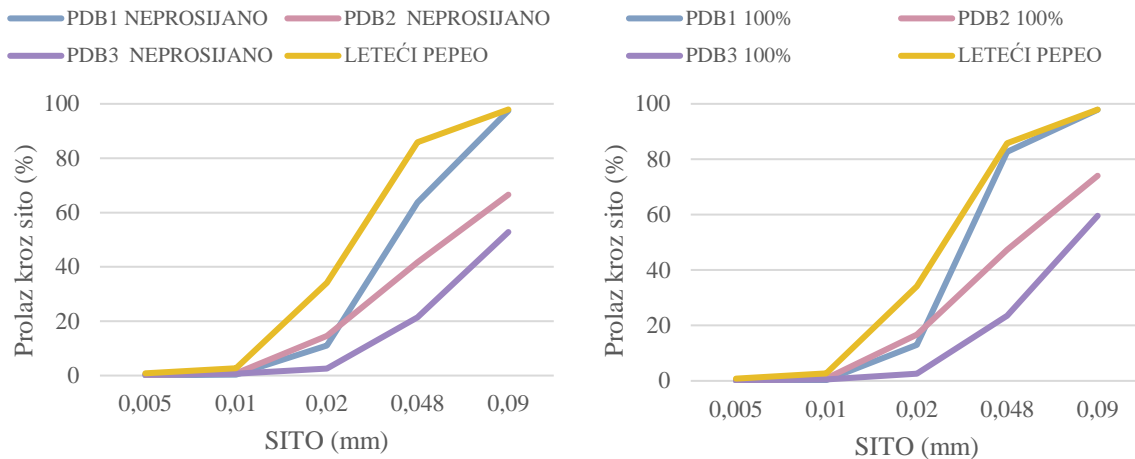
Usporedbom rezultata kemijske analize PDB-a prije i nakon prosijavanja, prikazanoj na slici 30, nisu uočene znatne razlike u sadržaju pojedinih kemijskih spojeva. Uočen je manji pad udjela CaO nakon prosijavanja kod pepela PDB 1 i PDB 3, a rast kod PDB 2. Udio SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nakon prosijavanja se povećao za PDB 1 i PDB 2, a smanjio za PDB 3. Pad vrijednosti LOI nakon prosijavanja uočen je kod PDB 1, dok je kod PDB 2 i PDB 3 vrijednost porasla. Međutim, treba imati na umu da ove razlike mogu biti posljedica uzorkovanja, što je jedan od bitnih nedostataka ovih materijala. Budući da se svaki PDB sastoji od čestica različitog porijekla i težine, prije samog uzorkovanja važno je osigurati homogeniziranost samog materijala.



Slika 30. Usporedba kemijskog sastava PDB-a prije i nakon prosijavanja

### 5.5.1.2 Određivanje veličine čestica air-jet metodom

Određivanje veličine čestica air-jet metodom obavljeno je na tri uzorka neprosijanih PDB-a, prosijanom PDBu, LP, te na svim vrstama veziva koje su korištene u pripremi pasta i mortova. Na slici 31 prikazana je usporedba granulometrije uzoraka PDB-a prije i nakon prosijavanja sa uzorkom LP iz ugljena. Vidljivo je da su se kod sva tri uzorka prosijavanjem PDB-a povećali postotci prolaza kroz sita, što je najizraženije za sita otvora 0.048 i 0.09 mm. Određivanjem veličine čestica potvrđeno je da je PDB koji je granulometrijom najbliži LP upravo PDB 1, koji je i prije prosijavanja imao vidljivo najfinije čestice. Iako se prosijavanjem PDB 2 i PDB 3 uspjelo eliminirati više od 6% čestica koje ne prolaze sito otvora 0.09 mm, ostatak na situ i dalje ne zadovoljava kriterij za klasifikaciju kao HL propisan normom HRN EN 459-1 2010.

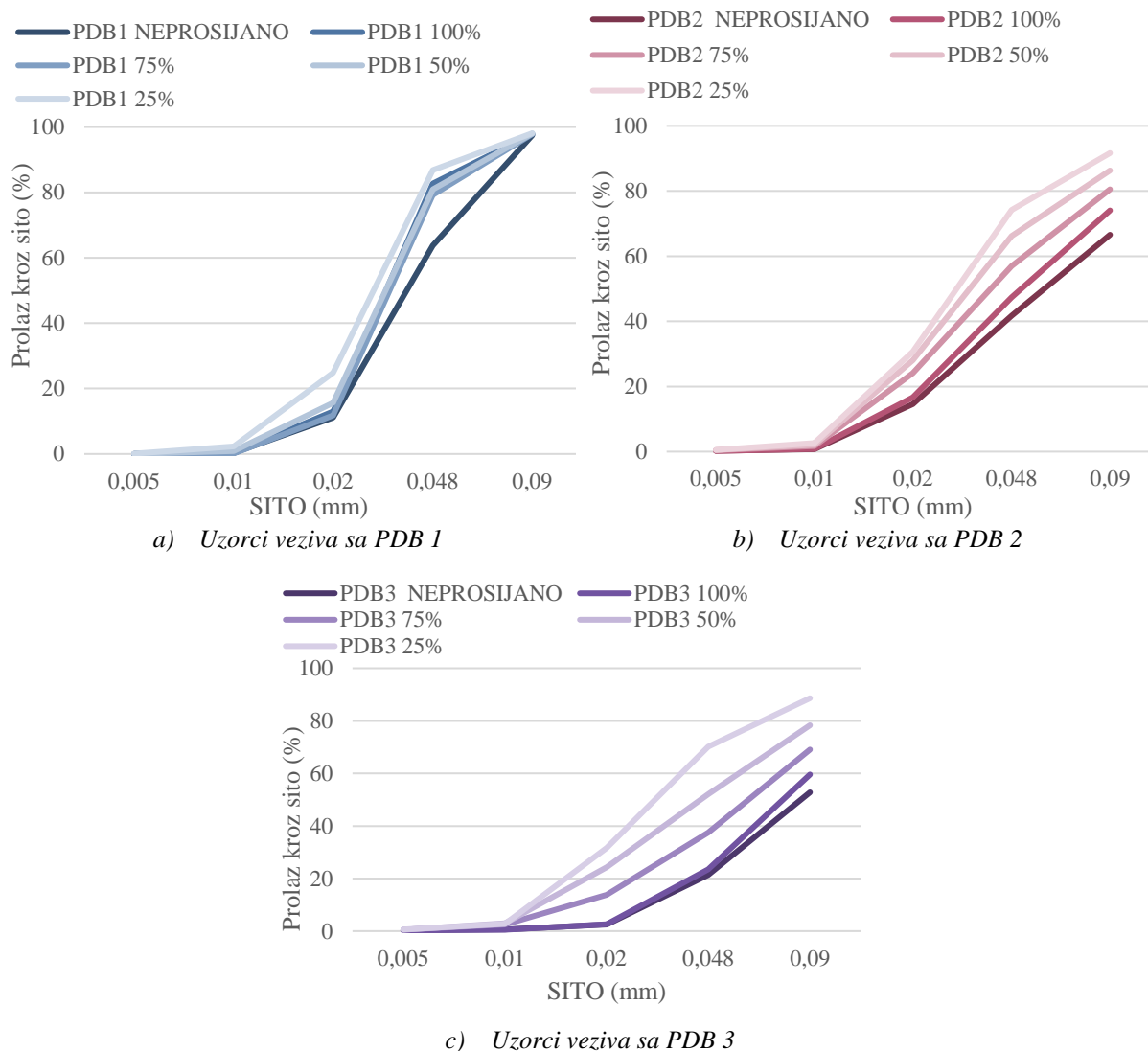


a) Neprosijani uzorci PDB-a i leteći pepeo iz ugljena

b) Prosijani uzorci PDB-a i leteći pepeo iz ugljena

Slika 31. Usporedba granulometrije PDB-a i letećeg pepela iz ugljena

Miješanjem PDB-a sa LP u svrhu pripreme veziva za daljnja ispitivanja rezultiralo je finijom granulometrijom, što je vidljivo na slici 32. Broj uz oznaku pepela na dijagramu označava maseni postotak PDB-a u vezivu, dok je ostatak do 100% nadomješten LP-om. Na slici 32a prikazani su granulometrijski dijagrami za veziva sa PDB 1 i vidljivo je da nagibi pravca nisu znatno promijenjeni dodatkom LP jer je PDB 1 granulometrijom njemu najbližiji, izražena je samo promjena granulometrije između uzoraka sa neprosijanim i prosijanim PDB-om. Sva veziva sa PDB 1 zadovoljavaju prolaz kroz sito otvora 0.09 mm propisan normom HRN EN 459-1, a doprinos dodatka LP u koracima od 25 % na navedeni prolaz kroz sito je oko 0.1%. Veća promjena u granulometriji prilikom dodavanja LP uočena je kod PDB 2 i PDB 3 što je prikazano redom na slikama 32b i 32c. Miješanjem ta dva PDB-a sa LP povećan je postotak prolaza kroz sita, te je kod dva veziva sa PDB 2 i jednim vezivom sa PDB 3 zadovoljen prolaz kroz sito otvora 0.09 mm propisan normom HRN EN 459-1. Doprinos dodatka LP u koracima od 25 % na navedeni prolaz kroz sito za PDB 2 varira između 5.4% i 6.5% , a za PDB 3 između 9.5% i 10.3 %.



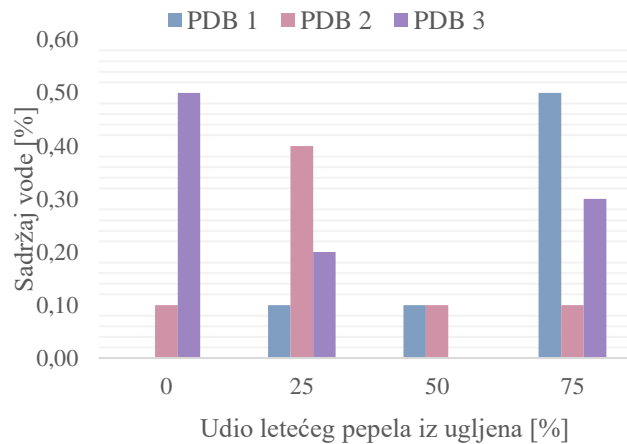
Slika 32. Granulometrijski dijagrami

### 5.5.1.3 Određivanje sadržaja slobodne vode

Na sadržaj slobodne vode u vezivima utjecali su načini izgaranja PDB-a i LP te postupak njihovog skladištenja nakon proizvodnje. Na slici 33 prikazan je udio slobodne vode u svim mješavinama veziva, u ovisnosti o masenom dodatku LP-a. Iako je uočena nelinearna raspodjela sadržaja vode u ovisnosti o dodatku LP-a, podatak je koristan za procjenu vlažnosti PDB-a koja utječe na njegovu potrebu za vodom u mješavinama pasta i mortova. PDB 1 sa 0% LP nije imao slobodne vode, te je rast istoga primijećen dodavanjem LP-a, ali linearnu ovisnost između povećanja udjela slobodne vode i LP u koracima od 25% nije moguće uspostaviti. Kod PDB 2 također ne postoji spomenuta linearna zavisnost, ali svi uzorci imaju određeni udio slobodne vode. PDB 3 bez dodatka LP je vezivo sa najvećim udjelom slobodne vode u usporedbi sa drugim vezivima bez dodatka LP, ali i kod njega ne postoji linearna zavisnost što je najizraženije podatkom da PDB 3 sa dodatkom od 50 % LP nema slobodne vode. Sva veziva imaju



sadržaj slobodne vode u iznosu od 0% do 0.5% masenog udjela veziva, što zadovoljava kriterij za klasifikaciju kao HL propisan normom HRN EN 459-1

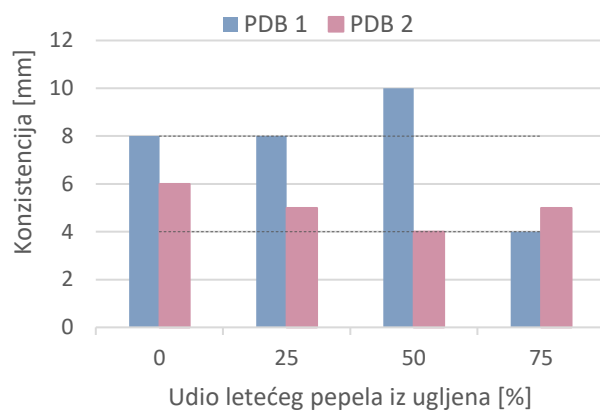


Slika 33. Sadržaj slobodne vode

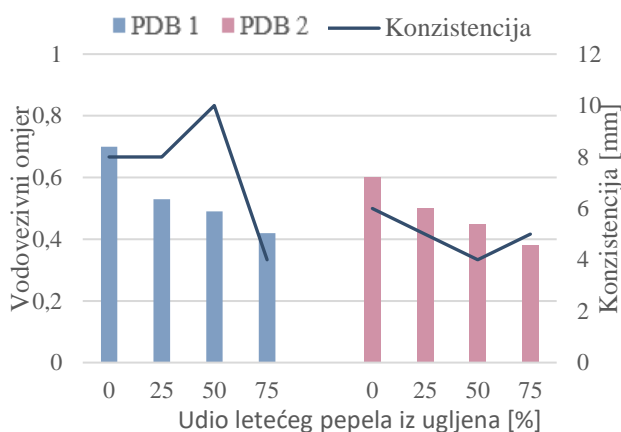
## 5.5.2 Ispitivanja pasta

### 5.5.2.1 Ispitivanje početka i kraja vezivanja

Za potrebe ispitivanja početka i kraja vezivanja pasta pripremljene su mješavine uzimajući u obzir propisanu vrijednost normirane konzistencije od  $185 \pm 3$  mm propisane normom HRN EN 459-2:2010 koju je potrebno ostvariti. Na slici 34 prikazane su dobivene vrijednosti konzistencija pasta sa PDB 1 i PDB 2, te maksimalna i minimalna vrijednost normirane konzistencije koje su prikazane sa dvije crtkane horizontalne linije. S obzirom na nelinearan odnos sadržaja slobodne vode u pastama prikazan prethodno na slici 33, normiranu konzistenciju nije bilo moguće odrediti bez izrade probnih mješavina i interpoliranja vrijednosti vodovezivnog omjera i konzistencije paste. Uočeno je da povećanje udjela LP u pastama rezultira smanjenom potrebom za vodom. Na slici 35 prikazane su usporedbe vodovezivnih omjera pasta sa postignutom konzistencijom gdje je vidljivo da je vrijednost konzistencije paste sa PDB 1 i 50% LP veća od ostalih vrijednosti iako se vodilo računa o smanjenju vodovezivnog omjera proporcionalno povećanju udjela LP. Iz tog razloga, dobivena vrijednost konzistencije paste sa PDB 1 i 50 % LP je prihvaćena iako nije u granici normirane konzistencije. Sve ostale paste su u granicama normirane konzistencije koja iznosi 4 do 8 mm, a na slikama je označena crtkanom linijom.

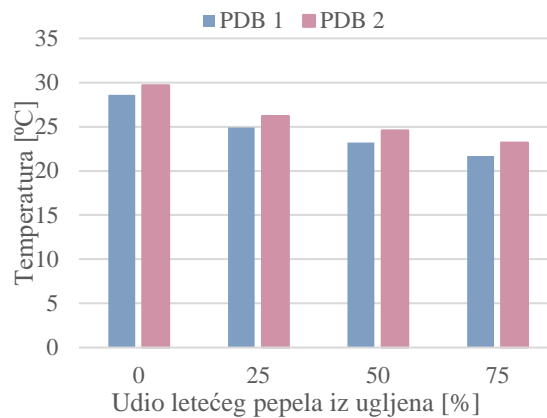


Slika 34. Konzistencija paste



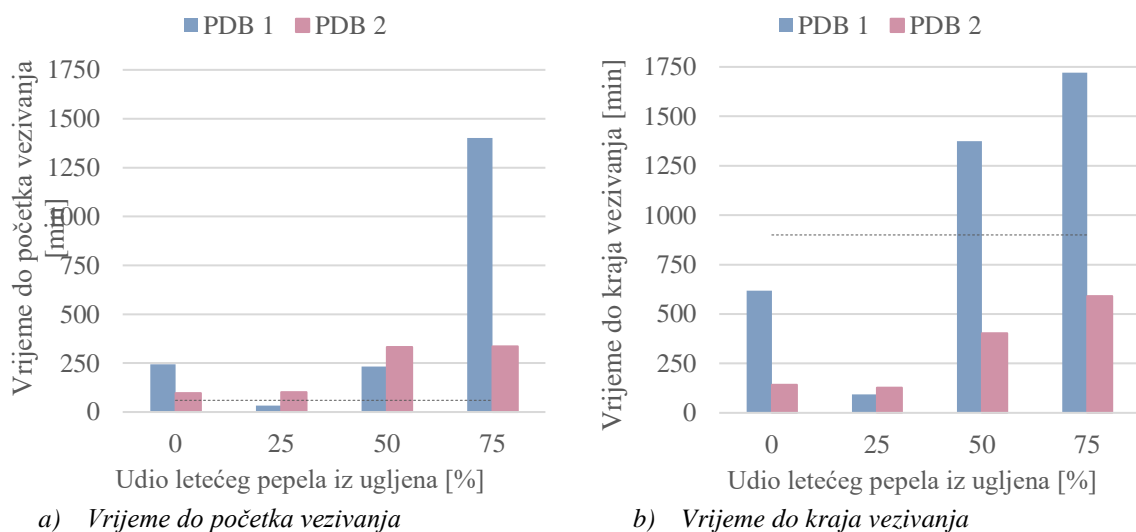
Slika 35. Usporedba vodovezivnog omjera i konzistencije paste

Prilikom miješanja pasta uočena je povećana potreba za vodom za ostvarivanje ciljane obradivosti, ali je primijećeno i izdvajanje vode nekoliko minuta nakon prestanka miješanja, što je posebno izraženo kod uzoraka sa PDB 2. Unatoč ostvarivanja ciljane obradivosti, primijećeno je da uzorci već kroz 5 minuta znatno gube na obradivosti i da je otežana ugradnja u kalupe za daljnja ispitivanja vremena vezivanja i postojanosti volumena. Uočeno je i da se gubitak obradivosti smanjuje sa povećanjem udjela LP u mješavinama. Utjecaj navedenog je umanjen laganim udaranjem u kalupe s ciljem njihovog potpunog popunjavanja. Brzi gubitak obradivosti pripremljenih pasta može se objasniti pojavom tzv. lažnog vezivanja, tj. gubitka plastičnosti koji nije trajan i potrebno ga je razlikovati od pravog vezivanja. U prilog toj činjenici idu i podaci o temperaturama pasta izmjerenih neposredno nakon miješanja prikazanih na slici 36. Vidljiv je linearan pad temperature proporcionalan sa povećanjem udjela LP u mješavinama, što je rezultat niže topline hidratacije LP.



Slika 36. Temperatura svježe paste

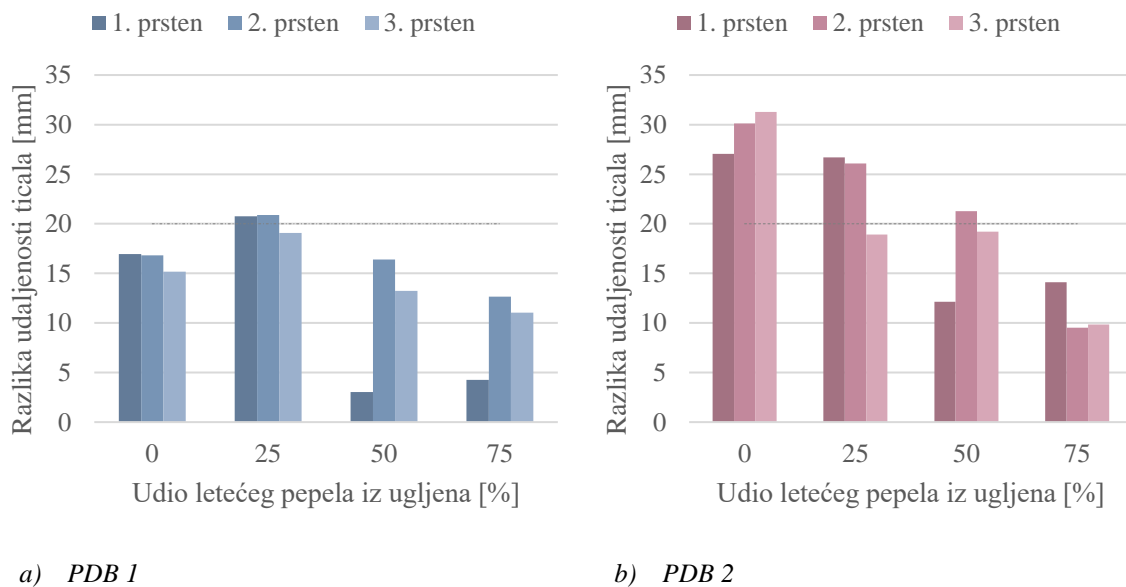
Nakon postizanja potrebne konzistencije, paste su ugrađene u kalupe i praćeno je vrijeme do početka i do kraja vezivanja, a dobiveni rezultati iskazani su na slici 37. Slika 37a prikazuje vrijeme do početka vezivanja, a crtkana horizontalna linija predstavlja kriterij za minimalno vrijeme definirano normom HRN EN 459-1 koje je potrebno ostvariti kako bi klasificirali veziva kao HL. Slika 37b prikazuje vrijeme do kraja vezivanja, ali u ovom slučaju horizontalna crtkana linija predstavlja maksimalno vrijeme koje se može ostvariti. Rezultati ispitivanja za tri paste sa PDB 1 ne zadovoljavaju kriterije iz navedene norme. Kod svih uzoraka pasta uočeno je smanjenje vremena do početka i kraja vezivanja sa dodavanjem 25% LP u usporedbi s uzorcima bez LP, ali daljnjim povećanjem udjela LP dolazi do ponovnog povećanja istog. Produljenje vremena vezivanja proporcionalno povećanju udjela LP može se objasniti inernošću LP-a u ranoj fazi procesa hidratacije [49][50].



Slika 37. Vrijeme vezivanja paste

### 5.5.2.2 Ispitivanje postojanosti volumena

Svi uzorci paste su neposredno nakon miješanja ugrađeni u Le Chatelierove prstenove, a razlika udaljenosti ticala prije i nakon procesa kuhanja prikaza je na slici 38. Za svaku mješavinu iskazane vrijednosti za sva 3 prstena. Na slici 38a prikazani su rezultati za sve mješavine sa PDB 1, a na slici 38b za sve mješavine sa PDB 2. Crtkana horizontalna linija na slikama predstavlja maksimalnu vrijednost razmaka ticala koju uzorak smije ostvariti, a koja je definirana normom HRN EN 459-1 za HL. Ukoliko jedna od ukupno tri vrijednosti po mješavini ne zadovoljava kriterij, uzima se da mješavina ne zadovoljava. Sukladno tome, vidljivo je da ovaj kriterij ne zadovoljavaju uzorak PDB 1 sa 25% LP, te uzorci PDB 2 sa dodatkom od 0%, 25% i 50 % LP-a. Također je vidljivo i da uzorci sa PDB 2 imaju veće vrijednosti navedenog parametra ako promatramo cijelu seriju uzoraka, pa je za očekivati da će kod mortova sa PDB 2 biti izraženije bubrenje uzoraka prilikom očvršćivanja.



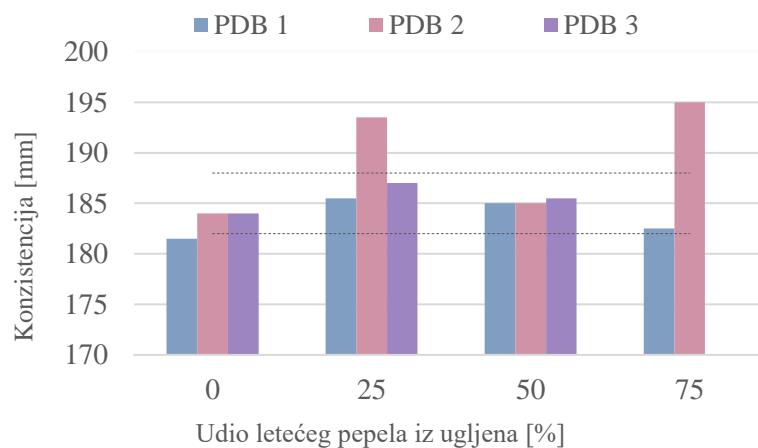
Slika 38. Razlika udaljenosti ticala Le Chatelierovih prstenova prije i nakon kuhanja

### 5.5.3 Ispitivanja mortova

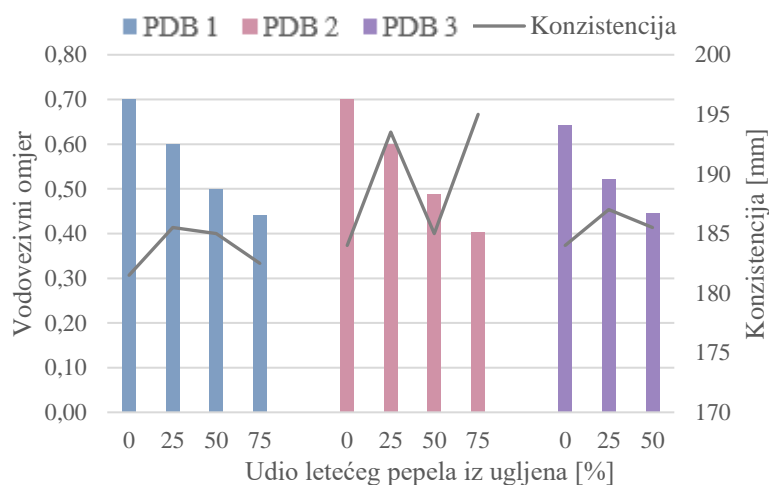
#### 5.5.3.1 Određivanje konzistencije svježeg morta

Prilikom pripremanja svih 11 mješavina mortova cilj je bio postići vrijednost normirane konzistencije radi lakše interpretacije rezultata. Podaci o vodovezivnim omjerima pasta, prikazani u tablici 8, poslužili su za procjenu vodovezivnog omjera mortova potrebnih za ostvarivanje normirane konzistencije. Pripremljene su probne mješavine te su interpolirani rezultati vodovezivnih omjera mortova sa

ostvarenim vrijednostima konzistencije. Vrijednosti konzistencija dobivenih rasprostiranjem mortova prikazani su na slici 39, gdje dvije crtkane horizontalne linije predstavljaju minimalnu i maksimalnu vrijednost normirane konzistencije. Vidljivo je da je vrijednost konzistencije morta sa PDB 1 i 0% LP manja od minimalne vrijednosti normirane konzistencije, a za mortove sa PDB 2 i dodatkom od 25% i 75% LP veća od maksimalne vrijednosti normirane konzistencije. Sve ostale vrijednosti su u granicama normirane konzistencije. Na slici 40 prikazana je usporedba vodovezivnog omjera mortova i postignutih vrijednosti konzistencija gdje je vidljivo da se ne može doći do jedinstvenog zaključka koji bi definirao potreban korak smanjenja vodovezivnog omjera sa povećanjem udjela LP, a da vrijednost konzistencije i dalje ostane u granicama normirane konzistencije. Iz tog razloga, sve dobivene vrijednosti konzistencija su prihvaćene i sva daljnja ispitivanja su provedena.

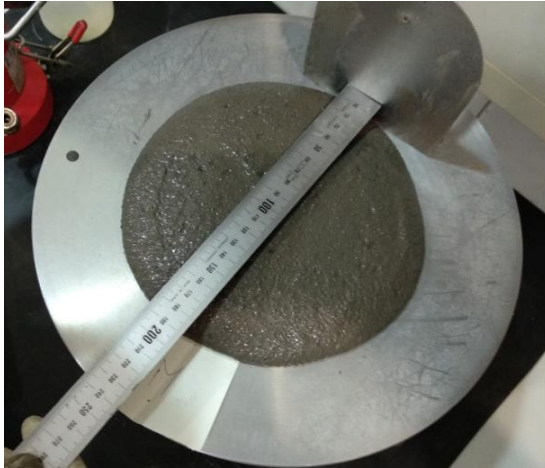


Slika 39. Konzistencija svježeg morta



Slika 40. Usporedba vodovezivnog omjera i konzistencije morta

Prilikom ispitivanja konzistencije morta, uočeno je povećano izdvajanje vode kod mješavina sa pepelom PDB 2 i PDB 3, kako je vidljivo na slici 41. Sa povećanjem udjela LP u mješavini, navedena pojava je reducirana.



a) PDB 1



b) PDB 2



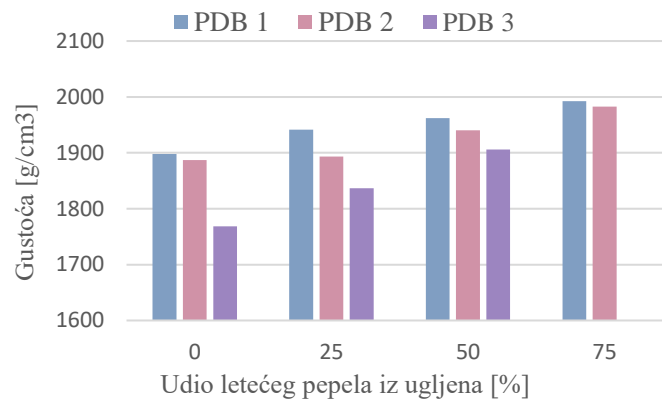
c) PDB 3

*Slika 41. Izdvajanje vode*

### *5.5.3.2 Određivanje gustoće svježeg morta*

Rezultati ispitivanja gustoće svježeg morta prikazani su na slici 42. Može se uočiti da su najveće vrijednosti gustoća postigli mortovi sa PDB 1 dok su najmanje vrijednosti kod mortova sa PDB 3. Vidljivo je i da gustoće rastu proporcionalno sa povećanjem udjela LP. To se može objasniti ako se vrijednosti gustoća usporede s granulometrijskim dijagramima veziva prikazanim u poglavlju 5.5.1.1. PDB s najfinijom granulometrijom je upravo PDB 1 pa je to rezultiralo sa najvećim vrijednostima gustoća, dok najmanju vrijednost gustoće ima PDB 3 koji ujedno ima i najkrupniju granulometriju.

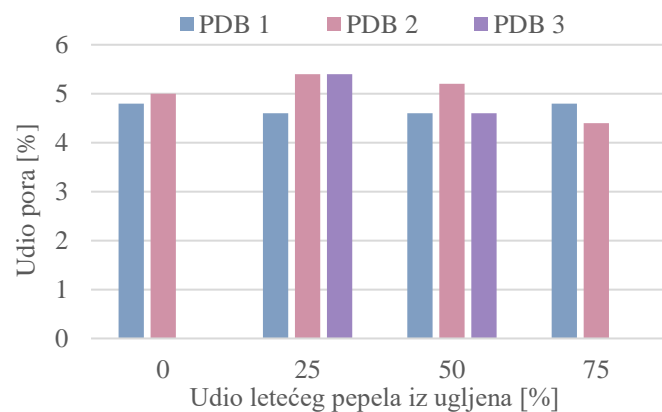
Navedeno je u skladu i s dosadašnjim ispitivanjima [44] provedenim na mortovima s PDB-om. S obzirom da LP ima finije čestice od sva tri PDB-a to rezultira i rastom gustoće morta proporcionalno s povećanjem udjela LP.



Slika 42. Gustoća svježeg morta

### 5.5.3.3 Određivanje udjela pora svježeg morta

Normom HRN EN 459-2 definirana je gornja vrijednost udjela pora u svježem mortu koja iznosi 25%. Sve pripremljene mješavine zadovoljavaju zadani uvjet, kako je i vidljivo na slici 43 gdje su prikazane vrijednosti udjela pora u 10 mješavina mortova. Za mješavinu sa PDB 3 bez dodatka LP nije bilo moguće odrediti navedeni parametar. Sve vrijednosti su u rasponu od 4,4% do 5,4%. Analizom prikazanog dijagrama nije uočena linearna ovisnost udjela pora i povećanja udjela LP u mješavinama, kao ni ovisnost udjela pora o granulometriji pojedinih PDB-a.

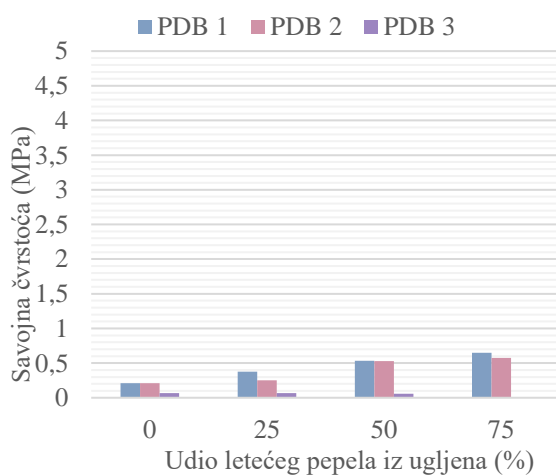


Slika 43. Sadržaj pora svježeg morta

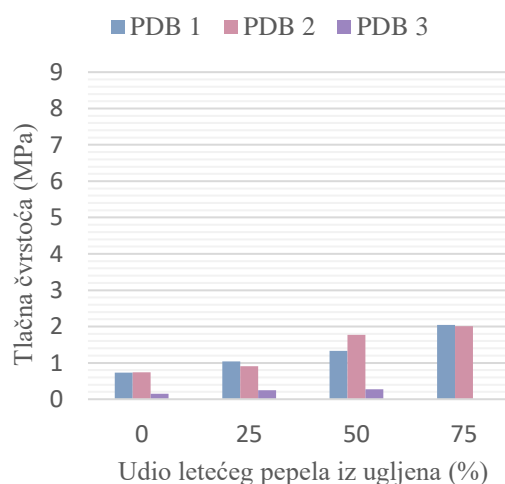
#### 5.5.3.4 Savojna i tlačna čvrstoća očvrstnalog morta

Srednje vrijednosti savojnih i tlačnih čvrstoća očvrstnalih mortova nakon 7 i 28 dana prikazane su na slici 44. Kod svih uzoraka vidljivo je povećanje vrijednosti savojne i tlačne čvrstoće proporcionalno povećanju udjela LP, što je rezultat reakcije oksida iz LP sa portlanditom ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) iz vapna pri čemu nastaju produkti hidratacije koji su zaslužni za razvoj čvrstoće. Ako usporedimo sadržaj portlandita pojedinih pepela, koji je prikazan na slici 29a, sa rezultatima savojnih i tlačnih čvrstoća mortova vidljivo je da PDB 2 koji ima najveći maseni udio portlandita razvija i najveće čvrstoće, a slijedi ga PDB 1. Kod svih uzoraka PDB 3 dobivene su izrazito niske vrijednosti savojnih i tlačnih čvrstoća, što je rezultat i njegovog nepovoljnog kemijskog sastava u usporedbi sa ostala dva PDB-a. Nadalje, usporedbom tlačnih čvrstoća nakon 28 dana starosti mortova bez dodatka LP i mortova s dodatkom 50% LP, može se uočiti da vrijednosti tlačne čvrstoće mortova s 50 % LP su otprilike 2,5 puta veće od tlačnih čvrstoća mortova bez dodatka LP za PDB 1, a 3 puta veće za PDB 2, što je u skladu sa rezultatima dosadašnjih ispitivanja [44]. Kod mortova s PDB 3 nije uočena takva ovisnost.

Povećanje vrijednosti čvrstoće proporcionalno sa povećanjem udjela LP, osim zbog kemijskog sastava PDB-a i LP, rezultat je i finije granulometrije LP koja rezultira povećanjem gustoće morta proporcionalno sa povećanjem udjela LP, kako je i prikazano na slici 45. Ovi rezultati poklapaju se s već obavljenim ispitivanjima [40], gdje je također uočen porast tlačne čvrstoće u vapnenim mortovima s povećanjem finoće mliva veziva.

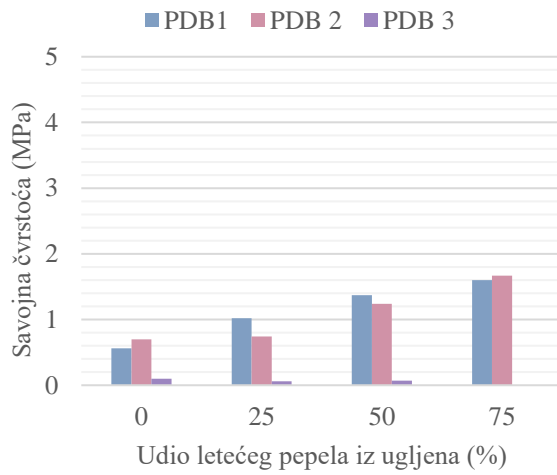


a) Savojna čvrstoća nakon 7 dana

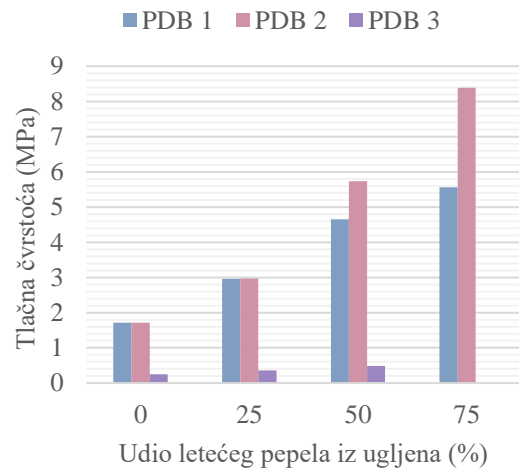


b) Tlačna čvrstoća nakon 7 dana



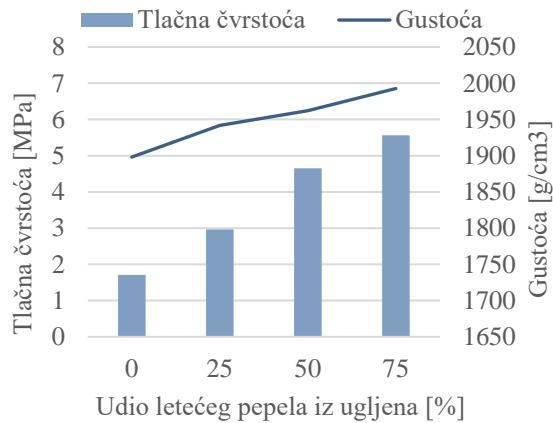


c) Savojna čvrstoća nakon 28 dana

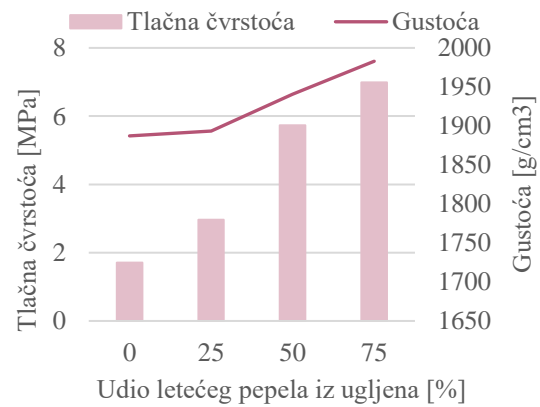


d) Tlačna čvrstoća nakon 28 dana

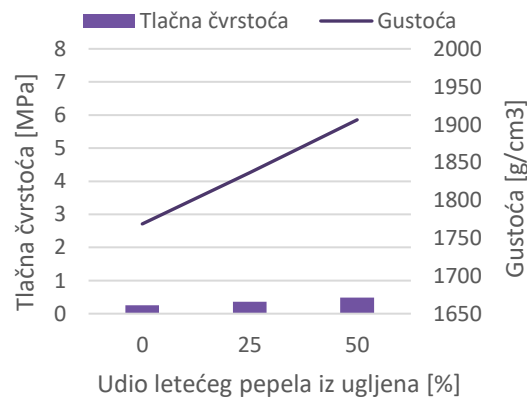
Slika 44. Savojna i tlačna čvrstoća očvrstlog morta



a) PDB 1



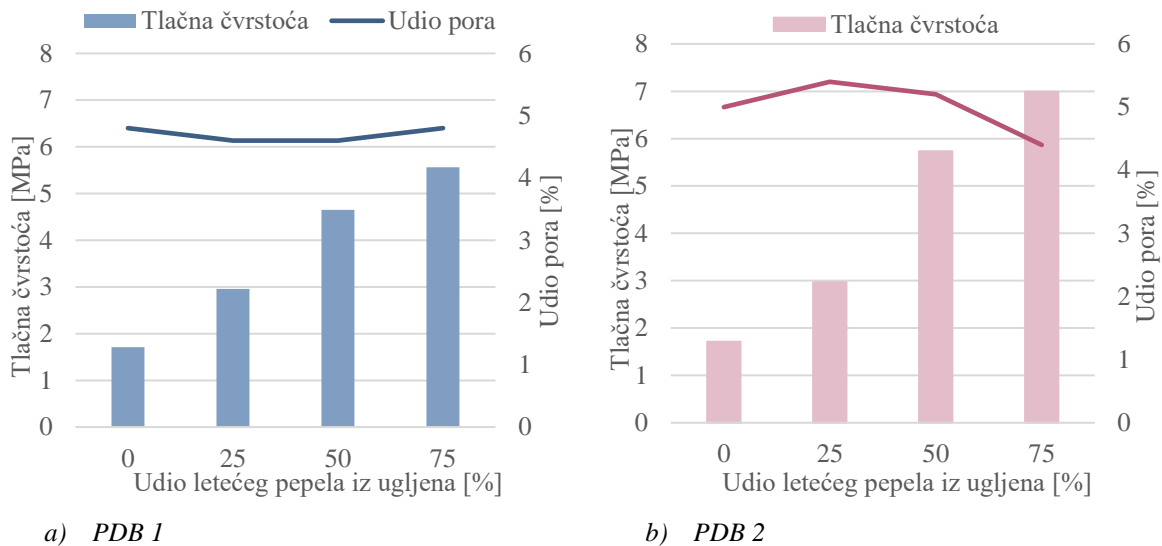
b) PDB 2



c) PDB 3

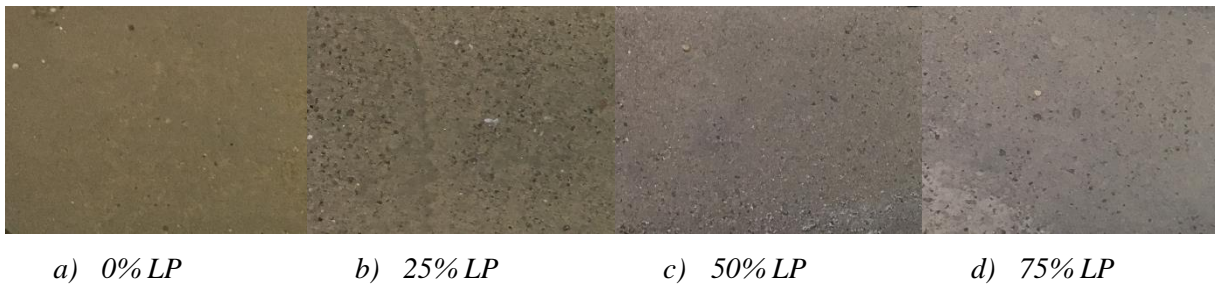
Slika 45. Usporedba 28-dnevne tlačne čvrstoće sa gustoćom svježeg morta

Zbog već spomenutog nepostojanja linearne zavisnosti udjela pora u svježem mortu o dodatku LP, uočava se isto kod usporedbe udjela pora sa tlačnim čvrstoćama morta što je prikazano na slici 46. Rezultati sa PDB 3 nisu prikazani zbog manjka rezultata jedne mješavine o udjelu pora.

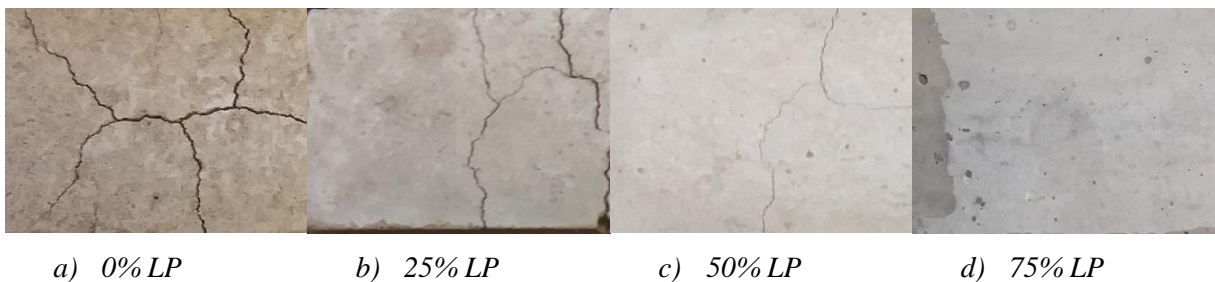


Slika 46. Usporedba 28-dnevne tlačne čvrstoće sa udjelom pora u svježem mortu

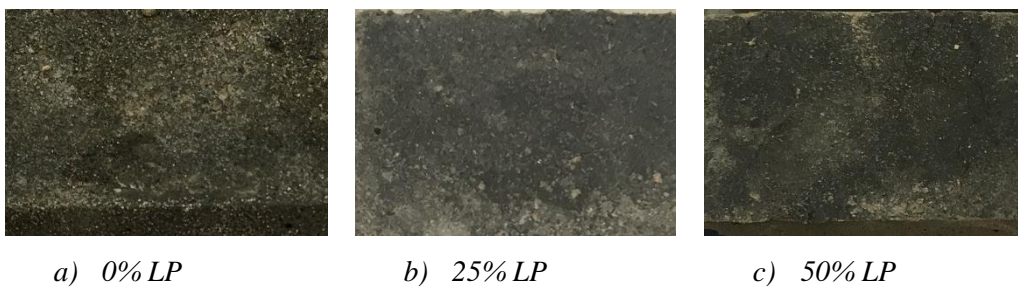
Potrebno je i istaknuti i razliku u boji mortova ovisno o korištenom tipu PDB-a, kao i o povećanju udjela LP u mješavinama. Na slikama 47, 48 i 49 prikazan je izgled površine uzoraka neposredno prije ispitivanja 28-dnevne savojne i tlačne čvrstoće morta. S obzirom na različitu boju PDB-a, mortovi sa 100 % PDB-a i 0% LP imali su boju sličnu izvornoj boji pepela. Povećanjem udjela LP u mješavinama, boja uzorka je postala sličnija boji LP-a. Kod uzorka sa PDB 2, što je vidljivo na slici 48, uočen je i znatan broj površinskih pukotina u usporedbi sa uzorcima sa PDB 1 i PDB 3 kod kojih navedene pojave nema. Broj pukotina se smanjivao sa povećanjem udjela LP, što se poklapa sa rezultatima ispitivanja volumne postojanosti paste koji su pokazali da PDB 2 ima izraženo bubrenje i da se ono smanjuje sa povećanjem udjela LP u pastama. Osim udjela LP u mješavinama, na pojavu pukotina utjecali su i uvjeti skladištenja uzoraka. To je najizraženije kod uzorka sa 100 % PDB 2 i 0% LP, što je prikazano na slici 50. Vidljivo je da je smanjeni udio vlage u kondicioniranoj komori, u kojoj su se skladištili uzorci za ispitivanje kapilarne vodoupojnosti, rezultirao većim brojem pukotina.



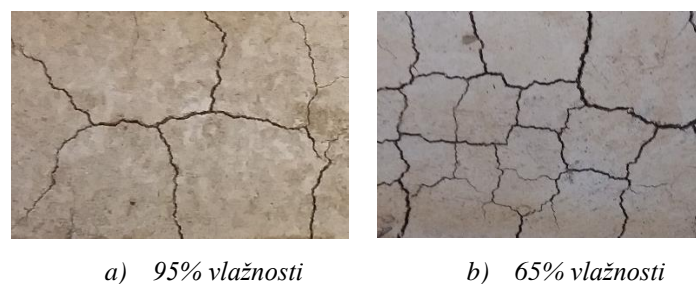
Slika 47. Izgled i tekstura površine očvrsljih uzoraka s PDB 1



Slika 48. Izgled i tekstura površine očvrsljih uzoraka s PDB 2



Slika 49. Izgled i tekstura površine očvrsljih uzoraka s PDB 3



Slika 50. Razlika u broju pukotina kod uzorka sa 100 % PDB 2 ovisno u uvjetima skladištenja

### 5.5.3.5 Koeficijent kapilarne vodoupojnosti za mortove

Za ispitivanje koeficijenta kapilarne vodoupojnosti predviđeno je 6 uzoraka po mješavini, ali neke od mješavina imaju manje uzoraka jer je dio njih odbačen zbog nepravilnih površina loma. Pratio se prirast mase pojedinih uzoraka svake mješavine u ovisnosti o vremenu, što je prikazano na slikama 52, 53 i 54,

redom za PDB 1, PDB 2 i PDB 3. Za sva 3 pepela vidljivo je da se povećanjem udjela LP smanjuje prirast mase uzorka. To se može objasniti povećanjem gustoće mortova proporcionalno povećanju udjela LP, što je rezultat njegove finije granulometrije.

Svi uzorci sa PDB 1 i PDB 2, prikazani redom na slikama 20 i 21, imaju izraženo početno upijanje u periodu od 10 minuta nakon čega slijedi manji prirast mase do sljedećeg mjerenja nakon 90 minuta. Prilikom tog mjerenja uočeno je da se na gornjoj plohi uzorka nazire vode i da je uzorak poprilično saturiran. Nakon isteka 24 sata, ti uzorci su prepolovljeni i dokazano je da je prodor vode potpun. Kod morta s PDB 2 bez udjela LP, prirasti mase u vremenu za dva uzorka se bitno razlikuju od ostalih uzoraka što je vidljivo na slici 53a, pa se ti rezultati mogu odbaciti.

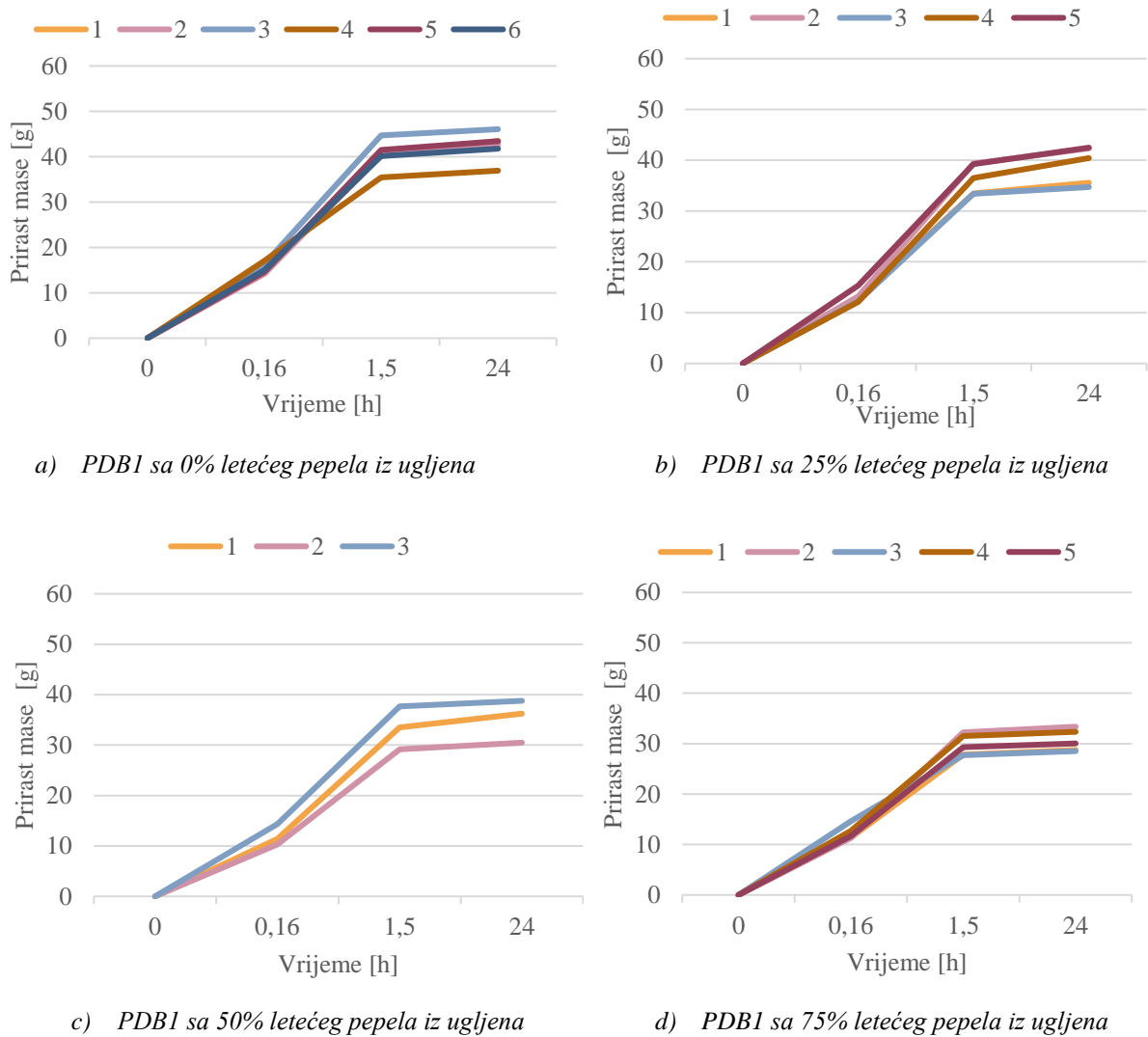
Kod uzoraka sa PDB 3, prikazanih na slici 22, uočen je najbrži prirast mase. Dva uzorka iz te serije, sa dodatkom 0% i 25 % LP, već nakon 10 minuta su na gornjoj plohi vidljivo mokra, dok je to isto uočeno nakon 15 minuta i kod trećeg uzorka sa 50% LP. Ispitivanje je prekinuto prilikom sljedećeg mjerenja mase, 90 minuta nakon početka ispitivanja, kada je cijepanjem uzorka dokazan potpuni prodor vode. Kao masa uzorka nakon 24 sata uzeta je ista vrijednost mase dobivena nakon 90 minuta jer se pretpostavilo da, zbog potpunog zasićenja, uzorak ne bi upio više vode. Prilikom cijepanja uzoraka okomito na smjer ugradnje, kod uzoraka sa PDB 3 uočena je pojava segregacije što je i vidljivo na slici 51.



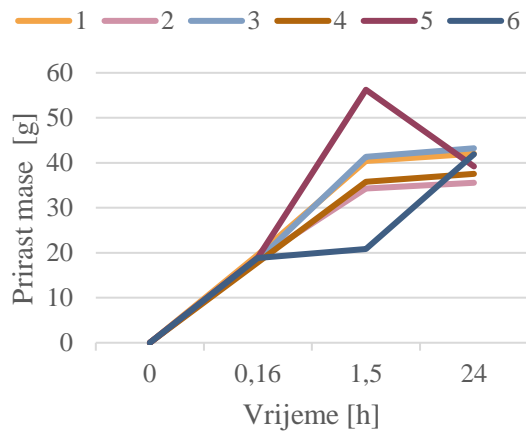
*Slika 51. Segregacija kod uzoraka sa PDB 3*

Prirast mase je najsporiji za mortove sa PDB 1 koji ima najfiniju granulometriju, a najbrži za PDB 3 koji ima najkrupniju granulometriju. Ovi rezultati razlikuju se od rezultata dosadašnjih ispitivanja [44], prema kojima bi mortovi s najfinijim PDB-om trebali imati više otvorenih pora i veći poroznost, odnosno brže upijanje vode. Iako mortovi s PDB 1 najsporije upijaju vodu, u konačnici upiju najveću količinu vode, dok mortovi s PDB 3 upiju najmanje. Te razlike u količini upijene vode nisu velike i iznose svega 10 g, a za njihovo objašnjenje potrebno je proučiti mikrostrukturu samih mortova, u vidu sadržaja otvorenih i zatvorenih pora. Budući da mort s 25% PDB 3 i 75% LP nije pripremljen iz

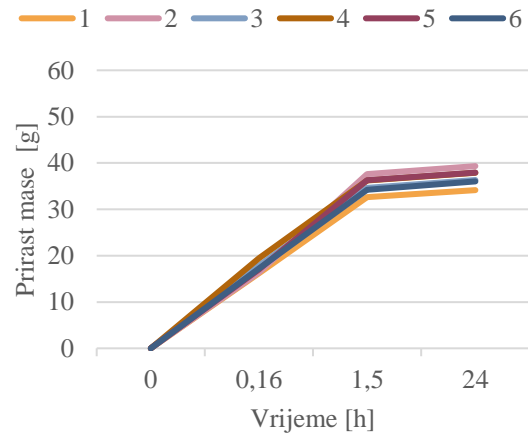
prethodno objašnjenih razloga, a sadržaj zraka u svježem mortu s PDB 3 bez udjela LP nije bilo moguće odrediti, iz rezultata provedenih ispitivanja nije moguće uspostaviti korelaciju između sadržaja pora u svježem mortu i količine upijene vode. Međutim, brže upijanje mortova s PDB 3 moglo bi biti posljedica segregacije prikazane na slici 51.



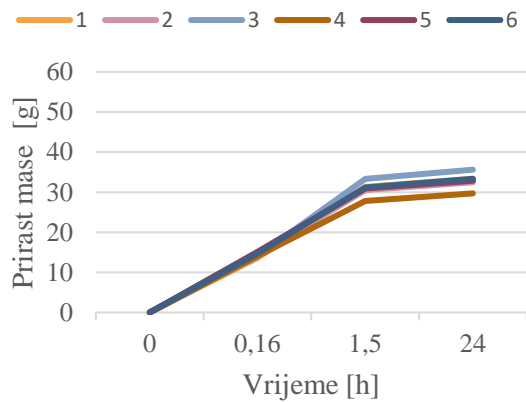
Slika 52 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja za uzorke sa PDB 1



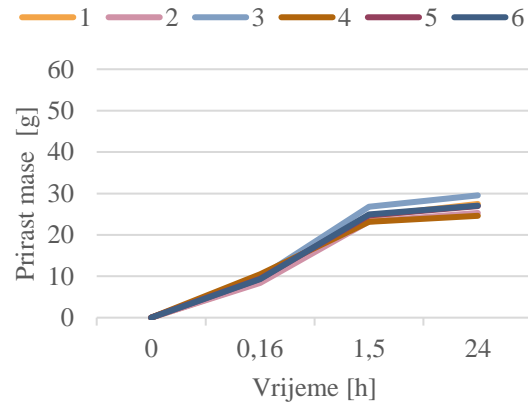
a) PBD2 sa 0% letećeg pepela iz ugljena



b) PBD2 sa 25% letećeg pepela iz ugljena

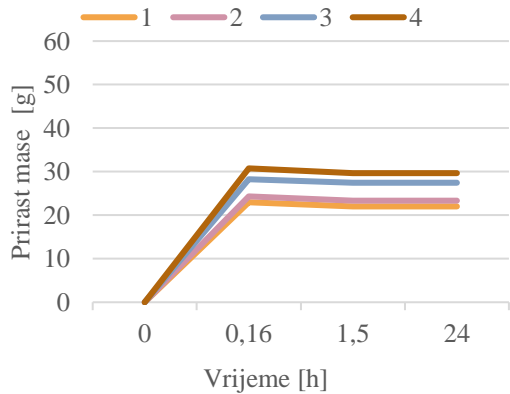


d) PBD2 sa 50% letećeg pepela iz ugljena

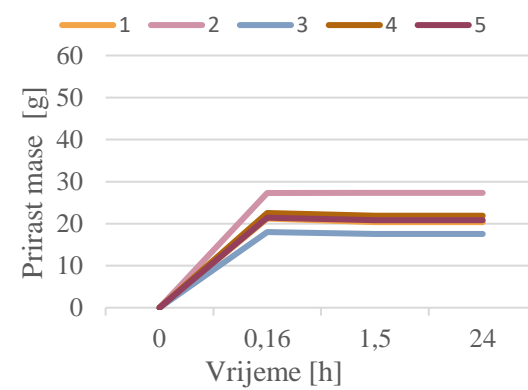


e) PBD2 sa 75% letećeg pepela iz ugljena

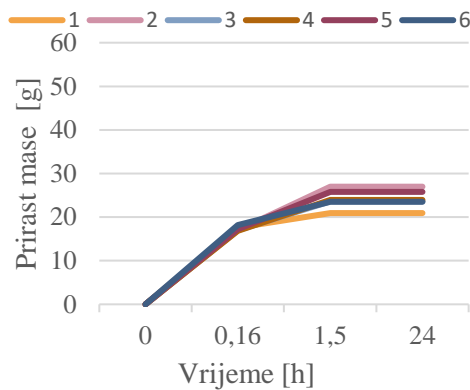
Slika 53 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja za uzorke sa PDB 2



a) PDB 3 sa 0% letećeg pepela iz ugljena



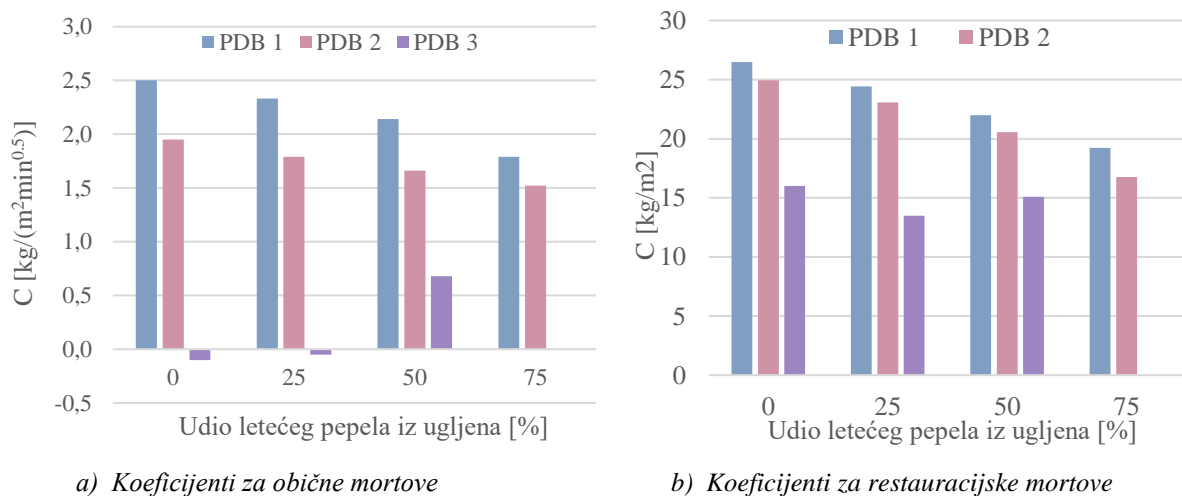
b) PDB 3 sa 25% letećeg pepela iz ugljena



c) PDB 3 sa 50% letećeg pepela iz ugljena

Slika 54. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja za uzorke sa PDB 3

Nakon bilježenja svih masa uzoraka u zadanim vremenima, izračunati su koeficijenti kapilarne upojnosti za obične mortove prikazani na slici 55a, te koeficijenti kapilarne upojnosti za restauracijske mortove prikazani na slici 55b. Ako zanemarimo podatke za PDB 3 koji je pokazao izrazito loša svojstva kapilarne upojnosti, analizom proračunatih koeficijenta za mješavine sa PDB 1 i PDB 2 je vidljivo da dodatak LP poboljšava svojstva kapilarne upojnosti mortova tj. smanjuje vrijednost koeficijenta kapilarne upojnosti. Ako se zanemare podaci za PDB 3 koji je pokazao izrazito loša svojstva kapilarne vodoupojnosti, analizom proračunatih koeficijenta za mješavine sa PDB 1 i PDB 2 je vidljivo da dodatak LP poboljšava svojstva kapilarne upojnosti mortova tj. smanjuje vrijednost koeficijenta kapilarne vodoupojnosti, što se podudara sa dosadašnjim ispitivanjima [43]. Rezultat je to pucolanske reakcije između letećeg pepela i vapna, tijekom koje nastaje dodatna količina C-S-H gela kojim se progušćuje matrica morta, reducira veličina unutarnjih pora te blokiraju kapilarne pore čime se dobiva mort manje propusnosti [34]

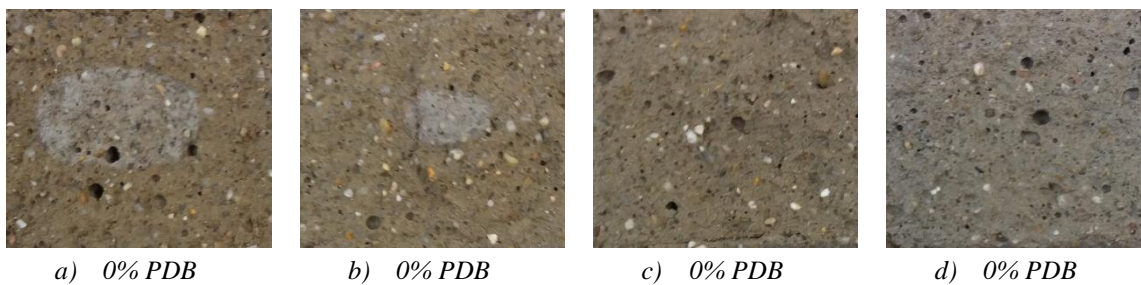


a) Koeficijenti za obične mortove

b) Koeficijenti za restauracijske mortove

Slika 55. Koeficijenti kapilarne vodoupojnosti morta

Nakon nanošenja epoksidnog premaza i cijepanja uzoraka za ispitivanje kapilarne vodoupojnosti, kod uzoraka sa PDB 1 i PDB 2 primijećene su mrlje svjetlije boje u sredini uzorka koje su najizraženije kod uzoraka bez dodatka LP-a i smanjuju se sa povećanjem njegova udjela u mješavini, što je prikazano na slici 56. Potrebno je i naglasiti da se kod navedenih uzoraka nakon završetka ispitivanja kapilarne vodoupojnosti primjetio neugodan miris. Objašnjenje navedene dvije pojave zahtijevaju dodatnu kemijsku analizu uzoraka koja u sklopu ovog rada nije provedena.



*Slika 56. Mrlje u uzorcima sa PDB 1*



## 6. KLASIFIKACIJA PREMA HRN EN 459-2:2010

U tablicama 14, 15 i 16 dana je usporedba rezultata ispitivanja sa kriterijima definiranim normom HRN EN 459-1:2010.

Tablica 14. Klasifikacija PDB 1 kao HL

<b>PDB 1</b>					
<b>SVOJSTVO</b>		<b>OMJERI VEZIVA</b>			
		100 % PDB + 0 % LP	75 % PDB + 25 % LP	50 % PDB + 50 % LP	25 % PDB + 75 % LP
SO <sub>3</sub>		<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Ca(OH) <sub>2</sub>		<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>	<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>	<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>	<i>HL 5</i>
Veličina čestica - ostatak po masi (%)	0,09 mm	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Sadržaj slobodne vode (%)		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Postojanost volumena	Alternativna metoda (mm)	<i>DA</i>	<i>NE</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Vrijeme vezivanja [h]	Početak	<i>DA</i>	<i>NE</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
	Kraj	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>
Sadržaj zraka (%)		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Tlačna čvrstoća [MPa]	Nakon 7 dana	<i>HL 2 , HL 3,5</i>	<i>HL 2 , HL 3,5</i>	<i>HL 2 , HL 3,5</i>	<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>
	Nakon 28 dana	<i>NE</i>	<i>HL 2</i>	<i>HL 3,5</i>	<i>HL 5</i>
<b>ZAKLJUČAK</b>		<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>

Tablica 15. Klasifikacija PDB 2 kao HL

<b>PDB 2</b>					
<b>SVOJSTVO</b>		<b>OMJERI VEZIVA</b>			
		100 % PDB + 0 % LP	75 % PDB + 25 % LP	50 % PDB + 50 % LP	25 % PDB + 75 % LP
SO <sub>3</sub>		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Ca(OH) <sub>2</sub>		<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>	<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>	<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>	<i>HL 5</i>
Veličina čestica - ostatak po masi (%)	0,09 mm	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Sadržaj slobodne vode (%)		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Postojanost volumena	Alternativna metoda (mm)	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>DA</i>
Vrijeme vezivanja [h]	Početak	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
	Kraj	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Sadržaj zraka (%)		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Tlačna čvrstoća [MPa]	Nakon 7 dana	<i>HL 2, HL 3,5</i>	<i>HL 2, HL 3,5</i>	<i>HL 2, HL 3,5</i>	<i>HL 2, HL 3,5 i HL 5</i>
	Nakon 28 dana	<i>NE</i>	<i>HL 2</i>	<i>HL 3,5, HL 5</i>	<i>HL 5</i>
<b>ZAKLJUČAK</b>		<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Zadovoljava HL 5</i>

Tablica 16. Klasifikacija PDB 3 kao HL

<b>PDB 3</b>					
<b>SVOJSTVO</b>		<b>OMJERI VEZIVA</b>			
		100 % PDB + 0 % LP	75 % PDB + 25 % LP	50 % PDB + 50 % LP	25 % PDB + 75 % LP
SO <sub>3</sub>		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Ca(OH) <sub>2</sub>		<i>HL 5</i>	<i>HL 5</i>	<i>HL 5</i>	<i>HL 5</i>
Veličina čestica - ostatak po masi (%)	0,09 mm	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>DA</i>
Sadržaj slobodne vode (%)		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Postojanost volumena	Alternativna metoda (mm)	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
Vrijeme vezivanja [h]	Početak	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
	Kraj	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
Sadržaj zraka (%)		<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>	<i>DA</i>
Tlačna čvrstoća [MPa]	Nakon 7 dana	<i>HL 2, HL 3,5</i>	<i>HL 2, HL 3,5</i>	<i>HL 2, HL 3,5</i>	<i>N/A</i>
	Nakon 28 dana	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>NE</i>	<i>N/A</i>
<b>ZAKLJUČAK</b>		<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>	<i>Ne zadovoljava</i>

## **7. ZAKLJUČAK**

U teorijskom dijelu ovog rada prikazana su saznanja o problematici vezanoj za dotrajavanje povijesnih građevina te o svojstvima materijala za njihovu sanaciju. Također, dan je pregled dosadašnjih istraživanja provedenih na vapnenim mortovima s određenim udjelima pepela dobivenog kao nusproizvod iz različitih biomasa, posebice PDB-a. U eksperimentalnom radu ispitana su svojstva veziva, pasta i mortova pripremljenih s različitim udjelima PDB i LP s ciljem klasifikacije PDB kao hidrauličnog vapna prema HRN EN 459-1 i pripreme ekološki prihvatljivog morta za sanaciju povijesnih građevina.

Na temelju provedenih ispitivanja došlo se do sljedećih zaključaka:

- Prema kemijskom sastavu PDB najbliži hidrauličnom vapnu je PDB 2 koji se odlikuje visokim udjelom slobodnog kalcijevog hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) i oksida  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$ . Slijedi ga PDB1, dok je PDB 3 sličiji letećem pepelu iz ugljena.
- PDB 1 je granulometrijom najbliži LP, dok PDB 3 ima najkrupnije čestice. PDB 2 i PDB 3 potrebno je miješati sa LP kako bi se zadovoljio kriterij ostatka na situ 0,09 mm prema HRN EN 459-1.
- Sadržaj slobodne vode u svim ispitanim vrstama veziva iznosi od 0 % do 0,5 % mase veziva, čime je zadovoljen prema HRN EN 459-2. Međutim, nije moguće uspostaviti linearnu ovisnost između sadržaja slobodne vode i udjela LP u pojedinom vezivu.
- Kod svih uzoraka pasta sa 25 % LP, uočeno je smanjenje vremena do početka i kraja vezivanja, u odnosu na paste bez dodatka LP. Međutim, daljnjim povećanjem udjela LP, povećalo se i vrijeme vezivanja, što se može objasniti inertnošću LP u ranim fazama hidratacije.
- Kod pasta s PDB 2 izraženo je bubrenje koje se smanjuje s povećanjem udjela LP u mješavini.
- Nije moguće uspostaviti linearni odnos između konzistencije svježeg morta i vodovezivnog omjera.
- Najveće gustoće imaju mortovi s PDB 1, a najmanje s PDB 3, što se može objasniti finoćom mliva PDB-a- Osim toga, gustoća morta raste proporcionalno s rastom udjela LP.
- Vrijednosti sadržaja pora za sve mortove iznose od 4,4 % do 5,4 %, ali nije moguće uspostaviti linearan odnos sa udjelom LP u mješavini.
- Najveće tlačne čvrstoće imaju mortovi s PDB 2, a najmanje s PDB3, što se može objasniti njihovim kemijskim sastavima. Također, vrijednosti tlačne čvrstoće rastu proporcionalno s udjelom LP, što je rezultat pucolanske reakcije.
- Mortovi s PDB 1 najsporije upijaju vodu, dok oni s PDB 3 najbrže upijaju. Međutim, u konačnici, mortovi s PDB 1 upiju najveću količinu vode.

Usporedbom dobivenih rezultata sa kriterijima norme HRN EN 459-1:2010 potvrđena je mogućnost klasifikacije PDB 2 kao HL i samim time mogućnost njegove primjene kao veziva u mortovima za sanaciju povijesnih građevina. Vrsta veziva koja je zadovoljila sve dane kriterije sadrži 25 % PDB 2 i 75 % LP i može se svrstati u razred HL 5. Unatoč zadovoljenju zahtjeva norme, preporuča se daljnje istraživanje s naglaskom na volumne deformacije koje su izražene kod pasta i mortova sa većim udjelima PDB 2. PDB 1 također pokazuje potencijal za primjenu u sanacijskim mortovima budući da mješavine sa udjelom PDB 1 50 % i manje, zadovoljavaju sve kriterije osim kraja vezivanja paste. Preporuča se daljnje istraživanje idealnog omjera PDB 1 u mortovima, manjeg od 50 % mase veziva, uz eventualnu promjenu mineralnog dodatka ili korištenje ubrzivača vezivanja. Rezultati ispitivanja provedenih sa PDB 3 isključili su njegovu mogućnost primjene zbog brojnih nepovoljnih svojstava.

## **ZAHVALE**

Istraživanje je financirano od strane Hrvatske zaklade za znanost kroz istraživački projekt: “Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC<sup>2</sup>”, IP-06-2016, voditeljice prof.dr.sc. Nine Štirmer na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

Posebno se želimo zahvaliti našoj mentorici doc. dr. sc. Ani Baričević na strpljenju, savjesnom i stručnom vođenju kroz cijeli projekt od samog početka.

Hvala i laborantima Zvezdani Matuzić i Miri Matuziću koji su nam nesebično pomagali i uvijek bili na raspolaganju tijekom obavljanja eksperimentalnog dijela rada.

Velika hvala i doktorantici Jeleni Šantek Bajto, mag.ing.aedif. na idejama i konstruktivnim kritikama te na pomoći oko odrađivanja eksperimentalnog dijela rada.

## LITERATURA

- [1] E. Parlament and E. Unije, *15/Sv. 11*. 2009, pp. 39–85.
- [2] Bioenergy Europe, “Bioenergy Europe, Statistical Report, 2018 Edition.”
- [3] HROTE, “Godišnji Izvještaj O Uspostavi Eko Bilančne Grupe U 2016. Godini,” 2017.
- [4] M. Island, “MARKET POTENTIAL OF WOOD BIOMASS ASH UTILISATION IN CEMENT COMPOSITES - CROATIAN CASE STUDY,” no. October, pp. 1–6, 2018.
- [5] R. Luciano and E. Sacco, “MATERIAL,” vol. 34, no. 24, 1997.
- [6] P. B. Lourenc, “Computations on historic masonry structures,” no. July, pp. 301–319, 2002.
- [7] R. Tc and O. Mortars, “Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars,” vol. 38, no. October, pp. 2004–2005, 2005.
- [8] K. V. A. N. Balen, “Preventive conservation of historic buildings . Raymond Lemaire International Centre for Conservation,” *Restor. Build. Monum. Mater. Sci. Conserv. Archit. heritage, Sustain. Constr.*, no. 4, pp. 1–9, 2008.
- [9] V. Hutsebaut-Buyse, I. dos Santos Flores Barbosa Colen José Maria da Cunha Rego Lobo de Carvalho Jury Chairperson, J. Pedro Ramôa Ribeiro Correia Supervisor, J. Maria da Cunha Rego Lobo de Carvalho Referee, and D. Sónia Maria Cancela dos Santos Raposo Costa Silva, “Maintenance in historic buildings in Belgium and Portugal Civil Engineering,” no. July, 2016.
- [10] V. Rives and J. G. Talegon, “Decay and Conservation of Building Stones on Cultural Heritage Monuments,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 514–516, pp. 1689–1694, 2009.
- [11] A. H. P. Maurenbrecher, K. Trischuk, and M. Z. Rousseau, “Review of Factors Affecting the Durability of Repointing,” *9th Can. Mason. Symp.*, 2001.
- [12] R. Mack and J. Speweik, “Preservation briefs: Repointing Mortar Joints in Historic Masonry Buildings,” pp. 1–16, 1996.
- [13] I. Stipanovi, “Trajnost materijala Sadr ž aj izlaganja.”
- [14] “TKM\_3.\_predavanje\_Zidje\_2017\_f.pdf.” .
- [15] B. M Feilden, *Conservation of Historic Buildings*, 3rd New Ed. Oxford, UK: Taylor & Francis Ltd, 2003.
- [16] A. E. G. Grimmer, “Glossary of Historic Masonry Deterioration Problems and Preservation Treatments,” 1984.
- [17] M. Sutan, “Effect of PFA on Strength and Water Absorption of Mortar,” *UNIMAS e-Journal Civ. Eng.*, vol. 2, no. March, pp. 7–11, 2011.
- [18] MIA, “Efflorescence : Cause and Control 1,” pp. 2–5, 1986.

- [19] S. E. Jeffrey L. Elder, “Efflorescence , Can it be Controlled ?”
- [20] K. Sv and D. U. Splitu, “LUK MAJSTORA OTTA POD SVODOM ZVONIKA,” pp. 84–100.
- [21] P. L. Waterproofing Specialists, “www.waterproofingspecialists.com.” [Online]. Available: <https://www.waterproofingspecialists.com.au/efflorescence-salt-removal-treatment/>.
- [22] “Masonry arch bridges: condition appraisal and remedial treatment,” vol. 44, no. 0, pp. 174–180.
- [23] A. Mark, “Binder Leaching of Naturally Hydraulic Lime Mortars,” no. September 2012, pp. 671–678, 2012.
- [24] C. Groot, “Repair mortars for historic masonry; Effects of the binder choice on durability,” *Heron*, vol. 61, no. 1, pp. 33–56, 2016.
- [25] V. Leko, “Iz povijesti graditeljstva,” *Građevinar*, vol. 61, pp. 775–791, 2007.
- [26] F. Pacheco-Torgal, J. Faria, and S. Jalali, “Some considerations about the use of lime-cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil?,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 488–494, 2012.
- [27] “PRACTICAL GUIDE TO LIME MORTARS.”
- [28] *IMV\_interna\_skripta.pdf* .
- [29] HRN EN 459-1, *Građevno vapno - 1. dio : Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti*.
- [30] P. Gibbons, “Pozzolans for Lime Mortars,” *The Conservation and Repair of Ecclesiastical Buildings*, 1997. .
- [31] N. Ademović and A. Kurtović, “Kamen i mort kod mostova iz razdoblja Osmanskog Carstva u Bosni i Hercegovini,” vol. 70, pp. 213–224, 2018.
- [32] A. Moropoulou, A. Bakolas, and S. Anagnostopoulou, “Composite materials in ancient structures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 295–300, 2005.
- [33] SidleyChem, “How to make the correct choice of fly ash in mortar?” .
- [34] S. Chandra and K. Bendapudi, “Contribution of Fly ash to the properties of Mortar and Concrete b h, u h /, .,” *Int. J. Earth Sci. Eng.*, vol. 04, no. October 2011, pp. 1017–1023, 2015.
- [35] P. L. Naktode, S. R. Dr Chaudhari, and U. P. Dr Waghe, “Evaluation of Lime for Use in Mortar - K42047075.pdf,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. 70–75, 2014.
- [36] A. Basumajumdar, A. K. Das, N. Bandyopadhyay, and S. Maitra, “Some studies on the reaction between fly ash and lime,” *Bull. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 2, pp. 131–136, 2005.
- [37] V. Sklivaniti *et al.*, “Valorisation of woody biomass bottom ash in Portland cement: A



- characterization and hydration study,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 205–213, 2017.
- [38] Hrvatski sabor, *Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, NN 100/2015*, vol. 2015, no. NN 100/2015. 2019, pp. 1–36.
- [39] I. Carević, N. Štirmer, and I. B. Pečur, “Primjena pepela iz drvene biomase kao zamjena cementa u betonu,” *Peti skup Mlad. istraživača iz Pod. građevinarstva i Srod. Teh. Znan. Zajed. Temelj. 2017., Zagreb. 18. - 19. rujna 2017.*, pp. 155–161, 2020.
- [40] M. Pavlíková *et al.*, “Valorization of wood chips ash as an eco-friendly mineral admixture in mortar mix design,” *Waste Manag.*, vol. 80, pp. 89–100, 2018.
- [41] A. Saraber, “Fly ash from coal and biomass for use in concrete door,” no. december. 2017.
- [42] M. Berra, T. Mangialardi, and A. E. Paolini, “Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, pp. 286–296, 2015.
- [43] R. Tarun, R. Naik, N. Kraus, and R. Kumar, “Wood Ash Utilisation,” no. July, 2001.
- [44] N. G. Almeida, P. Faria, and A. P. Pinto, “Lime mortars with rice husk ash for ancient masonry,” *HMC08 - Hist. Mortars Conf.*, p. CD, 2008.
- [45] S. Thirumalini, R. Ravi, and M. Rajesh, “Experimental investigation on physical and mechanical properties of lime mortar: Effect of organic addition,” *J. Cult. Herit.*, vol. 31, pp. 97–104, 2018.
- [46] M. Pavlíková *et al.*, “Ternary Blended Binder for Production of a Novel Type of Lightweight Repair Mortar,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 6, p. 996, 2019.
- [47] J. Fořt, M. Čáchová, E. Vejmelková, and R. Černý, “Mechanical and hygric properties of lime plasters modified by biomass fly ash,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 365, no. 3, 2018.
- [48] L. Fusade, H. Viles, C. Wood, and C. Burns, “The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 500–513, 2019.
- [49] Z. Q. Zhao, Z. Ge, R. J. Sun, G. F. Xin, and D. W. Huang, “Effect of Fly Ash and nanoCaCO<sub>3</sub> on the Setting Time of Cement Paste,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 405–408, pp. 2885–2888, 2013.
- [50] S. Xu, J. Wang, Q. Jiang, and S. Zhang, “Study of natural hydraulic lime-based mortars prepared with masonry waste powder as aggregate and diatomite/fly ash as mineral admixtures,” *J. Clean. Prod.*, vol. 119, pp. 118–127, 2016.

## **POPIS SLIKA**

Slika 1. Doprinos biomase u ukupnoj proizvodnji primarne energije u zemljama članicama EU u 2016. [2] .....	1
Slika 2. Faktori koji utječu na trajnost sanacijskih mortova [9] .....	5
Slika 3. Uvjeti potrebni za iscvjetavanje [26] .....	7
Slika 4. Iscvjetavanje soli na površini zidane građevine [12] .....	7
Slika 5. Posljedice subeflorescencije na zidanoj građevini [21] .....	8
Slika 6. Izluživanje vapna [12] .....	8
Slika 7. Oštećenja ziđa uslijed smrzavanja i odmrzavanja [21] .....	9
Slika 8. Utjecaji PDB-a na svojstva morta [44] .....	17
Slika 9. Veziva .....	19
Slika 10. CEN Standard pijesak .....	21
Slika 11. SikaPlast Techno 80 .....	21
Slika 12. Sijačica .....	24
Slika 13. Ukupan odbačeni materijal .....	24
Slika 14. Ostatak na situ 0,25 mm .....	24
Slika 15. Miješalica za pripremu paste .....	25
Slika 16. Miješalica za pripremu morta .....	26
Slika 17. Uređaj za prosijavanje air jet metodom .....	28
Slika 18. Peć za sušenje .....	29
Slika 19. Uzorci veziva sa određivanje sadržaja slobodne vode .....	30
Slika 20. Ispitivanje standardne konzistencije paste .....	32
Slika 21. Ispitivanje kraja vezivanja .....	33
Slika 22. La Chatelierovi prstenovi .....	33
Slika 23. Uzorci paste nakon kuhanja na pari .....	34
Slika 24. Oprema za ispitivanje konzistencije svježeg morta .....	35
Slika 25. Mjerenje konzistencije svježeg morta .....	35

Slika 26. Porometar .....	36
Slika 27. Preša za ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće morta.....	37
Slika 28. Uzorci za ispitivanje kapilarne vodoupojnosti mortova .....	39
Slika 29. Usporedba PDB-a i letećeg pepela iz ugljena prema: a) sadržaju slobodnog kalcijevog hidroksida, b) pH vrijednosti, c) kemijskom sastavu .....	41
Slika 30. Usporedba kemijskog sastava PDB-a prije i nakon prosijavanja.....	42
Slika 31. Usporedba granulometrije PDB-a i letećeg pepela iz ugljena.....	43
Slika 32. Granulometrijski dijagrami .....	44
Slika 33. Sadržaj slobodne vode.....	45
Slika 34. Konzistencija paste.....	46
Slika 35. Usporedba vodovezivnog omjera i konzistencije paste .....	46
Slika 36. Temperatura svježe paste .....	47
Slika 37. Vrijeme vezivanja paste .....	47
Slika 38. Razlika udaljenosti ticala Le Chatelierovih prstenova prije i nakon kuhanja .....	48
Slika 39. Konzistencija svježeg morta.....	49
Slika 40. Usporedba vodovezivnog omjera i konzistencije morta .....	49
Slika 41. Izdvajanje vode .....	50
Slika 42. Gustoća svježeg morta .....	51
Slika 43. Sadržaj pora svježeg morta .....	51
Slika 44. Savojna i tlačna čvrstoća očvrslog morta.....	53
Slika 45. Usporedba 28-dnevne tlačne čvrstoće sa gustoćom svježeg morta.....	53
Slika 46. Usporedba 28-dnevne tlačne čvrstoće sa udjelom pora u svježem mortu.....	54
Slika 47. Izgled i tekstura površine očvrslih uzoraka s PDB 1.....	55
Slika 48. Izgled i tekstura površine očvrslih uzoraka s PDB 2.....	55
Slika 49. Izgled i tekstura površine očvrslih uzoraka s PDB 3.....	55
Slika 50. Razlika u broju pukotina kod uzorka sa 100 % PDB 2 ovisno u uvjetima skladištenja.....	55
Slika 51. Segregacija kod uzoraka sa PDB 3 .....	56

Slika 52 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja za uzorke sa PDB 1 .....	57
Slika 53 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja za uzorke sa PDB 2 .....	58
Slika 54. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja za uzorke sa PDB 3 .....	59
Slika 55. Koeficijenti kapilarne vodoupojnosti morta.....	59
Slika 56. Mrlje u uzorcima sa PDB 1 .....	60

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podjela vapna prema HRN EN 459-1 [26].....	10
Tablica 2. Hidraulički modul vapna [25] .....	11
Tablica 3. Kemijski sastav hidrauličnog vapna [25] .....	11
Tablica 4. Podjela HL-a [26] .....	12
Tablica 5. Kriteriji za hidraulično vapno prema HRN EN 459-1 .....	18
Tablica 6. Fizikalna i kemijska svojstva veziva .....	20
Tablica 7. Vrste veziva.....	22
Tablica 8. Mješavine pasta .....	22
Tablica 9. Sastavi mortova .....	23
Tablica 10. Metode ispitivanja veziva.....	27
Tablica 11. Metode ispitivanja pasta .....	27
Tablica 12. Metode ispitivanja mortova u svježem stanju .....	27
Tablica 13. Metode ispitivanja mortova u očvrslom stanju.....	27
Tablica 14. Klasifikacija PDB 1 kao HL.....	61
Tablica 15. Klasifikacija PDB 2 kao HL.....	62
Tablica 16. Klasifikacija PDB 3 kao HL.....	63
Tablica 17 Postotci prolaza kroz sito.....	74
Tablica 18 Sadržaj slobodne vode u vezivima .....	74
Tablica 19 Početak i kraj vezivanja pasta.....	75
Tablica 20 Postojanost volumena pasta.....	75
	72

---

Tablica 21 Svojstva svježeg morta .....	76
Tablica 22 Savojna i tlačna čvrstoća morta .....	76
Tablica 23 Koeficijenti kapilarne vodoupojnosti morta .....	77

**PRILOZI**

Tablica 17 Postotci prolaza kroz sito

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Prolaz kroz sito [%]				
	PDB	LP	Otvor sita [mm]				
			0,005	0,01	0,02	0,048	0,09
PDB 1	100	0	0	0	13	83	980
	75	25	0	0	12	79	98
	50	50	0	1	16	81	98
	25	75	0	2	25	87	98
PDB 2	100	0	0	1	17	47	74
	75	25	0	2	24	57	81
	50	50	1	2	28	66	86
	25	75	1	3	31	74	92
PDB 3	100	0	0	1	3	24	60
	75	25	1	2	14	37	69
	50	50	0	3	24	52	78
	25	75	1	3	32	70	89

Tablica 18 Sadržaj slobodne vode u vezivima

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Masa prije sušenja [g]	Masa nakon sušenja [g]	Sadržaj slobodne vode [%]
	PDB	LP			
PDB 1	100	0	10,00	10,00	0,00
	75	25	10,00	9,99	0,10
	50	50	10,00	9,99	0,10
	25	75	10,00	9,95	0,50
PDB 2	100	0	10,00	9,99	0,10
	75	25	10,00	9,96	0,40
	50	50	10,00	9,99	0,10
	25	75	10,00	9,99	0,10
PDB 3	100	0	10,00	9,95	0,50
	75	25	10,00	9,98	0,20
	50	50	10,00	10,00	0,00
	25	75	10,00	9,97	0,30

Tablica 19 Početak i kraj vezivanja pasta

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Konzistencija [mm]	Početak vezivanja [min]	Kraj vezivanja [min]
	PDB	LP			
PDB 1	100	0	8	244	618
	75	25	8	33	94
	50	50	10	232	1375
	25	75	4	1401	1721
PDB 2	100	0	6	97	142
	75	25	5	102	127
	50	50	4	332	402
	25	75	5	336	591

Tablica 20 Postojanost volumena pasta

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Le Chatelier		
	PDB	LP	A [mm]	B [mm]	B-A [mm]
PDB 1	100	0	0,82	17,76	16,94
			3,26	20,07	16,81
			0	15,18	15,18
	75	25	0	20,76	20,76
			2,22	23,12	20,9
			1,1	20,19	19,09
	50	50	2,54	5,58	3,04
			0	16,41	16,41
			0	13,24	13,24
	25	75	0	4,27	4,27
			1,68	14,32	12,64
			0,64	11,69	11,05
PDB 2	100	0	0,8	27,84	27,04
			3,84	33,96	30,12
			1,87	33,15	31,28
	75	25	2,37	29,06	26,69
			3,14	29,23	26,09
			0	18,91	18,91
	50	50	0	12,13	12,13
			1,45	22,73	21,28
			0,77	19,96	19,19
	25	75	0,42	14,54	14,12
			2,77	12,3	9,53
			0	9,84	9,84

Tablica 21 Svojstva svježeg morta

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Konzistencija [mm]	Temperatura [°C]	Gustoća [mm]	Sadržaj zraka [%]
	PDB	LP				
PDB 1	100	0	181,5	23,8	1898,1	4,8
	75	25	185,5	23	1941,6	4,6
	50	50	185	22,1	1962,3	4,6
	25	75	182,5	20,6	1992,7	4,8
PDB 2	100	0	184	22,3	1887,2	5
	75	25	193,5	22,1	1893,4	5,4
	50	50	185	21,7	1940,4	5,2
	25	75	195	21,8	1982,9	4,4
PDB 3	100	0	184	20,2	1768,6	/
	75	25	187	20,1	1836,4	5,4
	50	50	185,5	20,7	1906,2	4,6

Tablica 22 Savojna i tlačna čvrstoća morta

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Savojna čvrstoća [MPa]		Tlačna čvrstoća [MPa]	
	PDB	LP	7 dana	28 dana	7 dana	28 dana
PDB 1	100	0	0,21	0,56	0,73	1,71
	75	25	0,38	1,02	1,04	2,96
	50	50	0,53	1,37	1,33	4,65
	25	75	0,65	1,6	2,04	5,56
PDB 2	100	0	0,21	0,7	0,74	1,71
	75	25	0,25	0,74	0,91	2,97
	50	50	0,53	1,24	1,77	5,73
	25	75	0,58	1,67	2,01	8,39
PDB 3	100	0	0,07	0,1	0,15	0,25
	75	25	0,07	0,06	0,24	0,36
	50	50	0,06	0,07	0,27	0,49



Tablica 23 Koeficijenti kapilarne vodoupojnosti morta

Oznaka veziva	Vrsta veziva [%]		Koeficijent kapilarne vodoupojnosti , C	
	PDB	LP	Obični mort [kg/m <sup>2</sup> min <sup>0.5</sup> ]	Restauracijski mort [kg/m <sup>2</sup> ]
PDB 1	100	0	2,5	26,49
	75	25	2,3	24,44
	50	50	2,1	21,98
	25	75	1,8	19,22
PDB 2	100	0	1,9	24,94
	75	25	1,8	23,08
	50	50	1,7	20,55
	25	75	1,5	16,76
PDB 3	100	0	-0,1	16,01
	75	25	-0,10	13,50
	50	50	0,7	15,08

## **SAŽETAK**

### **EKOLOŠKI MORTOVI ZA SANACIJU POVIJESNIH GRAĐEVINA**

Marija Bezinović, Keti Kristović

Neizbježan ali sastavni dio životnog vijeka gotovo svih građevina, a posebice povijesnih, je njihova sanacija, kao posljedica oštećenja nastalih tijekom dugotrajne izloženosti okolišu, ali i same uporabe. Zajedničko obilježje tih građevina je da su građene uglavnom od prirodnih materijala kao što su kamen i opeka, povezanih vapnenim mortom. Tijekom njihove sanacije zahtijeva se korištenje sanacijskih materijala kompatibilnih s originalnim materijalima korištenim u gradnji, s naglaskom na alternativne materijale. Trend povećane uporabe obnovljivih izvora energije rezultira povećanim količinama otpada, u ovom slučaju pepela (PDB-a) nastalog kao nusproizvod spaljivanja drvene biomase. Kemijskim sastavom ovaj pepeo vrlo je sličan hidrauličnom vapnu, zbog čega se u ovom radu provelo istraživanje s ciljem karakterizacije PDB-a te njegova korištenja kao zamjene za vapno u proizvodnji vapnenih mortova. U tu svrhu pripremljeni su mortovi s PDB-om različitih udjela i podrijetla, uz dodatak letećeg pepela dobivenog sagorijevanjem ugljena. Omjeri veziva, agregata i vode određeni su ciljem postizanja jednake obradivosti svih mješavina. Ispitana su svojstva morta u svježem i očvrnulom stanju (gustoća, sadržaj zraka, konzistencija, tlačna čvrstoća, kapilarno upijanje) te su provedene analize rezultata uzimajući u obzir kemijski sastav PDB-a, s naglaskom na količine dostupnog kalcijevog hidroksida.

**KLJUČNE RIJEČI** : pepeo drvene biomase, hidraulični vapneni mortovi, leteći pepeo iz ugljena

## **SUMMARY**

### **ECO-FRIENDLY MORTARS FOR REPAIR OF HISTORICAL BUILDINGS**

Marija Bezinović, Ketu Kristović

Repairs are an inevitable but integral part of a life cycle of most buildings, especially historical, caused by their use and long-term exposure to environmental conditions. The common feature of these buildings is that they are mostly made of natural materials, such as stone and bricks, binded by lime mortar. Therefore, repair mortars must be compatible with the original materials, considering the recent emphasis on using alternative materials. An increased trend in using renewable energy sources results in increased production of industrial waste, in this case the fly ash (WBA) generated as a by-product of wood biomass combustion. The chemical composition of these ashes is very similar to the composition of hydraulic lime, hence the aim of WBAs characterization and its use as a lime substitute in lime mortars production. For this purpose, several mortar mixtures with different amount of WBA were prepared with the addition of coal fly ash. The proportions of binder, aggregate and water were selected in order to achieve optimum workability. Specimens of mortars were tested in a laboratory regarding the properties in fresh and hardened state (density, air content, consistence, compressive strength, water absorption). The obtained results were analysed considering the chemical composition of WBAs, focusing on the content of available calcium hydroxide.

**KEY WORDS:** wood biomass ash, hydraulic lime mortars, coal fly ash