



PROJEKT: **USPOSTAVNI ISTRAŽIVAČKI PROJEKT**  
**REUSE OF SEWAGE SLUDGE IN CONCRETE INDUSTRY – FROM  
MICROSTRUCTURE TO INNOVATIVE CONSTRUCTION  
PRODUCTS (RESCUE)**

BROJ PROJEKTA: **7927**

PROJEKT FINANCIRA: **HRVATSKA ZAKLADA ZA ZNANOST**

ELABORAT: **IZVJEŠTAJ BR.3 –**  
**FIZIKALNE I KEMIJSKE KARAKTERISTIKE PEPILA DOBIVENOG  
SPALJIVANJEM MULJA**

VRSTA ELABORATA: **TEHNIČKI IZVJEŠTAJ**

UGOVOR: **120-050/14**

GODINA ISTRAŽIVANJA: **1 (01.09.2014. – 31.08.2015.)**

DATUM: **Kolovoz, 2015.**

IZRAĐIVAČ: **GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**

AUTORI:

Dražen Vouk, doc.dr.sc.  
Domagoj Nakić, mag.ing.aedif.  
Mario Šiljeg, doc.dr.sc.  
Lidija Valek Žulj, dr.sc.  
Vilko Mandić, dr.sc.

DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA

SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

prof. dr. sc. Neven Kuspilić, dipl. ing. građ.





## Fizikalne i kemijske karakteristike pepela dobivenog spaljivanjem mulja

### 1. Uvod

Mulj nastao procesima obrade otpadne na uređajima za pročišćavanje otpadne vode (UPOV) je složenog sastava i predstavlja mješavinu organskih i anorganskih tvari raspršenih u vodi, a sadržava i patogene mikroorganizme, parazite, virus te brojne potencijalno toksične elemente i spojeve (teške metale i dr.). Zbrinjavanje mulja nije važno isključivo s aspekta zadovoljenja zakonskih propisa, već i s aspekta odabira optimalne konцепције pročišćavanja, uključivo i samu obradu mulja.

Pojedine studijske analize zaključuju kako bi na UPOV većeg kapaciteta postupak spaljivanja mulja bio prihvatljiv koncept vezan uz postupak zbrinjavanja mulja. Spaljivanjem mulja generira se pepeo (eng. incinerated sewage sludge ash - ISSA) koji ima znatno manju masu i volumen, u odnosu na stabiliziran i dehidriran mulj, čime je olakšano njegovo daljnje zbrinjavanje. Međutim, ukoliko bi se usvojio koncept spaljivanja mulja, generirale bi se značajne količine pepela koji također u konačnici zahtijeva zbrinjavanje na odgovarajući način. U procesu odlučivanja o dalnjem korištenju ili odlaganju generiranog pepela ključan faktor predstavljaju njegove fizikalne karakteristike i kemijski sastav.

### 2. Spaljivanje mulja i generiranje pepela

Karakteristike mulja osnovni su utjecajni faktor pri odabiru optimalne tehnologije njegove obrade i cjelokupnog procesa zbrinjavanja.

Procesi termičke obrade mulja imaju zajednički cilj ukloniti organsku komponentu mulja čime preostaje tek nusprodukt u obliku pepela za daljnje zbrinjavanje. Mulj s UPOV može se u određenoj mjeri tretirati kao vrsta biogoriva, a kalorijska vrijednost osušenog mulja slična je kalorijskoj vrijednosti ugljena. Važno je naglasiti da je to kalorijska vrijednost organskog dijela mulja, dok anorganski dio nema kalorijsku vrijednost. Stoga je uobičajeno potrebno mulj dovesti barem do razine 28 - 33% suhe tvari (ST) kako bi moglo doći do auto-termičkog sagorijevanja bez dodavanja vanjskog goriva za održavanje procesa. Stoga je osnovna intencija kod primjene svih postupaka termičke obrade mulja iskorištavanje energije oslobođene tijekom procesa njegove termičke obrade za prethodnu redukciju sadržaja vlage u mulju. Drugim riječima, toplina oslobođena u procesu spaljivanja, može se koristiti za prethodno sušenje mulja.



Osnovni problemi vezani uz postupke termičke obrade su značajne količine energije potrebne za dostizanje visokih temperatura, visoki troškovi investicije te potreba za opsežnom opremom za kontrolu i sprječavanje onečišćenja zraka.

Spaljivanje mulja je dakle postupak njegove obrade koji uključuje sagorijevanje unutar zatvorene jedinice. Ovim postupkom reducira se masa upuštenog mulja na oko 20% rezultirajućeg pepela. Spaljivanjem se eliminiraju okolišni i zdravstveni problemi vezani uz mulj, prije svega uništavanjem patogena i toksičnih organskih spojeva. Važno je naglasiti da današnje spalionice udovoljavaju svim zahtjevima za očuvanjem ljudskog zdravlja i kvalitete okoliša. Temperatura spaljivanja osušenog mulja ima značajan utjecaj na mikrostrukutru i pucolanska svojstva dobivenog pepela.

Postoji više tipova postojanja za spaljivanje mulja, a mogu se izdvojiti tri osnovna tipa: modularna spalionica (eng. multiple hearth furnace), peć s izgaranjem u vrtložnom sloju (eng. fluidized bed incinerator) i električna infracrvena spalionica (eng. electric infrared incinerator).

Osnovni procesi koji utječu na sam postupak spaljivanja mulja su proces prethodnog sušenja mulja, otpuštanje i sagorijevanje gorivih komponenti te sagorijevanje pepelastog sadržaja koji preostaje u obliku čađe. Budući da je postupak spaljivanja mulja s UPOV potencijalan izvor raznih onečišćujućih tvari potrebno je posebnu pažnju posvetiti postupcima zaštite okoliša i ljudskog zdravlja. Postupci koji mogu nepovoljno utjecati na zdravje šireg područja su: otpuštanje teških metala, zbrinjavanje krutih ostataka (primjerice pepela iz ložišta peći i filtra) te razne emisije. Osnovni izvori nepovjerenja u postupke spaljivanja mulja s UPOV (sociološki aspekt) vežu se dakle uz otpuštanje plinovitih i krutih onečišćujućih tvari u atmosferu te zbrinjavanje rezultirajućeg pepela i mogućnosti naknadnog izluživanja teških metala iz pepela.

Uklanjanje viška vode iz mulja ključni je korak u ostvarenju uspješnog procesa spaljivanja. Uobičajena je praksa da se stabiliziran i dehidriran mulj koji sadržava 18 – 35 %ST uvodi u postupak sušenja, a tek potom se mulj koji sadrži 75 – 95 %ST (radi bolje energetske iskoristivosti, tj. povećanja kalorijske vrijednosti mulja, ali i smanjenja mase i volumena) uvodi u peći za spaljivanje, te se dobiva pepeo u obliku fino granuliranog otpadnog materijala.



### 3. Eksperimentalno istraživanje

Slika 1 prikazuje korištenu laboratorijsku opremu za sušenje i spaljivanje mulja korištenu u sklopu projekta „RESCUE“, a Slika 2 i sam mulj tijekom procesa spaljivanja te granule generiranog pepela nakon hlađenja.



Slika 1 Korištena laboratorijska oprema u procesu sušenja i spaljivanja mulja (sušionik i električna peć)

Za potrebe ovog istraživanja prikupljeni mulj s tri UPOV (Karlovac, Varaždin i Zagreb) podvrgnut je sušenju na  $105^{\circ}\text{C}$  do razine iznad 90% ST. Četvrti korišteni mulj (s UPOV Koprivnica) nije zahtijevao predsušenje budući da se radi o praškastom materijalu s visokim udjelom suhe tvari. Svi muljevi potom su spaljivani u električnoj laboratorijskoj peći na različitim temperaturama ( $800^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$  i  $1000^{\circ}\text{C}$ ). Kroz provođenje projekta "RESCUE" dokazano je da temperatura spaljivanja osušenog mulja ima utjecaj na mikrostrukturnu i pucolanska svojstva dobivenog pepela, što je detaljnije objašnjeno u ovom elaboratu.



Slika 2 Užareni mulj tijekom spaljivanja i granule stvrdnutog pepela nakon spaljivanja na  $800^{\circ}\text{C}$  (istraživanje u sklopu projekta „RESCUE“ na Građevinskom fakultetu u Zagrebu s muljem s UPOV Karlovac)



Nakon spaljivanja, dobivene granule stvrdnutog pepela (Slika 2) zahtijevale su dodatno mljevenje kako bi se dobio praškasti materijal pogodan za daljnje korištenje u ovom istraživanju (kao zamjena za dio cementa u cementnim mortovima i betonu). Mljevenje se provodilo ručno, pomoću klasičnih mlinaca (kućanski aparati za mljevenje kave) zapremnинe 50 - 70 g i 150 - 200 g (Slika 3). Trajanje jednog ciklusa mljevenja iznosilo je oko 2 minute. Bitno je za istaknuti kako pepeo dobiven spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica nije trebalo mljeti budući da je riječ o finom praškastom materijalu.



**Slika 3 Proces mljevenja granula pepela i prosijavanja finih čestica pepela (ostatak na situ označen crveno se ponovno melje)**

Zbog prisutnosti većih tvrdih grudica, mljeveni pepeo je trebalo prosijavati kroz fina sita veličine otvora 0,5 mm. Preostale grudice su vraćene u mlin na dodatno mljevenje te ponovno prosijane. Čitav prosijani pepeo se konačno pomiješao i homogenizirao.

Ovako dobiveni pepeo podvrgnut je višestrukim fizikalnim i kemijskim ispitivanjima s ciljem dobivanja što detaljnijih podataka o njegovu sastavu i mogućnostima dalnjeg korištenja.

U nastavku će se dati prikaz rezultata dobivenih fizikalnim i kemijskim analizama do sada obrađenih pepela i to za svaki pepeo zasebno (ovisno o uređaju i temperaturi spaljivanja) te međusobna usporedba dobivenih rezultata.



## 4. Fizikalne karakteristike pepela

Fizikalne karakteristike pepela analizirane u sklopu ovog istraživanja odnose se na ispitivanja gustoće i granulometrijskog sastava.

### 4.1 Gustoća pepela

Budući da se dobiveni pepeo u ovom istraživanju koristi kao zamjena za dio cementa u cementnim mortovima i betonu, prilikom određivanja gustoće pepela korištena je metoda specificirana za određivanje gustoće cementa – ASTM C-188.



Slika 4 Pribor korišten u postupku određivanja gustoće pepela (i cementa) prema ASTM C-188

Iz homogene mase uzeto je 65 g pepela te mu je određena gustoća radi potrebe dalnjih proračuna sastava cementnog morta i betona. Također, na isti način određena je i gustoća cementa korištenog u dalnjem istraživanju (miješani portlandski cement CEM II/B-M (S-V) 42,5N) i iznosi  $2,95 \text{ g/cm}^3$ .

U Tablici 1 dane su gustoće analiziranih pepela.

Dodatno je provedeno istraživanje uz dodavanje vapna osušenom mulju prilikom spaljivanja u različitim udjelima (10% i 20% vapna u odnosu na masu osušenog mulja). Ovaj dio istraživanja proveden je samo na mulju s UPOV Zagreb i uz temperature spaljivanja od  $800^\circ\text{C}$  i  $1000^\circ\text{C}$ , a rezultati gustoća ovako dobivenih pepela dani su u Tablici 2.



Tablica 1 Gustoća analiziranih pepela (g/cm<sup>3</sup>)

Izvor (porijeklo) mulja (pepela)	Temperatura spaljivanja		
	800°C	900°C	1000°C
UPOV Karlovac	2,67	2,73	2,83
UPOV Koprivnica	2,78	2,95	2,93
UPOV Zagreb	2,69	2,75	2,77

Tablica 2 Gustoća pepela dobivenih spaljivanjem mulja s UPOV-a Zagreb uz dodatak vapna (g/cm<sup>3</sup>)

Udio dodanog vapna u odnosu na masu osušenog mulja	Temperatura spaljivanja	
	800°C	1000°C
10 %	2,66	2,71
20 %	2,66	2,71

Iz prikazanih rezultata analiziranih uzoraka (13 uzoraka) očito je da je gustoća dobivenih pepela nešto manja ili u razini gustoće cementa. Također, zamjetan je trend porasta gustoće pepela s porastom temperature spaljivanja mulja.

Potrebno je naglasiti i da se gustoće svih dobivenih pepela nalaze unutar raspona gustoća pepela dobivenog spaljivanjem mulja s različitim UPOV diljem svijeta, na temelju pregleda literature dosadašnjih svjetskih istraživanja vezanih uz ovu tematiku, a koji se kreće 2,3 – 3,2 g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2 Granulometrijski sastav pepela

Granulometrijski sastav je pokazatelj masenog udjela pojedinih frakcija zrna (čestica) u tlu ili kakovom zrnastom (ili praškastom) materijalu. Definiran je krivuljom koja opisuje sadržaj čestica različite veličine izražen u postotcima težine.

Na temelju pregleda literature do sada objavljenih svjetskih istraživanja o ovoj tematici zaključeno je da se najveći dio čestica ovako dobivenih pepela nalazi u granicama 1 – 100 µm, dok je srednja veličina čestice oko 26 µm.

Za potrebe ovog istraživanja, određen je granulometrijski sastav dobivenih pepela na temelju norme HRN EN 933-10:2009 za razvrstavanje punila (filera) sijanjem, odnosno strujanjem zraka. Na ovaj



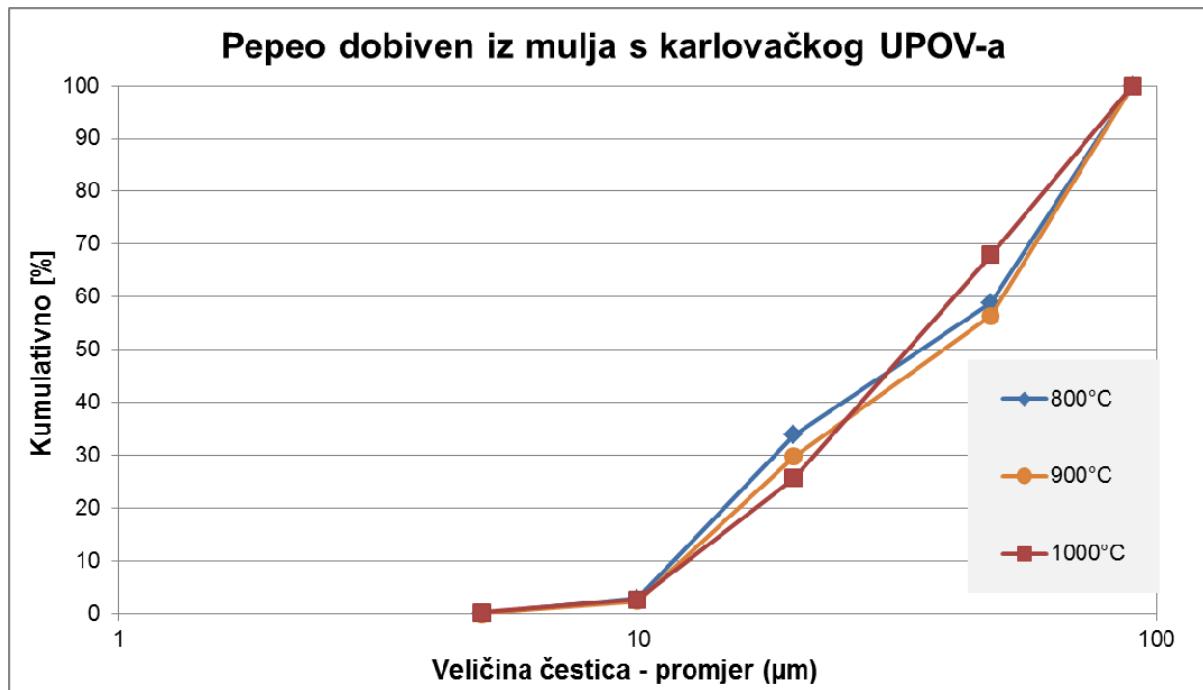
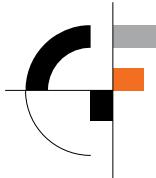
način određuje se granulometrijski sastav materijala s česticama do 2 mm, a budući da su svi pepeli prethodno prosijani na situ otvora 0,005 do 0,048 mm, ovaj uvjet je zadovoljen.

Materijal je prije početka prosijavanja dodatno osušen do konstantne mase. Prosijavanje je obavljeno pomoću uređaja za prosijavanje, odnosno treskalice za praškaste materijale s efektom vakuma AIR JET SEIVING MACHINE A058-05N nabavljenog sredstvima Hrvatske zaklade za znanost u sklopu projekta „RESCUE“. Uređaj za prosijavanje (treskalica) prikazan je na Slici 5.

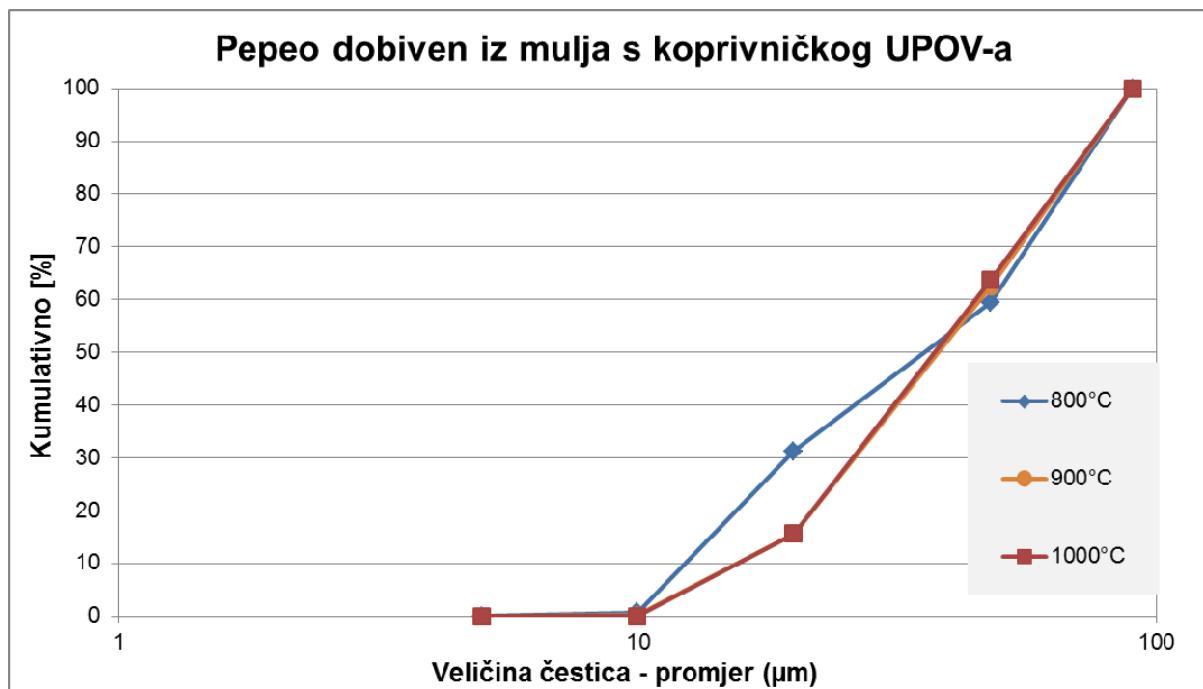
Rezultati prosijavanja do sada obrađenih pepela kroz projekt „RESCUE“ dani su u grafičkom obliku na Slikama 6-9 i na Slici 11. Na Slici 10 dana je usporedba granulometrijskih sastava pepela dobivenih spaljivanjem na 800°C u ovisnosti o porijeklu mulja (lokaciji UPOV).



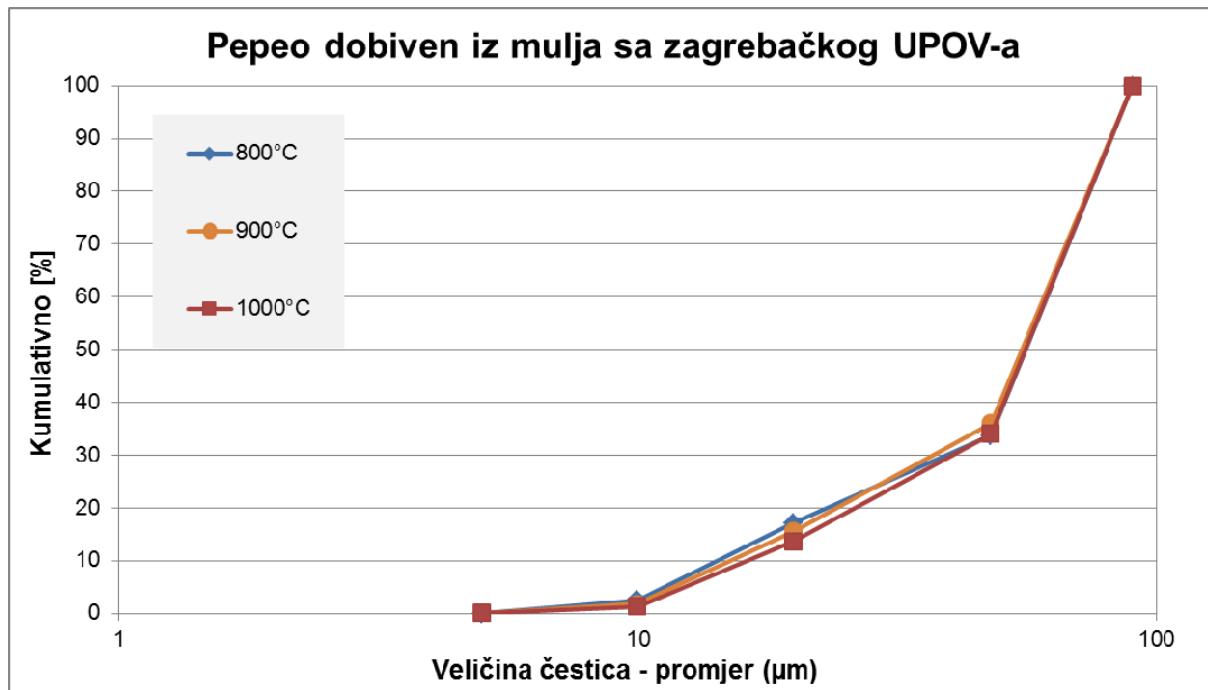
Slika 5 Treskalica za praškaste materijale s efektom vakuma



Slika 6 Granulometrijski sastavi pepela dobivenih iz mulja s karlovačkog UPOV-a



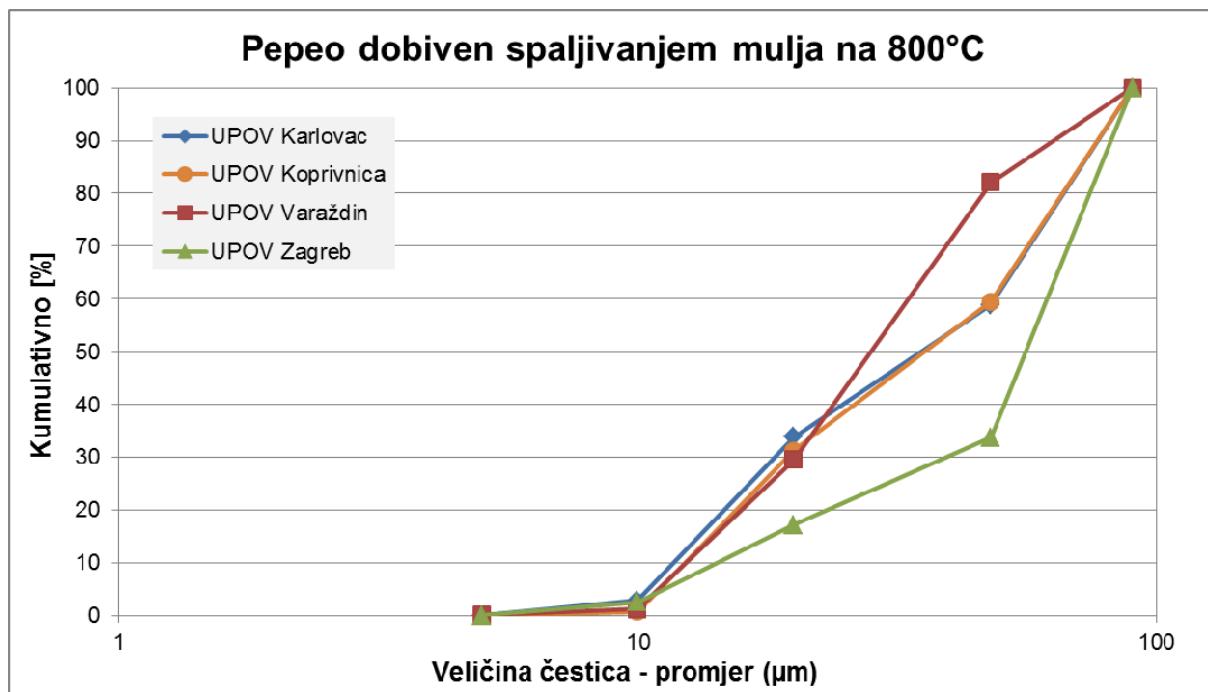
Slika 7 Granulometrijski sastavi pepela dobivenih iz mulja s koprivničkog UPOV-a



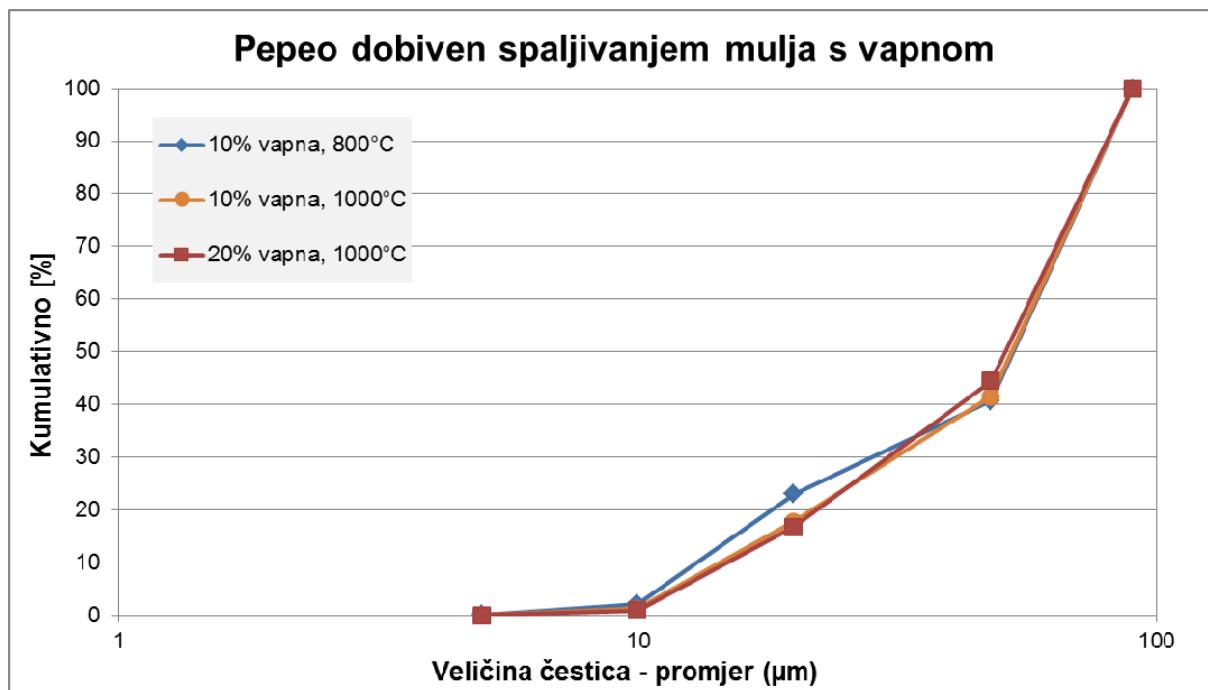
Slika 8 Granulometrijski sastavi pepela dobivenih iz mulja sa zagrebačkog UPOV-a



Slika 9 Granulometrijski sastav pepela dobiven iz mulja s varaždinskom UPOV-a



Slika 10 Usporedni prikaz granulometrijskih sastava pepela dobivenih spaljivanjem muljeva s četiri različita UPOV-a na 800°C



Slika 11 Granulometrijski sastavi pepela dobivenog spaljivanjem mulja sa zagrebačkog UPOV-a uz dodatak vapna



Iz prikazanih rezultata do sada analiziranih uzoraka (13 uzoraka) vidljivo je da nema značajnih odstupanja u granulometrijskim sastavima pepela u ovisnosti o primijenjenoj temperaturi spaljivanja mulja. Nešto veća odstupanja prisutna su pri uspoređivanju pepela iz različitih izvora (različiti UPOV). Pritom je najveći udio čestica pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb veći od  $48 \mu\text{m}$ , dok se za ostale pepeo najveći udio čestica nalazi u rasponu  $20 - 48 \mu\text{m}$ . Ipak, značajno je istaknuti da se raspon čestica analiziranih pepela podudara s rasponom čestica pepela prema rezultatima svjetskih istraživanja ( $1-100 \mu\text{m}$ ).

Prema prvim rezultatima za pepeo dobiven spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz dodatka vapna nisu vidljive značajnije razlike u granulometrijskom sastavu u ovisnosti o količini dodanog vapna.

U budućim fazama projekta neke od provedenih analiza ponovit će se uz korištenje dodatnih sita koja se planira nabaviti, a izvršit će se i analize preostalih uzoraka pepela koji nisu prikazani u sklopu ovog Izvještaja.



## 5. Kemijski sastav pepela

Temeljem pregleda literature na području istraživanja ustanovljeno je da su osnovni minerali koji čine pepeo iz mulja s UPOV  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  što stvara dobre prepostavke za korištenje u obliku mineralnog dodatka kompozitnim materijalima na bazi portlandskog cementa. Značajan je i udio  $\text{CaO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Također, ističe se da ovi pepeli uobičajeno sadrže i visoke udjele fosfata, uobičajeno 10 - 20% masenog udjela u obliku  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Teški metali poput žive (Hg), kadmija (Cd), antimona (Sb), arsenika (As) i olova (Pb) trebali bi spaljivanjem mulja sagorjeti. Ipak, prema nekim istraživanjima, u pepelu se pronalaze ispareni metali u tragovima uslijed njihove kondenzacije na česticama pepela nakon smanjivanja temperature unutar postrojenja za termičku obradu. Ukoliko se pepeo nakon spaljivanja odlaže, glavni problem po pitanju izluživanja teških metala predstavljaju antimon (Sb), molibden (Mo) i selen (Se). Prema tom kriteriju takav pepeo u većini zemalja ne bi bio pogodan za odlaganje na odlagališta neopasnog otpada.

Nadalje, ukoliko se koristi i tercijarni mulj, potrebno je obratiti pažnju na soli za kemijsko obaranje (precipitaciju) fosfora na bazi željeza i aluminija kojima se udjeli ovih metala u pepelu u tom slučaju mogu značajno povećati. Čak i na UPOV koji rade u stacionarnim uvjetima, udio glavnih kemijskih elemenata sadržanih u pepelu može značajno varirati. Elementi prisutni u pepelu s manjim udjelima mogu još značajnije varirati i biti pod značajnim utjecajem prirode industrijske aktivnosti na području koje gravitira sustavu odvodnje.

**Tablica 3 Karakteristike pepela dobivenog spaljivanjem mulja na temelju pregleda literature dosadašnjih svjetskih istraživanja (maseni udio pojedinih oksida u pepelu)**

Kemijski spoj	Maseni udio (%) (raspon vrijednosti)
$\text{CaO}$	1,93 – 31,30
$\text{SiO}_2$	17,27 – 50,60
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,32 – 19,09
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,70 – 20,00
$\text{MgO}$	1,40 – 3,22
$\text{TiO}_2$	0,29 – 1,00
$\text{Na}_2\text{O}$	0,32 – 1,26
$\text{K}_2\text{O}$	0,62 – 2,34
$\text{P}_2\text{O}_5$	1,67 – 18,17



Određivanje kemijskog sastava pepela u okviru istraživanja obuhvaćenim projektom „RESCUE“ bazira se na analiziranju udjela pojedinih oksida iz praškastog materijala. Ispitivanja oksida dobivena su naručenim analizama od strane akreditiranog laboratorija *CEMTRA d.o.o.* za tehničko ispitivanje i analize u području kontrole kvalitete, zaštite okoliša i ekotoksikološka ispitivanja.

Drugi dio kemijskih analiza odnosi se na sljedeće analize:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ , TDS (ukupne rastopljene krutine), pH, TOC (ukupni organski ugljik), DOC (otopljeni organski ugljik), TN (ukupni dušik),  $\text{P}_2\text{O}_5$  i  $\text{K}_2\text{O}$  rađene u vodenom eluatu i na analize sadržaja metala rađene u zlatotopci. Ovaj dio ispitivanja dobiven je naručenim analizama u suradnji s Laboratorijem za geokemiju okoliša Geotehničkog fakulteta u Varaždinu (Sveučilište u Zagrebu).

U nastavku će se prikazati rezultati kemijskih analiza do sada obrađenih uzoraka pepela. Udio pojedinih oksida u pepelu do sada je analiziran na ukupno 10 uzoraka.

**Tablica 4 Karakteristike pepela dobivenog spaljivanjem mulja s četiri UPOV u Hrvatskoj (maseni udio pojedinih oksida u pepelu)**

Kemijski spoj	Metoda	Mjerna jed.	UPOV Karlovac		UPOV Koprivnica		UPOV Varaždin		UPOV Zagreb	
			tamno		bijeli		svijetli		smeđi	
			sivi prah		prah		prah		prah	
Cao		% mas.	37,64	42,12	92,82	93,83	54,85	62,40	23,51	27,00
SiO <sub>2</sub>		% mas.	7,94	2,87	0,49	0,41	8,28	7,04	20,77	25,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		% mas.	16,46	11,72	0,89	1,19	1,37	1,71	7,48	8,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HRN EN ISO 11885:2010	% mas.	8,21	9,46	0,31	0,40	0,91	1,01	5,72	7,02
MgO		% mas.	4,23	4,53	0,71	0,77	1,66	1,44	2,50	3,00
TiO <sub>2</sub>		% mas.	0,76	1,03	0,04	0,05	0,12	0,15	0,36	0,52
Na <sub>2</sub> O		% mas.	0,28	0,28	0,04	0,03	0,19	0,20	0,15	0,15
K <sub>2</sub> O		% mas.	1,31	1,26	0,12	0,13	0,62	0,64	0,54	0,57
SO <sub>3</sub>		% mas.	5,83	7,66	1,40	1,15	9,50	10,67	4,75	5,88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		% mas.	16,02	17,21	0,80	0,83	10,25	11,98	10,40	11,98
Ostalo		računski	1,34	1,87	2,37	1,20	12,25	2,76	23,82	9,70



**Tablica 5 Karakteristike pepela dobivenog spaljivanjem mulja sa zagrebačkog UPOV uz dodatak 20% vapna (maseni udio pojedinih oksida u pepelu)**

Kemijski spoj	Metoda	Mjerna jed.	Izgled uzorka:	
			svijetlo prah	smeđi prah
Cao	HRN EN ISO 11885:2010	% mas.	34,28	38,62
SiO <sub>2</sub>		% mas.	24,17	26,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		% mas.	4,25	4,84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		% mas.	3,82	4,36
MgO		% mas.	0,40	1,31
TiO <sub>2</sub>		% mas.	0,39	0,41
Na <sub>2</sub> O		% mas.	0,12	0,18
K <sub>2</sub> O		% mas.	0,87	0,80
SO <sub>3</sub>		% mas.	5,46	6,45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		% mas.	7,78	9,13
Ostalo	računski	% mas.	18,46	6,96



Tablica 6 Analize kemijskog sastava pepela rađene u vodenom eluatu

Analiza	Mjerna jed.	UPOV		UPOV		UPOV	
		Karlovac	Koprivnica	Varaždin	Zagreb		
		800°C	1000°C	800°C	800°C	1000°C	1000°C
Cl <sup>-</sup>	mg/L	730	140	16	44	23	83
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0,03	0,05	0,06	0,09	0,16	0,12
F <sup>-</sup>	mg/L	0,04	0,74	0,06	0,29	< DL	0,27
S <sup>2-</sup>	µg/L	2	67	< DL	< DL	37	1
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	71	24	3	37	0	22
TDS	mg/L	582	2660	3340	3910	3560	1030
pH	-	10,89	11,97	12,23	12,4	12,3	11,8
TOC	mg/L	11,95	18,72	22,14	-	-	-
DOC	mg/L	9,40	17,87	19,81	12,37	5,27	6,32
TN	mg/L	1,27	1,58	1,90	2,37	1,34	1,06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mg/100g	5,24	1,20	1,04	-	-	-
K <sub>2</sub> O	mg/100g	132,4	60,39	49,75	-	-	-

\*DL- manje od granice detekcije



Tablica 7 Analize sadržaja metala u pepelu rađene u zlatotopci

Metal	Mjerna jed.	UPOV		UPOV		UPOV	
		Karlovac	Koprivnica	Varaždin	Zagreb	800°C	1000°C
K	mg/g ST	3,518	2,140	0,599	5,478	5,168	2,518
Zn	mg/g ST	24,262	0,920	0,815	0,963	0,278	0,770
Co	mg/g ST	0,0298	0,0185	0,0184	0,0031	0,0020	0,0067
V	µg/g ST	21,334	28,891	21,345	280,70	274,00	70,70
Mo	µg/g ST	16,936	14,280	15,975	18,637	12,690	15,142
Ba	µg/g ST	71,114	100,119	14,96	579,70	447,20	552,70
Se	µg/g ST	8,090	6,268	3,992	4,878	5,953	1,126
Cr	µg/g ST	21,929	20,198	2,67	38,10	43,50	42,50
Sr	µg/g ST	140,429	129,911	89,2	230,40	262,90	192,10
Ni	µg/g ST	88,955	52,283	172,35	94,00	121,50	85,50
As	µg/g ST	9,370	11,616	5,49	2,399	2,332	5,115
Pb	µg/g ST	70,364	94,471	6,96	61,50	44,00	170,70
Cd	µg/g ST	2,378	0,894	1,187	0,0375	0,0018	0,0020
Al	mg/g ST	8,495	8,167	7,485	0,5192	0,4925	0,3802
Cu	µg/g ST	207,396	142,307	33,05	136,00	202,50	470,00
Hg	µg/g ST	< DL	< DL	< DL	0,0606	0,0538	< DL

\*DL- manje od granice detekcije



## 6. Studija uzoraka pepela iz termički obrađenog mulja s UPOV-a metodama rendgenske difrakcijske analize i pretražne elektronske mikroskopije

Ovaj dio ispitivanja dobiven je naručenim analizama u suradnji s Fakultetom kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. U nastavku će se dati prikaz studija do sada obrađenih uzoraka pepela.

### 6.1 Uzorci i mjerjenje

Na analizu su dostavljena tri praškasta uzorka mulja s UPOV Karlovac (pepela dobivenog spaljivanjem mulja), termički obrađenog pri različitim temperaturama (800, 900, 1000 °C). Uzorci su četvrtanjem smanjeni na količinu potrebnu za analizu, smješteni u nosač te podvrgnuti rendgenskoj difrakcijskoj analizi (XRD) na difraktometru Shimadzu XRD-6000 sa CuK $\alpha$  zračenjem, uz ubrzavajući napon od 40 kV i struju 30 mA, u području 5 – 80 2 $\theta$ ° s korakom 0.02 2 $\theta$ ° i vremenom zadržavanja od 0,6 sekundi. Kvalitativna analiza provedena je korištenjem ICDD baze difrakcijskih podataka i literaturnih podataka te računalnog programskog paketa X'PertHighScore Plus. Rezultati su grafički prikazani kao funkcija intenziteta difrakcijskih maksimuma o kutu difracije.

Morfologija uzoraka ispitana je elektronskom mikroskopijom. Osim tri praškasta uzorka termički obrađenog mulja ispitana je i uzorak očvrsnulog čistog morta te uzorci očvrsnulog morta u koje je prilikom priprave dodana različita količina pepela spaljenog na različitim temperaturama. Prikladna količina uzoraka smještena je na ljepljivu traku te potom na nosače. Kako bi bili vodljivi uzorci su napareni zlatom/paladijem u plazmi argona korištenjem naparivača Quorum SC 7620. Potom je morfologija uzoraka ispitana metodom pretražne elektronske mikroskopije (SEM) na uređaju Tescan Vega 3. Na Slikama 14-15 prikazani su selektirani mikroografi.

Tablica 8 Denominacija uzoraka pepela

Lokalitet UPOV-a:	Karlovac		
Temperatura spaljivanja	800°C	900°C	1000°C
Uzorak	<b>800Ka</b>	<b>900Ka</b>	<b>1000Ka</b>

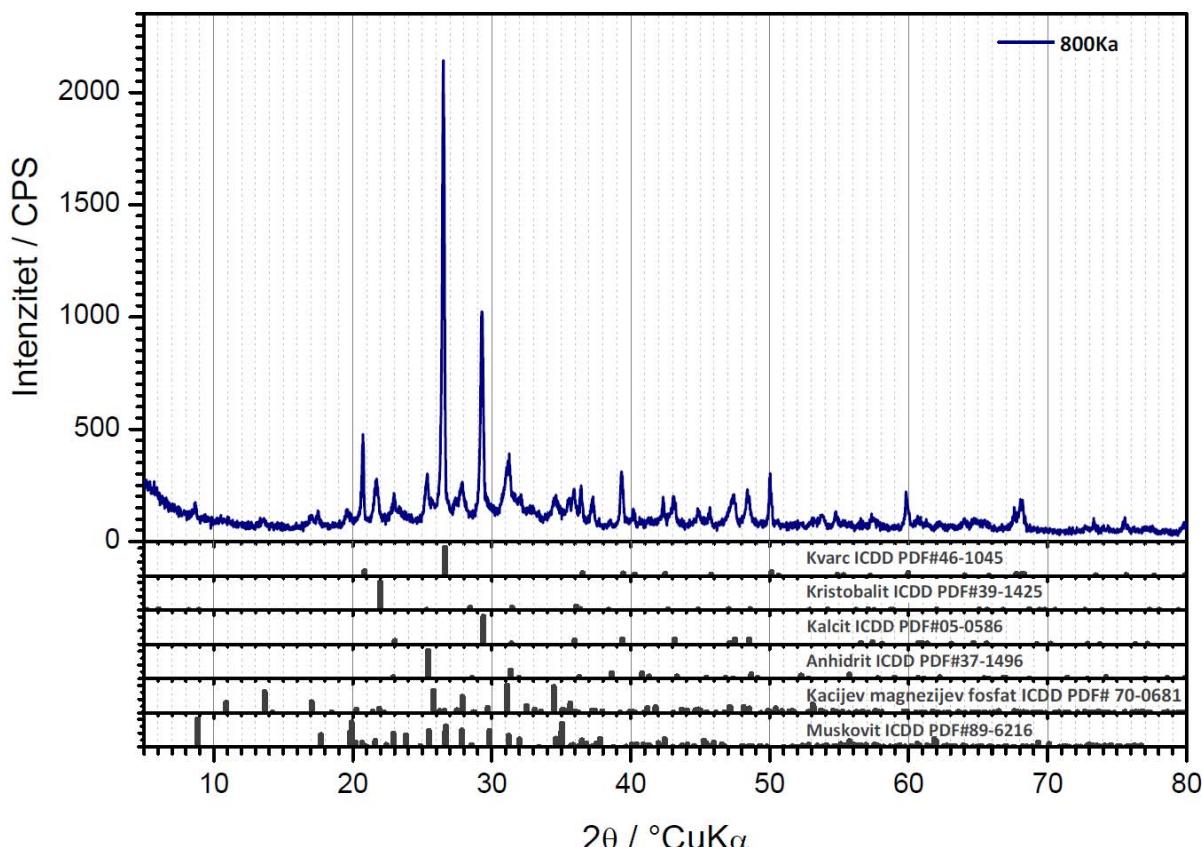


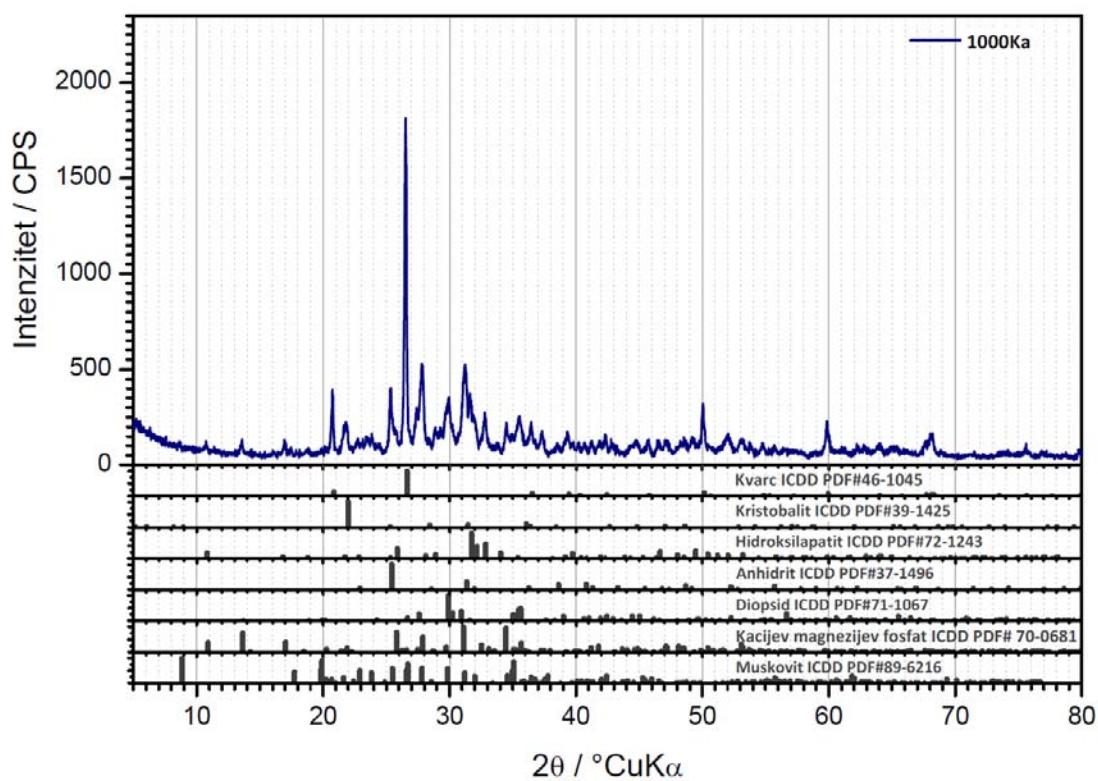
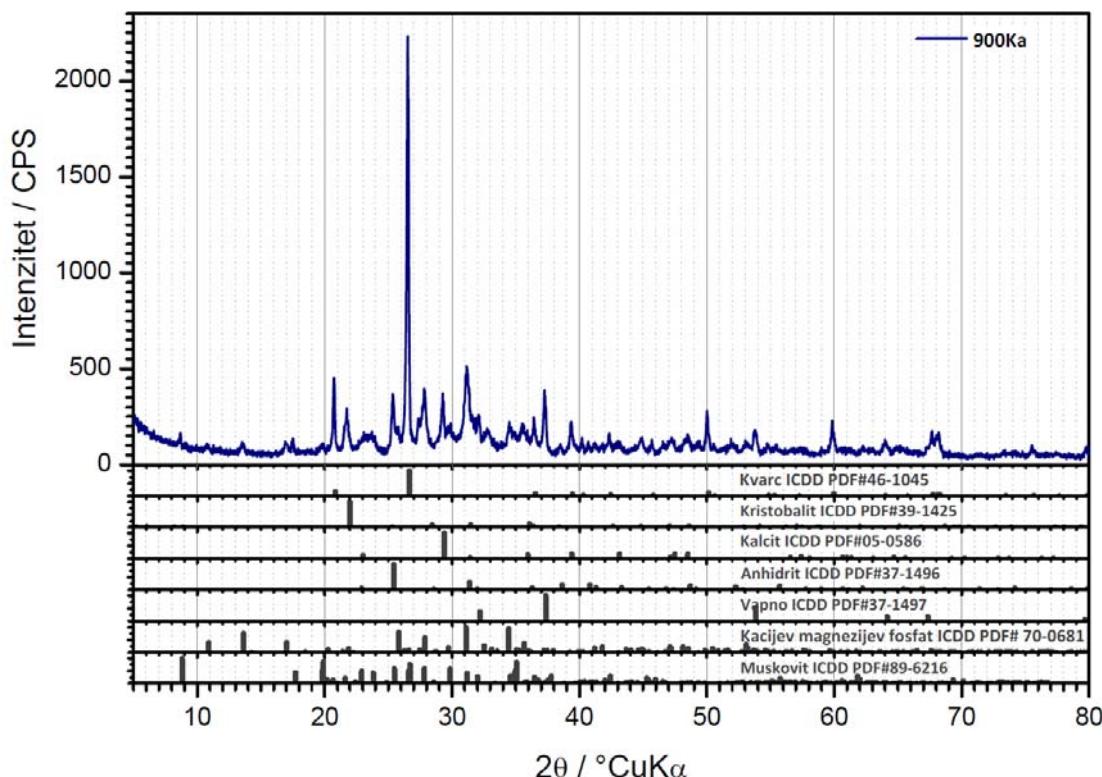
## 6.2 Rezultati

### XRD analize

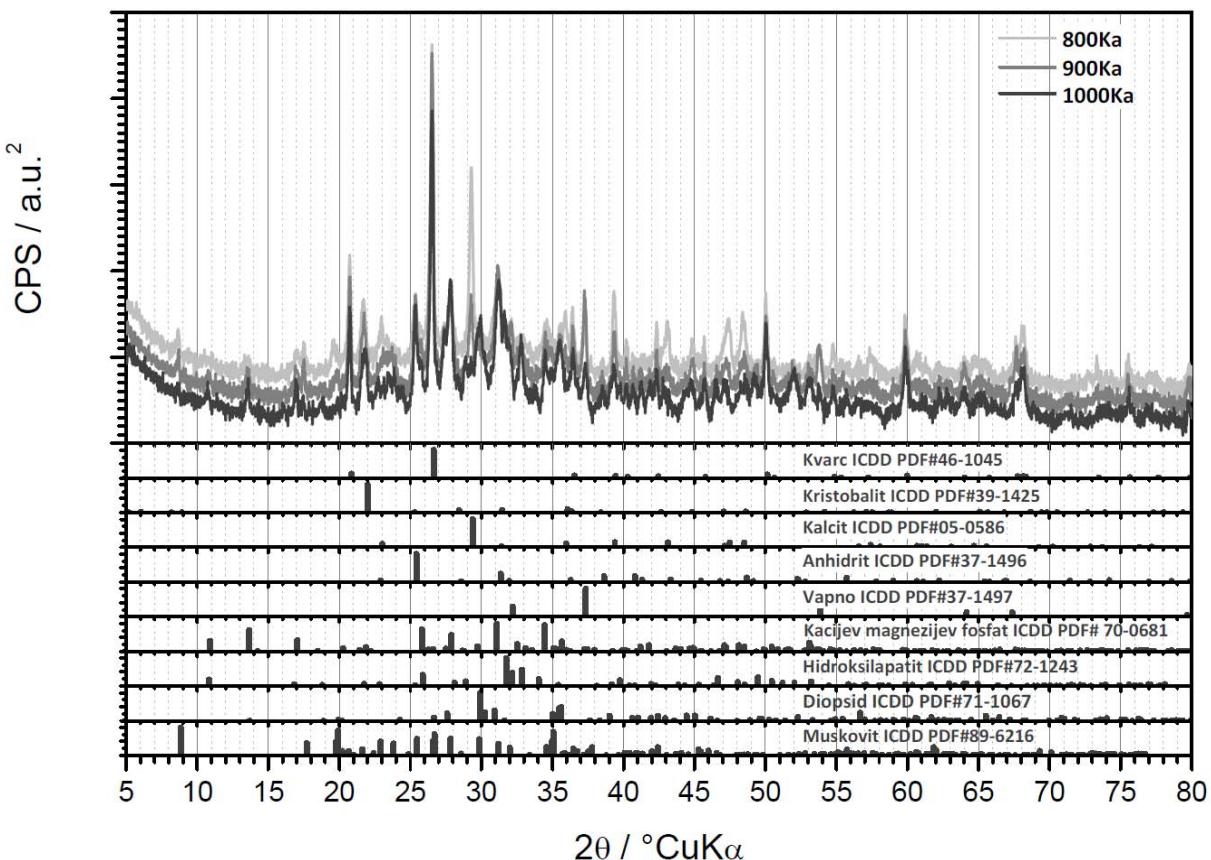
Uzorci pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac pri različitim temperaturama iskazuju difraktograme karakteristične za kompleksne uzorkе s velikom količinom kristalnih faza i sa znatnom količinom amorfne faze. No uzorci po termičkoj obradi pri različitim temperaturama ipak daju poprilično slične difraktograme. Primarno se uzorci mogu razlikovati tek u različitim udjelima prisutnih faza.

Uzorak termički obrađen pri 800 °C kao glavnu fazu daje kvarc,  $\text{SiO}_2$ . Uz kvarc nalazi se i manja količina kristobalita  $\text{SiO}_2$ . Prisutnost te količina silicijevih oksida neovisni su o temperaturi termičke obrade uzorka. Prisutne su i faze kalcita,  $\text{CaCO}_3$ , anhidrita  $\text{CaSO}_4$  te kalcijevog magnezijevog fosfata  $\text{Ca}_{2.86}\text{Mg}_{0.14}(\text{PO}_4)_3$  što je u skladu s kemijskim sastavom bogatim na kalciju. Nadalje uočava se prisutnost i muskovita,  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . Najbolje slaganje eksperimentalnih podataka s bazom difrakcijskih podataka uočeno je za muskovit ( $\text{K}_{0.727}\text{Na}_{0.170}\text{Ca}_{0.011})(\text{Al}_{0.933}\text{Fe}_{0.016}\text{Mg}_{0.011})_2(\text{Si}_{0.782}\text{Al}_{0.221}\text{Ti}_{0.005})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ .





Slika 12 HRD difraktogrami uzorka pepela: 800Ka, 900Ka te 1000Ka; kristalni sastav pojedinih uzoraka



Slika 13 Difraktogrami uzorka pepela

Uzorak termički obrađen pri 900 °C ima sve kristalne faze kao i uzorak obrađen pri 800 °C, dok kod uzorka obrađenog na 1000 °C ima razlike i u kvalitativnom sastavu. Kvarc i kristobalit prisutni su u skoro identičnim udjelima u svim uzorcima. Pri 900 °C uočava se nešto veći intenzitet maksimuma muskovita što može biti i posljedica preferirane orientacije uslijed dehidroksilacije do koje dolazi zbog povišenja temperature termičke obrade. Pri 1000 °C intenzitet maksimuma muskovitnih faza značajno pada što ukazuje na uznapredovalu degradaciju istih. Kalcit se sa povišenjem temperature termički razgrađuje te je u manjem udjelu prisutan pri 900 °C dok na 1000 °C u potpunosti nestaje. Intenziteti maksimuma faze kalcijevog magnezijevog fosfata jačaju s povišenjem temperature termičke obrade, što je u skladu s razgradnjom kalcita. Po raspodu većine kalcita se kao prijelazna faza pri 900 °C javlja kalcijev oksid, CaO, dok je pri ostalim temperaturama obrade nije uočen. Pri 1000 °C se može uočiti nastajanje hidroksiapatita  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  dok je pri 900 °C prisutan u tragovima. Pri temperaturi od 1000 °C dolazi do kristalizacije kalcijevog magnezijevog silikata koji se nalazi u tragovima: diopsida  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ .

Svi maksimumi su asignirani kristalnim fazama stoga ostale kristalne faze ili nisu prisutne ili se nalaze u udjelima nedostatnim za asignaciju. Naime nedvosmislena asignacija minornih komponenata otežana je i zbog prisutnosti velikog broja maksimuma relativno slabog intenziteta pri čemu znatno



preklapanje maksimuma dolazi do izražaja. Također zbog izostrukturne sličnosti pojedinih kristalnih faza lako je moguće da dolazi do stvaranja čvrstih otopina sa drugim metalnim ionima koji su prisutni u sustavu u manjim udjelima, pogotovo kao posljedica promjene temperature termičke obrade.

**Na temelju stabilnosti pojedinih faza moglo bi se prepostaviti da temperatura obrade od 800 °C nije dovoljno visoka da razgradi mulj u potpunosti, dok je pri 900 °C raspodjeljenje uzorka došao do izražaja. Pri 1000 °C se već stvaraju faze koje nisu interesantne pri hidrataciji cementnog materijala. Čini se da bi temperatura od 900 °C mogla biti najoptimalnija u pogledu kakvoće pepela koji bi se ugrađivao u cementni mort i beton.**

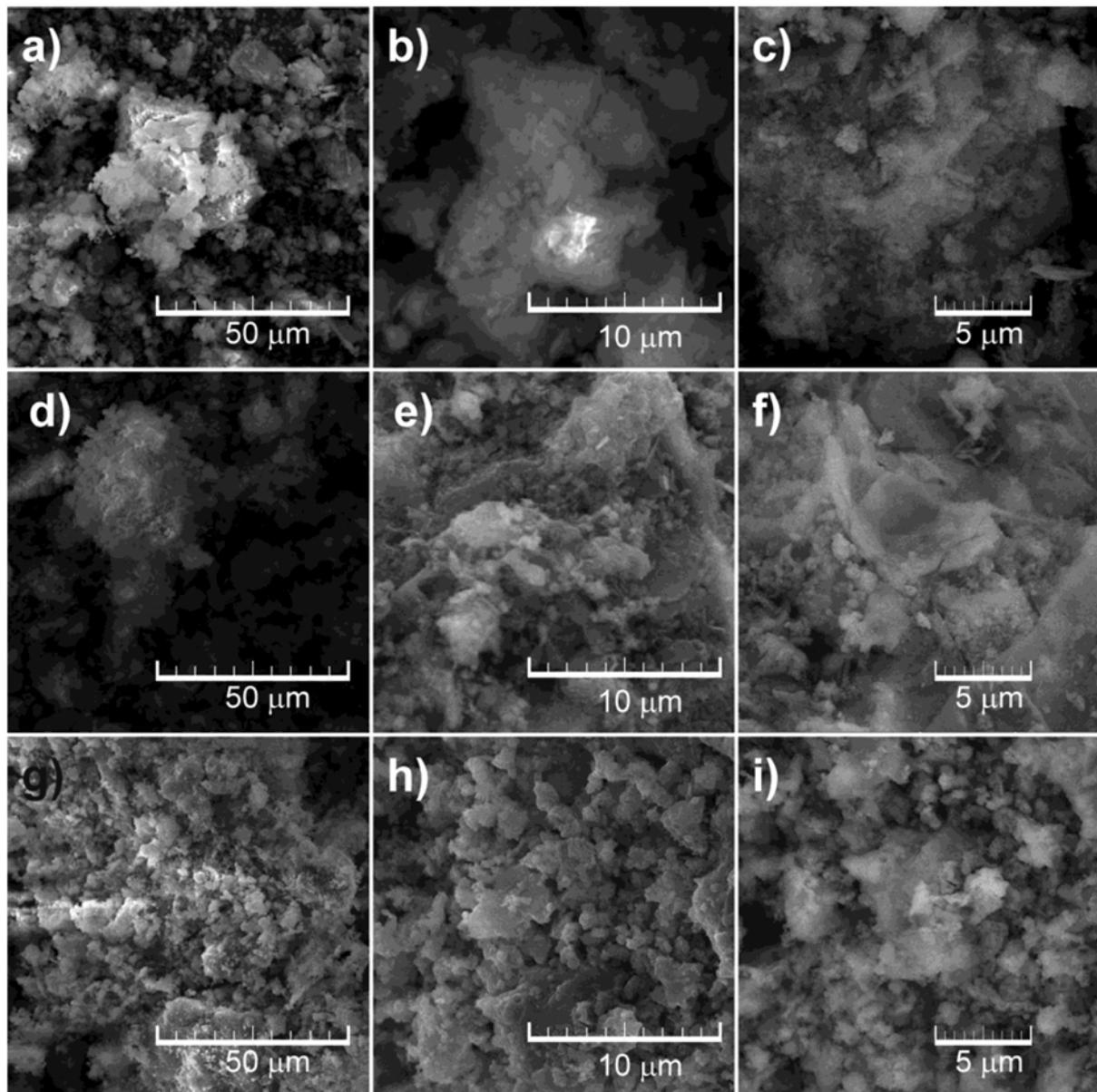
### **Pretražna elektronska mikroskopija (SEM)**

Morfologija uzorka ispitana je pretražnom elektronskom mikroskopijom. Za sve uzorke pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac pri različitim temperaturama i cementnog morta u koji je pepeo ugrađen mikrografi iskazuju sličnu morfologiju. Uočavaju se polidisperzna zrna. Čestice su prisutne u širokom rasponu raspodjele veličina i sa značajnim različitostima u obliku. Ipak prevladavaju čestice nepravilnih oblika pri čemu je uočljiva i značajna razina aglomeracije. S povišenjem temperature, odnosno pri najvišoj temperaturi obrade uočavaju se bolje definirana zrna te (oštiri) bridovi).

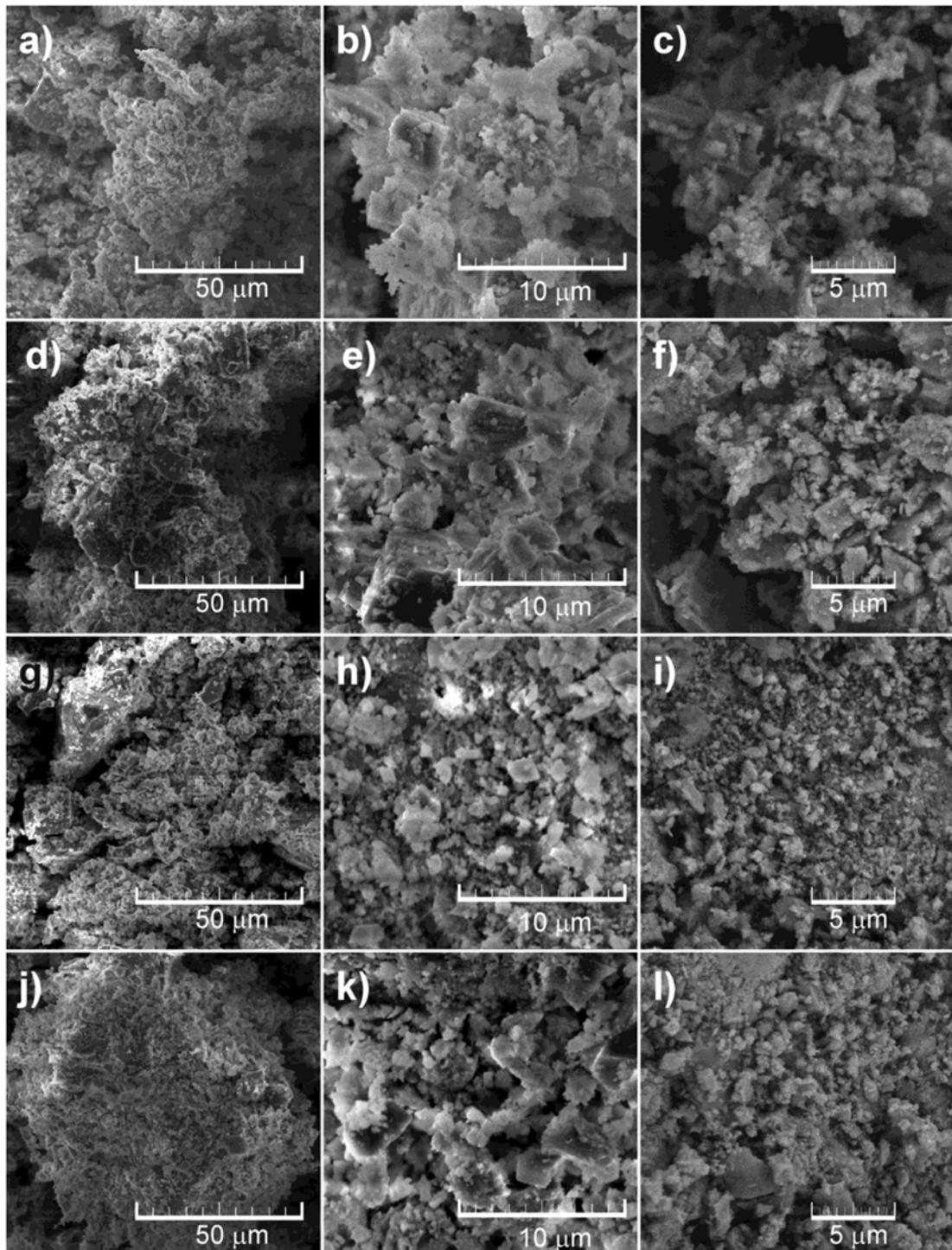
Područja različitog kemijskog sastava nisu dobro uočljiva što ukazuje da je raspored kristala različitih faza u uzorcima homogen te da su ti kristali vrlo malih dimenzija. Na osnovu istog nije moguće uočiti značajnije različitosti kemijskog sastava u morfologiji uzorka termički obrađenih pri različitim temperaturama. Tek u uzorku termički obrađenom na najvišu temperaturu uočava se postojanje separatnih zrna za koje se može reći da su različitog kemijskog sastava.

Uzorak čistog očvrsnulog morta ima morfologiju karakterističnu za usitnjeni očvrsli cementni materijal. Radi se opet o nepravilnim česticama široke raspodjele veličina bez značajnije izraženih pora i relativno homogene površine.

Uzorci očvrsnulog morta kojima je prilikom priprave dodan pepeo dobiven spaljivanjem mulja mogu se opisati morfologijom polidisperznih čestica širokog raspona veličina i oblika te visoke razine aglomeriranosti. Dodatkom 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja pri različitim temperaturama morfologija se ne mijenja značajno. Ipak razlike u stupnju aglomeracije te naizgled i u modalitetu raspodjele veličine čestica postoje. Valja imati u vidu da je utjecaj dodataka zasigurno razvidniji na samoj granici među pojedinim fazama. Praćenje promjena na granici faza nadilazi mogućnosti ove metode, no ipak posredno se utjecaj spomenutih promjena može očitovati praćenjem nekih drugih svojstava materijala, poput mehaničke čvrstoće i sl.



Slika 14 Mikroografi uzorka termički obrađenog mulja; snimke sekundarnim elektronima a,b) uzorak 800Ka; d,e) uzorak 900Ka; g,h) uzorak 1000Ka; snimke povratno raspršenim elektronima: c) uzorak 800Ka, f) uzorak 900Ka, i) uzorak 1000Ka



Slika 15

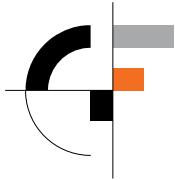
Mikroografi uzorka čistog očvrsnulog morta a,b) sekundarnim elektronima, c) povratno raspršenim elektronima; očvrsnulog morta sa dodatkom 20% termički obrađenog mulja pri  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  d,e) sekundarnim elektronima, f) povratno raspršenim elektronima; očvrsnulog morta sa dodatkom 20% termički obrađenog mulja pri  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  g,h) sekundarnim elektronima, i) povratno raspršenim elektronima; očvrsnulog morta sa dodatkom 20% termički obrađenog mulja pri  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  j,k) sekundarnim elektronima, l) povratno raspršenim elektronima



## 7. Zaključak

Iz prikazanih rezultata očito je da se spaljivanjem muljeva iz različitih izvora (s različitih UPOV) koji koriste različite tehnologije obrade mulja generiraju pepeli bitno različitih fizikalnih karakteristika i kemijskog sastava. Također, potvrđeno je i da temperatura spaljivanja mulja utječe na svojstva generiranog pepela.

U nastavku istraživanja predviđa se provesti dodatne fizikalne i kemijske analize preostalih uzoraka pepela, čime će se dobiti mogućnost provođenja detaljnijih usporedbi i povezivanja pojedinih procesa, prvenstveno porijekla mulja i temperature njegova spaljivanja, s karakteristikama rezultirajućeg pepela.



## 8. Tekstualni prilozi

### 8.1 Prilog 1. Dinamika sušenja i spaljivanja mulja

#### Mulj s UPOV-a Karlovac

Sušenje (na 105°C) stabiliziranog i dehidriranog mulja s UPOV-a Karlovac			
Datum	Masa mulja prije sušenja (g)	Masa mulja nakon sušenja (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
15.12.2014.	7107.0	2936.0	41.3
15.12.2014.	8254.0	3379.0	40.9
19.12.2014.	7388.4	3031.0	41.0
19.12.2014.	7977.5	3286.0	41.2
21.12.2014.	4967.4	2040.3	41.1
21.12.2014.	4303.4	1653.8	38.4
08.01.2015.	12319.0	4706.0	38.2
08.01.2015.	11259.0	3958.3	35.2

Ukupno dobiveno osušenog mulja (g): 24990.4

Preostalo mase u odnosu na početnu masu (prosječno): 39.31%

\*Mulj je sušen do konstantne mase i ustanovljeno je da je potrebno vrijeme sušenja oko 32h.



Spaljivanje osušenog mulja s UPOV-a Karlovac					
Datum	Temperatura spaljivanja (°C)	Trajanje spaljivanja (h)	Masa mulja prije spaljivanja (g)	Masa dobivenog pepela (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
15.01.2015.	800	3	875.4	513.8	58.7
16.01.2015.		5	881.8	505.9	57.4
19.01.2015.		7	879.0	486.7	55.4
20.01.2015.		5	794.8	421.6	53.0
22.01.2015.		5	802.5	473.8	59.0
23.01.2015.		3.5	830.4	478.5	57.6
26.01.2015.		3.5	819.5	481.1	58.7
27.01.2015.		3.5	957.4	568.8	59.4
28.01.2015.		3.5	771.9	449.3	58.2
29.01.2015.		3.5	752.7	439.1	58.3
30.01.2015.		3.5	761.6	446.5	58.6
02.02.2015.		3.5	587.6	340.6	58.0
03.02.2015.		3.5	881.0	512.7	58.2
18.02.2015.	900	3	924	515.4	55.8
19.02.2015.		4	768.4	418.5	54.5
20.02.2015.		2.5	482.6	262.3	54.4
21.02.2015.		2.5	599.4	331.6	55.3
22.02.2015.		2.5	667.5	374.7	56.1
24.02.2015.		2.5	779	420.7	54.0
25.02.2015.		2.5	555.7	306.5	55.2
26.02.2015.		2.5	681.3	379.7	55.7
26.02.2015.		2.5	607.9	341.2	56.1
27.02.2015.		2.5	523.9	287.5	54.9
27.02.2015.		2.5	613.2	347.3	56.6
28.02.2015.		2.5	699.1	392.2	56.1
01.03.2015.		2.5	742.7	416.2	56.0
02.03.2015.		2.5	391.4	220	56.2
03.03.2015.		2.5	400	220	55.0
04.03.2015.	1000	2.5	640	340	53.1
04.03.2015.		2.5	590	310	52.5
05.03.2015.		2.5	1240	670	54.0
05.03.2015.		2.5	670	370	55.2
06.03.2015.		2.5	990	545	55.1
06.03.2015.		2.5	720	400	55.6
07.03.2015.		2.5	830	450	54.2

Ukupno dobiveno pepela na 800°C (g): 6118.4

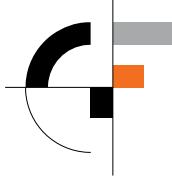
Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 57.74%

Ukupno dobiveno pepela na 900°C (g): 5233.8

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 55.47%

Ukupno dobiveno pepela na 1000°C (g): 3085.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 54.31%



## Mulj s UPOV-a Koprivnica

\*Mulj nije sušen budući da je sadržaj suhe tvari u ovom mulju već preko 90%.

Spaljivanje osušenog mulja s UPOV-a Koprivnica					
Datum	Temperatura spaljivanja (°C)	Trajanje spaljivanja (h)	Masa mulja prije spaljivanja (g)	Masa dobivenog pepela (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
09.03.2015.	800	4	660.0	500.0	75.8
10.03.2015.		6	740.0	520.0	70.3
11.03.2015.		4	630.0	450.0	71.4
11.03.2015.		2.5	500.0	360.0	72.0
12.03.2015.		3	740.0	540.0	73.0
13.03.2015.		3	500.0	370.0	74.0
13.03.2015.		3	720.0	530.0	73.6
14.03.2015.		3	650.0	480.0	73.8
14.03.2015.		3	710.0	520.0	73.2
15.03.2015.		3	450.0	330.0	73.3
16.03.2015.		3	690.0	510.0	73.9
16.03.2015.		3	460.0	340.0	73.9
17.03.2015.		3	680.0	505.0	74.3
17.03.2015.		3	520.0	385.0	74.0
18.03.2015.		3	530.0	390.0	73.6
18.03.2015.		3	510.0	380.0	74.5
19.03.2015.		3	490.0	360.0	73.5
19.03.2015.		3	560.0	410.0	73.2
20.03.2015.		3	570.0	420.0	73.7
23.03.2015.		3	520.0	385.0	74.0
23.03.2015.		3	460.0	340.0	73.9
24.03.2015.		3	690.0	510.0	73.9
24.03.2015.		3	720.0	530.0	73.6
25.03.2015.		3	650.0	480.0	73.8
25.03.2015.		3	500.0	370.0	74.0
26.03.2015.		3	450.0	330.0	73.3
26.03.2015.		3	490.0	360.0	73.5
27.03.2015.		3	500.0	370.0	74.0
27.03.2015.		3	630.0	460.0	73.0
28.03.2015.		3	600.0	440.0	73.3
29.03.2015.		3	520.0	380.0	73.1
29.03.2015.		3	530.0	390.0	73.6
30.03.2015.		3	490.0	360.0	73.5
30.03.2015.		3	680.0	500.0	73.5
31.03.2015.		3	620.0	460.0	74.2
31.03.2015.		3	610.0	450.0	73.8



01.04.2015.	900	2.5	680.0	490.0	72.1
01.04.2015.		2.5	700.0	500.0	71.4
02.04.2015.		2.5	650.0	470.0	72.3
07.04.2015.	800	3	540.0	400.0	74.1
07.04.2015.		3	600.0	440.0	73.3
08.04.2015.		3	590.0	440.0	74.6
08.04.2015.		3	620.0	460.0	74.2
09.04.2015.		3	540.0	400.0	74.1
09.04.2015.		3	490.0	360.0	73.5
10.04.2015.		3	650.0	480.0	73.8
10.04.2015.		3	610.0	450.0	73.8
11.04.2015.		3	520.0	380.0	73.1
11.04.2015.		3	610.0	450.0	73.8
12.04.2015.		3	590.0	430.0	72.9
13.04.2015.		3	560.0	410.0	73.2
13.04.2015.		3	490.0	360.0	73.5
14.04.2015.	900	2.5	700.0	500.0	71.4
14.04.2015.		2.5	560.0	400.0	71.4
15.04.2015.		2.5	580.0	420.0	72.4
16.04.2015.		2.5	600.0	430.0	71.7
16.04.2015.		2.5	590.0	420.0	71.2
17.04.2015.		2.5	610.0	440.0	72.1
17.04.2015.		2.5	540.0	390.0	72.2
19.04.2015.		2.5	650.0	470.0	72.3
20.04.2015.		2.5	700.0	500.0	71.4
20.04.2015.		2.5	560.0	400.0	71.4
21.04.2015.		2.5	550.0	400.0	72.7
21.04.2015.		2.5	600.0	430.0	71.7
22.04.2015.		2.5	630.0	450.0	71.4
22.04.2015.		2.5	580.0	420.0	72.4
23.04.2015.		2.5	560.0	400.0	71.4
23.04.2015.		2.5	530.0	380.0	71.7
24.04.2015.		2.5	680.0	490.0	72.1
24.04.2015.		2.5	690.0	500.0	72.5
25.04.2015.		2.5	670.0	480.0	71.6
25.04.2015.		2.5	710.0	510.0	71.8
27.04.2015.		2.5	700.0	500.0	71.4
27.04.2015.		2.5	730.0	520.0	71.2
28.04.2015.		2.5	650.0	470.0	72.3
28.04.2015.		2.5	630.0	450.0	71.4



29.04.2015.	1000	2.5	515.0	360.0	69.9
29.04.2015.		2.5	545.0	380.0	69.7
30.04.2015.		2.5	535.0	375.0	70.1
02.05.2015.		2.5	740.0	520.0	70.3
04.05.2015.		2.5	560.0	400.0	71.4
04.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
05.05.2015.		2.5	580.0	410.0	70.7
05.05.2015.		2.5	590.0	410.0	69.5
06.05.2015.		2.5	620.0	440.0	71.0
06.05.2015.		2.5	610.0	430.0	70.5
07.05.2015.		2.5	560.0	390.0	69.6
07.05.2015.		2.5	550.0	390.0	70.9
08.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
08.05.2015.		2.5	520.0	360.0	69.2
09.05.2015.		2.5	730.0	510.0	69.9
09.05.2015.		2.5	610.0	430.0	70.5
11.05.2015.		2.5	740.0	520.0	70.3
11.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
12.05.2015.		2.5	560.0	390.0	69.6
12.05.2015.		2.5	610.0	430.0	70.5
13.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
13.05.2015.		2.5	560.0	400.0	71.4
13.05.2015.		2.5	540.0	380.0	70.4
14.05.2015.		2.5	540.0	380.0	70.4
14.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
15.05.2015.		2.5	630.0	440.0	69.8
15.05.2015.		2.5	570.0	400.0	70.2
16.05.2015.		2.5	590.0	410.0	69.5
17.05.2015.		2.5	580.0	410.0	70.7
17.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
18.05.2015.		2.5	560.0	400.0	71.4
18.05.2015.		2.5	570.0	400.0	70.2
19.05.2015.		2.5	740.0	520.0	70.3
19.05.2015.		2.5	560.0	390.0	69.6
25.05.2015.		2.5	600.0	420.0	70.0
25.05.2015.		2.5	610.0	430.0	70.5
26.05.2015.	900	2.5	710.0	510.0	71.8
26.05.2015.		2.5	720.0	520.0	72.2
27.05.2015.		2.5	680.0	490.0	72.1
27.05.2015.		2.5	670.0	480.0	71.6
02.06.2015.	1000	2.5	740.0	520.0	70.3
03.06.2015.		2.5	710.0	500.0	70.4
03.06.2015.		2.5	690.0	490.0	71.0 30



04.06.2015.	900	2.5	690.0	500.0	72.5
04.06.2015.		2.5	700.0	500.0	71.4
07.06.2015.		2.5	650.0	470.0	72.3
08.06.2015.		2.5	730.0	520.0	71.2
11.06.2015.	1000	2.5	710.0	500.0	70.4
12.06.2015.		2.5	670.0	470.0	70.1

Ukupno dobiveno pepela na 800°C (g): 20875.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 73.56%

Ukupno dobiveno pepela na 900°C (g): 16220.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 71.83%

Ukupno dobiveno pepela na 1000°C (g): 17525.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 70.25%



## Mulj s UPOV-a Varaždin

<b>Sušenje (na 105°C) stabiliziranog i dehidriranog mulja s UPOV-a Varaždin</b>			
Datum	Masa mulja prije sušenja (g)	Masa mulja nakon sušenja (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
21.01.2015.	10430.9	2529.0	24.2
21.01.2015.	6534.3	1554.4	23.8
26.01.2015.	6863.3	1622.6	23.6
26.01.2015.	6599.7	1588.1	24.1
28.01.2015.	7555.5	1824.1	24.1
28.01.2015.	7360.6	1776.8	24.1
30.01.2015.	7382.1	1788.2	24.2
30.01.2015.	7771.6	1917.3	24.7
02.02.2015.	5483.7	1347.2	24.6
02.02.2015.	6638.5	1630.0	24.6
18.02.2015.	8836.9	2185.8	24.7
18.02.2015.	6981.5	1686.6	24.2
20.02.2015.	4783.8	1141.2	23.9
20.02.2015.	4963.9	1204.2	24.3
22.02.2015.	5734.9	1405.5	24.5
22.02.2015.	6777.4	1651.4	24.4
25.02.2015.	5114.4	1261.2	24.7
25.02.2015.	4809.6	1166.7	24.3
27.02.2015.	7075.4	1658.4	23.4
27.02.2015.	6954.8	1666.0	24.0
02.03.2015.	5035.7	1170.0	23.2
02.03.2015.	5593.9	1336.0	23.9

Ukupno dobiveno osušenog mulja (g): 35110.7

Preostalo mase u odnosu na početnu masu (prosječno): 24.17%

\*Mulj je sušen do konstantne mase i ustanovljeno je da je potrebno vrijeme sušenja oko 32h.



Spaljivanje osušenog mulja s UPOV-a Varaždin					
Datum	Temperatura spaljivanja (°C)	Trajanje spaljivanja (h)	Masa mulja prije spaljivanja (g)	Masa dobivenog pepela (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
27.05.2015.	800	3	540.0	260.0	48.1
27.05.2015.	1000	2.5	560.0	250.0	44.6
14.07.2015.	800	3	520.0	250.0	48.1
15.07.2015.		3	510.0	240.0	47.1
16.07.2015.		3	460.0	220.0	47.8
17.07.2015.		3	530.0	250.0	47.2
18.07.2015.		3	540.0	260.0	48.1
20.07.2015.		3	530.0	260.0	49.1
21.07.2015.		3	510.0	240.0	47.1
22.07.2015.		3	490.0	230.0	46.9
23.07.2015.		3	510.0	250.0	49.0
24.07.2015.		3	560.0	270.0	48.2
27.07.2015.		3	530.0	250.0	47.2
28.07.2015.		3	490.0	230.0	46.9
29.07.2015.		3	510.0	250.0	49.0
30.07.2015.		3	540.0	260.0	48.1
31.08.2015.		3	460.0	220.0	47.8

Ukupno dobiveno pepela na 800°C (g): 3940.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 47.87%

Ukupno dobiveno pepela na 1000°C (g): 250.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 44.64%



## Mulj s UPOV-a Zagreb

<b>Sušenje (na 105°C) stabiliziranog i dehidriranog mulja s UPOV-a Zagreb</b>			
Datum	Masa mulja prije sušenja (g)	Masa mulja nakon sušenja (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
04.03.2015.	7876.0	3036.0	38.5
04.03.2015.	8080.0	3000.0	37.1
06.03.2015.	5840.0	2240.0	38.4
06.03.2015.	7146.0	2676.0	37.4
09.03.2015.	8596.0	3196.0	37.2
09.03.2015.	8580.0	3060.0	35.7
11.03.2015.	9690.0	3650.0	37.7
11.03.2015.	8696.0	3216.0	37.0
13.03.2015.	11720.0	4450.0	38.0
13.03.2015.	12056.0	4776.0	39.6
15.03.2015.	9260.0	3520.0	38.0
15.03.2015.	10376.0	3940.0	38.0

Ukupno dobiveno osušenog mulja (g): 40760.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu (prosječno): 37.77%

\*Mulj je sušen do konstantne mase i ustanovljeno je da je potrebno vrijeme sušenja oko 32h.



**Spaljivanje osušenog mulja s UPOV-a Zagreb**

Datum	Temperatura spaljivanja (°C)	Trajanje spaljivanja (h)	Masa mulja prije spaljivanja (g)	Masa dobivenog pepela (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
26.05.2015.	800	3	650.0	370.0	56.9
26.05.2015.	1000	2.5	630.0	320.0	50.8
29.05.2015.		3	660.0	370.0	56.1
29.05.2015.		3	620.0	350.0	56.5
31.05.2015.		3	690.0	390.0	56.5
31.05.2015.		3	590.0	340.0	57.6
01.06.2015.		3	610.0	350.0	57.4
01.06.2015.		3	600.0	340.0	56.7
02.06.2015.		3	620.0	350.0	56.5
05.06.2015.		3	710.0	400.0	56.3
05.06.2015.		3	590.0	340.0	57.6
06.06.2015.		3	690.0	390.0	56.5
06.06.2015.		3	710.0	410.0	57.7
07.06.2015.		3	650.0	370.0	56.9
08.06.2015.		3	700.0	400.0	57.1
09.06.2015.		2.5	710.0	370.0	52.1
09.06.2015.		2.5	730.0	380.0	52.1
10.06.2015.		2.5	750.0	390.0	52.0
10.06.2015.		2.5	740.0	380.0	51.4
11.06.2015.		2.5	690.0	360.0	52.2
11.06.2015.		2.5	700.0	360.0	51.4
12.06.2015.		2.5	660.0	340.0	51.5
12.06.2015.		2.5	710.0	360.0	50.7
13.06.2015.		2.5	630.0	320.0	50.8
13.06.2015.		2.5	680.0	350.0	51.5
14.06.2015.		2.5	690.0	350.0	50.7
14.06.2015.		2.5	700.0	360.0	51.4
15.06.2015.		2.5	630.0	320.0	50.8
15.06.2015.		2.5	670.0	360.0	53.7
16.06.2015.		2.5	700.0	380.0	54.3
16.06.2015.		2.5	690.0	370.0	53.6
17.06.2015.		2.5	730.0	390.0	53.4
17.06.2015.		2.5	710.0	370.0	52.1
18.06.2015.		2.5	680.0	360.0	52.9
18.06.2015.		2.5	720.0	380.0	52.8
22.06.2015.		2.5	670.0	360.0	53.7



29.06.2015.	700	3	650.0	380.0	58.5
29.06.2015.		3	690.0	420.0	60.9
30.06.2015.		3	670.0	400.0	59.7
30.06.2015.		3	710.0	430.0	60.6
06.07.2015.		3	730.0	440.0	60.3
06.07.2015.		3	710.0	420.0	59.2
08.07.2015.		3	650.0	390.0	60.0
09.07.2015.		3	620.0	370.0	59.7
10.07.2015.		3	630.0	380.0	60.3

Ukupno dobiveno pepela na 700°C (g): 3630.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 59.90%

Ukupno dobiveno pepela na 800°C (g): 5170.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 56.88%

Ukupno dobiveno pepela na 900°C (g): 2970.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 53.32%

Ukupno dobiveno pepela na 1000°C (g): 4960.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 51.40%

<b>Suspaljivanje osušenog mulja s UPOV-a Zagreb i vapna u omjeru 90%:10%</b>					
Datum	Temperatura spaljivanja (°C)	Trajanje spaljivanja (h)	Masa mulja prije spaljivanja (g)	Masa dobivenog pepela (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
19.05.2015.	800	3	750.0	460.0	61.3
19.05.2015.		3	710.0	430.0	60.6
20.05.2015.	1000	2.5	700.0	410.0	58.6
20.05.2015.		2.5	720.0	420.0	58.3
24.05.2015.	800	2.5	690.0	420.0	60.9
25.05.2015.	1000	3	700.0	410.0	58.6
25.05.2015.		3	690.0	410.0	59.4
28.05.2015.	800	2.5	720.0	440.0	61.1

Ukupno dobiveno pepela na 800°C (g): 1750.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 60.98%

Ukupno dobiveno pepela na 1000°C (g): 1650.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 58.72%



Suspaljivanje osušenog mulja s UPOV-a Zagreb i vapna u omjeru 80%:20%					
Datum	Temperatura spaljivanja (°C)	Trajanje spaljivanja (h)	Masa mulja prije spaljivanja (g)	Masa dobivenog pepela (g)	Preostalo mase u odnosu na početnu masu (%)
21.05.2015.	1000	2.5	710.0	450.0	63.4
21.05.2015.		2.5	730.0	460.0	63.0
22.05.2015.		2.5	690.0	430.0	62.3
23.05.2015.	800	3	680.0	450.0	66.2
23.05.2015.		3	710.0	470.0	66.2
24.05.2015.		3	710.0	460.0	64.8
30.05.2015.	1000	3	690.0	450.0	65.2
30.05.2015.		2.5	670.0	420.0	62.7

Ukupno dobiveno pepela na 800°C (g): 1830.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 65.59%

Ukupno dobiveno pepela na 1000°C (g): 1760.0

Preostalo mase u odnosu na početnu masu : 62.86%