

# Korištenje mulja s UPOV-a u proizvodnji betona i betonskih elemenata

---

**Zlatković La Gioia, Andrea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:010314>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-29**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Andrea Zlatković La Gioia

**KORIŠTENJE MULJA S UREĐAJA ZA  
PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U  
PROIZVODNJI BETONA I BETONSKIH  
ELEMENATA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Andrea Zlatković La Gioia

**KORIŠTENJE MULJA S UREĐAJA ZA  
PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U  
PROIZVODNJI BETONA I BETONSKIH  
ELEMENATA**

ZAVRŠNI ISPIT

izv.prof.dr.sc. Dražen Vouk

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Andrea Zlatković La Gioia

**USE OF SEWAGE SLUDGE IN THE  
PRODUCTION OF CONCRETE AND  
CONCRETE ELEMENTS**

FINAL EXAM

izv.prof.dr.sc. Dražen Vouk

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Andrea Zlatković La Gioia

(Ime i prezime)

0082067962

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

KORIŠTENJE MULJA S UPOV-A U PROIZVODNJI BETONA I BETONSKIH ELEMENATA

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

USE OF SEWAGE SLUDGE IN THE PRODUCTION OF CONCRETE AND CONCRETE ELEMENTS

(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE, UIP-11-2013-7927)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

25.06.2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Dražen Vouk

Potpis mentora:

Komentor:

dr.sc. Hana Posavčić



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

---

## ZAHVALE

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Draženu Vouku na stručnoj pomoći i uputama tijekom pisanja mog završnog rada.

Također, zahvaljujem se obitelji i prijateljima koji su me podržavali tijekom dosadašnjeg studiranja.



---

## SAŽETAK

U završnom radu obrađena je tema *Korištenje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u proizvodnji betona i betonskih elemenata*. Prikazan je način proizvodnje mulja, kakvoća mulja, postupci obrade mulja i nusprodukti dobiveni njegovom obradom.

Jedan od nusproizvoda, nastao spaljivanjem mulja, pepeo (ISSA), može se primjenjivati u raznim industrijama. Posebna pozornost posvećena je korištenju pepela u betonskoj industriji, kao zamjena za dio cementa pri proizvodnji betona i cementnog morta. Također, prikazana je mogućnost korištenja pepela u proizvodnji agregata i kao zamjene dijela agregata u betonu i cementnom mortu. Svi zaključci izneseni su na temelju brojnih istraživanja.

**Ključne riječi:** uređaj za pročišćavanje otpadnih voda; mulj; suha tvar; spaljivanje; pepeo (ISSA); cement; beton

---

## SUMMARY

The topic discussed in the final paper is *Use of sewage sludge in the production of concrete and concrete elements*. It shows the methods of sewage sludge production, the quality of sewage sludge, the treatment processes and the side products obtained from its treatment.

One of the side products, sewage sludge ash (ISSA), generated by incineration of the sewage sludge, can be used in various industries. Special attention is given to the use of sewage sludge ash in the concrete industry as a partial replacement for cement in the production of concrete and cement mortar. Additionally, the paper indicates the possibility of using sewage sludge ash in the production of aggregates and as a partial replacement for aggregates in concrete and cement mortar. All conclusions are drawn based on numerous studies.

**Key words:** wastewater treatment plant; sewage sludge; dry mass; incineration; sewage sludge ash (ISSA); cement; concrete

---

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
SADRŽAJ .....	iv
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 METODE I TEHNIKE RADA .....</b>	<b>3</b>
<b>3 MULJ IZ UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA.....</b>	<b>4</b>
3.1 Proizvodnja mulja.....	4
3.2 Kakvoća mulja .....	7
3.3 Obrada mulja .....	8
3.4 Nusprodukti obrade mulja .....	12
<b>4 KORIŠTENJE MULJA S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U PROIZVODNJI BETONA I BETONSKIH ELEMENATA .....</b>	<b>15</b>
4.1 Pepeo dobiven spaljivanjem mulja s UPOV-a.....	15
4.1.1 Proces spaljivanja.....	15
4.1.2 Svojstva ISSA-e.....	16
4.2 Mogućnosti i načini korištenja ISSA-e u proizvodnji betona i betonskih elemenata .....	18
<b>5 OPIS REZULTATA VEZANIH UZ KARAKTERISTIKE GOTOVIH BETONSKIH PROIZVODA U ČIJOJ JE PROIZVODNJI KORIŠTEN MULJ.....</b>	<b>20</b>
5.1 ISSA kao zamjena za dio cementa u cementnim mortovima i betonu.....	20
5.1.1 Rezultati novijih istraživanja.....	20
5.1.2 Rezultati starijih istraživanja.....	22
5.2 Korištenje ISSA-e u proizvodnji agregata i kao zamjene dijela agregata u cementnom mortu i betonu.....	24
<b>6 ZAKLJUČAK.....</b>	<b>25</b>
POPIS LITERATURE.....	27
POPIS SLIKA.....	30
POPIS TABLICA.....	31

---

## 1 UVOD

Tvari i predmeti koje posjednik odbacuje predstavljaju otpad. Otpad je zabranjeno odbacivati u okoliš jer izravno onečišćuje biljni i životinjski svijet, pa tako i zdravlje ljudi. Budući da pravilno odlaganje i recikliranje otpada rezultira vrijednim sirovinama, trebalo bi težiti tom cilju. Važno je naglasiti da čak i prilikom pozitivnog ljudskog djelovanja na okoliš nastaju znatne količine otpada. Primjer navedenog je stvaranje mulja na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV-u) tijekom procesa pročišćavanja voda.

Pročišćavanje otpadnih voda i zbrinjavanje sporednih proizvoda koji nastaju prilikom pročišćavanja, postao je problem na svjetskoj razini. Obrada i zbrinjavanje mulja, koji nastaje kao nusprodukt pročišćavanja otpadnih voda, predstavlja veliki izazov pri projektiranju UPOV-a. U povijesti se, prilikom izgradnje UPOV-a, najviše pažnje pridavalo kakvoći pročišćene vode. Konačni efluent trebao je zadovoljavati propisane kriterije. Danas je, uz kakvoću pročišćene otpadne vode jednako važna i efikasnost obrade mulja, budući da sadrži mnoge opasne tvari.

Projekt izgradnje UPOV-a mora obuhvaćati sva tehnološka rješenja i troškove koji su s njim povezani. Tako unutar projekta mora biti riješeno pitanje konačnog zbrinjavanja mulja. Stoga, učinkovitost sustava javne odvodnje i cijena pročišćavanja otpadnih voda uključuje sve procese od početka pročišćavanja otpadnih voda do konačnog zbrinjavanja mulja. Potrebno je naglasiti da troškovi obrade i zbrinjavanja mulja kod UPOV-a veličine od 5000 do 200000 ES (ES-ekvivalent stanovnika) predstavljaju oko 50% ukupnih troškova poslovanja, a ponekad i više.

U procesu obrade otpadnih voda godišnje u svijetu nastaju milijuni tona mulja (SS-Sewage sludge). Prema dosadašnjim istraživanjima svaka osoba proizvede od 35 do 85 g ST/ES · dan (grama suhe tvari po ekvivalent stanovniku na dan). U Hrvatskoj se ta vrijednost kreće od 50 do 55 g ST/ES · dan.

Mulj koji je nastao u procesu pročišćavanja otpadnih voda može se koristiti u skladu s posebnim propisima, a zabranjeno je njegovo odlaganje u vode. Mogućnosti zbrinjavanja mulja su raznolike, a neke od najvažnijih su korištenje mulja u poljoprivredi, poboljšanje kvalitete temeljnog tla te spaljivanje mulja i daljna uporaba pepela dobivenog spaljivanjem.

Spaljivanje odnosno termička obrada mulja, pri kojoj se uvelike smanjuju masa i volumen mulja, omogućavaju lakše gospodarenje muljem. Pepeo, nastao spaljivanjem mulja, može se koristiti u raznim industrijama. Posebna pozornost posvećena je korištenju pepela u

---

građevinskoj industriji pri proizvodnji opeke, keramike, laganog agregata, asfalta te u betonskoj industriji. U ovom radu posebno je opisana mogućnost primjene pepela kao zamjene za dio cementa u cementnom mortu ili betonu. Mogućnost korištenja mulja, odnosno pepela, uvelike ovisi o njegovom sastavu.

---

## 2 METODE I TEHNIKE RADA

Rad je razrađen na teoretskoj razini korištenjem dostupne literature. Svi zaključci izneseni su na temelju brojnih istraživanja tijekom prijašnjih godina.

---

## 3 MULJ IZ UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

### 3.1 Proizvodnja mulja

Izgradnja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV-a) dovela je do nastanka značajnih količina mulja kao nusprodukt procesa pročišćavanja otpadnih voda. Nastaje oko 0,5 kg mulja/m<sup>3</sup> otpadne vode.

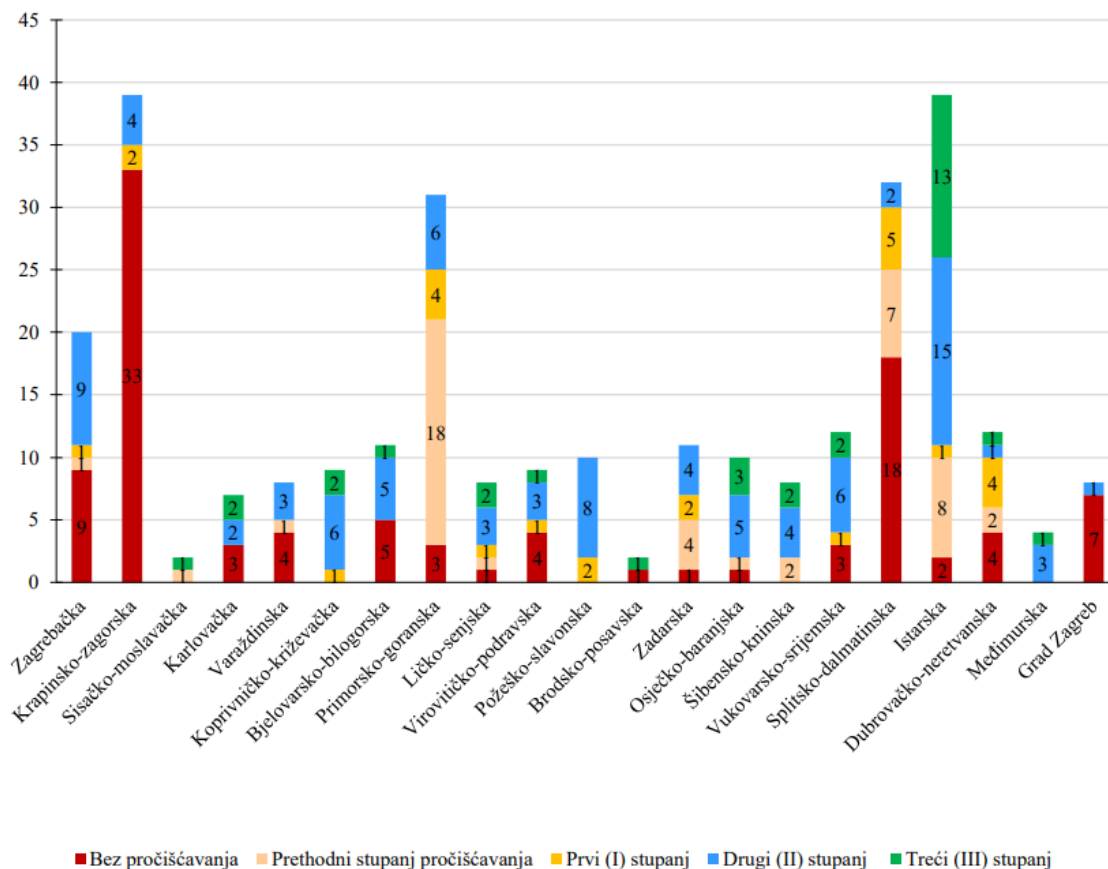
Mulj nastaje akumulacijom krutih tvari tijekom fizikalnih, bioloških i kemijskih procesa kao što su taloženje, mikrobiološka aktivnost, koagulacija i flokulacija. Fizikalni, biološki i kemijski procesi se u većini slučajeva kombiniraju. Najčešće se odvijaju u prirodi, a mogu se odvijati i u kontroliranim uvjetima unutar proizvodnih linija.

U fazi mehaničkog predtretmana, koji se sastoji od grube i fine rešetke i pjeskolovamastolova, skupljaju se različite organske i anorganske krutine, kao što su pijesak, šljunak, zemlja, organska i mineralna ulja i masti.

Uz mehanički predtretman, na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda postoje tri osnovna stupnja pročišćavanja. Prvi stupanj obuhvaća taloženje ili sedimentaciju. Tada se uklanjaju istaložene tvari i smanjuje količina ulaznog mulja. Drugi stupanj obuhvaća biološko pročišćavanje kojim se uklanjaju preostale krute i otopljene organske tvari, a treći stupanj pročišćavanja obuhvaća biološko i kemijsko pročišćavanje s ciljem uklanjanja nutrienata, fosfora i dušika. Stupanj pročišćavanja koji je potrebno primijeniti, ovisi ponajviše o sastavu otpadne vode i zahtjevima za izlazni efluent.



Slika 1: UPOV u Karlovcu s tri stupnja pročišćavanja (Izvor:[1])



Slika 2: Broj ispusta otpadnih voda iz sustava javne odvodnje po stupnjevima pročišćavanja u 2022. godini u Hrvatskoj (Izvor:[2])

UPOV-i s prethodnim taložnicima proizvode primarni mulj, a oni sa sekundarnim pročišćavanjem proizvode i biološki mulj. Navedene muljeve potrebno je adekvatno obraditi i zbrinuti sukladno zakonskoj regulativi. Neki UPOV-i koriste kemikalije, koje dodavaju u otpadnu vodu i muljeve, kako bi poboljšali ili ubrzali učinkovitost nekih tehnoloških procesa. Najveći dio dodanih kemikalija završava u muljevima povećavajući im ukupni volumen i masu što utječe na njegovu kvalitetu.



Tablica 1: Koncentracije suhe tvari u mulju u različitim fazama pročišćavanja (Izvor:[3])

Tehnološka faza	Koncentracija suhe tvari (%)	
	Raspon vrijednosti	Karakteristična vrijednost
<b>Prethodni taložnik</b>		
Primarni mulj	5-9	6
Primarni mulj s dodatkom soli željeza za uklanjanje fosfora	0,5-3	2
Primarni mulj s malim dodatkom vapna za uklanjanje fosfora	2-8	4
Primarni mulj s velikim dodatkom vapna za uklanjanje fosfora	4-16	10
<b>Naknadni taložnik</b>		
Aktivni mulj uz prethodno taloženje	0,5-1,5	0,8
Aktivni mulj bez prethodnog taloženja	0,8-2,5	1,3
Prokapnik	1-3	1,5
Okretni biološki nosač	1-3	1,5
<b>Anaerobna digestija</b>		
Primarni mulj	2-5	4
Mješavina primarnog i aktivnog mulja	1,5-4	2,5
Primarni mulj i mulj iz prokapnika	2-4	3
<b>Aerobna digestija</b>		
Primarni mulj	2,5-7	3,5
Mješavina primarnog i aktivnog mulja	1,5-4	2,5
Primarni mulj i mulj iz prokapnika	0,8-2,5	1,3

---

## 3.2 Kakvoća mulja

Svojstva mulja podrazumijevaju njegovo porijeklo, karakteristike i količine. Uz kakvoću pročišćene otpadne vode, važni su i kakvoća te učinkovitost obrade mulja koji se izdvaja tijekom pročišćavanja.

Kakvoća mulja s UPOV-a varira ovisno o izvoru otpadne vode, postupku pročišćavanja te korištenju dodatnih kemijskih tvari tijekom obrade. Općenito, mulj je mješavina organskih i anorganskih tvari raspršenih u vodi, uz prisutnost teških metala, patogenih mikroorganizama i različitih kemijskih spojeva.

Fizikalno – kemijska svojstva mulja su raznolika i ovise o raznim čimbenicima. Konzistencija mulja može biti tekuća, polutekuća ili kruta, ovisno o stupnju dehidracije kojem je izložen. Specifična težina mulja obično je viša od težine čiste vode zbog prisutnosti čvrstih čestica u njegovu sastavu. Sadržaj suhe tvari u mulju također može znatno varirati. To utječe na rukovanje i obradu mulja i na njegovu daljnju primjenu.

Smanjenje volumena mulja te povećanje koncentracije suhe tvari u ovisnosti o postupku obrade mulja, prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2: Smanjenje volumena mulja i povećanje koncentracije suhe tvari (Izvor:[4])

	<b>Sirovi mulj</b>	<b>Zgusnuti mulj</b>	<b>Dehidrirani mulj</b>	<b>Sušeni mulj</b>	<b>Spaljeni mulj</b>
<b>Koncentracija suhe tvari (%)</b>	1	5	25	90	100
<b>Smanjenje volumena mase u odnosu na sirovi mulj</b>	1	5	25	90	330
<b>Smanjenje volumena (%)</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>96</b>	<b>98,89</b>	<b>99,7</b>

Mulj obično ima neutralnu pH vrijednost. Sadrži značajne količine organskih tvari, uključujući ostatke hrane, fekalije, ulja i masti. Organski sadržaj kreće se od 20% do 70% mase mulja. Sadržaj teških metala kao što su olovo, živa, kadmij i cink može varirati u ovisnosti o industrijskim izvorima otpadne vode. Mulj često sadrži visoke razine dušika i fosfora, koji su ključni nutrijenti. Međutim, ako se pravilno ne kontroliraju, mogu uzrokovati eutrofikaciju.

Što se tiče bioloških svojstava mulja, mulj može sadržavati različite patogene mikroorganizme, uključujući bakterije, viruse i parazite, koji mogu predstavljati rizik za

---

zdravlje ljudi i životinja. Tijekom anaerobne obrade mulj može proizvoditi bioplin koji se koristi kao obnovljivi izvor energije.

Kakvoća mulja se redovito analizira kako bi se osigurala usklađenost sa zakonskim propisima i standardima zaštite okoliša. Analize uključuju fizikalno – kemijske, mikrobiološke i nutrijentske analize. Stalna kontrola i analiza svih navedenih parametara omogućuje učinkovito i ekološki prihvatljivo zbrinjavanje mulja.

### 3.3 Obrada mulja

Prije upotrebe ili konačnog odlaganja mulja, mulj treba obraditi. Temeljni ciljevi obrade otpadnog mulja su smanjenje volumena tijekom obrade kako bi se smanjili troškovi daljnje obrade i transporta obrađenog mulja i nadzor nad razgradnjom otpadne tvari kako bi se spriječili neželjeni utjecaji na okoliš pri konačnom odlaganju.

Postupak obrade mulja treba odrediti u skladu s načinom konačne dispozicije mulja. Ne postoji univerzalan način zbrinjavanja mulja, već je potrebno uzeti u obzir relevantne čimbenike kao što su svojstva otpadne vode, stupanj i tehnologija pročišćavanja, svojstva i količina proizvedenog mulja, kapacitet UPOV-a, zakonski propisi, lokalni uvjeti, troškovi izgradnje i održavanja UPOV-a. Za svaki uređaj potrebno je odabrati najprikladniji način konačnog zbrinjavanja mulja.

Odabir optimalnog tehnološkog rješenja obrade mulja na UPOV-u trebao bi se temeljiti na rezultatima detaljnih analiza različitih rješenja i njihovom višekriterijskom rangiranju, uzimajući u obzir ekonomske, tehničko – tehnološke i socijalne kriterije, kao i kriterij održivosti.

Mulj se sakuplja iz primarnih i naknadnih taložnika unutar UPOV-a. Primarni mulj nastaje taloženjem čvrstih čestica iz sirove otpadne vode, dok biološki mulj potječe iz bioloških procesa pročišćavanja.

Proces obrade mulja sastoji se od tri osnovne faze, a to su zgušnjavanje, stabilizacija i odvodnjavanje.

Zgušnjavanje predstavlja prvu fazu obrade kojoj je cilj smanjenje volumena mulja. Smanjenjem volumena mulja smanjuju se troškovi daljnje obrade i transporta obrađenog mulja, kao i troškovi izgradnje objekata na liniji mulja. Zgušnjavanjem se postiže koncentracija suhe tvari u mulju 2 – 12%. Procesi zgušnjavanja mogu biti gravitacijski, flotacijski ili mehanički.



Slika 3: Zgušnjivač mulja (Izvor:[5])

Stabilizacija mulja ključna je za smanjenje patogenih mikroorganizama i neugodnih mirisa. Predstavlja postupak kojim se smanjuje ili sprječava daljna razgradnja (truljenje) mulja. Mogući postupci stabilizacije su kemijska, biološka i toplinska stabilizacija.

Biološka stabilizacija mulja obuhvaća anaerobnu i aerobnu stabilizaciju. Kod anaerobne stabilizacije, mulj se razgrađuje bez prisutnosti kisika proizvodeći bioplin koji se može koristiti kao energetski izvor. Aerobna stabilizacija se odvija uz prisutnost kisika.



Slika 4: Anaerobni digestor (Izvor:[6])

Odvodnjavanje(dehidracija) mulja dodatno smanjuje njegov volumen uklanjanjem preostale vode. Procesi odvodnjavanja dijele se na fizikalno i mehaničko uklanjanje vode, a uključuju upotrebu filter preša, centrifuga i vakuumskih filtara. Cilj procesa je povećanje sadržaja suhe tvari kako bi se olakšalo rukovanje, transport i konačno zbrinjavanje mulja. Koncentracija suhe tvari u mulju koja se postiže dehidracijom je 25 – 35%. Dodavanje vapna dehidriranom mulju rezultira krutim muljem s većim sadržajem suhe tvari, a samim time i manjim volumenom.

			
1000 tona	125 tona	33 tone	15 tona
Svježi mulj (nedehidriran)	Dehidrirani mulj	Osušeni mulj	Pepeo iz ložišta dobiven spaljivanjem mulja
3% suhe tvari	24% suhe tvari	90% suhe tvari	> 99% suhe tvari

Slika 5: Karakteristike mulja u ovisnosti o stupnju obrade (Izvor:[7])

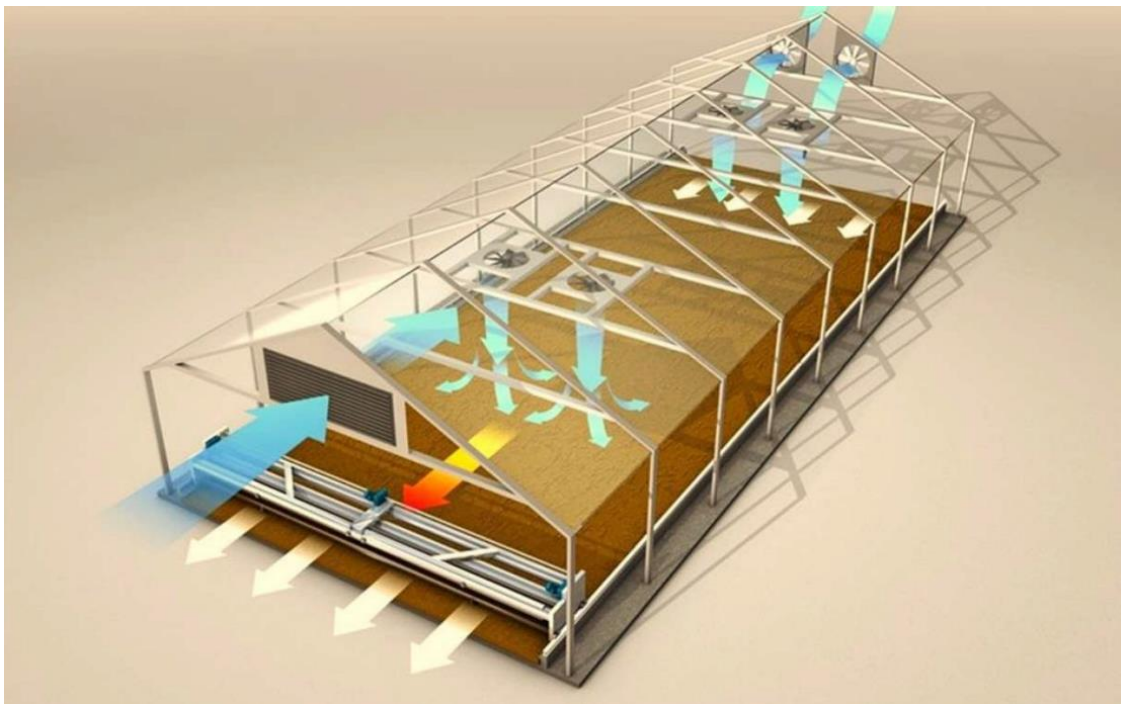
---

Uz prethodno objašnjene osnovne faze procesa obrade mulja, prema potrebi se mogu primijeniti i dodatne faze obrade mulja kao što su sušenje, spaljivanje, piroliza, homogenizacija, kondicioniranje i dezinfekcija.

Termička obrada mulja uključuje sušenje, spaljivanje i pirolizu mulja.

Solarna dehidracija predstavlja postupak sušenja mulja primjenom sunčeve energije. Proizvodi se sušeni mulj sa sadržajem suhe tvari do 90%. Također, sušeni mulj je moguće dobiti iz posebnih peći, na temperaturi između 200°C i 400°C, no taj se postupak rijetko primjenjuje.

Grad Karlovac je prvi u Hrvatskoj dobio europski projekt za pročišćavanje otpadnih voda, a zatim i postrojenje za solarno sušenje mulja kojim se volumen mulja smanjuje za 3,6 puta.

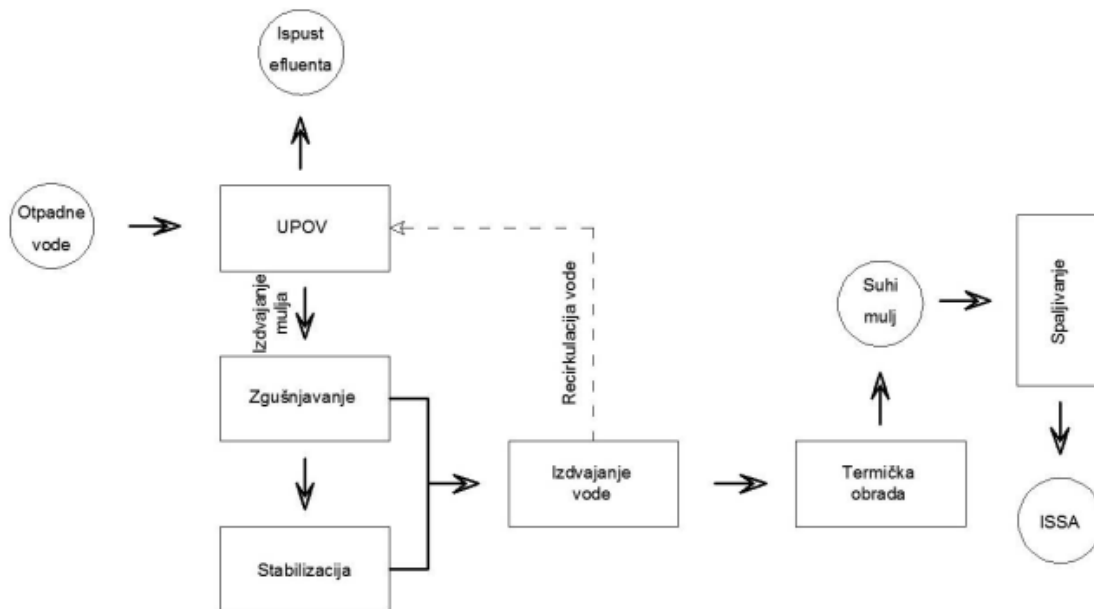


Slika 6: Postrojenje za solarno sušenje mulja u Karlovcu (Izvor:[8])

Kod procesa spaljivanja mulja postoji opasnost od onečišćenja zraka. Stoga je potrebno predvidjeti pročišćavanje plinova izgaranja. Neugodni mirisi se odstranjuju pri temperaturi većoj od 800°C. Ostaci procesa spaljivanja su pepeo, leteći pepeo i zgura.

Proces razgradnje organske tvari pri visokim temperaturama bez prisutnosti kisika naziva se piroliza. Plinovi, ulja, katran i pepeo predstavljaju konačne proizvode pirolize.

Termičkom obradom mulja stvara se pepeo (ISSA - Incinerated Sewage Sludge Ash) koji se može koristiti u različitim granama industrije. Posebno je značajan za građevinsku industriju, budući da se koristi pri proizvodnji opeke, keramike, cementa, betona, asfalta i drugog.



Slika 7: Shema procesa termičke obrade mulja (Izvor:[9])

Obrada mulja na UPOV-ima je složen proces koji uključuje više različitih faza s ciljem smanjenja volumena, stabilizacije organske tvari i smanjenja negativnog utjecaja na okoliš. Svaka faza obrade ključna je za postizanje učinkovitog i cjelovitog upravljanja muljem.

### 3.4 Nusprodukti obrade mulja

Nusprodukti obrade mulja pružaju raznolike mogućnosti za oporabu resursa i energetske učinkovitost. Zahtijevaju strogu regulaciju i nadzor kako bi se osiguralo njihovo sigurno i ekološki prihvatljivo korištenje.

Anaerobna stabilizacija mulja razgradnjom organske tvari proizvodi bioplin, sastavljen uglavnom od metana i ugljikovog dioksida te manjim udjelom drugih plinova.

Bioplin se može koristiti kao obnovljivi izvor energije za grijanje ili proizvodnju električne energije unutar postrojenja. Količina bioplina ovisi o podrijetlu i sastavu mulja. Njegova

---

produkcija iz mulja s UPOV-a predstavlja učinkovito rješenje za smanjenje otpada i proizvodnju energije.



Slika 8: Bioplinsko postrojenje u Písarovini (Izvor:[10])

Stabilizirani mulj, nusprodukt procesa poput anaerobne stabilizacije, aerobne stabilizacije ili kemijske stabilizacije može se koristiti kao gnojivo u poljoprivredi obogaćujući tlo hranjivim tvarima, ukoliko zadovoljava zakonske norme. Također može biti sastavni dio materijala za izgradnju, poput betona ili opeke.

Odvodnjavanje (dehidracija) mulja rezultira stvaranjem muljnih kolača s visokim sadržajem suhe tvari. Muljni kolači se mogu lakše transportirati i odlagati na deponije ili koristiti kao sirovina za daljnu termičku obradu.

Termička obrada mulja, poput spaljivanja ili pirolize, proizvodi pepeo i toplinsku energiju. Pepeo se može koristiti u građevinskoj industriji, primjerice za proizvodnju cementa, betona, opeke i asfalta, za poboljšanje tla i za izdvajanje fosfora, dok se toplinska energija može koristiti za proizvodnju električne energije ili topline.



---

Tekući ostaci ili procjedne vode nastaju tijekom procesa odvodnjavanja mulja i zahtijevaju dodatnu obradu prije ponovnog ispuštanja u okoliš, kako bi se zadovoljili standardi za kvalitetu vode.

Konačno zbrinjavanje mulja može uključivati odlaganje na deponije, iskorištavanje mulja u poljoprivredi ili oporabu proizvoda dobivenih termičkom obradom mulja. Sve metode zbrinjavanja moraju zadovoljiti ekološke standarde kako bi se spriječio negativan utjecaj na okoliš.

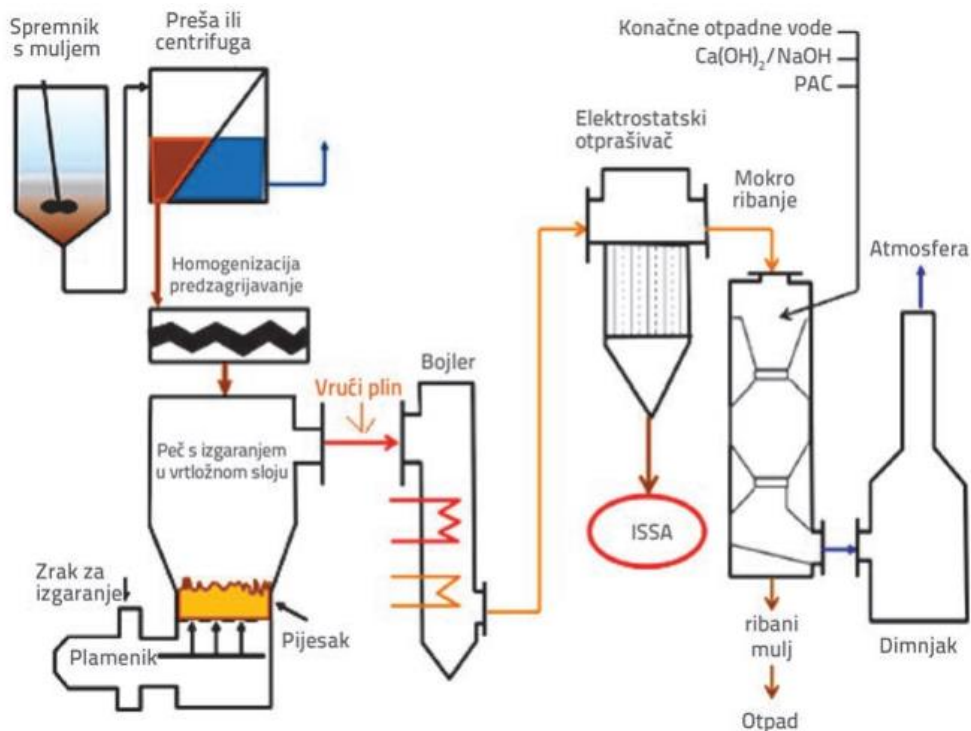
## 4 KORIŠTENJE MULJA S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U PROIZVODNJI BETONA I BETONSKIH ELEMENATA

### 4.1 Pepeo dobiven spaljivanjem mulja s UPOV-a

Pepeo dobiven spaljivanjem mulja, poznat kao ISSA (Incinerated Sewage Sludge Ash), značajan je nusproizvod termičke obrade mulja iz UPOV-a. Navedeni pepeo ima potencijalnu primjenu u raznim industrijama, a posebno u građevinskom sektoru.

#### 4.1.1 Proces spaljivanja

Spaljivanje predstavlja proces termičke obrade mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u visokotemperaturnim pećima. Najčešće se primjenjuju peć s izgaranjem u vrtložnom sloju, modularna spalionica i električna prigušena peć.



Slika 9: Peć s izgaranjem u vrtložnom sloju (Izvor:[11])

---

Stabiliziran i dehidriran mulj, sa sadržajem suhe tvari 18 – 35%, najprije se suši kako bi se smanjio sadržaj vode, što olakšava postupak spaljivanja.

Po završetku procesa sušenja, kada mulj sadrži 75 – 90% ST, stavlja se u specijalizirane visokotemperaturne peći gdje se spaljuje pri temperaturama većim od 800°C.

Nakon spaljivanja ostaje fino granulirani otpadni materijal, pepeo (ISSA), koji se odvaja od ispušnih plinova u filtarskim vrećama ili elektrostatičkim taložnicama. Uz pepeo, procesom spaljivanja nastaju leteći pepeo i zgura. Leteći pepeo sadrži čestice veličine do 100 µm, a može se primjenjivati u cestogradnji, pri proizvodnji betona i u poljoprivredi. Zgura se također može koristiti u cestogradnji, nakon zajedničkog spaljivanja s krutim otpadom.



Slika 10: Pepeo dobiven spaljivanjem (Izvor:[12])

Temperatura spaljivanja značajno utječe na svojstva dobivenog pepela, a dodavanje raznih kemikalija prilikom spaljivanja može poboljšati njegova svojstva.

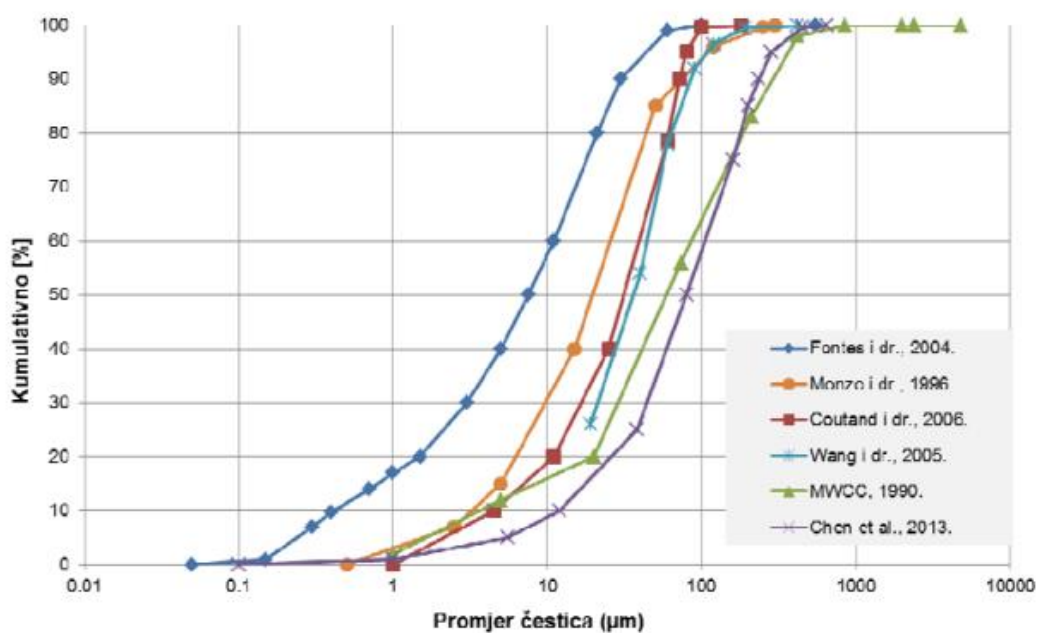
Pepeo se dalje obrađuje i primjenjuje u razne svrhe, osobito u građevinskoj industriji.

#### 4.1.2 Svojstva ISSA-e

ISSA predstavlja vrijednu sirovinu s brojnim mogućnostima primjene u industriji. Njezina kemijska i fizikalna svojstva čine je pogodnom za različite tehnološke procese. Pažljivo

upravljanje osigurava minimalan ekološki utjecaj, čineći ISSA-u korisnim i održivim materijalom za industrijsku upotrebu.

Nakon spaljivanja, ISSA ima sitnozrnu teksturu. To je pretežito praškasti materijal s malim udjelom čestica veličine zrna pijeska, organskom tvari i vlagom. Sastoji se od nepravilnih čestica različitih veličina s velikom specifičnom površinom. To utječe na njezina svojstva i većom potrebom za vodom pri primjeni u betonu i cementnom mortu. Raspon veličina čestica ISSA-e ovisi o postupcima obrade, udjelu industrijskih voda u otpadnoj vodi i sustavu odvodnje. Veličina čestica varira prema različitim autorima, što je prikazano na Slici 11.



Slika 11: Veličina čestica ISSA-e prema različitim autorima (Izvor:[4])

ISSA sadrži visoke koncentracije minerala poput fosfora, silicija, aluminija, željeza i kalcija. Najznačajniji minerali su silicijev dioksid i aluminijev oksid, što je prednost pri korištenju ISSA-e kao pucolanskog materijala. Obično sadrži povećanu koncentraciju sulfata zbog kemijskih spojeva primjenjenih kod procesa pročišćavanja otpadnih voda i fosfata.

Teški metali, kao što su olovo, kadmij, živa i arsen, koji bi spaljivanjem trebali sagorjeti, ponekad se mogu pronaći u tragovima. Takav pepeo nije pogodan za odlaganje na odlagališta neopasnog otpada.

Temperatura pri procesu spaljivanja mulja značajno utječe na svojstva dobivenog pepela. Nekoliko autora je zabilježilo različite utjecaje temperature spaljivanja na svojstva dobivenog pepela. Smanjenje apsorpcije vode i mase dobivenog pepela događa se pri

---

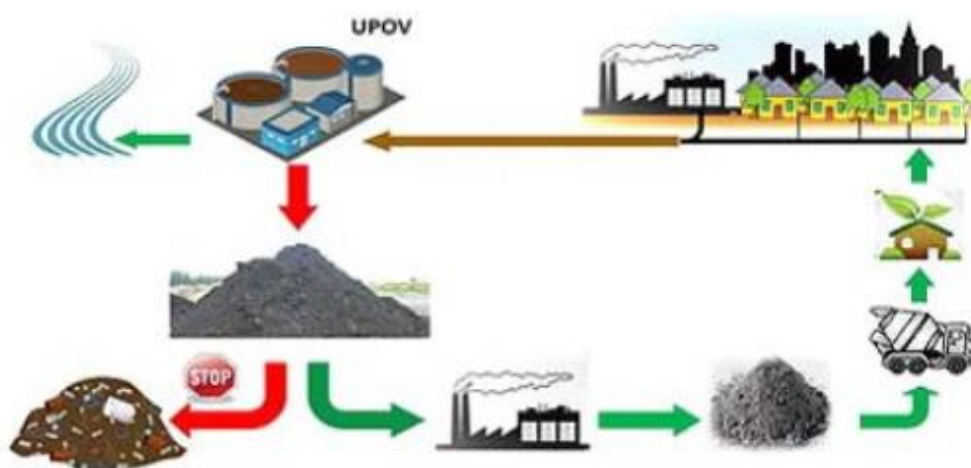
povišenju temperature s 800°C na 900°C. Posljedično tome raste vrijednost gustoće pepela koja pri temperaturi od 1000°C dostiže maksimalnu vrijednost. Stvaranje klinkera, odnosno smanjenje pucolanskih svojstava pepela događa se pri temperaturama većim od 900°C. Stoga, optimalna temperatura spaljivanja iznosi 800°C, a sve kako bi se očuvala pucolanska svojstva pepela.

ISSA je obično tamno sive do tamno smeđe boje. To ovisi o specifičnom sastavu mulja i uvjetima spaljivanja. Gustoća varira prema različitim autorima: 2300 - 3200 kg/m<sup>3</sup>, 2620 kg/m<sup>3</sup> te 2860 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.2 Mogućnosti i načini korištenja ISSA-e u proizvodnji betona i betonskih elemenata

Područje građevinarstva u velikoj mjeri troši prirodne materijale i resurse. Korištenje otpadnih materijala znatno smanjuje količine otpadnog materijala koji se odlaže na odlagališta, potrošnju energije te pridonosi očuvanju prirodnih obnovljivih ili neobnovljivih izvora.

Mulj s UPOV-a i pepeo dobiven njegovim spaljivanjem (ISSA) mogu se reciklirati i koristiti na različite načine. Najčešće se koriste pri proizvodnji keramike, opeke, crijepova, laganog agregata, asfalta i u betonskoj industriji.



Slika 12: Shema korištenja pepela u betonskoj industriji (Izvor:[13])

---

Beton predstavlja najčešće upotrebljavan umjetno dobiveni građevinski materijal. Kako bi se poboljšala određena svojstva, u beton i cementni mort mogu se dodati razni mineralni dodaci. Oni mogu biti anorganski, pucolanski ili latentni hidraulički materijali.

Prema dosadašnjim istraživanjima sastojci betona, cement i agregat, mogu se zamijeniti pepelom dobivenim termičkom obradom mulja. Važno je napomenuti da uvjeti i količine zamjene pepela u navedenim sastojcima ovise o različitim faktorima.

Korištenje otpadnih materijala u cementnoj industriji može se podijeliti na tri vrste primjene:

- kao sirovina za klinker
- kao alternativno gorivo
- kao zamjena za udio portland cementa u cementnim mješavinama

Sporedni proizvod, anorganski pepeo koji nastaje kada organski dio mulja izgori, a ima pucolanska svojstva, ugrađuje se u cementni klinker. Navedeni proces predstavlja pozitivno rješenje zbrinjavanja mulja budući da se pepeo dobiven sagorijevanjem odmah ugrađuje u klinker bez zasebnog odlaganja. Tako se smanjuje potreba za gorivom pri spaljivanju.

Bitno je naglasiti da se osušeni mulj, koji ima visoku kalorijsku vrijednost, može koristiti i u cementnoj industriji kao alternativno gorivo dok se ISSA ne može koristiti za istu svrhu, budući da nema gotovo nikakvu kalorijsku vrijednost.

Cement se dobiva spaljivanjem gline i vapnenca. Inače, sadržaj gline predstavlja oko 20% mase, a sadržaj vapnenca oko 80% mase cementa. Kako bi se mulj s UPOV-a mogao primjenjivati pri proizvodnji cementa, potrebno je promijeniti neke fizikalno - kemijske karakteristike mulja (smanjenje vlage i organske tvari, povećanje udjela kalcijevih spojeva). To je moguće postići stabilizacijom mulja i dodavanjem nekih alkalnih sredstava, na primjer vapna.

U cementnim materijalima, ISSA se može upotrebljavati kao pucolanski aktivan materijal ili kao inertni filter. Kada se ISSA koristi kao pucolanski aktivan materijal, ona djelomično zamjenjuje cement. Kada se koristi kao inertni filter može zamijeniti pijesak ili fini agregat.

Uglavnom, primjena ISSA-e u betonskoj industriji najčešće se odnosi na zamjenu dijela cementa u cementnom mortu ili betonu. ISSA se također može koristiti i kao zamjena dijela finog agregata.

---

## 5 OPIS REZULTATA VEZANIH UZ KARAKTERISTIKE GOTOVIH BETONSKIH PROIZVODA U ČIJOJ JE PROIZVODNJI KORIŠTEN MULJ

### 5.1 ISSA kao zamjena za dio cementa u cementnim mortovima i betonu

#### 5.1.1 Rezultati novijih istraživanja

Tijekom istraživanja iz 2017. godine, koje je provedeno na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, ispitivala su se svojstva pepela dobivenog iz mulja s karlovačkog UPOV-a kao zamjene dijela cementa u proizvodnji morta i betona. Opis rezultata vezanih uz karakteristike gotovih betonskih proizvoda u čijoj je proizvodnji korišten mulj s karlovačkog UPOV-a, odnosno pepeo dobiven spaljivanjem mulja, bit će iznesen na temelju navedenog istraživanja.

Za potrebe istraživanja korišten je stabiliziran i dehidriran mulj, starosti četiri mjeseca, osušen u laboratoriju na temperaturi od 105°C do sadržaja suhe tvari 90%. Osušeni mulj podvrgnut je spaljivanju u peći na temperaturama od 800°C i 900°C. Inače, temperature od 800°C i 900°C se najčešće koriste za spaljivanje mulja u inustrijskim spalionicama, a potvrđeno je da su one dovoljne za razgradnju organskih tvari prisutnih u mulju. Pepeo je nakon spaljivanja samljeven i dobiven je fini praškasti materijal.

Što se tiče morta i betona za ispitivanje su se pripremile referentne mješavine s 0% pepela i mješavine s 20% pepela, kao zamjene za cement.

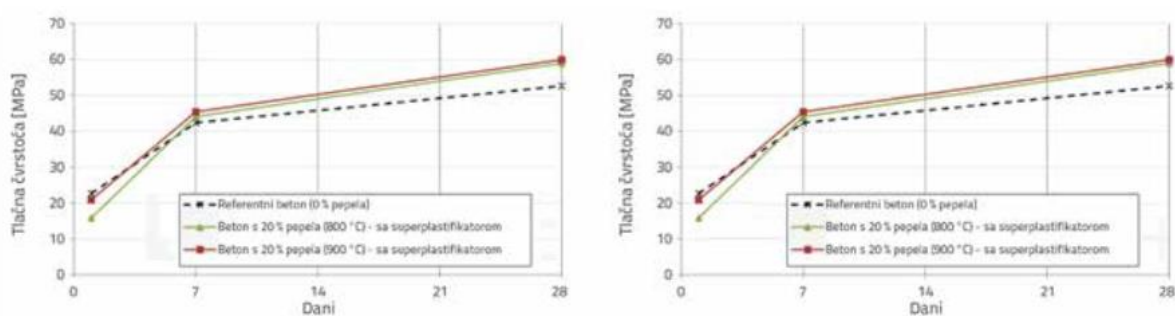
Budući da je već iz ranijih istraživanja poznato da se dodavanjem pepela smanjuje obradljivost, a posljedično tome povećava potreba za vodom, u mješavine je dodan superplastifikator.

Referentne mješavine i mješavine sa sadržajem pepela u svježem stanju pokazale su istu gustoću, a također nije uočeno nikakvo razdvajanje komponenti. U mješavinama s pepelom uočeno je povećanje sadržaja zraka.

Tijekom ispitivanja mehaničkih svojstava morta sa sadržajem pepela, pokazalo se da pepeo uzrokuje smanjenje tlačne i vlačne čvrstoće, no ne značajno. Treba naglasiti da je kod svih mješavina čvrstoća rasla s porastom vremena njegovanja. Isto tako, uočeno je da su padovi čvrstoće mortova sa sadržajem pepela izraženiji pri ranim čvrstoćama, a s vremenom gube na značaju.

Upotrebom superplastifikatora postignuta je bolja obradljivost i povećanje čvrstoće. Naime, mješavine s dodatkom superplastifikatora pokazale su jednake čvrstoće kao i referentna mješavina, a ponekad su bile i premašene.

Najveći iznos tlačne i vlačne čvrstoće (nakon 28 dana) postignut je u mješavinama sa sadržajem 20% pepela (dobivenog pri temperaturi od 900°C) kao zamjene za cement i s dodatkom superplastifikatora. Pokazalo se da su čvrstoće veće za oko 10% od čvrstoće referentne mješavine. Najmanji iznos tlačne i vlačne čvrstoće postignut je u mješavinama sa sadržajem 20% pepela (dobivenog pri temperaturi od 800°C) kao zamjene za cement i bez dodatka superplastifikatora. Čvrstoća se smanjila za 10% - 15% u odnosu na referentnu mješavinu. Na temelju navedenih podataka, dalo se zaključiti da pri starosti od 28 dana, mješavine sa sadržajem pepela od 20% pokazuju veću čvrstoću od čvrstoće referentne mješavine (oko 12%), uz blagu prednost mješavine s pepelom dobivenim na 900°C. Navedeni rezultati istraživanja znatno odstupaju od većine dotadašnjih rezultata budući da je najčešće uočen pad čvrstoća s porastom sadržaja pepela.



Slika 13: Promjena tlačne čvrstoće mortova (lijevo) i betona (desno) sa sadržajem pepela u odnosu na referentne mješavine (Izvor:[14])

Uočeno je da dodavanje pepela pozitivno utječe na trajnost morta, što proizlazi iz smanjenja koeficijenta plinopropusnosti u odnosu na referentnu mješavinu. Smanjenje propusnosti mortova s dodatkom pepela opravdava se time što pepeo popunja prostor između zrna agregata.

Dodavanjem pepela nisu uočene značajne volumenske deformacije betona. Ipak treba naglasiti da je ukupno skupljanje betona sa sadržajem pepela od 20% (dobivenog pri 800°C) veće u odnosu na referentnu mješavinu, dok pepeo dobiven pri 900°C ne pokazuje značajno odstupanje od referentne mješavine.



---

Po svemu sudeći, može se zaključiti da spaljivanje mulja pri 900°C i korištenje superplastifikatora pridonose uspješnoj zamjeni dijela cementa pepelom i to uz udio zamjene od 20% [14].

### 5.1.2 Rezultati starijih istraživanja

Iz starijih istraživanja, pri korištenju ISSA-e kao zamjene dijela cementa u cementnom mortu i betonu, također je primjećena smanjena obradljivost mješavine i povećana potreba za vodom zbog nepravilne morfologije čestica ISSA-e. Međutim, često se koriste kemijski dodaci koji bi nadoknadili manjak vode, npr. superplastifikatori što se može primjetiti i kod istraživanja iz 2017. godine.

Brojnim istraživanjima utvrđeno je se da se povećanjem sadržaja ISSA-e smanjuje tlačna čvrstoća. Isto tako, povećanje finoće čestica ISSA-e doprinosi povećanju čvrstoćama iako sadržaj ISSA-e ostaje nepromijenjen.

Uspoređujući rezultate različitih autora, dalo se primijetiti da vrijednosti rezultata ispitivanja značajno osciliraju. Na primjer, kod zamjene 20% cementa ISSA-om vrijednosti smanjenja tlačne čvrstoće su različite. Tako kod nekih autora smanjenje tlačne čvrstoće dostiže vrijednost od oko 25%, a kod nekih ide i do oko 50%. Razlog tome su različite dimenzije uzoraka morta, vodocementni omjeri, vrsta peći kod spaljivanja mulja, temperatura spaljivanja, dodaci tijekom procesa spaljivanja i drugi. Ovi rezultati se nikako ne poklapaju s rezultatima istraživanja iz 2017. godine.

Cementi s visokim sadržajem trikalcij aluminata (minerala koji tvori klinker) dobro se slažu s ISSA-om. Pri dodavanju ISSA-e nisu uočeni padovi mehaničkih karakteristika nakon njege od 28 dana.

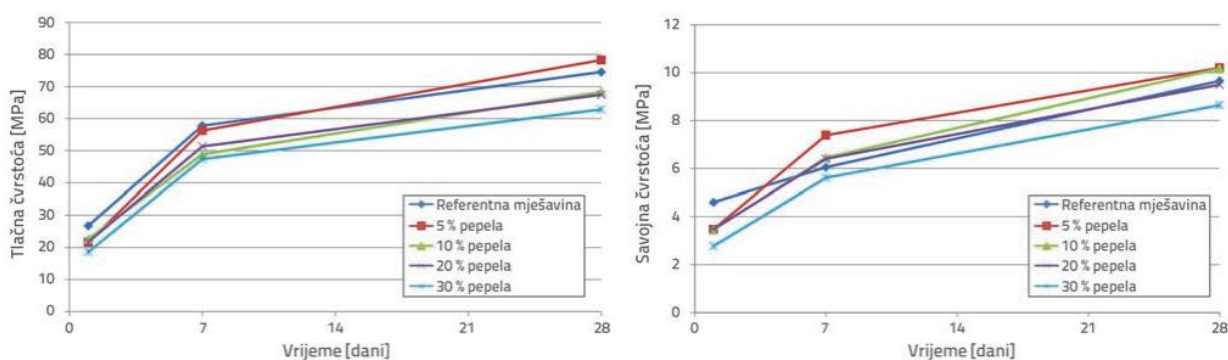
Istraživanjima iz 2004. godine, cementni mortovi s 10–30% ISSA-e u cementu, pokazali su jednake vrijednosti vlačnih čvrstoća s referentnim mortovima sa sadržajem ISSA-e 0% tek za vrijeme vezivanja od 28 dana. S druge strane, jednake vrijednosti tlačne čvrstoće postignute su za vrijeme vezivanja od 7 dana. Važno je primijetiti da iako u ranim fazama vezivanja čvrstoća može biti niska, nakon 28 dana postiže se znatno veća čvrstoća pa je negativan utjecaj ISSA-e na čvrstoću u kasnijim fazama vezivanja značajno smanjen. Nadalje, zamjena dijela cementa s ISSA-om doprinosi povećanju ukupne poroznosti [4].

Prema istraživanjima iz 2013. godine, tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje se smanjuju s porastom sadržaja ISSA-e u mješavini. Procjenjuje se da je razlog tomu višak vode i udio

kalcijevog oksida u pepelu. Za mješavine sa sadržajem ISSA-e od 10%, pad tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje bio je manji od 25% u usporedbi s uzorcima bez dodane ISSA-e [4].

Iako se tlačna čvrstoća smanjuje s povećanjem sadržaja ISSA-e u mješavini, ISSA ima određeni stupanj pucolanske aktivnosti. Inače, pucolanski materijal predstavlja silikatni i aluminatni materijal, koji pri dodiru s vlagom, kemijski reagira s kalcijevim hidroksidom i stvara spojeve cementnih karakteristika.

Prva istraživanja u Hrvatskoj provedena su na cementnom mortu s udjelima pepela 5%, 10%, 15%, 20% i 30% kao zamjenom za cement. Pepeo je dobiven spaljivanjem mulja s karlovačkog UPOV-a pri različitim temperaturama (800°C, 900°C i 1000°C) i ugrađen u mort s različitim vodocementnim omjerima (0,45; 0,50; 0,55). Istraživanje je pokazalo da cementni mort s 20% pepela kao zamjene za cement (dobiven pri 900°C; ugrađen vodocementnim omjerom 0,45) ima veću tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje od referentnog morta (bez ISSA-e), bez obzira na vrijeme vezivanja. Uočeno je da čvrstoće uzoraka rastu s porastom vremena vezivanja, ali i opadaju povećanjem udjela pepela u mortu. Općenito, uzorci morta s dodatkom pepela 20% ili manje, pokazali su veće ili jednake čvrstoće na savijanje od referentnog morta već nakon 7 dana vezivanja. Zaključeno je da najveću tlačnu čvrstoću, veću i od referentnog morta, pokazuje uzorak s udjelom zamjene cementa pepelom 5%, nakon 28 dana vezivanja. Na Slici 14. prikazani su rezultati navedenog istraživanja s dodatkom pepela dobivenog pri temperaturi od 900°C i ugrađenog pri vodocementnom omjeru 0,50 [15].



Slika 14: Rezultati istraživanja s različitim udjelom dodanog pepela (Izvor:[15])

Usprkos većini provedenih ispitivanja, neki autori su dokazali povećanja tlačnih čvrstoća mortova sa sadržajem ISSA-e u odnosu na uzorke bez sadržaja iste.

---

## 5.2 Korištenje ISSA-e u proizvodnji agregata i kao zamjene dijela agregata u cementnom mortu i betonu

Iako se ISSA u betonskoj industriji najčešće koristi kao zamjena dijela cementa u cementnom mortu ili betonu, može se koristiti i kao zamjena dijela agregata u betonu, zasebno ili u kombinaciji s muljem.

ISSA, pepeo nastao spaljivanjem mulja i mulj mogu se sinteriranjem koristiti u proizvodnji običnog ili laganog agregata.

Što se tiče energetske uštede ISSA je prikladnija za proizvodnju običnog agregata. Mješavine s manjim sadržajem mulja (<10%) prikladne su za proizvodnju agregata male do srednje gustoće, a mješavine s većim sadržajem mulja (20-30%) prikladnije su za proizvodnju agregata manjih gustoća.

ISSA se također može primjenjivati u cementnom mortu i betonu kao zamjena dijela finog agregata. Glavna karakteristika laganog agregata je porozna struktura što rezultira značajnom apsorpcijom vode. Slična svojstva ima i ISSA, stoga se može koristiti direktno, bez ikakvog prerađivanja, kao dodatak betonu.

Istraživanjima iz 2011. godine zaključeno je da se apsorpcija vode povećava s povećanjem sadržaja ISSA-e u odnosu na ukupni volumen agregata. Čvrstoće uzoraka s dodatkom ISSA-e pokazale su se sličnima čvrstoćama kontrolnih uzoraka (s 0% ISSA-e). Najznačajniji pad tlačne čvrstoće primjećen je na uzorcima s udjelima pepela od 50% i 100%. Na uzorcima s udjelom pepela manjim od 25%, kasne čvrstoće, nakon 90 i 180 dana njege, pokazale su se većima od tlačnih čvrstoća kontrolnih uzoraka. To je posljedica pucolanskih svojstava pepela. Zaključeno je, da je sadržaj ISSA-e od 25%, najprihvatljiviji udio zamjene laganog agregata s ISSA-om pri korištenju u betonima za nosive elemente. Veći sadržaj ISSA-e prihvatljiv je za korištenje u betonima za nekonstrukcijske elemente [4].

Mogućnosti primjene ISSA-e u proizvodnji agregata i kao zamjene dijela agregata u cementnim mortovima i betonu još uvijek nisu dovoljno istražene.

---

## 6 ZAKLJUČAK

Nakon razrađene teme *Korištenje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u proizvodnji betona i betonskih elemenata* može se donijeti niz zaključaka. Budući da se pročišćavanjem otpadnih voda stvaraju velike količine mulja, potrebno ga je obraditi i zbrinuti sukladno zakonskoj regulativi. Nužno je, pri projektiranju UPOV-a, obratiti pozornost na sve procese od početka pročišćavanja otpadnih voda do konačnog zbrinjavanja mulja.

Termičkom obradom mulja nastaje pepeo, ISSA, koji se u najvećoj mjeri upotrebljava u građevinskoj industriji. U radu su istražene mogućnosti korištenja pepela u betonskoj industriji. Primjena ISSA-e u betonskoj industriji uglavnom se odnosi na zamjenu dijela cementa u cementnom mortu ili betonu. Također, primjenjivati se može i pri proizvodnji agregata te zamjeni dijela agregata u cementnom mortu i betonu.

Što se tiče svojstava betona i morta u svježem stanju, istraživanjima se pokazalo da dodavanjem ISSA-e u mješavinu gustoća ostaje nepromijenjena u odnosu na referentnu mješavinu, ali se povećava poroznost. Dodavanjem pepela smanjuje se obradljivost, a posljedično povećava potreba za vodom zbog nepravilne raspodjele čestica dodanog pepela. Čvrstoće morta i betona sa sadržajem pepela rastu s povećanjem starosti morta/betona. Smatra se da sadržaj pepela (dobivenog spaljivanjem mulja pri temperaturi od 900°C) od 20% u mješavini cementnog morta i betona uz upotrebu superplastifikatora pridonose uspješnoj zamjeni cementa pepelom. Pri navedenom postotku zamjene i dodanom superplastifikatoru, mehaničke karakteristike morta/betona se minimalno mijenjaju, a čvrstoće su u većini slučajeva jednake čvrstoćama referentnih mješavina, ponekad i veće. Volumenske deformacije se ne mijenjaju značajno. Uočeno je da dodavanje pepela pozitivno utječe i na trajnost morta/betona.

Vezano za proizvodnju agregata, pepeo i mulj se mogu koristiti pri proizvodnji laganog ili običnog agregata. Budući da ISSA ima slična svojstva kao i lagani agregat (porozna struktura), može se direktno koristiti kao dodatak betonu.

Iz niza istraživanja može se zaključiti da zamjena cementa pepelom u iznosu od 20% s dodatkom superplastifikatora djeluje pozitivno na svojstva cementnog morta i betona. Također, sadržaj pepela od 25%, predstavlja najbolji udio zamjene laganog agregata pepelom pri upotrebi u betonima za nosive elemente.

---

Primjena naprednih rješenja za zbrinjavanje mulja može biti značajna gospodarska šansa u inovativnim tehnologijama u gospodarstvu i industriji.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Vodovod i kanalizacija d.o.o. Karlovac, Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda  
<https://www.vik-ka.hr/odvodnja/uredaj-za-prociscavanje-otpadnih-voda.html>
- [2] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja: *"Izvešće o ispustima i uređajima za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda iz Registra onečišćavanja okoliša za 2022. godinu"*, Zagreb, 2024.
- [3] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M., Tedeschi, S.: Izveštaj broj 13, *„Recikliranje mulja s uređaja za pročišćavanje u betonskoj industriji – pregled stanja na području istraživanja“*, Uspostavni istraživački projekt „Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE)“, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [4] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M.: *„Korištenje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskoj industriji“*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [5] Prezentacija „Obrada mulja“, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [6] Wikipedija, Obrada kanalizacijskog mulja  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Obrada\\_kanalizacijskog\\_mulja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obrada_kanalizacijskog_mulja)
- [7] Serdar, M.: Prezentacija *„Smjernice za primjenu mulja (pepela) u betonskoj industriji u okvirima kružnog gospodarstva“*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [8] Pipelife, Pipelife industrijsko podno grijanje dio postrojenja za solarno sušenje dehidriranog mulja, [pipelife.hr](http://pipelife.hr)  
<https://www.pipelife.hr/projekti/susenje-mulja-karlovac.html>
- [9] Vouk, D., Nakić, D., Malus, D., Šiljeg, M., Valek Žulj, L.: Izveštaj broj 2, *„Fizikalne i kemijske karakteristike mulja“*, Uspostavni istraživački projekt Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE), Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [10] Enerkon, Postrojenje na bioplin u Pisarovini, [enerkon.hr](http://enerkon.hr)  
<https://www.enerkon.hr/postrojenje-na-bioplin-pisarovina-1200-kwel/>
- [11] Nakić, D., Vouk, D.: Izveštaj broj 18, *„Ekološki utjecaj pepela“*, Uspostavni istraživački projekt Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE), Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.

- 
- [12] Lakušić, S.: „Izazovi u graditeljstvu 6“, Hrvatski graditeljski forum, 2022.
- [13] RESCUE, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet  
<https://www.grad.hr/rescue/>
- [14] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M.: „Gospodarenje muljem s UPOV-a – novi uvid u mogućnosti njegove uporabe kao zamjenskog cementnog materijala“, Građevinar 4/2018, 2018.
- [15] Vouk, D., Serdar, M., Nakić, D., Anić-Vučinić, A.: „Korištenje mulja s UPOV-a u proizvodnji cementnog morta i betona“, Građevinar 3/2016, 2016.
- [16] Domazet, N., Otpadni mulj - problem bez jednoznačnih rješenja, ali s mnogim prilikama, *energetika-net.com*  
<https://www.energetika-net.com/izdvajamo/otpadni-mulj-problem-bez-jednoznacnih-rjesenja-ali-s-mnogim-prilikama-34036/>
- [17] „Zakon o vodama“, NN 66/19, 84/21, 41/23, na snazi od 04.05.2023.
- [18] „Akcijski plan za korištenje mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda na pogodnim površinama“, Hrvatske vode, 2020.
- [19] Vouk, D., Malus, D., Tedeschi, S.: „Muljevi s komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda“, Građevinar 63/2011, 2011.
- [20] Nakić, D., Vouk, D., Hozmec, S., Štirmer, N.: „Pilot projekt – Recikliranje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskim proizvodima s primjenom u vodnom gospodarstvu“, 2017.
- [21] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M., Baričević, A.: Izvještaj broj 14, „Rezultati ispitivanja na betonu“, Uspostavni istraživački projekt Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE), Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [22] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M., Hozmec, S., Baričević, A., Mandić, V.: Izvještaj broj 15, „Pilot projekt – recikliranje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskim proizvodima s primjenom u vodnom gospodarstvu“, Uspostavni istraživački projekt Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE), Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [23] Nakić, D., Vouk, D., Serdar, M., Šiljeg, M.: „Technical and Environmental Study of Sewage Sludge Ash Utilization in Concrete Industry“
- [24] Šok, M., Detaljna analiza korištenja otpadnog mulja u kompostiranju, *kompost.hr*

---

<https://kompost.hr/otpadni-mulj/detaljna-analiza-koristenja-otpadnog-mulja-u-kompostiranju/>

[25] Karlovac prvi u zemlji ima postrojenje za solarno sušenje mulja, gradonacelnik.hr

<https://gradonacelnik.hr/vijesti/karlovac-prvi-u-zemlji-imaju-postrojenje-za-solarno-susenje-mulja/>

[26] Ružinski, N., Anić Vučinić, A.: „*Obrada otpadnih voda biljnim uređajima*“, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb, 2010.



---

## POPIS SLIKA

Slika 1: UPOV u Karlovcu s tri stupnja pročišćavanja (Izvor:[1]).....	4
Slika 2: Broj ispusta otpadnih voda iz sustava javne odvodnje po stupnjevima pročišćavanja u 2022. godini u Hrvatskoj (Izvor:[2]).....	5
Slika 3: Zgušnjivač mulja (Izvor:[5]) .....	9
Slika 4: Anaerobni digestor (Izvor:[6]).....	10
Slika 5: Karakteristike mulja u ovisnosti o stupnju obrade (Izvor:[7]) .....	10
Slika 6: Postojenje za solarno sušenje mulja u Karlovcu (Izvor:[8]) .....	11
Slika 7: Shema procesa termičke obrade mulja (Izvor:[9]) .....	12
Slika 8: Bioplinsko postrojenje u Pisarovini (Izvor:[10]) .....	13
Slika 9: Peć s izgaranjem u vrtložnom sloju (Izvor:[11]) .....	15
Slika 10: Pepeo dobiven spaljivanjem (Izvor:[12]).....	16
Slika 11: Veličina čestica ISSA-e prema različitim autorima (Izvor:[4]).....	17
Slika 12: Shema korištenja pepela u betonskoj industriji (Izvor:[13]).....	18
Slika 13: Promjena tlačne čvrstoće mortova (lijevo) i betona (desno) sa sadržajem pepela u odnosu na referentne mješavine (Izvor:[14]).....	21
Slika 14: Rezultati istraživanja s različitim udjelom dodanog pepela (Izvor:[15]) .....	23

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Koncentracije suhe tvari u mulju u različitim fazama pročišćavanja (Izvor:[3])..... 6

Tablica 2: Smanjenje volumena mulja i povećanje koncentracije suhe tvari (Izvor:[4]) ..... 7