



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.6 –**
ANALIZA TRŽIŠTA

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: Nina Štirmer, izv.prof.dr.sc.
Marijana Serdar, dr.sc.
Ana Baričević, dr.sc.

DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

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





Analiza tržišta

1. Uvod

Pročišćavanje otpadnih voda i zbrinjavanje sporednih proizvoda koji pritom nastaju predstavlja aktualan problem na svjetskoj razini, naročito tijekom posljednjih 20 - 30 godina. Izgradnja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) s jedne strane predstavlja pozitivan utjecaj na okoliš, a s druge dovodi do novih problema koji se manifestiraju kroz generiranje značajnih količina mulja koje je potrebno prikladno zbrinuti. U postupku pročišćavanja otpadnih voda kao sporedni proizvod svakog tehnološkog postupka generira se određena količina mulja, prvenstveno kroz izdvajanje mulja iz prethodnih (primarni mulj) i naknadnih (biološki mulj) taložnika. Generirani mulj potrebno je prikladno obraditi na samom UPOV-u i zbrinuti u okoliš u skladu sa zakonskom regulativom. U prosjeku se generiraju jedinične količine mulja u iznosu 35 do 85 g ST/ES-dan (Jamshidi et al., 2011). U Hrvatskoj se prema podacima dostupnim s postojećih UPOV-a ta vrijednost kreće oko 50 do 55 g ST/ES-dan.

Mulj koji se generira na UPOV-u nastaje kao sporedni proizvod akumulacije krute tvari tijekom fizikalnih (taloženje), bioloških (mikrobiološka aktivnost) i kemijskih procesa (koagulacija, flokulacija). Mulj je složenog sastava i predstavlja mješavinu organskih i anorganskih tvari raspršenih u vodi, a sadržava i patogene mikroorganizme, parazite, viruse te brojne potencijalno toksične elemente i spojeve (teške metale i dr.).

U dosadašnjoj praksi izgradnje UPOV-a struka je primarno bila koncentrirana na liniju vode te nastojanja da pročišćena voda zadovolji propisane kriterije učinkovitosti pročišćavanja. U pojedinim zemljama EU se primjerice mulj još uvijek odlaže na odlagalištima krutog otpada i na druge, često neodgovarajuće i nedopuštene načine. Ovaj pristup još uvijek je aktualan iako je stručna javnost već relativno dugo vremena upoznata s europskim smjernicama za konačno odlaganje muljeva s UPOV-a, u kojima je klasično odlaganje na uređena odlagališta praktički nemoguće.

Potrebno je istaknuti da se projekti izgradnje UPOV-a, u kojima nije riješeno konačno zbrinjavanje mulja, ne mogu smatrati potpunim, jer ne obuhvaćaju tehnološka rješenja i troškove koji su s tim povezani. Shodno rečenom, učinkovitost sustava javne odvodnje i cijena pročišćavanja otpadnih voda (iskazana jedinično po ekvivalent stanovniku ili kroz volumen otpadne vode), ne može se zasnivati samo na troškovima nastalim unutar kruga UPOV-a, već na ukupnim troškovima do konačnog zbrinjavanja mulja. Troškovi obrade i zbrinjavanja mulja nisu zanemarivi te kod uređaja veličine od 5.000 do 200.000 ES, iznose približno 50 % ukupnih troškova poslovanja (Nowak, et al., 2003), a u

određenim okolnostima (odvoz izvan Hrvatske) mogu biti i znatno veći uz povećanje negativnog sociološkog utjecaja (Kocks Consult GmbH, 2010).

Činjenica je da do danas u velikom broju zemalja u razvoju, kao i u pojedinim razvijenim zemljama svijeta, nije cjelovito riješen problem zbrinjavanja mulja, niti je isti određen propisima, uputama ili smjernicama. Kako gradnja UPOV-a u Hrvatskoj postaje sve intenzivnija, zbrinjavanje mulja će opterećivati rad komunalnih poduzeća, koja upravljaju sustavima odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda.

Odabir optimalnog postupka obrade mulja na UPOV-u ovisi između ostalog i o konačnom zbrinjavanju pa je već kod izgradnje uređaja to nužno uzeti u obzir. Pojedine studijske analize (Kocks Consult GmbH, 2010; WYG International Ltd, 2013), nakon cjelovite raščlambe različitih rješenja, a uzimajući u obzir i troškove zaštite okoliša, zaključuju kako bi postupak termičke obrade bio prihvatljiv koncept konačne obrade mulja na UPOV-u većeg kapaciteta. Termičkom obradom mulja se u značajnoj mjeri olakšava daljnje gospodarenje novonastalim proizvodom (pepelom), prvenstveno kao posljedica značajnog smanjenja mase i volumena konačnog sporednog proizvoda. Termičkom obradom se smanjuje ukupna masa mulja i do 85 % (FHWA-RD-97-148, 2012). Smanjuje se i volumen ukupne otpadne tvari, termički se uništavaju toksične organske komponente, minimiziraju se neugodni mirisi i olakšava daljnje gospodarenje, a moguće je dobivanje energije (Tantawy et al., 2012).

U sklopu postupka termičke obrade mulja javlja se sporedni proizvod u obliku pepela (ISSA) koji u konačnici treba zbrinuti na odgovarajući način, a čije količine nisu zanemarive. Primjerice, na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda kapaciteta 1.500.000 ES proizvodit će se oko 80.000 t/godišnje stabiliziranog i dehidriranog mulja (s 30 - 35 % ST), dok bi se u procesu termičke obrade proizvodilo oko 18.000 t/godišnje pepela. Donatello i Cheeseman (2013) je procijenio da se danas na globalnoj razini u procesima termičke obrade muljeva s UPOV-a generira oko 1.700.000 t pepela/godišnje (najveći dio u SAD, EU i Japan). Izgradnjom novih i rekonstrukcijom postojećih UPOV-a navedena brojka će se u budućnosti konstantno povećavati.

Mogućnost ponovne upotrebe mulja (pepela) u velikoj mjeri ovisi o njegovom sastavu, prije svega kemijskom. Stoga rezultate određenih istraživanja koja su rađena s muljevima čiji se sastav razlikuje od muljeva generiranih na području Hrvatske treba uzeti s određenim oprezom. Primjerice, u Hrvatskoj je tijekom posljednja dva desetljeća znatno opala industrijska proizvodnja, što je rezultiralo značajnim promjenama količina i sastava otpadnih voda koje dotječu na UPOV, a samim tim i sastava muljeva. Isto tako, sastav mulja i pepela koji se generira na UPOV-u u značajnoj mjeri ovisi i o tehnološkom procesu pročišćavanja vode i same obrade mulja (npr. dodaje li se mulju u konačnoj fazi obrade vapno i dr.).

Konačno zbrinjavanje mulja nije važno isključivo s aspekta zadovoljenja zakonskih propisa, već i s aspekta odabira optimalne koncepcije pročišćavanja, uključivo i samu obradu mulja. Navedeno je posebno izraženo kroz mogućnosti ponovne upotrebe mulja. Uz prethodno opisanu problematiku, u



sklopu projekta RESCUE (Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products), financiranog od Hrvatske zaklade za znanost (projektom 7927) detaljnije se razmatra mogućnost korištenja mulja u betonskoj industriji, odnosno korištenja pepela kao sporednog proizvoda konačne obrade mulja. U sklopu istog projekta očekuje se dobivanje rezultata koji bi trebali poslužiti za intenzivnije poticanje razmišljanja vezanih uz isplativost i opravdanost korištenja/recikliranja mulja s uređaja za pročišćavanje.

Ista je problematika sve aktualnija i u Hrvatskoj, obzirom da je u skladu s preuzetim obvezama prema EU u tijeku intenzivno projektiranje i izgradnja velikog broja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) većih od 10.000 ES.

Spaljivanjem mulja generira se pepeo koji ima znatno manju masu i volumen, u odnosu na stabiliziran i dehidriran mulj, čime je olakšano njegovo konačno zbrinjavanje. Međutim, ukoliko bi se usvojio koncept spaljivanja mulja na 4 do 5 regionalnih spalionica (Zagreb, Split, Rijeka, Osijek i potencijalno Varaždin) generirale bi se značajne količine pepela koji bi u konačnici trebalo zbrinuti na odgovarajući način.

Primjerice, na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda kapaciteta 250.000 ES proizvodilo bi se oko 13.500 t/godišnje stabiliziranog i dehidriranog mulja (s 30-35% ST), dok bi se u procesu termičke obrade proizvodilo oko 3.000 t/godišnje pepela.

U okvirima održivog razvoja, recikliranjem mulja gotovo u potpunosti se zatvara ciklus pročišćavanja otpadnih voda pri čemu se generiraju zanemarive količine otpadne tvari koje je potrebno odložiti u okoliš.

U sklopu projekta RESCUE provedena je analiza tržišta vezano uz betonsku industriju na području Hrvatske. U sklopu provedene analize tržišta nastojalo se istražiti u kojoj je mjeri tržište spremno za prihvaćanje nove sirovine (pepela dobivenog spaljivanjem mulja) i betonskih proizvoda s pepelom te koja se kvalitativna svojstva sirovine i proizvoda očekuju. Za potrebe analize tržišta, članovi projektnog tima pripremili su anketni upitnik koji je poslan većem broju proizvođača betona i betonskih proizvoda u Hrvatskoj. Rezultati provedene ankete dani su u sklopu ovog izvještaja.



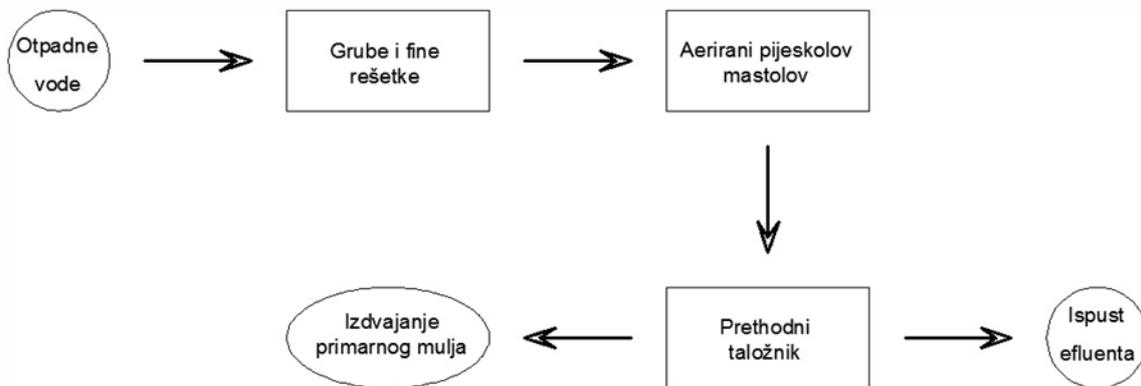
2. GENERIRANJE MULJA NA UPOV-u

2.1 Općenito

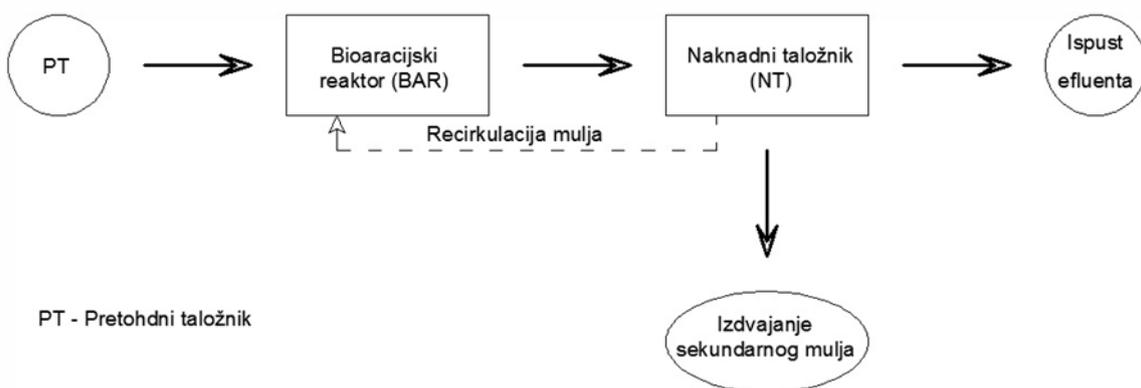
U postupku pročišćavanja otpadnih voda na UPOV-u iz istih se uklanjaju otpadne tvari te se pročišćena voda ispušta u okoliš bez narušavanja prirodne biološke ravnoteže u prijemnicima (površinskim i podzemnim vodnim tijelima). U postupku pročišćavanja otpadnih voda kao sporedni proizvod svakog tehnološkog procesa generiraju se određene količine mulja (prvenstveno kroz izdvajanje mulja iz prethodnih i naknadnih taložnika). Pritom se na UPOV-u uz mehanički predtretman (gruba i fina rešetka, aerirani pjeskolov-mastolov) primjenjuju tri osnovna stupnja pročišćavanja:

- I. stupanj – taloženje ili mikrofiltracija s uklanjanjem ukupne raspršene tvari (min. 50 %) i manjeg dijela organskog onečišćenja (min. 20 %)
- II. stupanj – biološko pročišćavanje s uklanjanjem organskog onečišćenja
- III. stupanj – biološko i kemijsko pročišćavanje s uklanjanjem dušika i fosfora

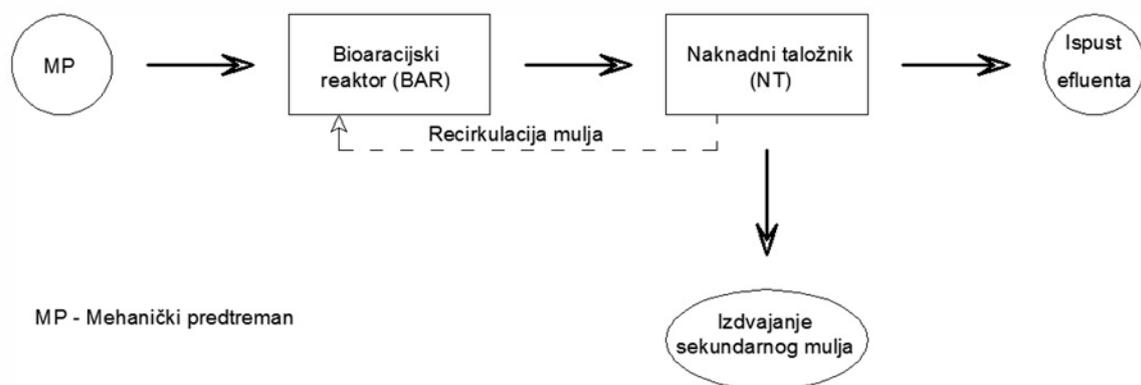
U sklopu I. stupnja pročišćavanja generiraju se značajne količine primarnog mulja kroz izdvajanje u prethodnim taložnicima (Slika 1). Na UPOV-u s II. stupnjem pročišćavanja uz primjenu konvencionalnog postupka s aktivnim muljem uz izdvajanje mulja u prethodnim taložnicima dodatno se izdvajaju značajne količine biološkog (sekundarnog) mulja u naknadnim taložnicima (Slika 2). U funkciji II. stupnja pročišćavanja moguće je primijeniti različita tehnološka rješenja. Primjerice, uz primjenu postupka s produženom aeracijom (istovremenom stabilizacijom) dolazi do izdvajanja mulja isključivo u naknadnim taložnicima (Slika 3). Na UPOV-u s III. stupnjem pročišćavanja moguća je primjena tehnoloških procesa s prethodnim taložnicima i bez njih, te je moguće izdvajanje mulja i u prethodnim i u naknadnim taložnicima (slično kao i kod prethodno opisanog II. stupnja).



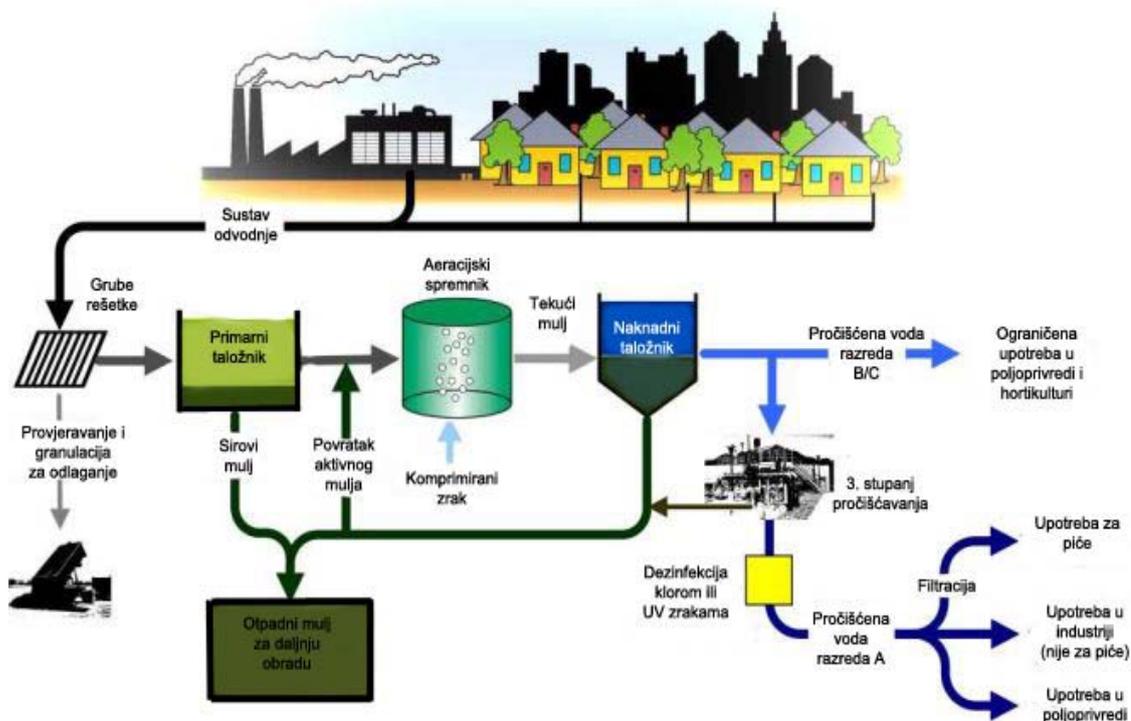
Slika 1 Shematski prikaz UPOV-a s I. stupnjem pročišćavanja



Slika 2 Shematski prikaz UPOV-a s II. stupnjem pročišćavanja (konvencionalni postupak s aktivnim muljem)



Slika 3 Shematski prikaz UPOV-a s II. stupnjem pročišćavanja (postupak s produženom aeracijom – istovremenom stabilizacijom)



Slika 4 Sustav pročišćavanja voda i proces nastajanja mulja (URL_5)

2.2 Obrada mulja na UPOV-u

Generirani primarni mulj (iz prethodnog taložnika) i biološki mulj (iz naknadnih taložnika) potrebno je prikladno obraditi na samom uređaju i zbrinuti u okoliš u skladu sa zakonskom regulativom i propisima.

Postupak obrade mulja poželjno je odrediti u ovisnosti o načinu konačne dispozicije mulja. Ne postoji jedinstven način konačnog zbrinjavanja mulja, a u odnosu na relevantne čimbenike (svojstva otpadne vode, stupanj i tehnologiju čišćenja otpadne vode, svojstva i količinu proizvedenog mulja, kapacitet UPOV-a, zakonske propise, mjesne prilike, troškove izgradnje i održavanja i dr.) potrebno je za svaki uređaj odabrati način na koji će se mulj konačno zbrinuti. Odabir optimalnog tehnološkog rješenja obrade mulja na UPOV-u trebao bi proizaći na temelju rezultata detaljno provedenih analiza različitih rješenja i njihovog višekriterijskog rangiranja, uvažavajući pritom ekonomski, tehničko-tehnološki i socijalni kriterij, te kriterij održivosti. U okvirima nastojanja za ponovnom upotrebom (recikliranjem) mulja izuzetno je važno imati u vidu da različite mogućnosti ponovne upotrebe mulja zahtijevaju primjenu određenih postupaka obrade mulja.

Tijek obrade mulja na UPOV najčešće prolazi tri osnovne faze:

- zgušnjavanje
- stabilizacija
- odvodnjavanje.

Zgušnjavanje mulja je proces u kojem dolazi do smanjenja volumena mulja, kako bi se smanjili troškovi njegove kasnije obrade, kao i troškovi izgradnje objekata koji slijede na liniji mulja. Ovisno o svojstvima mulja i primijenjenom tehnološkom rješenju, zgušnjavanjem se postiže koncentracija suhe tvari u mulju 2 - 12 % ST.

Stabilizacijom mulja postiže se inhibicija, smanjenje ili eliminacija mogućnosti daljnjeg truljenja mulja (razgradnje organske tvari uz pomoć mikroorganizama).

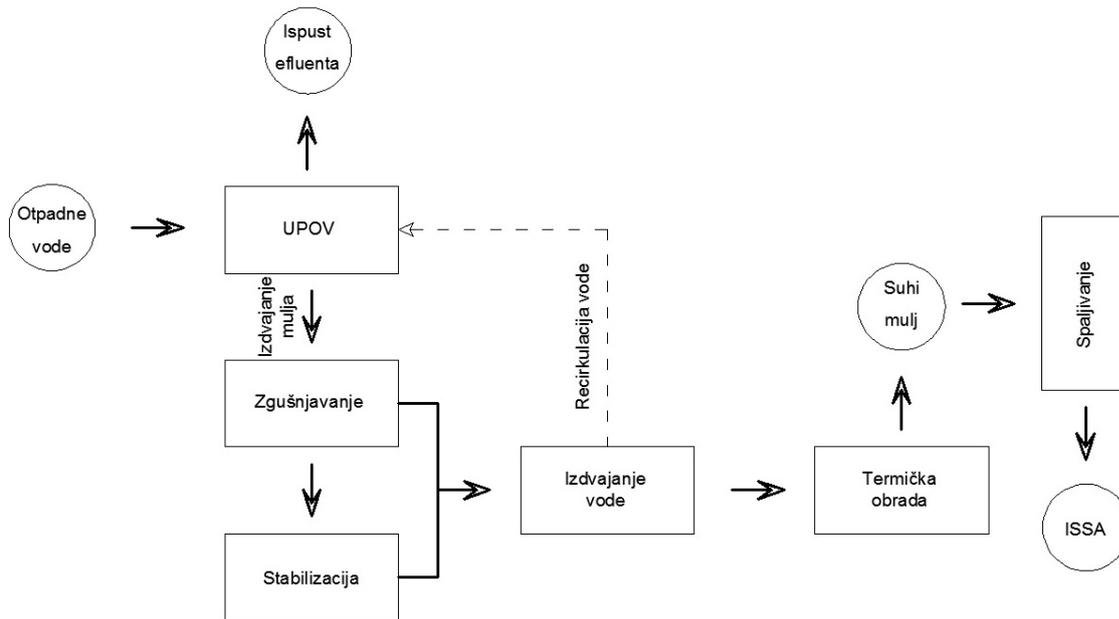
Dehidracija mulja je postupak kojim se iz mulja uklanja sadržaj vode. Dehidracijom se postiže koncentracija suhe tvari u mulju 25 - 35 % S T. Da bi se dobio kruti mulj s većim sadržajem suhe tvari, te shodno tome manji volumen (i s time manji prijevozni troškovi) trebalo bi strojno dodavati vapno dehidriranom mulju.

Uz prethodno izdvojena tri osnovna postupka obrade mulja, izdvajaju se i dodatne faze obrade mulja koje se prema potrebi mogu primijeniti:

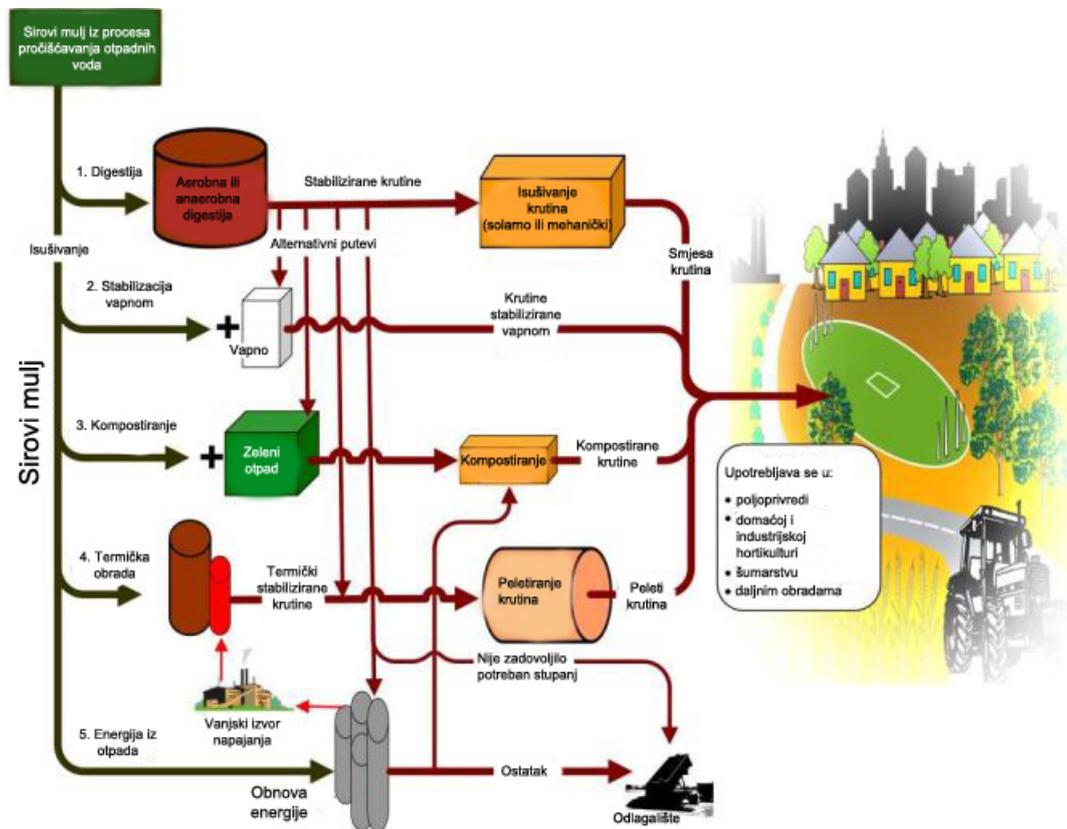
- homogenizacija
- kondicioniranje
- sušenje
- spaljivanje
- dezinfekcija.

U velikom broju zemalja EU značajne količine stabiliziranog i dehidriranog mulja se spaljuju. Spaljivanjem mulja generira se pepeo koji je po obujmu tri do pet puta manji od svježeg mulja što pozitivno utječe na smanjenje troškova njegovog konačnog zbrinjavanja, uz dodatno isticanje mogućnosti recikliranja pepela.

Kako je u uvodnom dijelu ovog izvještaja napomenuto, pojedine studijske analize (Kocks Consult GmbH, 2010; WYG International Ltd, 2013), zaključuju kako bi na UPOV-u većeg kapaciteta postupak spaljivanja mulja bio prihvatljiv koncept vezan uz konačno zbrinjavanje mulja s izgradnjom 4 - 5 regionalnih spalionica mulja (Zagreb, Split, Rijeka, Osijek, Varaždin).



Slika 5 Shematski prikaz procesa obrade mulja s termičkom obradom i proizvodnjom pepela (ISSA)



Slika 6 Postupci obrade mulja (URL_5).

2.3 Spaljivanje mulja s UPOV-a

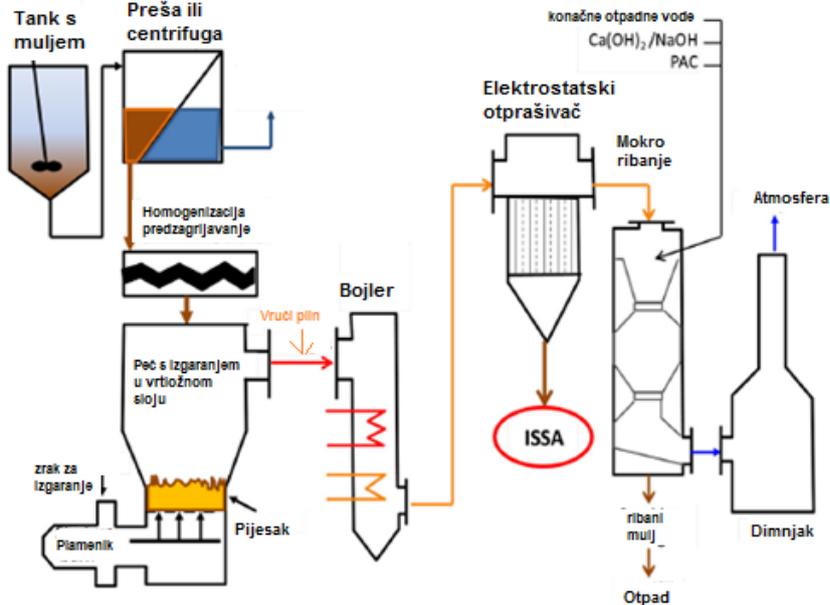
Stabiliziran i dehidriran mulj koji sadrži 18 – 35 % ST prije konačnog spaljivanja se uobičajeno suši, u prvom redu s ciljem povećanja energetske učinkovitosti pri spaljivanju. Mulj koji sadrži 75 – 95 % ST potom se uvodi u peći za spaljivanje, te se dobiva pepeo (ISSA), fino granulirani otpadni materijal.

Kalorijska vrijednost mulja slična je onoj smeđeg ugljena, ali treba obratiti pozornost na činjenicu da je to kalorijska vrijednost organskog dijela mulja, dok anorganski dio nema kalorijsku vrijednost. Stoga je uobičajeno potrebno mulj dovesti barem do razine od 28 do 33 % ST kako bi moglo doći do auto-termičkog sagorijevanja bez dodavanja vanjskog goriva za održavanje procesa (Donatello i Cheeseman, 2013). U stabiliziranom i dehidriranom stanju mulj ima kalorijsku vrijednost u rasponu 12 – 20 MJ/kg (Donatello et al., 2004). Različite vrste peći koriste se za spaljivanje stabiliziranog i dehidriranog mulja. Najčešće korištene su peći s izgaranjem u vrtložnom sloju (engl. fluidised bed) (Donatello et al., 2004).

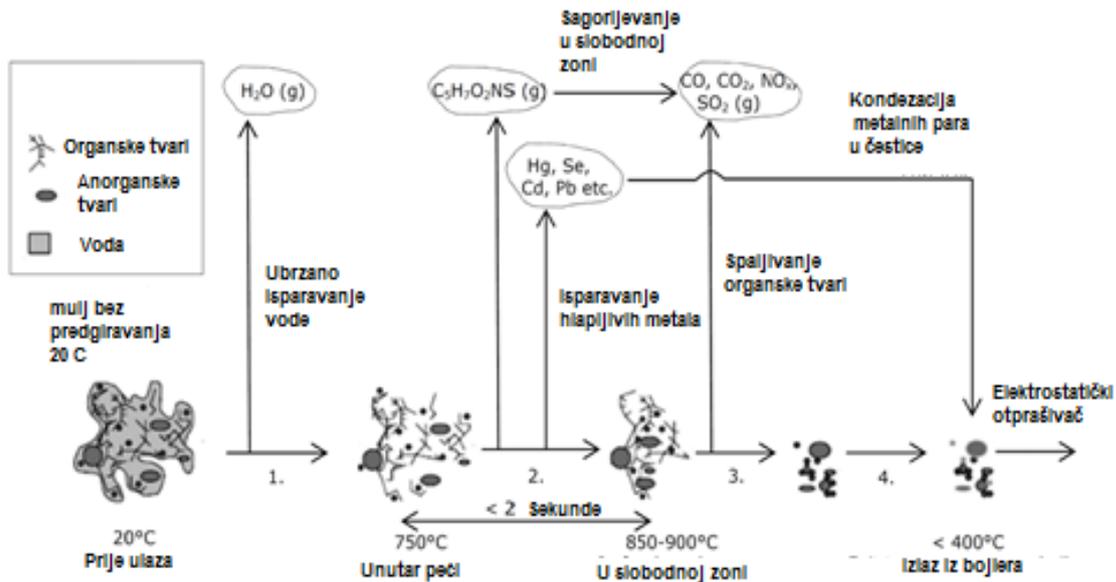
Temperatura u komori za sagorijevanje kontrolira se vodom ili tekućim plinskim uljem. Na dnu peći nalazi se pijesak koji pomaže stabilizirati temperaturne fluktuacije unutar same peći. Vrijeme sagorijevanja u peći je 1 – 2 sata i tijekom tog vremena dolazi do isparavanja vode, lako hlapljivih metala i sagorijevanja organskih spojeva koji prelaze u plinove. Ostale anorganske tvari se iznose iz komore u obliku finih čestica zajedno s ispušnim plinovima. Pepeo se obično skuplja pomoću „bag“ filtera ili elektrofiltera. Ispušni plinovi se moraju tretirati u skladu s EU direktivom o spaljivanju otpada (Donatello i Cheeseman, 2013).

Od ostalih vrsta peći za spaljivanje mulja izdvaja se modularna spalionica (Pan et al., 2003) i električna prigušena peć (engl. electrical muffle furnace) (Tantawy et al., 2012).

Pepeo generiran spaljivanjem mulja odvaja se od ispušnih plinova u filtarskim vrećama ili putem elektrostatičkih taložnica prije pročišćavanja plinova (Yusuf et al., 2012). Prilikom spaljivanja mulja s UPOV-a ne samo da nastaje pepeo koji je moguće višestruko iskoristiti, već se u ovom procesu odvija cjelokupno termičko uništavanje organskih, ali i najvećeg dijela anorganskih zagađivala (Al-Sharif i Attom, 2013).



Slika 7 Peći s izgaranjem u vrtložnom sloju (Donatello i Cheeseman, 2013)



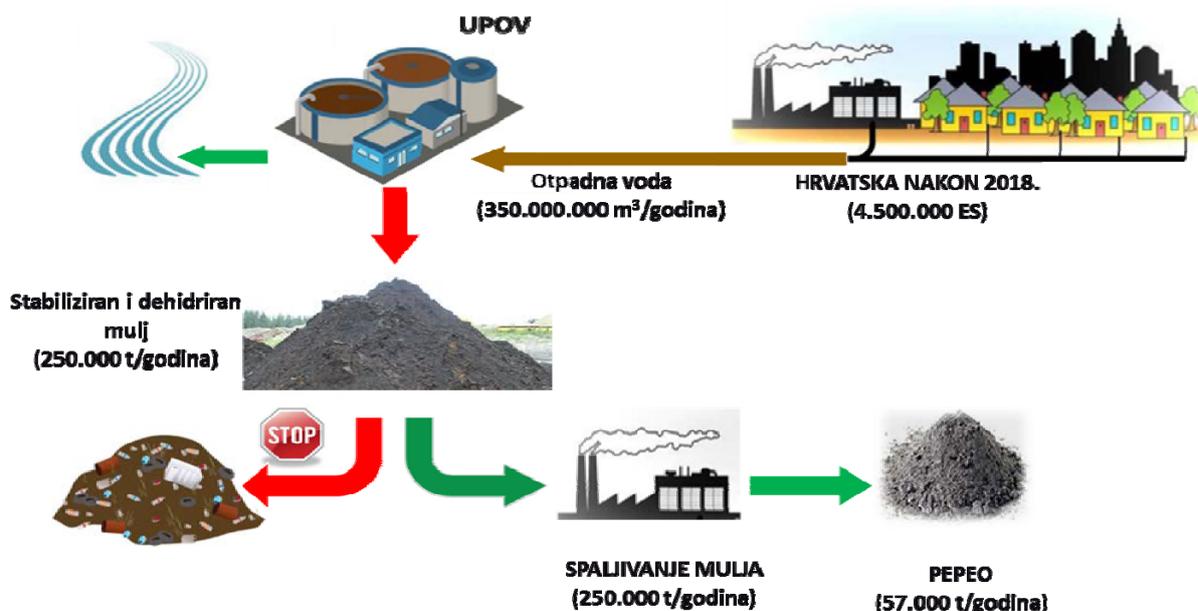
Slika 8 Fizikalni i kemijski procesi prilikom spaljivanja (Donatello i Cheeseman, 2013)



Slika 9 Karakteristike pojedinih oblika mulja iz otpadnih voda ovisno o njegovom tretmanu (URL_6)

2.4 Generiranje mulja u Hrvatskoj

U Hrvatskoj će do 2018. godine biti u pogonu uređaji s ukupnim kapacitetom oko 4.500.000 ES što će rezultirati generiranjem ukupne količine stabiliziranog i dehidriranog mulja u iznosu oko 250.000 t/godišnje (Slika 10). U slučaju odabira termičke obrade muljeva generiralo bi se oko 57.000 t pepela godišnje. Spaljivanjem mulja ne rješava se u cijelosti problem njegovog gospodarenja. Naime, dobiveni pepeo također je potrebno zbrinuti u okoliš u skladu s relevantnom zakonskom regulativom i propisima.



Slika 10 Generiranje mulja u Hrvatskoj nakon 2018. godine

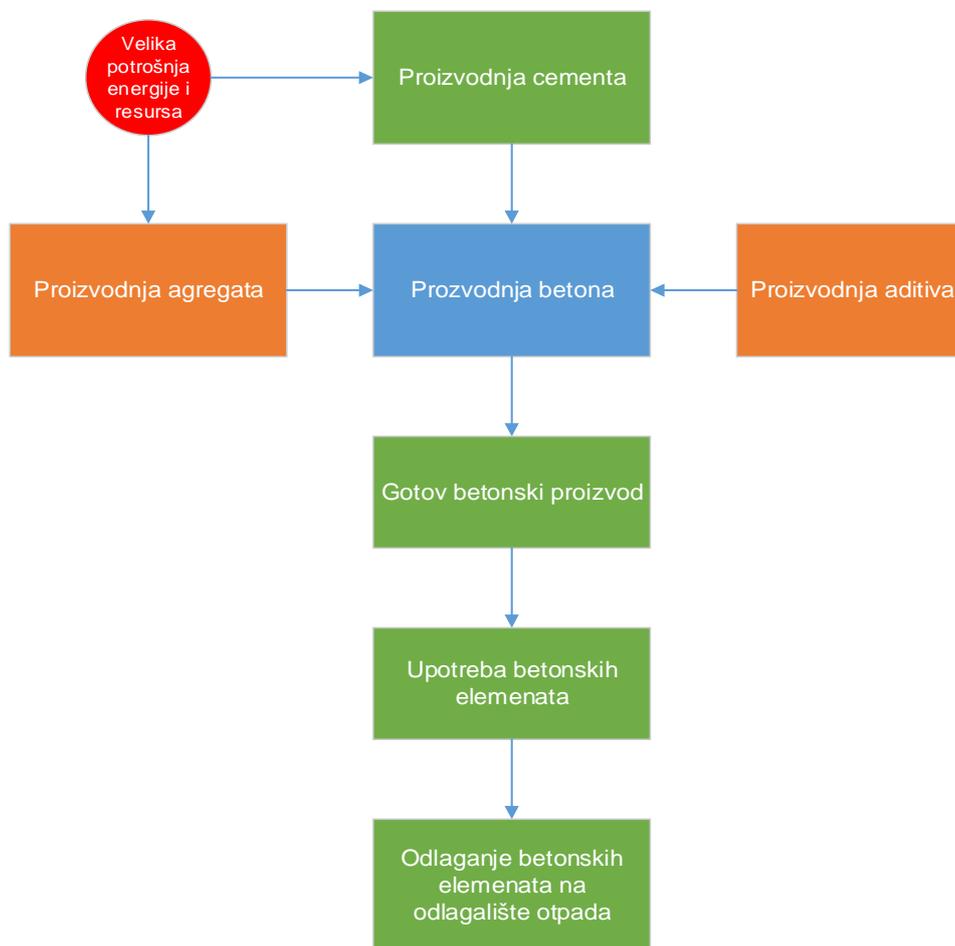
3. INDUSTRIJA BETONA

3.1 Općenito

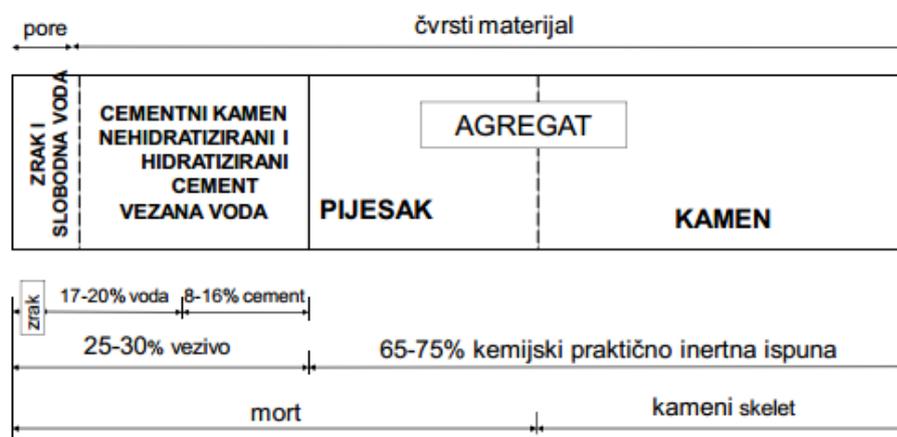
Tijekom evolucije i diferencijacije, industrijska ekonomija nije se odmakla od osnovne karakteristike uspostavljene u ranim danima industrijalizacije, a to je linearni model potrošnje resursa koji funkcionira po principu "uzmi-proizvedi-odloži" (engl. „take-make-dispose“) (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Osnovna pretpostavka ovog modela je da kompanije uzimaju materijal iz prirode, koriste energiju i rad za proizvodnju proizvoda i prodaju ga potrošaču koji ga na kraju odbaci/odlaže kada više ne služi svrsi. Većim dijelom prošlog stoljeća smanjenjem cijena resursa podupirao se rast ekonomije u naprednim gospodarstvima svijeta. Formiranje niske cijene resursa u odnosu na troškove rada dovelo je do stvaranja rasipnog sustava iskorištavanja resursa. Ponovno iskorištavanje materijala nije bilo ekonomično, to jest bilo je jeftinije uzimati nove materijale i odlagati ih na odlagalište otpada (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Jedan od primjera linearne industrije je industrija betona, koja je dosada iskorištavala prirodne resurse za proizvodnju betonskih proizvoda i nakon upotrebe bi se betonski proizvodi odlagali na odlagališta otpada kao građevinski otpad. Linearna industrija betona (Slika 11) obuhvaća više segmenata proizvodnje. Tako su sadržani segmenti proizvodnje agregata, cementa, vode i dodataka. Posebna pozornost se pridaje segmentima proizvodnje agregata i cementa, jer oni zauzimaju najveći udio u volumenu betona i najveća je potrošnja energije tijekom njihove proizvodnje.

Beton je heterogeni konstrukcijski materijal koji se sastoji od portlandskog cementa, agregata, vode te po potrebi kemijskih i mineralnih dodataka. U usporedbi s čelikom, beton ima 10 - 20 puta manju čvrstoću i 4 - 7 puta anji modul elastičnosti m , stoga se postavlja opravdano pitanje zašto je beton danas najčešće korišten umjetni materijal na svijetu. Može se izdvojiti najmanje tri razloga za to. Za razliku od drva i čelika, beton kao konstrukcijski element može biti u kontaktu s vodom bez ozbiljnih oštećenja. Dokaz tome su betonski elementi u agresivnim industrijama kao što su kemijska i naftna industrija. Drugi razlog je široka primjena betonskih elemenata te sama jednostavnost i brzina gradnje. Treći razlog je njegova cijena koja je vrlo povoljna u odnosu na druge građevinske materijale. Još bi se mogli istaknuti dobra otpornost na požar, jednostavno održavanje i otpornost na ciklička opterećenja (Monteiro, 2006). Svojstva betona u svježem i očvrstulom stanju prvenstveno ovise o komponentama od kojih je napravljen i njihovom udjelu (Slika 12). Agregat čini približno tri četvrtine volumena betona (Ukrainczyk, 1994).



Slika 11 Prikaz linearne industrije betona



Slika 12 Sastav betona i volumni udio (Bjegović, Štirmer, 2015)



Agregati za beton mogu se podijeliti na prirodne, umjetne i reciklirane. Prirodni agregati mogu se proizvesti iz vučenog nanosa, koji se formira procesima erozije raznih vrsta stijena ili drobljenjem velikih komada prirodnih stijena. Većina svojstava agregata ovise o svojstvima izvorne stijene (sedimentna, metamorfna i eruptivna) i postupcima usitnjavanja. Umjetni agregat se proizvodi za neku posebnu namjenu, kao što je lagani beton. To su agregati od ekspandirane i pečene gline, perlit, vermikulit i otpadni proizvodi ili sekundarne sirovine u industriji (zgura, leteći pepeo) (Ukrainczyk, 1994). Reciklirani agregat sastoji se od zdrobljenih i razvrstanih anorganskih čestica dobivenih iz materijala koji su već korišteni u konstrukcijama. Dobiva se sortiranjem mješovitog građevinskog otpada u centralnom pogonu ili odvajanjem materijala na izvoru i direktan prijevoz u postrojenja za obradu. Kao reciklirani agregat najčešće se koristi beton, asfalt i opeka (URL_3). Agregat zbog svog velikog udjela u betonu ima veliki utjecaj na svojstva svježeg i očvrstalog betona. Tako agregat značajno utječe na cijenu betona, dimenzijsku stabilnost, otpornost na habanje i tvrdoću. U Tabl. 1 prikazano je koja svojstva agregata utječu na pojedina svojstva betona (Ukrainczyk, 1994).

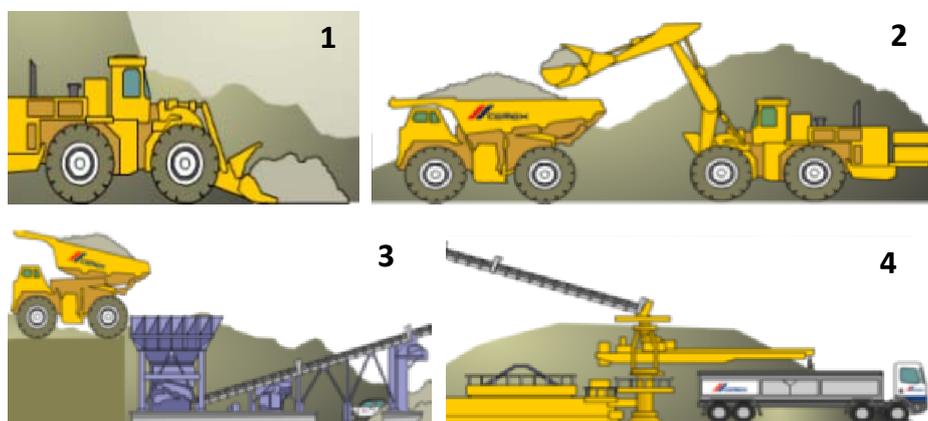
Tabl. 1 Utjecaj svojstava agregata na svojstva betona

Svojstva betona	Svojstva agregata
Čvrstoća	Čvrstoća
	Tekstura
	Čistoća
	Oblik zrna
	Maksimalno zrno
Skupljanje	Modul elastičnosti
	Oblik zrna
	Granulometrijski sastav
	Maksimalno zrno
Toplinski koeficijent	Muljevitost i glinene čestice
	Toplinski koeficijent
Modul elastičnosti	Modul elastičnosti
	Poissonov koeficijent

3.2 Proizvodnja agregata

Proizvodnja prirodnog agregata je jedan od segmenata linearne betonske industrije. Jednostavnost proizvodnje agregata ovisi o pristupačnosti, debljini pokrovnog sloja, čistoći i drugim relevantnim karakteristikama pozajmišta, te o propisanim uvjetima kvalitete agregata za određenu namjenu. Proizvodnja drobljenog agregata (URL_4) (Slika 13) za beton obuhvaća sljedeće:

- Stijene kamenoloma se uzimaju na koncesiju od minimalno trideset godina. Za iskop stijene obično se primjenjuje kontrolirana eksplozija. Nakon toga se rahla stijena prevozi kamionima na drobilice koje drobe agregat na sitne frakcije tako da odgovaraju potrebama kupca.
- Eksploziv se koristi samo da se površinski razrahli stijena tako da se bagerima može dalje iskopati i utovarivati u kamione za transport do drobilice.
- Na drobilici se stijena usitnjava u sitne frakcije. Većina drobilica ima četiri faze u proizvodnji agregata, a to su: predsijavanje, drobljenje i mljevenje, sijanje i hidrosepariranje.
- Agregat usitnjen na sitne frakcije se prevozi cestom ili željeznicom do potrošača (URL_4).



Slika 13 Proizvodnja drobljenog agregata po fazama (URL_4)



3.3 Proizvodnja cementa

Nakon agregata sljedeći segment linearne betonske industrije predstavlja proizvodnja cementa. Pri proizvodnji cementa ne samo da je velika potrošnja energije (4 GJ/ tona cementa), već je velika i emisija ugljikovog dioksida (CO_2). Pri proizvodnji jedne tone portlandskog cementnog klinkera ispusti se 0,8-0,9 tona CO_2 u atmosferu. Zbog toga danas cementna industrija, pri proizvodnji cementa od 3,3 milijarde tona godišnje, uzrokuje 5 - 7 % svjetske emisije ugljikovog dioksida u atmosferu (Monteiro, 2006). Cement se proizvodi (Slika 14) spaljivanjem sirovina vapnenca (80 %) i gline (20 %).

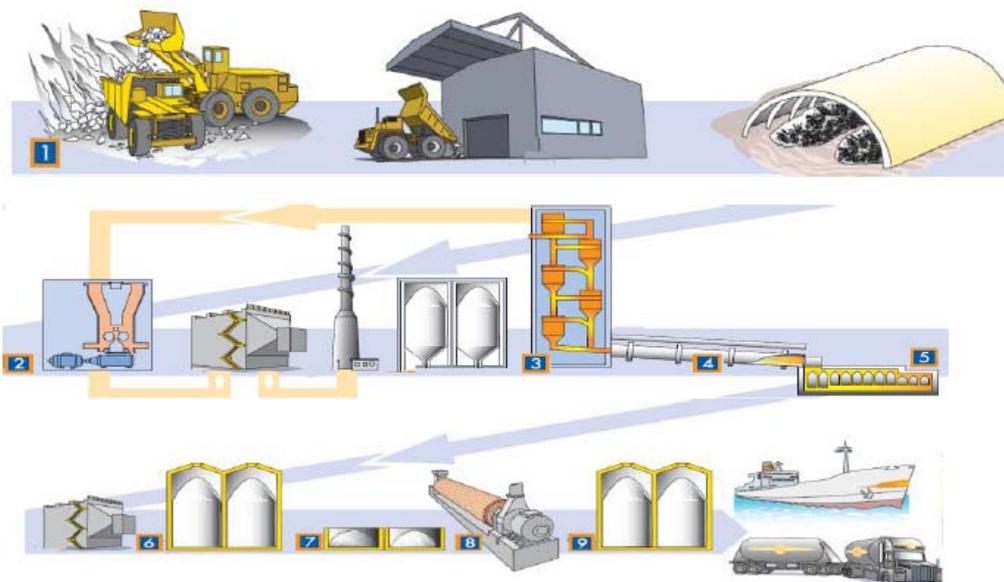
(1) Vapnenac se usitnjava i drobi do veličine zrna od 80 mm, sastoji se od kalcijevog i magnezijevog karbonata (Mousavi, 2013).

(2) Male količine kvarcnog pijeska, boksita ili hematita dodaju se sirovinama za proizvodnju cementa radi optimizacije sadržaja silicija, aluminija i željeza (Donatello i Cheeseman, 2013).

(3) U modernim sustavima za proizvodnju cementa, prije sinteriranja, sirovina se radi uštede energije predgrijava na temperaturu od 850 do 900 °C u trajanju od nekoliko minuta uz stupanj kalcinacije (otpuštanje CO_2) vapnene komponente od oko 95 % (Đureković, 1996).

(4) Proces sinteriranja se odvija na temperaturi od 1450 °C, a mješavina prelazi u kalcijeve silikate i kalcijeve aluminate. Tako nastane cementni klinker, veličine granula 3 – 25 mm, koji se nakon izlaska iz peći hladi (5) i skladišti u klinker silosima (6).

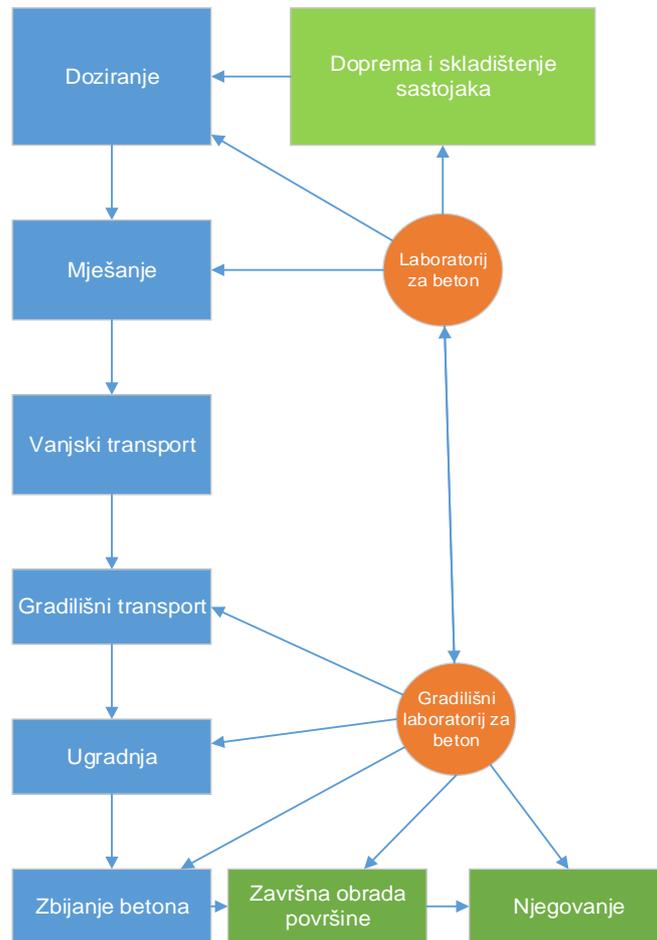
(7) Završni korak u proizvodnji cementa jest dodavanje gipsa (ili materijala koji sadrži potreban udio vodotopljivoga kalcijevog sulfata) i drugih dodataka i njihovo zajedničko (8) mljevenje. Tek je samljevena smjesa cementnog klinkera i gipsa proizvod koji naziva cementom. Gotovi se cement skladišti u vertikalnim betonskim silosima (9) u kojima se pumpanjem homogenizira. Temperatura gotovog cementa u silosu ne smije biti veća od 70 °C (Đureković, 1996). Većina energije u proizvodnji cementa troši se na proces kalcinacije cementa. Goriva koja se koriste u rotacijskoj peći za proizvodnju cementa su: kameni ugljen, dizelsko ulje, loživo ulje i otpadni proizvodi. Najčešće korišteno gorivo je kameni ugljen (Mousavi, 2013).



Slika 14 Proizvodnja cementa po fazama (Mousavi, 2013)

3.4 Proizvodnja betona

Poznavajući postupke proizvodnje agregata i cementa, kao dva najvažnija segmenta linearne industrije betona, može se opisati i sam postupak proizvodnje betona. Beton se izrađuje u betonarama na gradilištu, u betonarama tvornica predgotovljrnig elemenata ili u centralnim betonarama. U posljednjih dvadesetak godina učinjen je veliki napredak u mehaniziranju, industrijalizaciji i automatizaciji postupka proizvodnje betona. Postupak proizvodnje betona (Ukrainczyk, 1994) obuhvaća sljedeće faze prikazane na Slika 15:



Slika 15 Proizvodnja betona

4. ANKETNO ISPITIVANJE

4.1 Priprema ankete

Za potrebe projekta RESCUE provedena je analiza tržišta vezano uz betonsku industriju na području Hrvatske. U sklopu provedene analize tržišta nastojalo se istražiti u kojoj je mjeri tržište spremno za prihvaćanje nove sirovine (pepela dobivenog spaljivanjem mulja) i konačnih betonskih proizvoda za čiju proizvodnju bi bio korištene pepeo te koja se kvalitativna svojstva sirovine i proizvoda očekuju od tržišta. Za potrebe analize tržišta članovi projektnog tima pripremili su anketni upitnik koji je upućen prema 80-ak proizvođača betona i betonskih proizvoda u Hrvatskoj.

Anketa sadržava 13 konkretnih pitanja i dodatni prostor za komentare. Sadržaj ankete prikazan je na sljedeće tri stranice ovog izvještaja.



Anketa

1. 1. Naziv pogona i lokacija:

2. 2. Ime, prezime i kontakt ispunjavatelja ankete:

3. 3. Približna godišnja količina proizvedenog betona [m³]:

4. 4. U koje vrste elemenata se poglavito ugrađuje beton koji proizvodite?

(1 ili više odgovora)

Odaberite sve točne odgovore.

- Elementi niskogradnje
- Elementi visokogradnje
- Prednapeti elementi
- Opločnici
- Druga betonska galanterija
- Ostalo: _____

5. 5. Trajanje transporta betona kojeg proizvodite do gradilišta [min]:

(navesti prosječno i maksimalno vrijeme)



6. 6. Koje razrede tlačne čvrstoće betona najviše koristite?

(do 3 odgovora)

Odaberite sve točne odgovore.

- C8/10
- C12/15
- C16/20
- C20/25
- C25/30
- C30/37
- C35/45
- C40/50
- C45/55
- C50/60
- veće razrede od C50/60

7. 7. Koje vrste cementa najviše koristite pri proizvodnji betona?

(do 3 odgovora)

Odaberite sve točne odgovore.

- CEM I
- CEM II/A-S ili II/B-S
- CEM II/A-D
- CEM II/A-P ili II/B-P
- CEM II/A-Q ili II/B-Q
- CEM II/A-V ili II/B-V
- CEM II/A-W ili II/B-W
- CEM II/A-T ili II/B-T
- CEM II/A-L ili II/B-L
- CEM II/A-LL ili II/B-LL
- CEM II/A-M (S-V) ili II/B-M (S-V)
- CEM II/A-M (S-LL, V-LL) ili II/B-M (S-LL, V-LL)
- CEM III/A, III/B ili III/C
- CEM IV/A ili IV/B
- CEM V/A ili V/B

8. 8. Koji razred konzistencije (SLUMP) betona najviše primjenjujete?

(do 2 odgovora)

Odaberite sve točne odgovore.

- S1 (10-40 mm)
- S2 (50-90 mm)
- S3 (100-150 mm)
- S4 (160-200 mm)
- S5 (≥ 220 mm)



9. 9. Koja svojstva deklarirate za proizvedeni beton?

Odaberite sve točne odgovore.

- Vodonepropusnost
- Smrzavanje/odmrzavanje sa ili bez soli za odmrzavanje
- Otpornost na habanje
- Kemijska otpornost
- Ostalo: _____

10. 10. Koristite li pri spravljanju betona neki od sljedećih dodataka?

Odaberite sve točne odgovore.

- Silicijska prašina
- Leteći pepeo
- Zgura
- Metakaolin
- Ostalo: _____

11. 11. Da li ste upoznati s mogućnošću upotrebe recikliranih materijala kao dodataka betonu ili kao zamjene dijela cementa i agregata?

Označite samo jedan oval.

- Da
- Ne

12. 12. Da li ste upoznati s mogućnošću recikliranja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kao zamjene dijela cementa i agregata u proizvodnji betona i cementnog morta?

Označite samo jedan oval.

- Da
- Ne

13. 13. Da li biste u proizvodnji betona koristili pepeo dobiven spaljivanjem mulja kao zamjene udjela cementa (i do 20%) u slučaju pozitivnih svojstava dobivenog betona?

Označite samo jedan oval.

- Da
- Ne

14. Komentar:



4.2 Rezultati anketnog ispitivanja

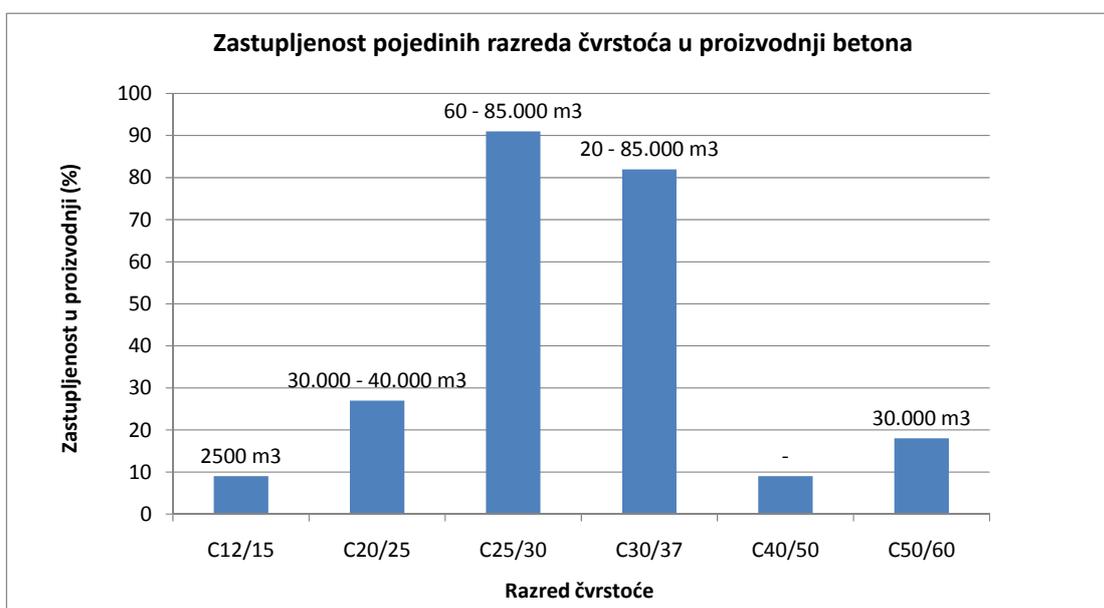
Na anketna pitanja trenutno je odgovorilo 11 proizvođača betona s približnom godišnjom proizvodnjom betona od 20 do 85000 m³ i to za različite betonske građevne proizvode, od prednapetih elemenata do opločnika.

Na osnovi prikupljenih odgovora može se zaključiti sljedeće:

- 73 % ispitanika upoznato je s mogućnošću upotrebe recikliranih materijala kao dodatka betonu ili kao zamjene dijela cementa i agregata
- 45 % ispitanika upoznato je s mogućnošću recikliranja pepela dobivenog splajivanjem mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u proizvodnji betona i cementnog morta
- 91 % ispitanika koristilo bi u proizvodnji betona pepeo dobiven spaljivanjem mulja kao zamjenu dijela cementa u slučaju pozitivnih svojstava dobivenog betona
- 18 % ispitanika navelo je da u proizvodnji superplastifikator
- za najčešće trajanje prijevoza betona do gradilišta većina ispitanika navela je vrijeme od 30 i 60 minuta te 120 minuta
- vrste cemenata koje proizvođači najčešće primjenjuju u proizvodnji betona su (bilo je moguće više odgovora):
 - CEM I – 27 % – portlandski cement
 - CEM II/A-S – 27 % – portlandski cement s dodatkom zgure 6 – 20 %
 - CEM II/B-S – 27 % – portlandski cement s dodatkom zgure 21 – 35 %
 - CEM II/A-VV – 9 % – portlandski cement s dodatkom letećeg pepela 6 – 20 %
 - CEM II/B-VV – 9 % – portlandski cement s dodatkom letećeg pepela 21 – 35 %
 - CEM II/A-M (S-V) – 55 % – miješani portlandski cement s dodatkom zgure i letećeg pepela 6 – 20 %
 - CEM II/B-M (S-V) – 55 % – miješani portlandski cement s dodatkom zgure i letećeg pepela 21 – 35 %
 - CEM II/A-M (S-LL) – 9 % – miješani portlandski cement s dodatkom zgure i vapnenca 6 – 20 %



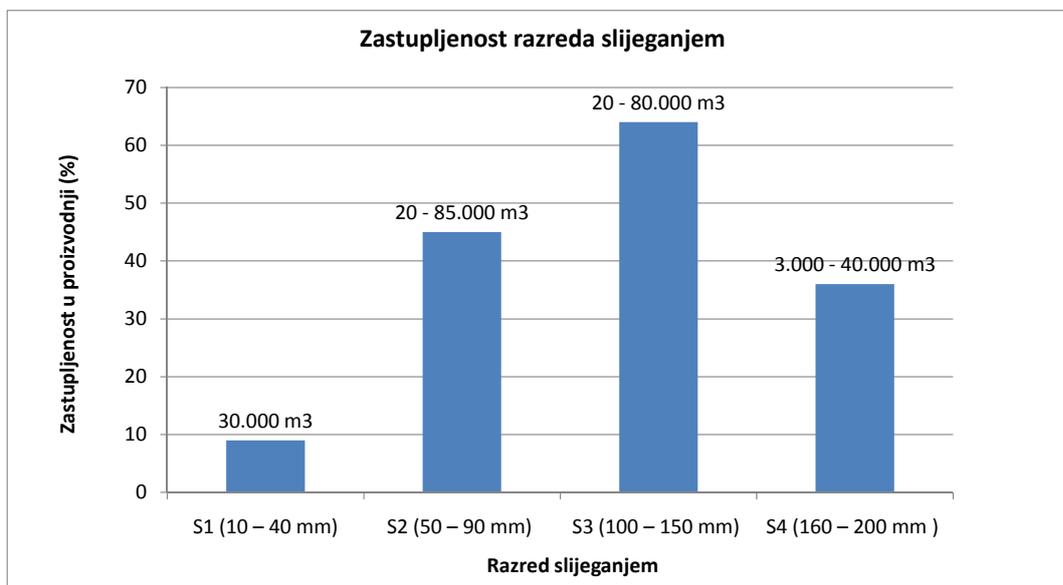
- CEM II/B-M (S-LL) –9 % – miješani portlandski cement s dodatkom zgure i vapnenca 21 – 35 %
 - CEM II/A-M (V-LL) – 9 % – miješani portlandski cement s dodatkom letećeg pepela i vapnenca 6 – 20 %
 - CEM II/B-M (V-LL) – 9 % – miješani portlandski cement s dodatkom letećeg pepela i vapnenca 21 – 35 %
 - CEM III/A –9 % – metalurški cement s dodatkom zgure 35 – 65 %
 - CEM III/B – 9 % – metalurški cement s dodatkom zgure 66 – 80 %
 - CEM III/C – 9 % – metalurški cement s dodatkom zgure 81 – 95 %
- razredi čvrstoća koje proizvođači najčešće proizvode su (bilo je moguće više odgovora), slika 16:
 - C12/15 – 9 %
 - C20/25 – 27 %
 - C25/30 – 91 %
 - C30/37 – 82 %
 - C40/50 – 9 %
 - C50/60 – 18 %





Slika 16 Zastupljenost pojedinih razreda čvrstoća u proizvodnji betona

- razredi konzistencije slijeganjem koje proizvođači primjenjuju su (bilo je moguće više odgovora), slika 17:
 - S1 (10 – 40 mm) – 9 %
 - S2 (50 – 90 mm) – 45 %
 - S3 (100 – 150 mm) – 64 %
 - S4 (160 – 200 mm) – 36 %



Slika 17 Zastupljenost razreda slijeganjem

- svojstva koja proizvođači deklariraju za beton koji proizvode (osim razreda čvrstoće) su (bilo je moguće više odgovora):
 - vodonepropusnost – 82 %
 - smrzavanje i odmrzavanje sa ili bez soli za odmrzavanje – 73 %
 - otpornost na habanje – 18 %
 - kemijska otpornost – 2 %

Uz odgovore na navedena pitanja, ispitanici su istaknuli sljedeće:



„Mineralni dodaci koje bismo koristili za proizvodnju betona moraju zadovoljavati zahtjeve pripadajućih normi i imati izjavu o svojstvima.“

„Upoznat sam s problemom zbrinjavanja mulja i mogućnostima njegove uporabe te smatram kako bi naša tvrtka mogla surađivati na rješavanju problema.“

„Naša tvrtka otvorena je za suradnju na ovom području.“

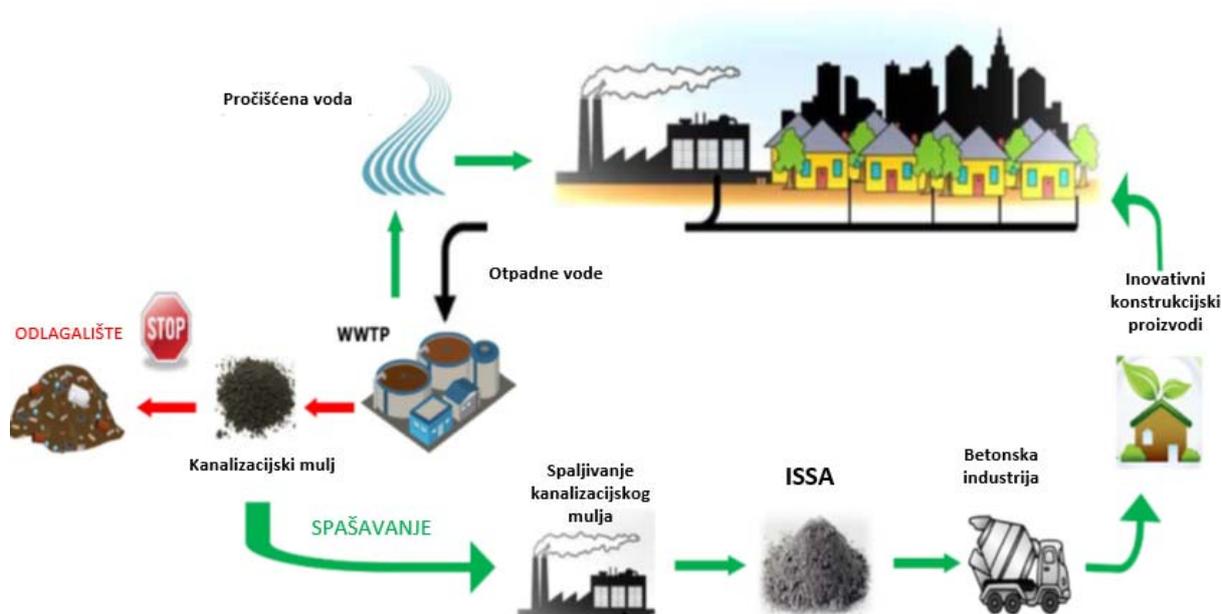
„Ako korištenje spaljenog mulja (značajno) ne utječe na kvalitetu, a ekonomski je isplativo naravno da smo spremni to prihvatiti.“

5. ZAKLJUČNO O ANALIZI TRŽIŠTA

Posljednjih godina industrijski razvoj je dominirao u jednom smjeru, linearni model proizvodnje i potrošnje u kojem se roba proizvodi od sirovina, prodaje, koristi, a zatim odbaci kao otpad. Model je izuzetno uspješan u pružanju pristupačnih proizvoda za potrošače i materijalno blagostanje za milijarde. Naglo povećanje materijalne potražnje uzrokovalo je smanjenje i poskupljenje prirodnih resursa. Možda je najproblematičnije to što je ovaj nagli rast potražnje imao negativne posljedice na okoliš. Simptomi su vidljivi u smanjenju zaliha hrane i vode za piće, smanjenju površina plodnog tla i dr. Moderni cirkularni-regenerativni oblici potrošnje predstavljaju dobru alternativu koja nailazi na plodno tlo. Oblik cirkularnog gospodarstva je takav da otpad jedne industrije predstavlja sirovinu za drugu industriju. Na takav je način osiguran je gospodarski rast, racionalnije gospodarenje prirodnim resursima, te smanjenje količine proizvedenog otpada. Cirkularno gospodarstvo nudi veliku transformacijsku priliku za buduće generacije, odnosno stvaranje novih radnih mjesta i osiguravanje veće kvalitete života (čist i lijep okoliš). Prelazak na regenerativni model će potaknuti gospodarske aktivnosti na području proizvodnje, inovacija, prerade, obnova te omogućiti razvoj novih poslovnih modela koji iskorištavaju način na koji se tržište kreće.

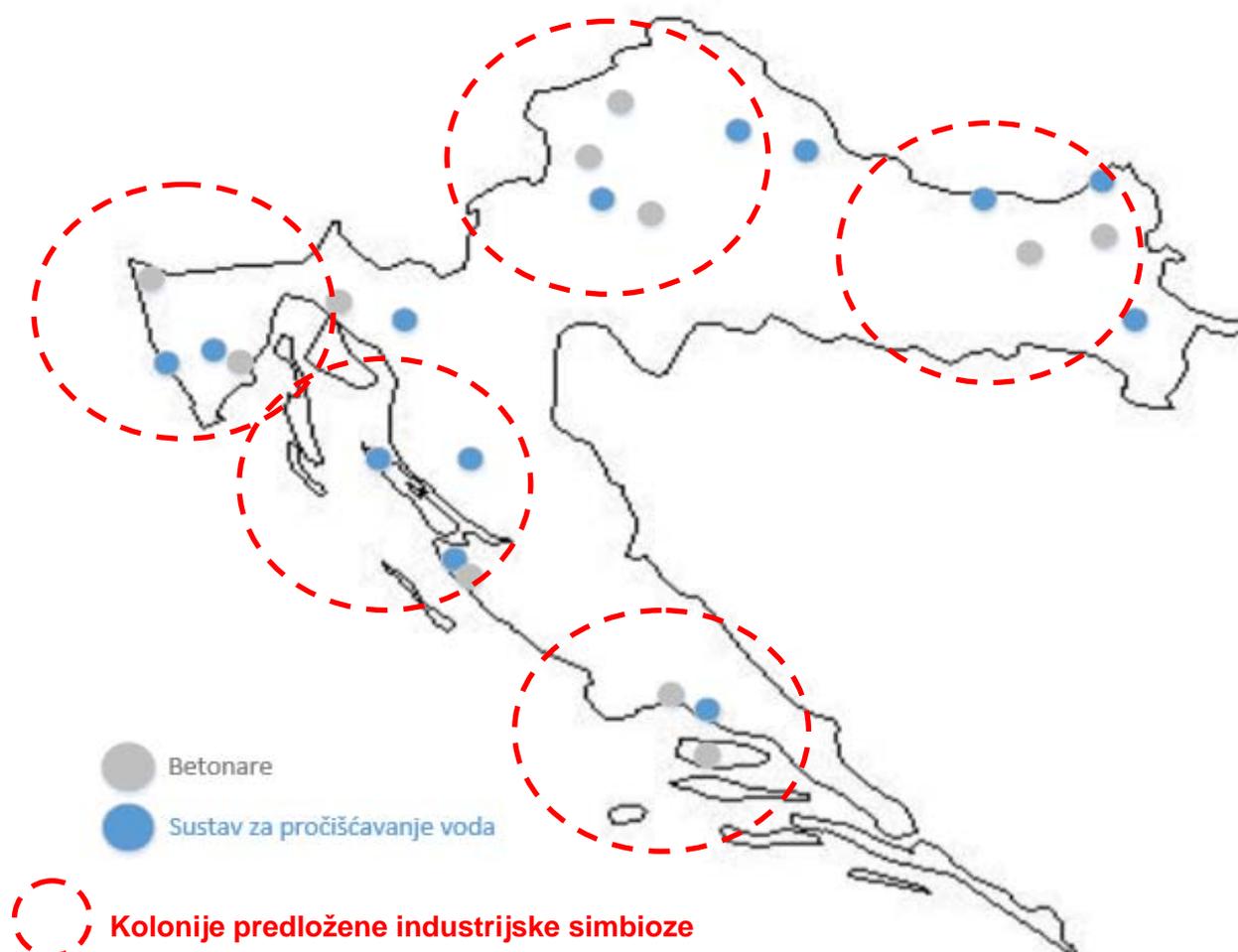
Ovim istraživanjem analizirana je u sklopu anketnog ispitivanja mogućnost povezivanja naizgled dvije različite industrije u tzv. industrijsku simbiozu. S jedne strane industrija betona koristi velike količine prirodnih resursa, dok s druge strane sustavi pročišćavanja otpadnih voda proizvode velike količine otpada kojeg je potrebno zbrinuti. Rezultati dosadašnjih istraživanja u sklopu projekta RESCUE, uključivo i rezultate anketnog ispitivanja, pokazuju da je primjena pepela dobivenog spaljivanjem mulja iz otpadnih voda u proizvodnji betona tehnološki moguća, s obzirom na to da korištenje značajne količine mulja ne kompromitira osnovna svojstva betona. Naprotiv, pažljivim kombiniranjem mineralnih dodataka moguće je dodatno aktivirati pepeo te potencijalno pripremiti betone tehnički kompetitivnih svojstava. Za pretpostaviti je da bi ovakva primjena mogla osigurati i određene ekonomske prednosti, posebno ako se uzme u obzir činjenica da će se za nepravilno gospodarenje otpadom ulaskom u Europsku Uniju plaćati određeni penali na državnoj razini. Dosada dobiveni rezultati anketnog ispitivanja od strane proizvođača betona i betonskih elemenata ukazuju na spremnost betonske industrije na prihvaćanje inovacija u proizvodnji uz korištenje otpadne tvari (pepela) kao zamjene za udio cementa ili agregata.

Povezivanje dvaju linearnih industrija, odnosno industrije pročišćavanja otpadnih voda i industrije cementa u jedinstvenu simbiozu predstavlja jedan od mogućih modela cirkularnog gospodarstva. Na Slika 18 može se vidjeti shematski primjer jednog takvog cirkularnog modela, koji kružno cirkulira od pročišćavanja otpadnih voda, spaljivanja mulja koji onda postaje sirovina za dobivanje inovativnih proizvoda u betonskoj industriji.



Slika 18 Cirkularna simbioza industrije betona i industrije pročišćavanja voda

Ekološki i ekonomski utjecaji betonske industrije na gospodarstvo su ogromni, a kako betonska industrija predstavlja najznačajniju granu građevinarstva u Hrvatskoj važno je naglasiti značaj njezinog uključivanja u cirkularnu formu gospodarstva. Na Slika 19 prikazan je jedan od mogućih scenarija stvaranja tzv. kolonija ekološke proizvodnje betonskih proizvoda u kojima bi kao dio veziva bio korišten pepeo dobiven spaljivanjem mulja iz otpadnih voda. Na Slika 19 su prikazani sustavi za pročišćavanje otpadnih voda, koji su se prije tretirali kao proizvođači otpada, a u predloženoj industrijskoj simbiozi se pretvaraju u proizvođače sirovina. Također su prikazane betonare s certificiranom proizvodnjom koje bi u kolonijama industrijske simbioze bili potrošači novoprodučenih sirovina, te bi od njih proizvodile ekološke i inovativne građevne proizvode. Ovakav potencijalni model omogućio bi strateško povezivanje tih dvaju industrija u jedinstvenu simbiozu.



Slika 19 Moguće strateško povezivanje industrije pročišćavanja voda (generiranja mulja) i betonske industrije na teritoriju Republike Hrvatske

LITERATURA

- Al-Sharif, M.M., Attom, M.F., 2013. A geoenvironmental application of burned wastewater sludge ash in soil stabilization. *Environ. Earth Sci.*, DOI 10.1007/s12665-013-2645-z.
- Bjegović, D.; Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Tiskara Zelina, 2015.
- Donatello, S., Cheeseman, C., Tyrer, M., Biggs, A., 2004. Sustainable construction products containing sewage sludge ash., Department of Civil and Environmental Engineering, South Kensington campus, Imperial College London, SW7 2AZ. *Akristos Ltd., Innovation Centre 1, Keele University Business Park, Keele, Staffordshire, ST5 5NB.
- Donatello, S., Cheeseman, C.R.: *Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA)*; Imperial College, London, 2013.
- Đureković, A.: *Cement, cementni kompozit i dodaci za beton*, IGH:Školska Knjiga, Zagreb, 1996.
- Ellen MacArthur Foundation; *Towards the circular economy*, 2013
- FHWA-RD-97-148, 2012. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction: Sewage Sludge Ash – Material Description
- Jamshidi, A., Mehrdadi, N., Jamshidi, M., 2011. Application of sewage dry sludge as fine aggregate in concrete. *J. Envir. Stud.* Vol. 37, No. 59.
- Yusuf, R.O., Moh'd Fadhil, M.D., Ahmad, H.A., 2012. Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – a review. *Int. J. Global Environmental Issues*, Vol. 12, Nos. 2/3/4. 214-228.
- Kocks Consult GmbH, 2010. Konceptualna studija zbrinjavanja otpadnog mulja - CUPOV Zagreb, Zagrebačke otpadne vode, Zagreb.
- Monteiro, P. J. M.: *Concrete - microstructure, Properties and Materials*, McGraw-Hill, 2006.
- Mousavi, M.: *Life Cycle Assessment of Portland Cement and Concrete Bridge*; Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013.
- Nowak, O.; Kuehn, V.; Zessner, M., (2003), *Sludge management of small water and wastewater treatment plants*, *Water Science and Technology*, Vol 48, 11-12, 33-41.
- Pan, S.C., Tseng, D.H., Lee, C.C., Lee, C., 2003. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Waste Manage.* 33, 1749-1754
- Tantawy, M.A., El-Roudi, A.M., Abdalla E.M., Abdelzaher, M.A., 2012. Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. *ISRN Chemical Engineering*, vol. 2012, Article ID 487037, 8 pages
- Ukrainczyk, V.: *Beton - struktura, svojstva, tehnologija*, Alcor, Zagreb, 1994.



- URL_1: Open House – Održiva gradnja, Dostupno:<[http://www.openhouse-fp7.eu/assets/files/,OPEN%20HOUSE-article for translation Bosnian.pdf](http://www.openhouse-fp7.eu/assets/files/,OPEN%20HOUSE-article%20for%20translation%20Bosnian.pdf).
- URL_2: Agregat, prvo predavanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Dostupno:<[http://www.grad.unizg.hr/download/repository/1. Predavanje Uvod%5B1%5D.pdf](http://www.grad.unizg.hr/download/repository/1.Predavanje_Uvod%5B1%5D.pdf).
- URL_3: Agregat, treće predavanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu;
Dostupno:<[http://www.grad.unizg.hr/download/repository/3. Predavanje Agregat.pdf](http://www.grad.unizg.hr/download/repository/3.Predavanje_Agregat.pdf)
- URL_4: Cemex, How We Extract Aggregates;
Dostupno:<<http://www.cemexusa.com/ProductsServices/AggregatesExtractionProcesses.aspx>.
- URL_5: Australian and New Zealand Biosolids Partnership; Dostupno:<<http://www.biosolids.com.au/what-are-biosolids.php>.
- URL_6: Andritz separation: *Drying technologies for sewage sludge*; Dostupno:<[http://www.centrivit.cz/download/andritz dryers en.pdf](http://www.centrivit.cz/download/andritz_dryers_en.pdf).

WYG International Ltd & WYG savjetovanje d.o.o. & WYG Ireland & FCG International Ltd, (2013),
Obrada i zbrinjavanje otpada i mulja generiranog pročišćavanjem otpadnih voda na javnim
sustavima odvodnje otpadnih voda gradova i općina u hrvatskim županijama, Tehničko-
ekonomska studija, Projekt zaštite voda od onečišćenja na priobalnom području 2.



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za hidrotehniku
Katedra za zdravstvenu hidrotehniku i okolišno inženjerstvo

