

Muljevi s komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

Dražen Vouk, Davor Malus, Stanislav Tedeschi

Ključne riječi

otpadne vode,
uređaj za pročišćavanje,
mulj,
karakteristike mulja,
odlaganje mulja,
obrada mulja,
upotreba mulja

Key words

waste water,
treatment plant,
sludge,
sludge properties,
sludge disposal,
sludge treatment,
sludge use

Mots clés

eau usée,
usine de traitement,
boues,
propriétés de boues,
décharge de boues,
traitement de boues,
utilisation de boues

Ключевые слова

сточные воды,
сооружение для
очистки, ил,
характеристики ила,
утилизация ила,
обработка ила,
использование ила

Schlüsselworte

Abwasser,
Reinigungsanlage,
Schlamm,
Schlammkennzeichen,
Schlammablagerung,
Schlammbearbeitung,
Schlammbenutzung

D. Vouk, D. Malus, S. Tedeschi

Pregledni rad

Muljevi s komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

Polazi se od konstatacije da konačna dispozicija mulja koji se kao proizvod stvara na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda predstavlja veliki problem i to ne samo u Hrvatskoj već i diljem svijeta. U ovome je radu prikazano porijeklo, karakteristike i mjerodavne količine mulja. Razmotrena je postojeća zakonska regulativa u Hrvatskoj o načinima konačnog odlaganja mulja, pri čemu su istaknute mogućnosti njegove upotrebe. Dodatno je opisan i način izbora postupka obrade mulja.

D. Vouk, D. Malus, S. Tedeschi

Subject review

Sludge generated at municipal waste water treatment plants

The paper starts with statement that the final disposal of sludge generated as product at municipal waste water treatment plants is a big problem, not only in Croatia, but all over the world. The origin, properties and relevant quantities of sludge are presented in the paper. Regulatory framework used in Croatia for final disposal of sludge is considered, and possibilities of its reuse are indicated. The selection of the sludge treatment procedure is also described.

D. Vouk, D. Malus, S. Tedeschi

Ouvrage de synthèse

Boues produites par les usines municipales de traitement des eaux usées

L'ouvrage commence par la constatation que l'enfouissement final des boues générées comme produit dans les usines municipales de traitement des eaux usées est un grand problème, non seulement en Croatie, mais partout dans le monde. Les origines, les propriétés et les quantités de référence de ces boues sont présentées dans l'ouvrage. Le cadre législatif utilisé en Croatie pour réguler la décharge finale des boues est considéré, et les possibilités de réutilisation de ces boues sont indiquées. La sélection de procédure pour traitement des boues est également décrite.

Д. Воук, Д. Малус, С. Тедешчи

Обзорная работа

Ил из коммунальных сооружений для очистки сточных вод

Исходится из утверждения, что конечная диспозиция ила, образующегося в сооружениях для очистки сточных вод в качестве продукта, представляет собой серьезную проблему не только в Хорватии, но и во многих странах мира. В данной работе приводятся происхождение, характеристики и релевантные количества ила. Рассмотрены существующие в Хорватии законодательные положения, регламентирующие способы конечной утилизации ила, а также указаны возможности его использования. Дополнительно описывается способ выбора процедуры обработки ила.

D. Vouk, D. Malus, S. Tedeschi

Übersichtsarbeit

Schlämme aus Kommunalanlagen für die Abwasserreinigung

Man geht von der Konstatierung aus dass die endgültige Disposition des Schlammes der in Abwasserreinigungsanlagen als Produkt entsteht ein grosses Problem darstellt, und zwar nicht nur in Kroatien sondern auch in der ganzen Welt. In diesem Artikel sind Ursprung, Kennzeichen und massgebende Mengen von Schlamm dargestellt. Betrachtet ist die bestehende gesetzliche Regulative über die Arten der endgültigen Disposition des Schlammes in Kroatien, wobei die Möglichkeiten dessen Benutzung hervorgehoben werden. Beiträglich ist auch die Auswahl des Verfahrens der Schlammbearbeitung beschrieben.

Autori: Dr. sc. **Dražen Vouk**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Davor Malus**, dipl. ing. građ.; prof. emer. dr. sc. **Stanislav Tedeschi**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

U postupcima pročišćavanja otpadnih voda kao nusprodukt pojavljuje se mulj. U prvom valu izgradnje uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) struka je bila koncentrirana na liniju vode, trudeći se dokazati kako će konačni efluent zadovoljavati propisane kriterije učinkovitosti pročišćavanja i neće ugroziti konačni prijamnik. Projektanti, lokalne vlasti, pa čak i izrađivači studija o utjecaju na okoliš, nisu znali gdje će se mulj konačno odložiti, koja obilježja bi trebao imati i koliko stoji njegovo konačno odlaganje. Bila je dovoljna konstatacija da će se odložiti na odgovarajuće mjesto od strane ovlaštene osobe, a može se u radu UPOV-a pokazati da će zadovoljiti i primjenu u poljoprivredi.

Izgradnjom gradskih i županijskih odlagališta komunalnog otpada pristup konačnom odlaganju mulja se promijenio. Ostaje pitanje koliki sadržaj suhe tvari (%) izraženo kroz ukupni organski ugljik (TOC) i sadržaj biorazgradive komponente, ima mulj da bi se prema [1] mogao odlagati.

Ovo prilično idilično stanje još uvijek traje iako je stručna javnost već dosta dugo upoznata s europskim smjericama za konačno odlaganje muljeva u kojima je klasično odlaganje na uređena odlagališta praktično nemoguće. Pravilnik [1] to isto potvrđuje uz odgodu primjene do kraja 2016. godine.

Približavanjem 2017. godini i naglim porastom dinamike izgradnje UPOV-a problem konačnog odlaganja mulja će rasti, inicirajući potrebu za ulaganjem golemih financijskih sredstava na tehnologije i građevine za tu namjenu.

Projekte novih UPOV-a trebat će dopuniti opsežnim analizama i istraživanjima koja će problem muljeva tretirati integralno na lokalnoj i regionalnoj razini uzimajući u obzir temeljna ishodišta kao što su: kakvoća mulja s gledišta mogućnosti ponovne primjene, energetska vrijednost, jedinična količina proizvedenog mulja, kemikalije u mulju, mogućnost centralizirane obrade, raspoloživost poljoprivrednih i ostalih površina za ponovnu upotrebu, sve uz zadovoljenje zakonskih odredaba.

Slika o učinkovitosti javnog sustava odvodnje i cijeni pročišćavanja jediničnog volumena otpadne vode, ne temelji se samo na troškovima nastalim unutar kruga UPOV-a, već na ukupnim troškovima koje znatno povećavaju troškovi konačnog odlaganja muljeva. Računa se da troškovi obrade i konačnog odlaganja mulja komunalnog UPOV-a veličine od 5.000 do 200.000 ES iznose približno 50 % ukupnih troškova poslovanja [2].

2 Podrijetlo, karakteristike i količine mulja

Temeljni je cilj čišćenja otpadnih voda iz njih ukloniti nepoželjne sastojke prije konačnog ispuštanja u okoliš. U tom postupku neminovno se stvara niz nusproizvoda

koji se moraju skupljati i obraditi prije no što se kontrolirano odlože.

U fazi prethodnog čišćenja na grubim i finim rešetkama skupljaju se različite vrste organskih i anorganskih krutina (ostaci hrane, plastika, staklo, metal, tekstil, papir), u pjeskolovima pijesak, šljunak i zemlja, a u mastolovima organska i mineralna ulja i masti [3].

UPOV-i koji imaju prethodno taloženje proizvode sirovi ili primarni mulj, a oni koji imaju biološki stupanj proizvodnje i biološke muljeve. Neki UPOV rabe kemikalije koje ubrzavaju ili poboljšavaju učinkovitost neke tehnološke operacije. Te se kemikalije dodaju u otpadnu vodu i muljeve i njihov najveći dio završava u muljevima povećavajući im ukupnu masu, volumen i kakvoću.

Potrebno je naglasiti da se danas često umjesto primarnog taloženja rabe mikrosita s otvorima manjim od 0,5 mm koja imaju istu ili sličnu učinkovitost. Logično je da prikupljeni materijal s takvih sita ima karakteristike primarnog mulja i tako bi se trebao tretirati.

Količina otpadne tvari iz prethodnog postupka pročišćavanja višestruko je manja od količina mulja, jednostavno se obrađuje i odlaže. Sve se krutine mogu odlagati na odlagalištima neopasnog otpada, a prikupljena ulja i masti se mogu reciklirati u rafinerijama, spaliti ili iskoristiti na samom uređaju ako uređaj ima anaerobnu stabilizaciju mulja.

Muljevi su po svojem sastavu i količini, obradi i konačnom odlaganju veliki tehnološki i ekonomski problem svakoga javnog sustava odvodnje.

Tablica 1. Jedinična proizvodnja mulja prema stupnju i načinu obrade otpadnih voda i mulja [4]

Stupanj i način čišćenja	Dnevna količina suhe tvari mulja (g ST/ES ₆₀)
Prethodno taloženje	40-60
Fizikalno-kemijski mulj	55-80
Pojačani fizikalno-kemijski mulj	60-70
Biološki mulj iz naknadnog taložnika – srednje opterećenje mulja	25-40
Biološki – iz naknadnog taložnika, nisko opterećenje mulja	15-25
Anaerobno stabilizirani mezofilni postupak	25-50
Aerobno stabilizirani termofilni postupak	50-60

Ovisno o načinu čišćenja otpadnih voda, količine mulja mogu se procijeniti prema tablici 1. Prema stupnju pro-

Tablica 2. Koncentracije suhe tvari u mulju u pojedinim tehnološkim fazama [5]

Tehnološka faza	Koncentracija suhe tvari (%)	
	Raspon vrijednosti	Karakteristična vrijednost
Prethodni taložnik		
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
Naknadni taložnik		
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 nosači	1-3	1,5
Anaerobna digestija		
Primarni mulj	2-5	4
Mješavina primarnog i aktivnog mulja	1,5-4	2,5
Primarni mulj i mulj iz prokapnika	2-4	3
Aerobna digestija		
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

čišćavanja, za prosječne komunalne otpadne vode, sadržaj suhe tvari u mulju u pojedinim tehnološkim fazama može se procijeniti prema tablici 2.

Temeljni su ciljevi obrade otpadnog mulja:

- smanjenje volumena u svakoj fazi obrade radi smanjenja troškova daljnje obrade te prijevoza obrađenog mulja do lokacije konačne dispozicije (odlaganja)
- nadziranje razgradnje otpadne tvari kako bi se pri konačnom odlaganju spriječili neželjeni utjecaji na okoliš.

Smanjenje volumena mulja i povećanja koncentracije suhe tvari u ovisnosti o postupku obrade mulja, mogu se vidjeti u tablici 3.

Nadziranje razgradnje organske tvari u mulju radi sprječavanja neželjenih utjecaja na okolinu postiže se stabilizacijom mulja.

Tablica 3. Smanjenje volumena mulja i povećanje koncentracije suhe tvari [4]

Parametar	Sirovi mulj	Zgusnuti mulj	Ocijedeći mulj	Sušeni mulj	Spaljeni mulj
Koncentracija suhe tvari (%)	1	5	25	90	100
Višekratnik smanjenja volumena	1	5	25	90	330
Smanjenje volumena (%)	0	80	96	98,89	99,7

Stabilizacija je postupak kojim se ometa, smanjuje ili sprječava mogućnost daljnje organske razgradnje (truljenja) mulja. Mogući su sljedeći postupci stabilizacije mulja:

- kemijski
- toplinski
- biološki.

Stabilizacijom mulja smanjuje se broj patogenih mikroorganizama i neugodan miris. Primjena postupka stabilizacije ovisi o mjestu i načinu konačne dispozicije mulja.

3 Zakonski propisi o mulju

Otpadne vode (sanitarne, industrijske, oborinske) sadrže različite vrste i količine otpadne tvari. Radi očuvanja okoliša u ekološkom, zdravstvenom i estetskom pogledu, otpadne tvari prije ispuštanja u okoliš moraju se obraditi, a ostatak koji se pojavljuje kao nusprodukt obrade odložiti na neškodljiv način. Kako bi se očuvao okoliš, doneseni su odgovarajući zakonski propisi kojih je

nužno pridržavati se prije donošenja odluke o načinu obrade i konačnog odlaganja mulja.

U Strategiji upravljanja vodama [6] navedeno je: "Posebna pažnja će se posvetiti zbrinjavanju mulja u multidisciplinarnom planiranju odlagališta mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda".

U Planu gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2007. do 2015. godine [7], u točki 5.4, Posebne kategorije otpada, navodi se: "Mulj nastao pročišćavanjem komunalnih otpadnih voda mogao bi se tretirati sastavnicom komunalnog otpada, no gospodarenje muljem je u nadležnosti pravnih osoba koje upravljaju uređajima za obradu otpadnih voda, a ne tijela nadležnih za gospodarenje otpadom".

U Zakonu o vodama [8], u dijelu koji se odnosi na mulj (čl. 69), navodi se: "Mulj nastao u postupku pročišćavanja otpadnih voda može se koristiti u skladu s posebnim propisima. Odlaganje mulja iz stavka 1 ovog članka u vode, zabranjeno je".

Odlaganje mulja na odlagališta nije dopušteno, što proizlazi iz Pravilnika o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada na odlagalištima otpada [1], a dodatno se navodi da je na odlagalištima otpada zabranjen prihvata, između ostalog, i: "*komunalnog otpada ukoliko mu masa biorazgradive komponente premašuje 35 % od ukupne mase*". Biološki stabilizirani mulj sadrži uvijek više od 35 % biorazgradive tvari. Također se navodi da je kao kriterij za odlaganje otpada na odlagališta neopasnog otpada, kao granična vrijednost za ukupni organski ugljik (TOC), određeno najviše 5 % od mase suhe tvari, a stabilizirani mulj ima više od 5 % TOC-a.

Jedna od mogućnosti konačne dispozicije mulja bila bi iskorištavana u poljoprivredi pa je Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva donijelo Pravilnik o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj rabi u poljoprivredi [9]. Pravilnikom su navedena ograničenja što se tiče uporabe mulja koja se odnose na sljedeće:

- sadržaj teških metala u mulju i poljoprivrednom tlu na kojem se rabi
- sadržaj organskih tvari u mulju
- sadržaj patogenih mikroorganizama
- vrste tla i namjenu
- količinu suhe tvari mulja koja se smije u jednoj godini aplicirati na poljoprivredno tlo.

Osim Pravilnika [9] u slučaju upotrebe mulja u poljoprivredi, moraju se uzeti u obzir i zahtjevi navedeni u Pravilniku o dobroj poljoprivrednoj praksi u korištenju gnojivom [10]. Naime, pod nazivom "gnojivo s dušikom" podrazumijeva se i kompost te otpadni mulj nastao u procesu pročišćavanja otpadnih voda kućanstava ili komunalnih izvora, uključivo i mulj iz septičkih jama. Cilj ovog Pravilnika [10] zaštititi područja podložna eutrofikaciji i područja „ranjiva“ na nitrate.

Za slučaj termičke oksidacije mulja nema posebnih propisa. Primjenjuju se propisi o spaljivanju krutog otpada, odnosno propisi doneseni na temelju Zakon o zaštiti zraka [11] i Uredbe o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku [12].

4 Mogućnosti konačnog odlaganja mulja

Prije konačnog odlaganja i/ili upotrebe mulja sirovi je mulj potrebno obraditi. Obrada mulja ovisi i o načinu uporabe. Mulj iz otpadnih voda nije potpuno bezvrijedan materijal, jer sadrži oko 70 % organske tvari čija se energijska vrijednost može iskoristiti. Ogrjevna moć suhe organske tvari ovisna je o vrsti mulja te je procijenjena kao srednja vrijednost od 25.000 KJ/kg kod neobra-

đenog mulja, a do 12.000 KJ/kg kod anaerobno stabiliziranog mulja [5].

Energijska vrijednost mulja može se iskoristiti tijekom obrade, primjerice pri proizvodnji bioplina kod anaerobne stabilizacije ili iskorištavanjem energijskog potencijala pri termičkoj stabilizaciji.

Mulj sadrži i određenu količinu hranjivih tvari koje se mogu iskoristiti (dušik, fosfor, kalij). Izbor načina i mjesta konačnog odlaganja je složen i ovisi o više činitelja:

- svojstvima otpadne vode
- stupnju i tehnologiji čišćenja otpadne vode
- svojstvima i količini proizvedenog mulja
- kapacitetu UPOV-a
- zakonskim propisima
- mjesnim prilikama
- troškovima izgradnje i održavanja.

Ne postoji jedinstven način konačnog odlaganja mulja, a u odnosu na navedene činitelje potrebno je za svaki uređaj odabrati način na koji će se mulj konačno odložiti.

Ako nisu stvoreni osnovni uvjeti za iskorištavanje mulja u poljoprivredi ili se mulj neće termički obraditi, može se, uz odgovarajuću obradu (solidifikacija), rabiti u građevinarstvu ili odlagati na odlagališta komunalnog otpada.

Općenito obrađeni mulj s uređaja za čišćenje komunalnih otpadnih voda može se upotrijebiti:

- u poljoprivredi, odnosno za slične namjene kao što su cvjećarstvo, šumarstvo, pašnjaci, sanacija oštećenih dijelova zemljišta (skijališta i sl.)
- proizvodima termičke oksidacije i solidifikacije, primjerice u građevinarstvu (pepeo)
- odlaganjem na posebno uređenim odlagalištima samo za mulj, lagunama i sl. (ova mogućnost postoji samo do kraja 2016. godine).

4.1 Iskorištavanja mulja u poljoprivredi

Mulj je u prvom redu poboljšivač tla, a sadržaj mikrohranjiva i makrohranjiva nije usporediv s klasičnim gnojivima. Upotreba mulja u poljoprivredi, šumarstvu, cvjećarstvu i sl. temelji se na sadržaju hranjivih tvari u mulju. Razgradnjom organske tvari u mulju do anorganske, one se ugrađuju u glinaste i humusne čestice i postaju dostupne biljkama za rast. Organska tvar u mulju poboljšava strukturu tla te omogućava prozračivanje tla. Istodobno omogućava bolje zadržavanje vlage u tlu. Za prihranjivanje biljaka bitna su tri elementa – dušik, fosfor i kalij. Međutim, mulj sadrži i druge tvari potrebne za rast biljaka kao što su mikrohranjiva – željezo, mangan, cink, bakar, bor, molibden. Općenito mulj sadrži vrijednosti hranjivih tvari navedene u tablici 4.

Tablica 4. Sadržaj hranjivih tvari u mulju [4]

Element	U % od suhe tvari
Dušik	3-7
Fosfor	2-7
Kalij	<1,5

Prema nekim se istraživanjima [5], mogu usporediti hranidbene vrijednosti mineralnih gnojiva uobičajenih u poljoprivredi i mulja (izdvojene u tablici 5.).

Tablica 5. Usporedba hranjivih tvari u mineralnim gnojivima i mulju u postocima

Proizvod	Dušik	Fosfor	Kalij
Mineralno gnojivo	5	10	10
Stabilizirani mulj (suhe tvari)	3,3	2,3	0,3

U slučaju kada kakvoća mulja zadovoljava propise o primjeni mulja u poljoprivredi, tada se mulj može rabiti nakon stabilizacije u tekućem ili krutom obliku. Klasifikacija muljeva u odnosu na sadržaj suhe tvari prikazana je u tablici 6.

Tablica 6. Tipovi mulja prema sadržaju vlage [4]

Pokazatelj	Tipovi mulja			
	tekući	zgnusnuti	kruti	sušeni
Suhe tvari	1-10%	10-30%	30-90%	>90%
Način obrade	nije odvođen	odvođen strojno	odvođen i miješan s vapnom ili kompostiran	termički sušen

Mulj se u poljoprivredi ne upotrebljava kontinuirano, ali s obzirom da se proizvodi cijele godine potrebno ga je skladištiti. Mogućnost skladištenja, troškovi prijevoza do poljoprivrednog zemljišta i način razastiranja po površini ovise o tipu mulja; troškovi prijevoza su niži kod manjeg sadržaja vode u mulju, a za ostale se uvjete može načiniti odgovarajuća usporedba kod koje oznaka "+" označuje prednost (tablica 7.).

Tablica 7. Kvalitativna usporedba odlaganja mulja u poljoprivredi prema tipovima mulja [4]

Tip mulja	Skladištenje	Razastiranje	Pogodnost za poljoprivredu
Tekući	- - -	+	+
Zgnusnuti	- -	-	+
Kruti			
- miješan s vapnom	+	++	++
- kompost	++	++	+++
Sušeni	++	++	++

Osim ograničenja što se tiče sastojaka štetnih i opasnih tvari u mulju postoje i druga ograničenja. Ograničenja koja je propisala Američka agencija za zaštitu okoliša prikazana su u tablici 8.

Tablica 8. Mjerila za primjenu mulja kao poboljšivača tla [5]

Pokazatelj	Neprihvatljivo	Povoljno
Nagib tla	> 12%	< 3%
Propusnost tla	> 1×10^5 cm/s	$\leq 10^{-7}$ cm/s
Debljina tla	< 0,6 m	> 3 m
Udaljenost od površinskih voda	< 90 m	> 300 m
Dubina do podzemne vode	< 3 m	> 15 m
Udaljenost od zdenca vodoopskrbe	do 300 m	veća od 60 dana

Konačno, potrebno je istaknuti da mulj kao poboljšivač tla mora biti siguran i u zdravstvenom pogledu, posebice glede mikroorganizama.

Mulj se u poljoprivredi može rabiti kao kompost. Kompost je proizvod sličan humusu. Nastaje u postupku daljnje razgradnje organske tvari (aerobno i/ili anaerobno). Muljevi gradskih otpadnih voda sadrže znatne količine dušikovih spojeva pa se radi poboljšanja odnosa ugljika i dušika, pri kompostiranju dodaje suho lišće ili drveni otpaci i piljevina, a može i kruti gradski otpad.

4.2 Uporaba proizvoda termičke oksidacije

Kada se mulj ne može rabiti kao poboljšivač tla u poljoprivredi, šumarstvu, cvjećarstvu i za slične namjene, moguće rješenje je primjena jednog od postupaka termičke oksidacije, kako bi se količina mulja bitno smanjila te u cijelosti organska tvar razgradila do anorganske.

Polazeći od činjenice da organska tvar u mulju ima odgovarajući energijski potencijal, a u skladu s Pravilnikom o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada [1], poželjno je mulj iskoristiti u energijske svrhe.

Iskorištavanje mulja kao energenta, u postupku anaerobne stabilizacije, primjenjuje se bez obzira na naknadnu termičku oksidaciju. Razgradnjom organske tvari u anaerobnoj se stabilizaciji dobiva plin, sa znatnim udjelom metana. Uporaba dobivenog bioplina kao energenta ostvarena je prvi put 1895. godine u Engleskoj [13].

Količina bioplina u mezofilnom anaerobnom postupku ovisi o sastavu mulja, odnosno podrijetlu, a za komunalne se otpadne vode može računati s vrijednostima prikazanim u tablici 9.

Donja ogrjevna moć bioplina, uz pretpostavku da je količina metana 65 %, bit će 22.400 KJ/m³. Prirodni plin, koji sadrži metan, butan i propan, ima donju ogrjevnu moć 37.300 KJ/m³.

Pretvorbom u električnu energiju, pomoću motora s unutarnjim izgaranjem, stupanj iskorištavanja energije je do 30 %. Toplinska energija od hlađenja motora i ispušnih cijevi može se iskoristiti do vrijednosti 45 % energije plina.

Tablica 9. Proizvodnja bioplina kod anaerobne digestije (mezofilne) [4]

Pokazatelj	Mulj iz prethodnog taložnika	Mulj iz naknadnog taložnika
Razgradnja organske tvari (O.T. u %)	50-55	45-50
Količina bioplina Nm ³ / kg razgrađene O. T.	0,85-1,2	0,75-1,0

Mulj nakon anaerobne stabilizacije sadrži još uvijek oko 50 % organske tvari pa ga nije moguće odložiti na komunalno odlagalište s ostalim komunalnim krutim otpadom. Ostatak mulja može se dalje spaljivati u posebnim pećima ili zajedno s ostalim komunalnim otpadom. Spaljivanje je postupak kojim se osim potpunog isparavanja vode obavlja i oksidacija (izgaranje) svih organskih tvari. Konačni je proizvod pepeo odnosno anorganska tvar.

Termička oksidacija može se obavljati na više načina i to:

- spaljivanjem mulja u posebnim pećima
- spaljivanjem mulja zajedno s ostalim krutim otpadom
- oksidacijom u struji vlažnog zraka.

Spaljivanjem se razvijaju visoke temperature (i više od 800 °C kako bi se odstranili neugodni mirisi) pa se toplinska energija može iskoristiti za proizvodnju tople vode, pare ili pretvorbu u električnu energiju.

Pri postupku spaljivanja nastaju sljedeći ostaci:

- lebdeći pepeo
- pepeo
- zgura (drozga).

Čestice lebdećeg pepela općenito su veličine manje od 100 μm. Kemijski je sastav lebdećeg pepela reda veličine prikazanog u tablici 10. Na temelju dosadašnjih spoznaja lebdeći pepeo mogao bi se rabiti u cestogradnji i pri proizvodnji betona. Ispitivanja sadržaja teških metala pokazala su lebdeći pepeo ima sastav kao što je prikazano u tablici 11.

Uza stalnu kontrolu pepela i tla na koji se pepeo odlaže, dosadašnja su ispitivanja [4] pokazala da bi se lebdeći

pepeo mogao iskoristiti u poljoprivredi i sličnim namjenama u količinama 10-15 tona po hektaru zemljišta (gođišnje).

Tablica 10. Prosječni kemijski sastav lebdećeg pepela [4]

Pokazatelj	Lebdeći pepeo	
	od spaljivanja samo mulja	od spaljivanja krutog otpada
SiO ₂ , %	35-45	20-32
Al ₂ O ₃ , %	8-18	15-17
CaO, %	15-20	12,5-38
P ₂ O ₅ , %	10-20	2-14
Kloridi, %	0,004-0,005	4,5
SO ₃ , %	0,7-2,8	5-6,5

Tablica 11. Koncentracije teških metala u lebdećem pepelu [4]

Teški metal	Koncentracije u mg/kg suhe tvari	Dopuštene koncentracije u mg/kg suhe tvari *
Cd	5-17	5
Cr	10-600	500
Cu	300-1000	600
Hg	0,07-1,5	5
Pb	10-500	500
Ni	40-150	80
Zn	1000-4000	2000

*Odnosi se na dopušteni sadržaj teških metala u obrađenom mulju koji se rabi u poljoprivredi [9]

U slučaju da lebdeći pepeo sadrži veće koncentracije teških metala, potrebno je pepeo obraditi prije odlaganja na odlagališta. Primjenjuje se postupak solidifikacije, odnosno miješanje s cementom i vodom kako bi se postigli dovoljno čvrsti blokovi koji će osigurati i kemijsku stabilnost.

Zgura od zajedničkog spaljivanja s krutim se otpadom može također iskoristiti u cestogradnji.

4.3 Odlaganje na zemljištu

Ovisno o namjeni zemljišta, topografskim prilikama, geološkim okolnostima i drugim činiteljima, u pojedinim slučajevima mulj se iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda neće moći iskoristiti za poljoprivredu i slične namjene. Također se može pretpostaviti da neće postojati ni ekonomski uvjeti za termičku oksidaciju mulja.

Kao moguće rješenje kod malih se UPOV-a može obrada i konačno odlaganje mulja provesti na susjednom velikom UPOV-u. Mulj se može prevoziti ili tlačiti cjevovodom.

Kao daljnja mogućnost konačnog odlaganja mulja, kod malih UPOV-a, jest odlaganje stabiliziranog mulja u lagunama. Lagune mogu biti zemljani jarci dubine 3-5 m i širine do 2,0 m. Ovisno o propusnosti tla i najvišim se-

zonskim razinama podzemne vode, potrebno je izraditi slojeve nepropusnosti bočnih stranica i dna kao kod odlagališta otpada. Zbog mogućnosti pojave mirisa te razvoja insekata, lagune moraju biti udaljene od naseljenih mjesta i javnih prometnica. Ovo rješenje nije popularno i uglavnom se izbjegava.

U novije se vrijeme primjenjuje i metoda "ozemljavanja" mulja, postupak pri kojem se mulj u izgrađenim močvarama stabilizira, oslobađa viška vode te postupno s ostacima trstike pretvara u zemljani materijal. Suhi mulj kod kojeg se smanjuje volumen za više od 50 % može se vaditi iz izgrađene močvare te iskoristiti u poljoprivredi, šumarstvu, kao i općenito kod zelenih površina kao poboljšivač tla [14].

5 Izbor postupka obrade mulja

U ovisnosti o načinu konačnog zbrinjavanja mulja odredit će se i postupak prethodne obrade. Mogućnost uporabe u poljoprivredi zakonom je propisana, a u prvom redu ovisi o podrijetlu otpadne vode, udaljenosti poljoprivrednog zemljišta od UPOV-a te kao ne manje bitnom činitelju, spremnosti poljoprivrednika, odnosno vlasnika zemljišta da prihvati mulj. U Austriji je na primjer, upotreba mulja u poljoprivredi različita u pojedinim pokrajinama. Općenito, u poljoprivredi je 2007. godine iskorišteno 15 % od ukupne količine mulja [15]. Prema istom autoru, 40 % ukupne količine mulja u Austriji iskorišteno je kao kompost od mulja za poboljšanje dijelova zemljišta, posebice u planinama, a ostalo je spaljeno u tvornicama cementa ili na privremenim odlagalištima za kasniju uporabu.

U Kaliforniji (SAD) se godišnje proizvede 680.000 tona suhe tvari mulja. Od toga se u poljoprivredi koristi 70 %, 12 % za dnevni pokrov odlagališta otpada, 6 % se odlaze na odlagališta za mulj, 5 % se spaljuje, a ostatak se privremeno skladišti na UPOV-e i odlaze na teren [16].

U Njemačkoj godišnje se proizvede 2.000.000 tona suhe tvari mulja. Od toga se 52,5 % obrađuje termički, 30 % se iskoristi u poljoprivredi, a ostatak se rabi u građevinskoj i drugoj industriji, dok odlaganja mulja na odlagališta komunalnog otpada nema [17].

U Nizozemskoj se godišnje proizvede 350.000 tona suhe tvari mulja. Gotovo se cjelokupna prethodno navedena količina obrađuje termički [18].

Za slučaj da se mulj rabi u poljoprivredi, kao poboljšivač tla i slično, na UPOV-ima je potrebno predvidjeti sljedeće postupke obrade:

- zgušnjavanje
- stabilizaciju
- odvodnjavanje.

Kod srednjih i većih uređaja preporučuje se primijeniti anaerobnu stabilizaciju. Naime, to je jedini biološki postupak kojim se može iskoristiti energijska razina mulja. Bioplin, koji je proizvod anaerobne stabilizacije, u slučaju da sadrži oko 2/3 metana i 1/3 ugljikova dioksida ima donju ogrjevnu moć od 6,63 kWh/m³ plina. Kako bi se povećala proizvodnja plina u anaerobnoj digestiji, posljednjih se godina osim mezofilnih postupaka (30-38 °C) primjenjuju termofilni postupci (50-57 °C) ili termalna hidroliza (150-180 °C uz 5-10 bara tlaka) kao obrada prije stabilizacija. Postignuta su povećanja proizvodnje metana i do 30 % [19].

Odvodnjavanjem (dehidracijom) na trakastim cjediljkama i/ili centrifugama postiže se koncentracija suhe tvari u mulju oko 20-30 %, odnosno tip zgusnutog mulja. Da bi se postigao tip krutog mulja, zbog smanjenja sadržaja vode (te manjih prijevoznih troškova) trebalo bi primijeniti ili tlačnu cjediljku (40-50 % suhe tvari) ili, što je češće, strojno dodavati vapno dehidriranom mulju. Kompost od mulja, kojem se dodaju komadići drveta i/ili piljevina, zbog poboljšanja odnosa ugljika i dušika sadrži 40-50 % suhe tvari. Sušeni se mulj koji sadrži oko 90 % suhe tvari može je proizvesti u posebnim pećima na temperaturi 200 do 400 °C. Zbog potrošnje energije u količini od 4,0 do 5,0 MJ/kg isparene vode ovaj se postupak rijetko primjenjuje.

Posljednjih se godina razvija postupak sušenja mulja (do 90 % suhe tvari) primjenom sunčeve energije pod nazivom solarna dehidracija.

Na području Hrvatske može se računati sa sunčevom energijom od 1.000 do 1.700 kWh po m² (godišnje) vodoravne površine što odgovara toplinskoj energiji od 100 do 110 litara loživog ulja po m² godišnje. U klimatskim uvjetima karakterističnim za veći dio područja Hrvatske, sunčeva energija omogućava isparavanje oko 800 kg vode po m² godišnje.

Kao primjer izgradnje jednog od najvećeg uređaja za solarno sušenje mulja navodi se uređaj Manague (Nikaragva), za 1,8 milijuna stanovnika [20].

U tijeku su razvoj i primjena jednog postupka obrade mulja te pretvorba u poboljšivač tla koji ne sadrži štetne tvari nazvan *Ecocycling*. Postupkom je predviđeno usitnjavanje mulja i miješanje s dodacima kao primjerice gline, vapna te određene kemikalije (u ovisnosti o sastavu mulja). Postupak se odvija bez zagrijavanja, bez dodatne vode te nema neugodnih mirisa. Ovaj bi postupak mogao biti zanimljiv uz uvjet da postoji dovoljno zemljišta na kojem bi se proizvod primjenjivao.

U slučaju kada iz bilo kojih razloga ne postoji mogućnost uporabe mulja u poljoprivredne i slične namjene, kod većih se uređaja (i/ili skupine srednjih i manjih ure-

đaja), prije konačnog zbrinjavanja, predlaže termička oksidacija mulja. Podrazumijeva se da će se kod termičke oksidacije iskoristiti energijska razina mulja.

Samospaljivanje mulja ovisi o sadržaju vode u mulju i o sadržaju organskih tvari. Što je manji postotak organske tvari u mulju, potreban je veći postotak suhe tvari. Biološki stabiliziran mulj sa sadržajem organske tvari oko 50 % potrebno je odvodnjavati do sadržaja suhe tvari 35-46,5 %, ovisno o tipu peći za spaljivanje [4].

Primjenom zajedničkog spaljivanja mulja i komunalnog krutog otpada omogućava se sušenje mulja do razine samospaljivosti pa se time izbjegava potreba za dodavanjem drugog energenta.

Iz navedenog slijedi da pri spaljivanju samog mulja trebalo predvidjeti sljedeće postupke:

- zgušnjavanje
- odvodnjavanje (dehidracija).

Kod sirovoga miješanog mulja iz prethodnog i naknadnog taložnika, koji sadrži oko 72 % organske tvari, samozapaljivanje se postiže kod 25,5 do 35 % suhe tvari mulja [4] pa je potrebno manje energije za odvodnjavanje. U slučaju kad se mulj spaljuje zajedno s ostalim krutim otpadom, mogu se preporučiti sljedeći postupci:

- zgušnjavanje
- anaerobna stabilizacija s iskorištenjem energije
- odvodnjavanje.

Naime, još uvijek se smatra da je iskorištavanje bioplina iz mulja jedan od najpovoljnijih načina iskorištavanja energetske razine mulja.

Potrebno je napomenuti da pri spaljivanju mulja postoji opasnost od onečišćenja zraka pa treba predvidjeti pročišćavanje plinova pri izgaranju. Na temperaturi od 800 °C odstranjuju se neugodni mirisi, ali još uvijek je potrebno dim iz peći pročitati s obzirom na sadržaj prašine (lebdećeg pepela) te dušikovih oksida, teških metala, ukupnih ugljikovodika i otrovnih organskih spojeva.

Jedan je od postupaka toplinske obrade mulja i piroliza, postupak razgradnje organske tvari pri visokoj temperaturi u atmosferi bez kisika. Konačni proizvodi su plinovi (metan, vodik, ugljikov monoksid), ulja, katran i poug-

ljenjena kruta tvar te pepeo. Plinovi iz pirolize mogu se upotrebljavati za proizvodnju pare te pretvorbu u električnu energiju. Postupak je još uvijek u razvoju te do sada nema značajnijih primjena u obradi mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda.

6 Zaključak

Dosadašnja iskustva pokazuju da povećanjem broja izgrađenih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, problem konačne dispozicije mulja postaje sve veći. Stoga je izboru najpovoljnijega rješenja obrade mulja i njegove konačne dispozicije potrebno pridati veću važnosti to već u prvim fazama definiranja konceptijskog rješenja uređaja za pročišćavanje. Kao prilog navedenoj konstataciji može se uzeti u obzir i činjenica da troškovi obrade i konačnog odlaganja mulja iznose i do 50 % ukupnih troškova poslovanja cjelokupnog uređaja, uključivo troškove kapitalnih ulaganja, pogona i održavanja te konačnog odlaganja.

Postojeće se uređaje za pročišćavanje također preporučuje dodatno ispitati u smislu mogućnosti eventualnih poboljšanja tehnoloških procesa obrade mulja, a sve s ciljem što manje proizvodnje stabiliziranog mulja kako bi se troškovi njegova odlaganja dodatno smanjili.

Značajan faktor pri definiranju najpovoljnijega postupka obrade mulja i konačnog odlaganja može biti mogućnost njegova ponovnog iskorištavanja, što u skladu s načelima održivog razvitka u današnje vrijeme sve više dobiva na važnosti.

Činjenica jest da na području iskorištavanja mulja u poljoprivredi i kompostiranju u Hrvatskoj, osim donošenja Pravilnika o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj rabi u poljoprivredi (NN 38/08), nije napravljeno gotovo ništa, osobito u dijelu strateškog pristupa problemu osiguranja potrebnih površina, odnosno pristanka krajnjih korisnika. Od početka 2017. godine muljevi se više neće smjeti odlagati na odlagališta, što znači da se za sve nove projekte UPOV-a treba osigurati drukčiji način konačnog odlaganja. Za uređaje većeg kapaciteta (>100.000 ES) ili grupe manjih uređaja unutar užega regionalnog područja, termička se obrada može ocijeniti prihvatljivim rješenjem s ekonomskog i tehničko-tehnološkog gledišta.

LITERATURA

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 117/07)</p> <p>[2] Nowak, O.; Kuehn, V.; Zessner, M.: <i>Sludge management of small water and wastewater treatment plants</i>, Water Science and Technology, Vol 48, 11-12, (2003), 33-41.</p> <p>[3] Pravilnik o gospodarenju otpadnim uljima, (NN 124/06)</p> | <p>[4] OTV: <i>Traiter et Valoriser les Boues</i>. Liguge (France): Aubin Imprimeurs, (1997), 457.</p> <p>[5] Metcalf and Eddy Inc: <i>Wastewater Engineering Treatment and Reuse</i>, Mc Graw Hill, New York, (2003), 1819.</p> <p>[6] Strategija upravljanja vodama, (NN 91/08)</p> |
|---|---|

- [7] Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007.-2015. godine (NN 85/07)
- [8] Zakon o vodama, (NN 153/09)
- [9] Pravilnik o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj koristi u poljoprivredi (NN 38/08)
- [10] Pravilnik o dobroj poljoprivrednoj praksi u korištenju gnojiva, (NN 56/08)
- [11] Zakon o zaštiti zraka, (NN 178/04, 60/08)
- [12] Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku, (NN 133/05)
- [13] Tedeschi, Stanislav: Zaštita voda. Zagreb: Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, (1997), 297.
- [14] Bulc, T.: *Ispitivanje učinkovitosti ozemljavanja mulja na uređaju Krasinec – Slovenija, Ljubljana, Limnos*, (1998).
- [15] Müller, Horst: *Wastewater sludge management under Austria's federal framework*, IWA: Water 21, (2009), 32-33.
- [16] State of California, Department of Resources Recycling and Recovery CALRecycle, *Organic Materials Management*, www.calrecycle.ca.gov
- [17] Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung Nr. 490/2010, Njemačka.
- [18] Europaeische Wirtschaftsdienst GmbH, Report Klaerschlamm, 2010, pp. 7-8.
- [19] Novak, T., John: *The advantages of the thermal hydrolysis in sludge treatment*, IWA: Water 21, (2009), 26.
- [20] Stedman, Lis: Solar sludge – drying facilities for Nicaragua's show case wastewater plant. IWA: Water 21, (2010), 34-35.