

OBRADA AKTIVNOG MULJA S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE KOMUNALNIH OTPADNIH VODA PROCESOM KOMPOSTIRANJA

doc. dr. sc. Dajana Kučić Grgić

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva
i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska
dkucic@fkit.hr

Luka Bera

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva
i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

Martina Miloloža

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva
i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

dr. sc. Matija Cvetnić

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva
i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

dr. sc. Tatjana Ignjatić Zokić,

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva
i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

Branko Miletić

Vododer d.o.o.,
Kačićeva 21, Zagreb, Hrvatska

Tomislav Leko

Komunalno d.o.o.,
Težačka 8, Vrgorac, Zagreb

doc. dr. sc. Vesna Očelić Bulatović

Sveučilište u Zagrebu,
Metalurški fakultet,
Aleja narodnih heroja 3,
Sisak, Hrvatska

U današnje vrijeme porastom broja stanovnika te razvojem industrije globalno raste količina nastalih otpadnih voda koje je potrebno obraditi. U postupku biološke obrade otpadnih voda generira se aktivni mulj kojeg je potrebno zbrinuti na odgovarajući način.

U ovom je radu ispitana učinkovitost obrade mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) grada Vrgorca procesom kompostiranja, odnosno odredio se optimalan omjer mulja (M) i supstrata (S) na temelju maksimalne konverzije, trajanja termofilne faze i temperature. U tu su svrhu ispitani različiti omjeri mješavine S i M (SP – samo biootpad, P1 – S/M = 2,5:1 ; P2 – S/M = 5:1 ; P3 – S/M = 7:1) u reaktorima radnog volumena, $V_r = 1$ L. U pokusima SP, P1, P2 i P3 postignuta je konverzija od 43 %, 64 %, 56 % te 53 %, maksimalna temperatura iznosila je 57,1 °C, 58,3 °C, 61,4 °C, odnosno 62,8 °C, a termofilna faza trajala je 3, 13, 7 i 5 dana. Najučinkovitiji pokus (P1) prenesen je u veće mjerilo, u reaktor radnog volumena $V_r = 10$ L, gdje se proveo pokus P4. U pokusu P4 postignuta je konverzija od 56 % s maksimalnom temperaturom od 57,48 °C i trajanjem termofilne faze od 4 dana.

Ključne riječi: aktivni mulj, biorazgradnja, kompostiranje, kompost, adijabatski reaktor

1. UVOD

Okoliš, prirodno i svako drugo okruženje zajednica organizama koje omogućuje njihovo postojanje i njihov razvoj treba čuvati. Neodgovoran i nepravilan odnos prema prirodi dovodi do onečišćenja tla, podzemnih i površinskih voda, mora i zraka (Feinstein i dr. 1983.). Kako bi se osigurala što bolja kvaliteta života i smanjio negativan utjecaj na okoliš potrebno je otpadom gospodariti na odgovarajući način. Otpadne vode su sve potencijalno onečišćene vode. Komunalne otpadne vode nastaju kao produkt raznih kućanskih aktivnosti, na sanitarnim čvorovima stambenih, javnih i industrijskih objekata te prilikom uzgoja domaćih životinja na farmama (Briški 2016.). Komunalne otpadne vode se bez prethodne obrade ne smiju ispustiti u prirodni recipijent, a najčešće se primjenjuje biološka obrada aktivnim muljem. Takva obrada započinje prethodnim stupnjem obrade, odnosno komunalna otpadna voda prolazi kroz rešetke različitih veličina gdje se uklanjaju krupne čvrste otpadne tvari. Nakon uklanjanja pijeska i masti, u prethodnom se taložniku talože suspendirane tvari, a izbistreni tok ulazi u aerirani bioreaktor gdje miješana kultura mikroorganizama (aktivni mulj) razgrađuje otopljene organske tvari. Aktivni mulj je aerobni suspendirani sustav koji nastaje povezivanjem bakterija, gljiva, protozoa i metazoa sa suspendiranim česticama u veće ili manje nakupine nazvane flokule ili pahuljice (Bian i dr. 2017., Vuković i dr. 2012., Wang 2012.). Bakterije su najvažnija skupina mikroorganizama u aktivnom mulju i to heterotrofne bakterije iz rodova *Pseudomonas* (*Pseudomonas alcaligenes*, *Pseudomonas aeromonas*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*) i *Flavobacterium* (*Cytophaga*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Coryneform*) koje kao izvor ugljika koriste organsku tvar (Bian 2017. i (Haug 1993.). Nakon bioreaktora izlazni tok odvodi se u sekundarni taložnik u kojem se aktivni mulj taloži na dno, a pročišćena i izbistrena voda se ispušta u prijamnik. Nakon sekundarnog taložnika, a prije ispusta u prijamnik, pročišćena voda se može dodatno dezinficirati. Dio aktivnog mulja iz sekundarnog taložnika se vraća natrag u aerirani bioreaktor, dok se ostatak aktivnog mulja obrađuje fizikalno-kemijskim, biološkim ili termičkim procesima zajedno s muljem izdvojenim u primarnom taložniku. (Briški 2016., Pravilnik o gospodarenju mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj koristi u poljoprivredne svrhe, NN 38/2008, Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja, NN 71/2019). Mulj iz otpadnih voda nije bezvrijedan materijal, sadrži oko 70 % organske tvari čija se energijska vrijednost može iskoristiti, kao i nutrijenti poput dušika, fosfora i kalija. Prema EU direktivi za mulj 86/278/EEC, EU direktivi za otpadne vode 91/271/EEC i hrvatskim nacionalnim zakonima, mulj se mora obraditi prije upotrebe u poljoprivredi. U poljoprivredi kao poboljšivač tla se smije koristiti samo obrađeni mulj u kojem su uništeni patogeni mikroorganizmi, a prema Pravilniku obrađeni mulj označava mulj koji je podvrgnut

biološkoj, kemijskoj ili toplinskoj obradi, dugotrajnom skladištenju (najmanje šest mjeseci) ili nekom drugom postupku kojim je znatno smanjena razgradnja i opasnost po zdravlje. Obradeni se mulj prema EU direktivi za mulj 86/278/EEC ne smije upotrebljavati na: (a) travnjacima i pašnjacima koji se koriste za ispašu stoke ili površinama na kojima se uzgaja krmno bilje ako će se krmno bilje brati prije isteka određenog vremenskog razdoblja, (b) tlu na kojem rastu nasadi voća i povrća, uz iznimku voćaka i (c) tlu namijenjenom uzgoju voća i povrća koje je obično u izravnom dodiru s tlom i koje se obično jede sirovo, u razdoblju od 10 mjeseci prije i za vrijeme berbe ili žetve. Pri upotrebi obrađenog mulja moraju se uzeti u obzir potrebe biljaka za prehranjivanjem, međutim, mora se paziti da se ne nanosi šteta kvaliteti tla kao ni kvaliteti površinskih i podzemnih voda.

U novije vrijeme sve veća pozornost je dana zbrinjavanju mulja procesom kompostiranja (Wang, Chen, Zheng 2019., Wang 2019.), gdje se kao produkt dobije kompost klase III koji je prema Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada namijenjen korištenju na tlu koje se ne koristi za proizvodnju hrane, kao što je šumsko zemljište, odnosno zemljište za parkove. Koristi se i za potrebe uređenja, odnosno rekultivacije zemljišta, kao i za izradu završnog rekultivacijskog sloja odlagališta. Kompostiranje je proces razgradnje / pretvorbe nestabilne organske tvari pomoću mikroorganizama u stabilan produkt – kompost uz oslobađanje topline, CO₂, NH₃ i vode (Haug 1993., Kučić 2014.). Proces kompostiranja mulja s uređaja za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda uglavnom se provodi uz prisustvo kisika, odnosno u aerobnim uvjetima u otvorenom ili zatvorenom (reaktorskom sustavu). Na proces kompostiranja utječu brojni čimbenici poput vlage, omjera C/N, pH – vrijednosti, veličine čestica, protoka zraka i dr. te se u većini slučajeva provodi kokompostiranje, odnosno kompostiranje dva ili više supstrata. S obzirom da aktivni mulj sadrži visok udio vlage i izrazito nizak omjer C/N, takav je supstrat potrebno umiješati sa supstratom koji ima nizak udio vlage i visok omjer C/N, poput različitog strukturnog materijala (granja, lišća, slame), biootpada, miješanog komunalnog otpada, agroindustrijskog otpada i dr. (Huang 2001., Yamada i Kawase 2006.). U svijetu, pa tako i u Hrvatskoj, biootpad se odlaže u posebne spremnike te se jedan dio odvozi u kompostanu na kompostiranje, a drugi se dio odlaže na odlagališta otpada. Biootpad odlikuje visoka vlažnost i optimalan omjer C/N (Kučić Grgić 2019.). U cilju postizanja optimalne vlažnosti, u mješavinu aktivnog mulja i biootpada potrebno je dodati strukturni materijal, kako bi se osigurala rahlost mješavine.

U ovom se radu ispitala stabilizacija mulja s uređaja za obradu otpadnih voda (UPOV) procesom kompostiranja. Kao supstrat za kompostiranje korišten je mulj, kao kospupstrat biootpad te kao strukturni materijal lišće i granje. Proveden je veći broj pokusa, u reaktorima

radnog volumena $V_r = 1$ L i $V_r = 10$ L. U reaktorima manjeg volumena ispitali su se različiti maseni omjeri mulja s UPOV-a (M) i biootpada (B) (SP – slijepa proba (biootpad), P1 – B/M = 2,5:1; P2 – B/M = 5:1; P3 – B/M = 7:1) te se u reaktor većeg mjerila postavio omjer s najboljim rezultatima (P1). Tijekom 16 dana procesa kompostiranja pratila se temperatura, ukupan broj mezofilnih i termofilnih mikroorganizama, *Escherichia coli*, *Salmonella* sp., teški metali u supstratu, C/N omjer, udio vlage, udio hlapive tvari, pH supstrata i kondenzata, volumen kondenzata, udio nastalog CO_2 i NH_3 , te se na temelju dobivenih rezultata izračunala konverzija.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Materijali

Uređaj za obradu otpadnih voda grada Vrgorca u pogonu je s drugim stupnjem pročišćavanja otpadne vode prikupljene sustavom javne odvodnje, a temelji se na punom mehaničko-biološkom pročišćavanju. Mulj korišten u ovom istraživanju nije prethodno ugušćivan, nego je podvrgnut taloženju, a bistri dio (voda) se izdvojio.

Kao kosupstrat u procesu kompostiranja korišten je biootpad. U ovom istraživanju biootpad se sastojao od sljedećih komponenti: kore banane, jabuke, krumpira, mrkve i limuna, ljuska jajeta i luka, kruh, kupus, naranča, rajčica i cikla. U cilju postizanja optimalne vlažnosti i rahlosti mješavine supstrata (mulja s UPOV-a) i kosupstrata (biootpada) dodani su strukturni materijali, granje i lišće.

Za uzgoj mezofilnih i termofilnih bakterija, odnosno gljiva, te *E. coli* i *Salmonelle* sp. korištene su različite podloge. Hranjivi agar je korišten za uzgoj bakterija, sladni agar za uzgoj gljiva, a Chromogenic Coliform Agar (CCA) i Xylose Lysine Desoxycholate Agar (XLD) za uzgoj *E. coli* odnosno *Salmonelle* sp. Sve podloge su priređivane prema uputama proizvođača.

Sva istraživanja provedena su u Zavodu za industrijsku ekologiju Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu.

2.2. Analitički postupci

Tijekom procesa kompostiranja u određenim se periodima izuzimao uzorak te je napravljena fizikalno-kemijska i mikrobiološka karakterizacija supstrata. Prema Austrian Standardu odredio se udio vlage, udio suhe tvari, udio hlapive tvari, pH-vrijednost supstrata i kondenzata. Udio dušika (% N) odredio se prema Kjeldahl metodi (FOSS Kjeltect™ 2100), a koncentracija aniona i kationa ionskom kromatografijom, ICS 3000 uređajem (Dionex, SAD). Elementarna analiza aktivnog mulja i mješavine kompostnog materijala odredila se ICP-MS tehnikom (Perkin Elmer, SAD). Ukupan broj mezofilnih i termofilnih mikroorganizama, odnosno *E. coli* i *Salmonelle* sp., odredio se prema Bergey i Holtu (1994.) i Briški (2012.), odnosno metodom membranske filtracije.

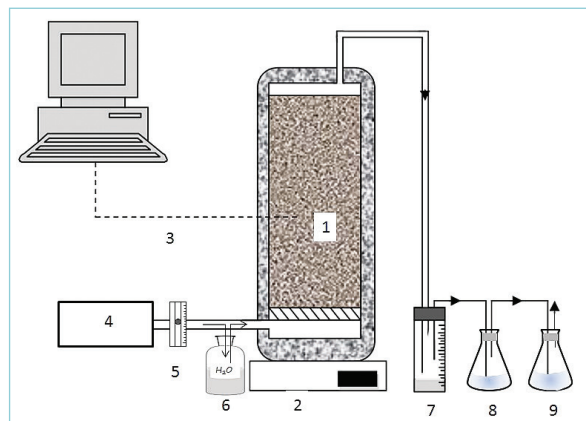
Tijekom procesa kompostiranja pratila se i koncentracija nastalog CO_2 i NH_3 prema Kolthoff i Sandel (1951.).

2.3. Provedba pokusa

Proces kompostiranja mješavine mulja s UPOV-a i biootpada proveden je u adijabatskim reaktorima, $V_r = 1$ L (SP, P1-P3) i $V_r = 10$ L (P4). Proces je vođen 16 dana. Prvi set pokusa postavljen je u reaktorima manjeg radnog volumena ($V_r = 1$ L) s različitim omjerima mulja s UPOV-a i biootpada, **tablica 1**. Na temelju dobivenih rezultata izabran je pokus koji je dao najbolje izlazne rezultate te se postavio u reaktor većeg radnog volumena, $V_r = 10$ L.

U adijabatskim reaktorima radnog volumena, $V_r = 1$ L, zrak se upuhivao odozgo prema dolje pomoću aeracijskih pumpi, a protok zraka bio je kontroliran rotametrima. Na dno reaktora stavljene su plastične strugotine koje su osiguravale ravnomjernu distribuciju kisika kroz kompostnu masu. Ispred ulaza u reaktor bila je postavljena boca ispiralica, kroz koju je prolazio upuhivani zrak, te je osiguravala kontinuirano ovlaživanje supstrata. Na izlazu iz reaktora skupljao se kondenzat te plinovi CO_2 i NH_3 koji su bili apsorbirani u 1 mol L^{-1} NaOH odnosno 4 % H_3BO_3 . Temperatura je tijekom procesa kompostiranja mjerena ubodnim termometrom.

U adijabatskom reaktoru radnog volumena, $V_r = 10$ L, (**slika 1**) zrak se upuhivao pomoću kompresora odozdo prema gore, a protok zraka bio je kontroliran rotametrom. Na dno reaktora postavljen je rešetkasti nosač koji je osiguravao ravnomjeran protok zraka kroz kompostnu masu, a boca ispiralica kroz koju je prolazio upuhivani zrak osiguravala je kontinuirano ovlaživanje supstrata. Temperaturno osjetilo bilo je smješteno u sredini reaktora, bilo je spojeno na osobno računalo te se primjenom programa LabView očitavala temperatura. Na izlazu iz reaktora skupljao se kondenzat, kao i plinovi CO_2 i NH_3 koji su bili apsorbirani u 1 mol L^{-1} NaOH odnosno 4 % H_3BO_3 . Reaktor je tijekom cijelog procesa bio postavljen na vagu s koje se očitavala promjena kompostne mase. Uzorkovanje se provodilo kroz otvor na vrhu reaktora.



Slika 1: Shematski prikaz adijabatskog reaktora: 1 – reaktor, 2 – vaga, 3 – temperaturna osjetila s akvizicijom, 4 – kompresor, 5 – rotametar, 6 – boca ispiralica, 7 – boca za prikupljanje kondenzata, 8 – 4% H_3BO_3 , 9 – 1 mol L^{-1} NaOH

Tablica 1: Početni uvjeti provedbe procesa kompostiranja

	Vr = 1 L				Vr = 10 L
	SP	P1	P2	P3	P4
m (supstrata) / kg	0,250				2,5
ω (vlage) / %	55 - 65				
ω (suhe tvari) / %	45 - 35				
ω (hlapive tvari) / %	60 - 85				
Omjer C/N / -	20-30				
Veličina čestica / cm	1-2				
V (boca ispiralica) / L	0,2				2
pH-supstrata / -	5,5 – 7,5				
q / L min ⁻¹ kg _{HTO} ⁻¹	0,6				
ω (B) / ω (AM)	1	2,5:1	5:1	7:1	2,5:1

3. REZULTATI I RASPRAVA

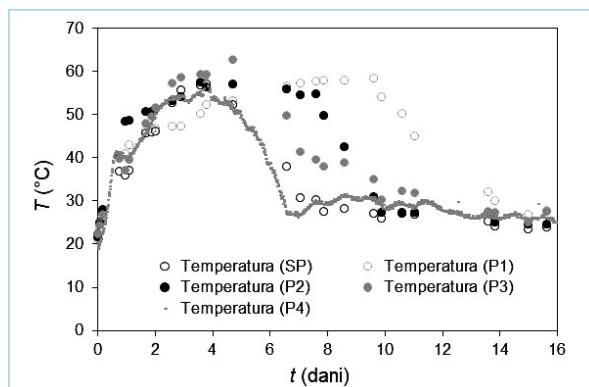
Prije postavljanja procesa kompostiranja provedena je fizikalno – kemijska karakterizacija supstrata – mulja s UPOV-a i kosupstrata – biootpada. Prema literaturi (Bian, 2017., El Kadiri Boutchich, 2015., Kučić Grgić, 2019., Lu i sur., 2009.), i iz [tablice 2.](#) može se vidjeti da je pH – vrijednost mulja i biootpada u neutralnom odnosno blago kiselom području, što odgovara početnim uvjetima procesa kompostiranja. Mulj s UPOV-a sadrži visoki udio vlage, 97,48 %, dok je udio vlage u biootpadu nešto niži, 70 – 90 %, ovisno o sastavu. Prema dosadašnjim istraživanjima (Bian, 2017., El Kadiri Boutchich, 2015., Lu i sur., 2009.) mulj se prije procesa kompostiranja često dehidrira te mu vlažnost iznosi oko 70 %, što je poželjnije za kompostiranje. Zbog visokog sadržaja vlage u mulju i biootpadu potrebno je dodati strukturalni materijal kako bi se postigla vlažnost oko 60 % i kako ne bi došlo do sabijanja materijala, odnosno do stvaranja anaerobnih uvjeta (Kučić i sur., 2013.; Kučić Grgić, 2019.). Kao

strukturalni materijal često se koristi lišće, granje, slama, sijeno, ugljen i dr., ovisno o dostupnosti navedenih materijala. Strukturalni materijal također ima ulogu u podešavanju omjera C/N i pH – vrijednosti (Haug, 1993.). Nakon završetka procesa kompostiranja, odnosno zrenja, kompost se prosijava i strukturalni materijal se vraća ponovno u proces. Prema literaturi (Bian, 2017., El Kadiri Boutchich, 2015., Kučić Grgić 2019., Lu i sur., 2009.) i prema provedenim ispitivanjima C/N omjer mulja s UPOV-a znatno je manji nego C/N omjer biootpada ([tablica 2](#)). Mulj je bogatiji dušikom od biootpada, iako omjer C/N biootpada ovisi o sastavu biootpada, npr. ako se biootpad većinom sastoji od povrća, omjer C/N će biti niži (C/N = 15 – 25/1), dok voće ima nešto viši omjer C/N (C/N = 25 – 35/1) ([tablica 2](#)). Mulj s UPOV-a korišten u ovom radu imao je niži udio hlapive tvari od biootpada, odnosno niži udio organske tvari ([tablica 2](#)). *Escherichia coli* je na početku procesa kompostiranja bila prisutna i u mulju i u biootpadu, dok *Salmonelle* sp. nije bilo ([tablica 2](#)). Umješavanjem mulja, biootpada i strukturalnog materijala mogu se podesiti optimalni početni uvjeti za proces kompostiranja.

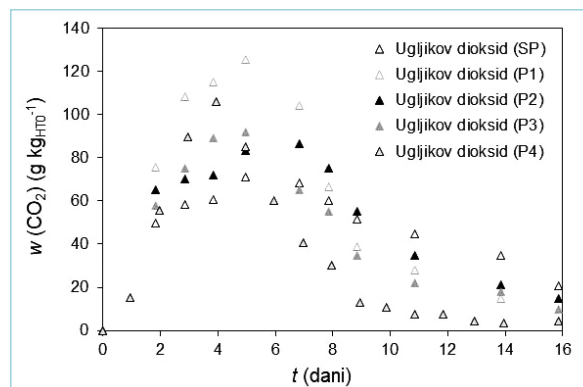
Na [slici 2](#) prikazana je promjena temperature u pokusima koji su se provodili u reaktorima manjeg mjerila, Vr = 1 L, SP, P1, P2 i P3, te u reaktoru većeg mjerila, Vr = 10 L, P4. U svim je pokusima postignuta termofilna faza koja je trajala 3, 13, 7, 5 i 4 dana s najvišim zabilježenim temperaturama od 57, 58, 61, 63 i 58 °C u pokusima SP, P1, P2, P3 i P4 ([tablica 3](#)). U pokusu P1 (B/AM = 2,5/1), gdje je bilo dodano najviše mulja, termofilna faza je najdulje trajala. U pokusu P1 za razliku od pokusa SP, P2 i P3 temperatura nije eksponencijalno porasla, tj. mikroorganizmima je trebalo dulje vrijeme prilagodbe na novonastale uvjete procesa. U pokusu P1 postignuta je konverzija od 64 %, što je i ujedno najveća dobivena konverzija u svim pokusima. U pokusu SP, gdje

Tablica 2: Fizikalno-kemijska karakterizacija supstrata za kompostiranje

Eksperiment	SP	P1	P2	P3	P4	Mulj s UPOV-a
ω (vlage) (%)	48	66	55	54	68	97
ω (hlapive tvari) / %	71	83	82	72	83	73
pH-vrijednost (-)	6,60	5,59	6,03	6,22	6,21	5,86
C/N omjer (-)	19	16	18	21	16	15
N (%)	2,11	2,85	2,55	1,9	3,05	2,7
γ (NH ₄ ⁺) _{supstrata} (mg L ⁻¹)	4,31	3,39	2,57	2,57	3,49	38,38
<i>E.coli</i> (st mL ⁻¹)	3,33x10 ²	6,87x10 ³	1,06x10 ⁴	9,21x10 ³	3,47x10 ⁴	7,58x10 ⁴
<i>Salmonella</i> sp. (st mL ⁻¹)				0		
Mezofilne bakterije (st mL ⁻¹)	5,32x10 ⁸	9,11x10 ⁷	6,41x10 ⁷	4,85x10 ⁷	5,25x10 ⁷	1,82x10 ⁶
Mezofilni kvasci (st mL ⁻¹)	1,57x10 ⁶	2,38x10 ⁶	1,03x10 ⁶	9,94x10 ⁵	1,08x10 ⁶	5,80x10 ³
Mezofilne plijesni (st mL ⁻¹)	0	3,29x10 ³	0	0	2,59x10 ⁶	6,40x10 ³



Slika 2: Promjena temperature u pokusima SP, P1, P2, P3 i P4 tijekom 16 dana kompostiranja supstrata u adijabatskom reaktoru



Slika 3: Promjena ugljikovog (IV) oksida u pokusima SP, P1, P2, P3 i P4 tijekom 16 dana kompostiranja supstrata u adijabatskom reaktoru

je bio samo biootpad, postignuta je najmanja konverzija od 43 %, najkraće je trajala termofilna faza iz čega se može zaključiti da se umješavanjem mulja s biootpadom postiže učinkovitiji proces. Prema navedenom, najbolji su rezultati dobiveni u pokusu P1, što je i u skladu s literaturom (Yamada, 2006.) te se navedeni omjer postavio u reaktor većeg mjerila, $V_r = 10$ L.

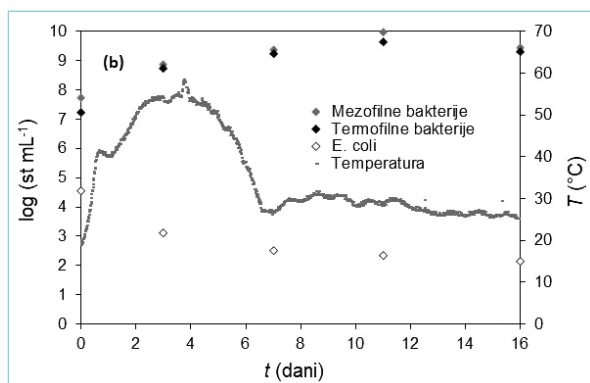
Na slici 3 prikazana je promjena koncentracije CO_2 na izlazu iz reaktora u pokusima SP, P1, P2, P3 i P4 te se može primijetiti da se krivulje CO_2 slažu s temperaturnim krivuljama, odnosno najviše CO_2 je nastalo u termofilnoj fazi kada je najintenzivnija razgradnja kao produkt mikrobne respiracije, a slična opažanja opisana su u literaturi Herner i sur., 2017., Kučić i Briški, 2017.,

Sanchez i sur., 2017. U pokusima P1 i P4 detektirano je 687, odnosno 653 $\text{g kg}_{\text{HTO}}^{-1} \text{CO}_2$.

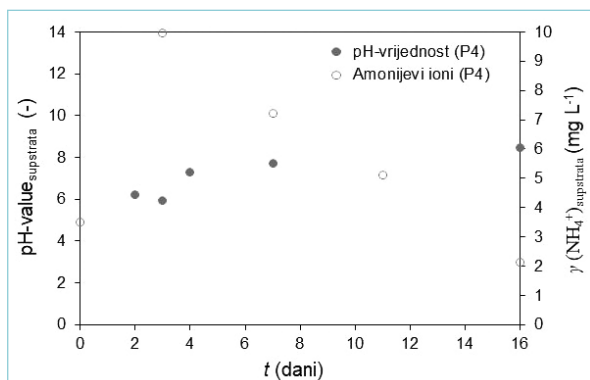
Tijekom procesa kompostiranja (P4) izmjenjivao se broj mezofilnih i termofilnih plijesni i kvasaca, odnosno bakterija (slika 4). U nultom danu procesa kompostiranja broj mezofilnih bakterija iznosio je $5,25 \times 10^7 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, a u 3. i 7. danu uočava se eksponencijalni rast te je broj iznosio $5,58 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, odnosno $2,39 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$. Broj mezofilnih bakterija nastavlja rasti do 11. dana kada je iznosio $9,03 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$. Po završetku procesa kompostiranja uočava se blagi pad, a broj mezofilnih bakterija u 16. danu iznosio je $2,74 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$. Termofilne bakterije prate isti trend kao i mezofilne. Broj termofilnih bakterija u 0. danu procesa iznosio je $1,66 \times 10^3 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, te u 3. danu vidljiv je eksponencijalni porast i iznosio

Tablica 3: Rezultati kompostiranja mješavine mulja s UPOV-a i biootpada u reaktorima radnih volumena 1 L i 10 L

Eksperiment	SP	P1	P2	P3	P4
m (supstrat) _{vlažne tvari} (kg)	0,125	0,112	0,129	0,146	1,6
ω (vlage) (%)	48	66	55	57	70
ω (hlapive tvari) (%)	75	67	70	67	61
pH-vrijednost _{supstrata} (-)	7,86	8,37	8,13	8,36	8,46
pH-vrijednost _{kondenzata} (-)	8,17	8,30	8,25	8,40	8,33
C/N omjer (-)	15	7	8	6	5
N (%)	2,82	5,09	5,01	6,01	6,25
ω (CO_2) ($\text{g kg}_{\text{HTO}}^{-1}$)	520,35	686,92	577,52	519,23	653,93
ω (NH_3) ($\text{mg kg}_{\text{HTO}}^{-1}$)	50	0	14	21	0
γ (NH_4^+) _{supstrata} (mg L^{-1})	64	36	49	49	28
γ (NH_4^+) _{kondenzata} (mg L^{-1})	71	35	43	67	28
<i>E.coli</i> (st mL^{-1})			0		$1,05 \times 10^2$
<i>Salmonella</i> sp. (st mL^{-1})			0		
Mezofilne bakterije (st mL^{-1})	$9,06 \times 10^8$	$5,29 \times 10^8$	$4,23 \times 10^8$	$8,49 \times 10^8$	$2,74 \times 10^9$
Mezofilni kvasci (st mL^{-1})	0	$2,81 \times 10^4$	0	0	0
Mezofilne plijesni (st mL^{-1})	$2,81 \times 10^5$	$3,94 \times 10^4$	$2,67 \times 10^3$	$1,12 \times 10^7$	$5,41 \times 10^6$
V (kondenzata) (mL)	52	96	44	46	124
T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	57,1	58,3	61,4	62,8	57,5
Trajanje termofilne faze (d)	3	13	7	5	4
Konverzija (%)	43	64	56	53	56



Slika 4: Promjena koncentracije mezofilnih i termofilnih gljiva (pljesni i kvasci) (a) i bakterija (b) tijekom 16 dana kompostiranja u pokusu P4



Slika 5: Promjena pH-vrijednosti supstrata i koncentracije NH_4^+ iona u supstratu tijekom procesa kompostiranja u pokusu P4

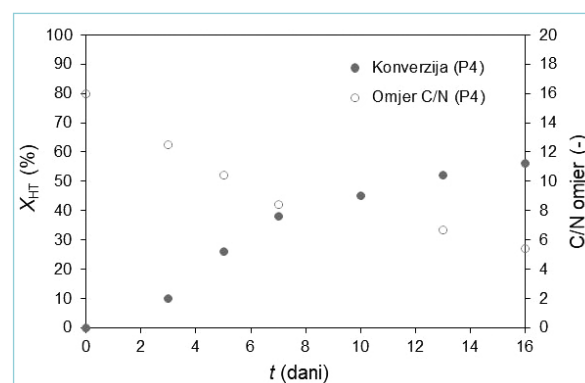
je $5,54 \times 10^8 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, a u 7 danu $1,76 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$. U 11. danu broj termofilnih bakterija iznosio je $4,32 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, a u 16. danu $2,07 \times 10^9 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$. U kompostnoj masi tokom cijelog procesa kompostiranja nije uočena prisutnost *Salmonelle* sp., dok je uočena prisutnost *E. coli*. U 0. danu procesa broj *E. coli* iznosio je $3,47 \times 10^4 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, a u 3. danu $5,66 \times 10^5 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$ kada broj *E. coli* počinje opadati, uslijed visoke temperature u kompostnoj masi. U 7. danu broj *E. coli* iznosio je $1,016 \times 10^4 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, 11 danu $9,5 \times 10^3 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, te na kraju procesa broj *E. coli* je iznosio $1,05 \times 10^2 \text{ g}_{\text{ST}}^{-1}$, što je bilo manje od dozvoljene vrijednosti prema Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, NN 117/2014. U pokusima SP, P1, P2 i P3 nije detektirana *E. coli* na kraju procesa.

Tablica 4: Koncentracija metala u aktivnom mulju, biootpadu i kompostu nakon procesa kompostiranja

	Biootpad	Mulj s UPOV-a	Kompost (mješavina aktivnog mulja i biootpada)	Dopušteni sadržaj u kompostu Klasa I, NN 117/2014
$\omega(\text{kadmij}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	0,3	0,4	0,1	0,7
$\omega(\text{krom}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	1,1	2,7	1	70
$\omega(\text{živa}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	0	0	0	0,4
$\omega(\text{nikal}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	1,4	0,9	1,2	25
$\omega(\text{olovo}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	0,1	7,3	0,4	45
$\omega(\text{bakar}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	1,3	23,8	2,5	70
$\omega(\text{cink}) (\text{mg kg}_{\text{ST}}^{-1})$	0,9	100,6	10,1	200

Na slici 5 prikazana je promjena pH-vrijednosti u pokusu P4 te koncentracija amonijevih iona u supstratu. Početna pH – vrijednost supstrata iznosila je 6,2, a u trećem danu vidljiv je pad pH-vrijednosti na 5,9 zbog stvaranja organskih kiselina prilikom razgradnje jednostavnih organskih spojeva, što je u skladu s objavljenim rezultatima Kučić i sur., 2013. te Venglovsky, 2005.. Do kraja procesa kompostiranja pH – vrijednost je rasla do konačne vrijednosti od 8,5. Prema literaturi (Kučić Grgić, 2019., Robledo Mahonb, 2019.) uzrok porasta pH – vrijednosti kompostne mase je stvaranje amonijevih iona (NH_4^+) kao rezultat amonifikacije (slika 5).

Tijekom procesa kompostiranja omjer C/N se smanjivao u svim pokusima (slika 6 i tablica 3) porastom konverzije hlapive tvari, koja predstavlja razgradnju organske tvari biorazgradivog otpada. Koncentracija plina amonijaka u svim pokusima na izlazu iz reaktora je bila neznatna (tablica 3). Prema Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, NN 117/2014 koncentracija metala u kompostu (tablica 4) je bila ispod dozvoljene granice.



Slika 6: Promjena omjera C/N i konverzije tijekom 16 dana kompostiranja u pokusu P4

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio ispitati učinkovitost obrade mulja s uređaja za obradu komunalnih otpadnih voda grada Vrgorca procesom kompostiranja, odnosno

odrediti optimalan omjer mulja s UPOV-a (M) i supstrata (S) na temelju maksimalne konverzije, trajanja termofilne faze i temperature. Provedeno je četiri pokusa s različitim omjerima biootpada i mulja (SP, P1, P2, P3) u reaktorima radnih volumena $V_r = 1\text{ L}$ (pokusi SP, P1, P2, P3). Najučinkovitiji pokus (P1) prenesen je u veće mjerilo, $V_r = 10\text{ L}$, (pokus P4).

Na temelju dobivenih rezultata, konverzije, trajanja termofilne faze, količine nastalog CO_2 , može se zaključiti da je najuspješniji eksperiment bio P1 gdje je dodano najviše mulja što je i svrha ovog istraživanja. Termofilna faza trajala je punih 14 dana što je omogućilo uništavanje patogenih mikroorganizama. Pokusi P1 i P4 imali su najniži početni omjer C/N (16/1) i bilo je za očekivati da će doći do gubitka dušika u obliku amonijaka, međutim tijekom 16 dana nije došlo do emisije NH_3 , a razlog tome može biti dodani strukturni materijal. Proces prenesen u veće mjerilo (P4) dao je približno slične rezultate kao i u manjem mjerilu (P1), osim što je termofilna faza puno kraće trajala što je rezultiralo nepotpunim uništavanjem *E. coli*, iako u granici dozvoljene koncentracije. Dobiveni

kompost iz pokusa P1, ali i pokusa P4 prema Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada NN 117/2014, u pogledu sadržaja teških metala, organske tvari i patogenih mikroorganizama odgovara kompostu klase I. Shodno navedenim rezultatima, mulj s uređaja za obradu komunalnih otpadnih voda uspješno je obrađen procesom kompostiranja te kao takav bi se mogao koristiti kao poboljšivač tla. S obzirom da se radi o mulju s uređaja za obradu komunalnih otpadnih voda, kompost je prema Pravilniku klasificiran u kompost klase III koji je namijenjen korištenju na tlu koje se ne koristi za proizvodnju hrane. Kompostiranje samog mulja s UPOV-a nije izvedivo zbog visokog udjela vode i niskog omjera C/N zbog čega bi došlo do stvaranja anerobnih uvjeta u procesu, termofilna faza bi kratko trajala i ne bi se postigla visoka temperatura s kojom bi se osiguralo uništavanje patogenih mikroorganizama, postojala bi velika mogućnost nastajanja velikih količina procijeđene vode te kao krajnji rezultat – kompost, ne bi bio odgovarajuće kvalitete. U budućnosti je potrebno ispitati mulj s UPOV-a umiješan samo sa strukturnim materijalom. ■

LITERATURA

- Austrian Standards Institute (1986.): Austrian Standard: Analytical Methods and Quality Control for Waste Compost. ÖNORM S 2023, Vienna, Austria.
- Bergey, D.H.; Holt, J.G., (1994.): *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore.
- Bian, R.; Sun, Y.; Li, W.; Ma, Q.; Chai, X., (2017.): Co – composting of municipal solid waste mixed with matured sewage sludge: The relationship between N_2O emissions and denitrifying gene abundance. *Chemosphere*, 189, 581 – 589.
- Briški, F. (2016.): *Zaštita okoliša*. Element, Zagreb, Hrvatska.
- Briški, F.; Kopčić, N.; Čosić, I.; Kučić, D.; Vuković M., (2012.): Biodegradation of tobacco waste by composting: Genetic identification of nicotine-degrading bacteria and kinetic analysis of transformations in leachate. *Chemical Papers*, 66, 1103 – 1110.
- El Kadiri Boutchich, G., Tahiri, S., Mahi, M., Gallart-Mateu, D., de la Guardia, M., Aarfane, A., Lhadi, EK., El Krati, M., (2015.): Characterization of activated sludge from domestic sewage treatment plants and their management using composting and co-composting in aerobic silos. *Jurnal of Materials and Environmental Science*, 6, 2206 – 2220.
- EU direktiva za mulj, 86/278/EEC.
- EU direktiva za otpadne vode, 91/271/EEC.
- Feinstein, M. S., Miller, F. C., Strom, P.F., MacGregor, S. T., Psarianos, K. M., (1983.): Composting ecosystem management for waste treatment, *Biotechnology*, 1, 347 – 353.
- Haug, R. T., (1993.): *The practical handbook of compost engineering*. Lewis, Boca Raton.
- Herner, Ž., Kučić, D., Zelić, B. (2017.): Biodegradation of imidacloprid by composting process. *Chemical Papers*, 71, 13–20.
- Huang, G. F., Fang, M., Wu, Q. T., Zhou, L. X., Liao, X. D. & Wong, J. W. C., (2001.): Co-Composting of Pig Manure with Leaves. *Environmental Technology*, 22, 1203–1212.
- Kolthoff, I.M., Sandel, E.B., (1951.): *Inorganic Quantitative Analysis*, pp. 347–352. Školska knjiga, Zagreb.
- Kučić Grgić, D., Vuković Domanovac, M., Domanovac, T., Šabić, M., Cvetnić, M., Ocelić Bulatović, V., (2019.): Influence of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* BSW and Clinoptilolite Addition on the Biowaste Composting Process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 5399–5409.
- Kučić, D., Briški, F., (2017.): Emission of gases during composting of solid waste. *Kemija u industriji*, 66, 467–474.
- Kučić, D., (2014.): Integracija procesa kompostiranja i adsorpcije. Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije.
- Kučić, D., Kopčić, N., Briški, F. (2013.): Zeolite and potting soil sorption of CO_2 and NH_3 evolved during co-composting of grape and tobacco waste. *Chemical Papers*, 67, 1–8.
- Lu, Y., Wu, X., Guo, J., (2009.): Characteristics of municipal solid waste and sewage sludge co-composting. *Waste Management*, 29, 1152 – 1157.
- Robledo Mahónb T.; Martina M.A.; Gutiérrez M.C.; Toledo M.; González I.; Arandab E.; Chicaa A.F.; Calvob C., (2019.): Sewage sludge composting under semi-permeable film at full-scale: Evaluation of odour

- emissions and relationships between microbiological activities and physico-chemical variables. *Environmental Research*, 177, 108624.
- Pravilnik o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj koristi u poljoprivredne svrhe, NN 38/2008.
- Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja, NN 32/2010.
- Pravilnik o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, NN 117/2014.
- Sánchez, J.O.; Ospina, D.A.; Montoya, S., (2017.): Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69, 136-153.
- Venglovsky, J.; Sasakova, N.; Vargova, M.; Pacajova, Z.; Placha, I.; Petrovsky, M.; Harichova, D., (2005.): Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite. *Bioresource Technology*, 92, 181-189.
- Vuković, M.; Ćosić, I.; Kučić, D.; Kopčić, N.; Briški, F., (2012.): Biodegradation kinetics of tobacco-waste leachate by activated sludge in a sequencing batch reactor. *CABEQ*, 26, 191-198.
- Wang, X.; Chen, T.; Zheng, G., (2019.): Preservation of nitrogen and sulfur and passivation of heavy metals during sewage sludge composting with KH_2PO_4 and FeSO_4 . *Bioresource Technology*, *In press, Corrected Proof*.
- Wang, X.; Zheng, G.; Chen, T.; Shi, X.; Wang, Y.; Nie, E.; Liu, J., (2019.): Effect of phosphate amendments on improving the fertilizer efficiency and reducing the mobility of heavy metals during sewage sludge composting. *Journal of Environmental Management*, 235, 124-132.
- Wang, J., (2012.): Biological sludge minimization and biomaterials/bioenergy recovery technologies: Fundamentals of biological processes for wastewater treatment, John Wiley i Sons, New Jersey.
- Yamada, Y.; Kawase, Y., (2006.): Aerobic composting of waste activated sludge: Kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption. *Waste management*, 26, 49-61.

Treatment of active mud from urban wastewater treatment plants using the composting process

Abstract. At present, due to population growth and industrial development, there is a global increase in generated wastewater quantities that require treatment. Active sludge generated in the biological procedure of wastewater treatment requires adequate disposal. The paper examines the efficiency of sludge treatment at the Vrgorac wastewater treatment plant (WWTP) using the composting process. The optimal ratio of sludge (M) and substrate (S) was determined based on maximum conversion, thermophilic stage duration and temperature. To this end, different ratios of the S and M mixture were tested (SP – only biowaste, P1 – S/M = 2.5:1 ; P2 – S/M = 5:1 ; P3 – S/M = 7:1) in reactors of working volume $V_r = 1$ L. In the tests SP, P1, P2 and P3, the achieved conversion ranged from 43 %, 64 %, 56 % to 53 %, respectively, maximum temperature was 57.1 °C, 58.3 °C, 61.4 °C and 62.8 °C, while the thermophilic stage lasted 3, 13, 7 and 5 days. The most efficient test (P1) was transferred to a larger scale, in the reactor with working volume $V_r = 10$ L, where the test P4 was conducted. In the test P4, the achieved conversion equalled 56 %, with maximum temperature of 57.48 °C and thermophilic stage duration of 4 days.

Key words: active sludge, biodegradation, composting, compost, adiabatic reactor

Behandlung des in der Klärwasseranlage entstandenen Belebtschlammes durch Kompostierung

Zusammenfassung. Mit der Steigerung der Einwohnerzahl und der industriellen Entwicklung wächst auch die Menge der zu behandelnden Abwässer. Im Laufe der biologischen Behandlung der Abwässer entsteht Belebtschlamm, der auf entsprechende Weise entsorgt werden muss.

In dieser Untersuchung wurde die Wirksamkeit der Behandlung des in der Klärwasseranlage der Stadt Vrgorac entstandenen Belebtschlammes durch Kompostierung geprüft. Außerdem wurde das optimale Verhältnis zwischen Schlamm (M) und Substrat (S) auf Grund der maximalen Umwandlung, der Dauer der thermophilen Phase und der Temperatur festgestellt. Zu diesem Zwecke wurden unterschiedliche Verhältnisse von S und M (SP – nur Bioabfall, P1 – S/M = 2,5:1 ; P2 – S/M = 5:1 ; P3 – S/M = 7:1) in den Reaktoren mit Betriebsvolumen $V_r = 1$ L untersucht. In den Versuchen SP, P1, P2 und P3 wurde die Umwandlung von 43 %, 64 %, 56 % bzw. 53 % erzielt, die maximal gemessene Temperatur betrug 57,1 °C, 58,3 °C, 61,4 °C bzw. 62,8 °C, und die thermophile Phase dauerte 3, 13, 7 bzw. 5 Tage. Der wirksamste Versuch (P1) wurde in einen größeren Maßstab übertragen, nämlich, in den Reaktor mit Betriebsvolumen $V_r = 10$ L, wo der Versuch P4 durchgeführt wurde. In diesem Versuch wurde die Umwandlung von 56 % mit maximaler Temperatur von 57,48 °C und der Dauer der thermophilen Phase von 4 Tagen erreicht.

Schlüsselwörter: Belebtschlamm, biologischer Abbau, Kompostierung, Kompost, adiabatischer Reaktor