

Laboratorijska ispitivanja mehaničko-biološki obrađenog otpada

Igor Petrović, Vlasta Szavits-Nossan, Damir Štuhec

Ključne riječi

otpad,
mehaničko-biološka
obrada (MBO),
laboratorijska ispitivanja,
geotehničke karakteristike,
stišljivost, veliki edometar

Key words

waste,
biomechanical
treatment (BMT),
laboratory testing,
geotechnical properties,
compressibility,
large-size oedometer

Mots clés

déchets,
traitement biomécanique,
essai en laboratoire,
propriétés géotechniques,
compressibilité,
oedomètre de grande
taille

Ключевые слова

отходы,
механико-биологическая
обработка (МБО),
лабораторные испытания,
геотехнические
характеристики,
сжимаемость,
крупный эдометр

Schlüsselworte

Abfall,
mechanisch - biologische
Bearbeitung (MBB),
Laboruntersuchungen,
bodentechnische
Charakteristika,
Komprimierbarkeit,
grosser Oedometer

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Štuhec

Pregledni rad

Laboratorijska ispitivanja mehaničko-biološki obrađenog otpada

Prikazani su rezultati vlastitih laboratorijskih ispitivanja osnovnih geotehničkih karakteristika MBO otpada, koji su prethodili ispitivanju njegove stišljivosti u novom edometru, karakteristike ovog uređaja te priprema uzoraka i njihova ugradnja u edometarsku ćeliju. Prikazana je izrada novoga velikog edometra promjera 500 mm, visine 200 mm koji je neuobičajen za geotehnička ispitivanja u svijetu. Pored rezultata vlastitih istraživanja prikazani su i rezultati drugih autora.

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Štuhec

Subject review

Laboratory testing of waste after biomechanical treatment

The authors present results obtained during laboratory testing of basic geotechnical properties of waste subjected to biomechanical treatment, as well as subsequent compressibility testing of this waste in a new oedometer. Properties of this oedometer, preparation of specimens, and their placement into the oedometer cell, are also presented. Fabrication of this new large-size oedometer, 500 mm in diameter, and 200 mm in height, seldom used in the world for the conduct of geotechnical tests, is described. In addition to their own test results, the authors also provide results obtained by other authors.

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Štuhec

Ouvrage de synthèse

L'analyse en laboratoire des déchets suite à leur traitement biomécanique

Les auteurs présentent les résultats obtenus au cours de l'analyse en laboratoire des propriétés principales géotechniques des déchets soumis au traitement biomécanique préalable, ainsi que l'essai de compressibilité effectué sur ces déchets dans le nouveau oedomètre. Les propriétés de cet oedomètre, la préparation des échantillons, et leur installation dans la cellule oedométrique, sont également présentées. La fabrication de ce nouveau oedomètre de grande taille, 500 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, rarement utilisé dans le monde pour la réalisation des essais géotechniques, est décrite. En plus des résultats obtenus par les auteurs, ils présentent également les résultats obtenus par d'autres auteurs.

И. Петрович, В. Сзавитс-Носсан, Д. Штухец

Обзорная работа

Лабораторные испытания отходов, прошедших механико-биологическую обработку

Приведены результаты собственных лабораторных испытаний основных геотехнических характеристик отходов после механико-биологической обработки (МБО), которые предшествовали испытаниям на сжимаемость отходов в новом эдометре. Описаны также характеристики этого прибора, подготовка образцов и их установка в ячейку эдометра. Описано изготовление нового крупного эдометра, имеющего диаметр 500 мм и высоту 200 мм, использование которого при геотехнических испытаниях является необычным в мировой практике. Помимо результатов собственных исследований, приведены результаты других авторов.

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Štuhec

Übersichtsarbeit

Laboruntersuchungen des mechanisch - biologisch bearbeiteten Abfalls

Dargestellt sind Ergebnisse eigener Laboruntersuchungen der grundlegenden bodentechnischen Kennzeichnung des MBB Abfalls, vorhergehend der Untersuchung dessen Komprimierbarkeit im neuen Oedometer, Charakteristika dieser neuen Einrichtung sowie die Vorbereitung der Proben und deren Einbau in die Oedometerzelle. Dargestellt ist die Herstellung des neuen grossen Oedometers mit Durchmesser 500 mm und Höhe 200 mm der in der Welt für bodentechnische Untersuchungen üblich ist. Neben den Ergebnissen eigener Untersuchungen sind auch Ergebnisse anderer Autoren dargestellt.

Autori: Prof. dr. sc. **Vlasta Szavits-Nossan**, dipl. ing. mat., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb; dr. sc. **Igor Petrović**, dipl. ing. geot.; **Damir Štuhec**, dipl. ing. geot., Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Varaždin

1 Uvod

Odlaganje komunalnog otpada danas je jedan od važnih problema u zaštiti okoliša. Veliki broj neuređenih odlagališta-smetlišta i nemaran odnos prema njima pokazatelji su niskih ekoloških standarda. Tek je u posljednje vrijeme u Hrvatskoj počelo intenzivnije ulaganje u projektiranje i izgradnju suvremenih pogona za obradu i odlaganje otpada, a snažan poticaj toj "probudenoj ekološkoj svijesti" dali su, za naše prilike, strogi zahtjevi u procesu približavanja standardima Europske zajednice.

Opći koncept održivog razvoja nalaže obradu otpada koja mora prethoditi njegovu konačnom odlaganju na odlagalište. Osnovni cilj ove obrade jest smanjenje količine otpada koji se odlaže na odlagalište i smanjenje generiranih količina plina i filtrata. Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2007.-2015. godine [1] predviđa uporabu nekoliko različitih tehnoloških postupaka obrade komunalnog otpada prije njegova konačnog odlaganja. Jedan je od tih postupaka mehaničko-biološka obrada (MBO) komunalnog otpada čiji je krajnji cilj reduciranje količine biorazgradivog otpada, koji se sprema na odlagalištima, te povrat korisnih sirovina iz otpada sustavom automatske separacije.

Osim smanjenja količine otpada i generiranih količina plina i filtrata, mehaničko-biološka obrada otpada povoljno utječe na geotehničke aspekte odlagališta otpada. Naime, istraživanja granulometrijskog sastava mehaničko-biološki obrađenog otpada pokazuju da je MBO otpad svojim granulometrijskim sastavom i vizualnim izgledom vrlo nalik tlu pa je uobičajeno da se mehanička svojstva takvog otpada ispituju u laboratorijima za mehaniku tla. Međutim, treba voditi računa o činjenici da mehanička svojstva mehaničko-biološki obrađenog otpada uglavnom odgovaraju mehaničkim svojstvima onih tala koja se u standardnoj geotehničkoj praksi smatraju toliko lošima da ih se najčešće zamjenjuje boljim materijalima. Ova činjenica pokazuje da ni u mehanici tla, kao disciplini iz koje se razvila mehanika otpada, nema dovoljno iskustva u ispitivanju materijala koji imaju mehanička svojstva slična onima koja ima mehaničko-biološki obrađeni otpad.

S druge strane, prema suvremenom konceptu, zatvoreno odlagalište predstavlja nasutu građevinu a dovezen i zbijen otpad obložen je s donje i gornje strane nepropusnim barijerama. Visina nasutih odlagališta doseže i nekoliko desetaka metara, a njihovi se obujmi izražavaju u stotinama tisuća ili milijunima prostornih metara. Zbog toga problemi mehaničke otpornosti i stabilnosti odlagališta zahtijevaju primjerenu pozornost i obradu pri projektiranju i izvedbi u području geotehničkog inženjerstva. Budući da otpad, kao građevni materijal, ima nepovoljna mehanička svojstva (veliku stišljivost i razmjerno malu čvrstoću) i da, u slučaju neobrađenog otpada, mijenja sastav s vremenom, u odlagalištima komunalnog otpada

dolazi do nestabilnosti, oštećenja, pa i havarija, a sanacije nastalih šteta su dugotrajne i skupe [2]. Sve ovo upozorava da je potrebno što bolje poznavanje fizikalno-mehaničkih karakteristika otpada.

U ovom su članku prikazani rezultati vlastitih laboratorijskih ispitivanja osnovnih geotehničkih karakteristika mehaničko-biološki obrađenog otpada koja su prethodila ispitivanju njegove stišljivosti u novom, velikom edometru promjera 500 mm. Uz vlastite je rezultate dan i pregled objavljenih rezultata ispitivanja tih karakteristika drugih autora.

2 Uzorci mehaničko-biološki obrađenog otpada

2.1 Podrijetlo uzoraka

Uzorci ispitivanog mehaničko-biološki obrađenog otpada uvezeni su s odlagališta iz Republike Austrije (objava točne lokacije nije dopuštena) na temelju suglasnosti Ministarstva zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva o jednokratnom uvozu uzoraka tog otpada iz Republike Austrije u količini od 1 m³. Odabrano se odlagalište otpada počelo koristiti krajem 70-ih godina, a proširenje na površinu od 11 hektara i volumen od približno 1,7 milijuna m³ izvedeno je sredinom 80-ih godina. Godišnje se oko 70.000 tona otpada unosi u postrojenje, a nakon obrade otpada preostaje oko 20.000 tona za odlaganje.

Za potrebe ovog istraživanja uzorkovanje je provedeno manualno na odlagalištu otpada. Otpad se površinski grabio lopatom i utovarivao u plastične vreće (slika 1.). Na taj je način uzorkovano oko 1 m³, odnosno 500 kg mehaničko-biološki obrađenog otpada.



Slika 1. Uzorkovanje mehaničko-biološki obrađenog otpada

2.2 Postupak obrade uzorkovanog otpada

Na odlagalištu otpada s kojeg su uzeti uzorci, otpad se obrađuje u:

- postrojenju za sortiranje industrijskog otpada koje sortira čiste frakcije korisnih sirovina za recikliranje

- postrojenju za kompostiranje u zatvorenim prostorima (hale za kompostiranje) za intenzivno truljenje u kojima se postiže bolji i brži tijek truljenja. Kompostira se biološki otpad koji se skuplja odvojeno i mulj s komunalnih pročistača otpadnih voda.

Kao ulazni materijali dopremaju se u prvom redu kućni otpad, industrijski otpad, mulj s pročistača otpadnih voda ili odgovarajući predobrađeni otpad (teška frakcija).

Da bi se iz dopremljenog otpada odvojile organske tvari rabe se dva temeljna principa:

- prvi je princip mehaničko odvajanje visokoorganskih sastojaka (bogate gorive vrijednosti) koji se ne mogu biološki razgraditi
- drugi princip jest biološka razgradnja (kompostiranje odnosno truljenje) razgradivih organskih i biogenih sastojaka u razdoblju od nekoliko tjedana.

Mulj s pročistača i teška frakcija se u pripremi za biološku obradu izmiješaju i dodaju u takozvano intenzivno truljenje (zatvoreni prostori za truljenje). Nakon nekoliko ciklusa truljenja, u kojima sudjeluju svježi zrak, protočni zrak i dodatak vode, a time i temperatura, udio kisika i sadržaj vlage, računalno regulirani prema zadanoj recepturi, materijal se iz intenzivnog truljenja uzima utovarivačem i predaje na potpuno automatiziranu mehaničku obradu (konfekcioniranje).

Na konfekcioniranju se materijal odvaja na različite dijelove. Za odvajanje se rabe postupci rešetanja, usitnjavanja te elektrostatske i magnetske separacije. Iz donjeg dijela raspona veličine zrna dobiva se otpad koji se poslije još jedne dodatne biološke obrade može odložiti na odlagalište.

Na početku mehaničke obrade, izdvojeni otpad za odlaganje dalje se obrađuje u trećem zatvorenom stupnju truljenja. U ovom stupnju truljenja materijal ostaje tako dugo dok se njegova ogrjevna vrijednost ne spusti ispod granične vrijednosti, koja je definirana propisom za odlagališta (gornja ogrjevna vrijednost od 6600 kJ/kg). Potom se materijal odlaže na odlagalište. Otpad odložen na odlagalište može se tretirati kao inertni materijal. Mehaničko-biološki obrađeni otpad, koji je uzorkovan na odlagalištu za ova istraživanja, star je 6 mjeseci.

2.3 Sušenje otpada

Prije laboratorijskih ispitivanja otpad je trebalo osušiti. U standardnim se postupcima ispitivanja u mehanici tla za tu namjenu rabe sušionici, a uzorci se suše na temperaturi od 105 °C. Budući da se ovdje radilo o znatno većoj količini uzoraka, odlučeno je da će se oko 250 kg mehaničko-biološki obrađenog otpada prosušiti na zraku i nakon dva tjedna odrediti njegov sadržaj vlage. Razasrti otpad na sušenju prikazan je na slici 2.



Slika 2. Razasrti otpad na sušenju

Tijekom sušenja, jednom na dan bilježila se relativna vlažnost zraka i temperatura zraka. Zabilježene temperature i vlažnosti zraka prikazane su u tablici 1. Srednja vrijednost temperature prostorije u kojoj se otpad sušio odgovara srednjoj vrijednosti temperature za mjesec svibanj u Varaždinu (prema podacima objavljenim na web-stranici Državnog hidrometeorološkog zavoda). Porast relativne vlažnosti zraka, koja se može uočiti u drugom dijelu ove tablice, uzrokovan je obilnim oborinama u tom razdoblju. Relativna je vlažnost zraka, međutim, bila nešto niža od mjesečnog prosjeka koji za grad Varaždin iznosi oko 70 % [3] pa je postignut sadržaj vlage otpada manji od one koja bi se postigla da se otpad sušio na otvorenom prostoru.

Tablica 1. Relativna vlažnost i temperatura zraka zabilježene tijekom sušenja otpada

Datum 2010. g	Vrijeme [h]	Relativna vlažnost zraka [%]	Temperatura zraka [°C]
23. 4.	13:00	51,5	15,0
24. 4	15:20	56,0	14,5
25. 4	09:30	58,5	14,0
27. 4.	12:30	58,5	15,0
28. 4.	12:30	59,0	15,5
29. 4.	15:30	63,5	15,0
30. 4.	19:00	66,0	15,0
4. 5.	16:00	64,0	15,5
5. 5.	16:30	61,5	15,5
6. 5.	11:30	60,5	15,0
7. 5.	15,00	63,0	16,0
Srednja vrijednost		59,5	15,0

Nakon sušenja, otpad je zatvoren u plastične vreće i uskladišten u podrumskim prostorijama Geotehničkog fakulteta u Varaždinu.

2.4 Sadržaj vlage otpada nakon sušenja

Neka tvar ima ravnotežni sadržaj vlage kada je u ravnoteži s vlagom zraka s kojim je u kontaktu. Ravnotežni sadržaj vlage, osim o uvjetima u zraku, ovisi o sastavu tvari (mineraloškom i granulometrijskom), a osobito o prisutnosti organskih sastojaka. Svi procesi u prirodi teže nekom ravnotežnom stanju pa se tako svaka tvar, ostavljena dovoljno dugo u dodiru sa zrakom određene vlage i temperature, osuši do ravnotežnog sadržaja vlage. U geotehnici, veličina ravnotežnog sadržaja vlage pruža neizravan uvid u granulometrijski sastav materijala, njegovu disperzivnost, mineraloški sastav i sadržaj organskih sastojaka [4].

Nakon višednevnog sušenja na zraku, ravnotežni je sadržaj vlage otpada određen prema normi ASTM D 2974, kao za uzorke organskog tla. Pritom su se uzorci otpada sušili u sušioniku na temperaturi od 105 °C. Ravnotežni sadržaj vlage određen je na 13 uzoraka mehaničko-biološki obrađenog otpada, od kojih je 10 prikazano na slici 3. Uzorci su uzeti iz prostorije u kojoj se otpad sušio, s nekoliko različitih mjesta uključujući i ona s kojih su uzeti uzorci za ispitivanje granulometrijskog sastava otpada.



Slika 3. Uzorci otpada za određivanje ravnotežnog sadržaja vlage otpada

Utvrđena srednja vrijednost ravnotežnog sadržaja vlage mehaničko-biološki obrađenog otpada iznosila je 7,5 %. Usvojena proračunska vrijednost sadržaja vlage je 7 %, jer se očekivao manji pad sadržaja vlage otpada u vremenskom razdoblju od skladištenja do uporabe uzoraka zbog porasta temperature u idućim (ljetnim) mjesecima. Ova je vrijednost sadržaja vlage otpada rabljena za proračun potrebne mase otpada i vode za pripremu uzoraka za ispitivanje stišljivosti mehaničko-biološki obrađenog otpada.

3 Osnovne geotehničke karakteristike ispitivanog mehaničko-biološki obrađenog otpada

3.1 Granulometrijski sastav ispitivanog otpada

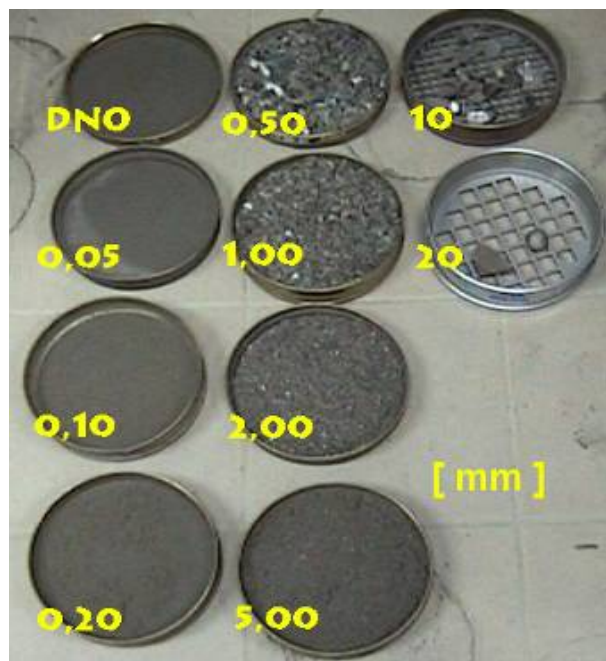
Granulometrijski je sastav prikaz masa pojedinih frakcija materijala zrnastih i koloidnih čestica, izraženih u postocima ukupne mase uzorka. On služi za klasifika-

ciju i identifikaciju te za indirektnu ocjenu mehaničkih karakteristika ispitivanog materijala.

Granulometrijski je sastav otpada određen s ciljem da bi se:

- provjerila opće prihvaćena klasifikacija otpada kao krupnozrnatog materijala,
- utvrdila maksimalna veličina zrna u otpadu budući da, prema britanskoj normi za ispitivanje stišljivosti tla (BS 1377: Part 5: 1990), maksimalni promjer zrna, koji nova edometarska čelija, visine 200 mm, može prihvatiti, iznosi 40 mm (najviše 1/5 visine čelije)
- na osnovi graduiranosti otpada ustanovila mogućnost njegova zbijanja u čeliju edometra.

Granulometrijski sastav otpada određen je prema normi HRN.U.B1.018. na dva uzorka. Uzorci su uzeti iz prostorije u kojoj se otpad sušio, s dva različita mjesta, a pripremljeni su metodom četvrtanja. Uzorci su se zatim vibriranjem prosijavali kroz niz sita s padajućom veličinom otvora. (Materijal koji se zadržao na pojedinim sitima prikazan je na slici 4.). Iz prosijanih je uzoraka utvrđeno da je najveće zrno veličine 30 × 20 mm (slika 5.) što je, što se tiče najvećeg promjera zrna u uzorku koji se može ugraditi u čeliju edometra, zadovoljavajuće. Za oba je uzorka masa na posljednjem situ bila manja od 10 % ukupne mase uzorka pa se nije određivao granulometrijski sastav sitnih frakcija postupkom areometriranja.



Slika 4. Sita različitih otvora s materijalom koji se na njima zadržao



Slika 5. Zrna najvećeg promjera u uzorcima otpada

Na slici 6. prikazane su granulometrijske krivulje za oba uzorka. S ove se slike može uočiti da se veličina zrna otpada, u usporedbi s tлом, kreće u granicama od sitnozrnatog pijeska do krupnozrnatog šljunka. Općenito se zato mehaničko-biološki obrađeni otpad može klasificirati kao krupnozrnati materijal.

Uzorak krupnozrnatog materijala (pijeska ili šljunka) dobro je graduiran ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti [10]:

- za šljunak :
 - koeficijent zakrivljenosti mora biti u granicama $1 < C_c < 3$
 - koeficijent jednoličnosti mora biti $C_u \geq 4$
- za pijesak:
 - koeficijent zakrivljenosti mora biti u granicama $1 < C_c < 3$
 - koeficijent jednoličnosti mora biti $C_u \geq 6$

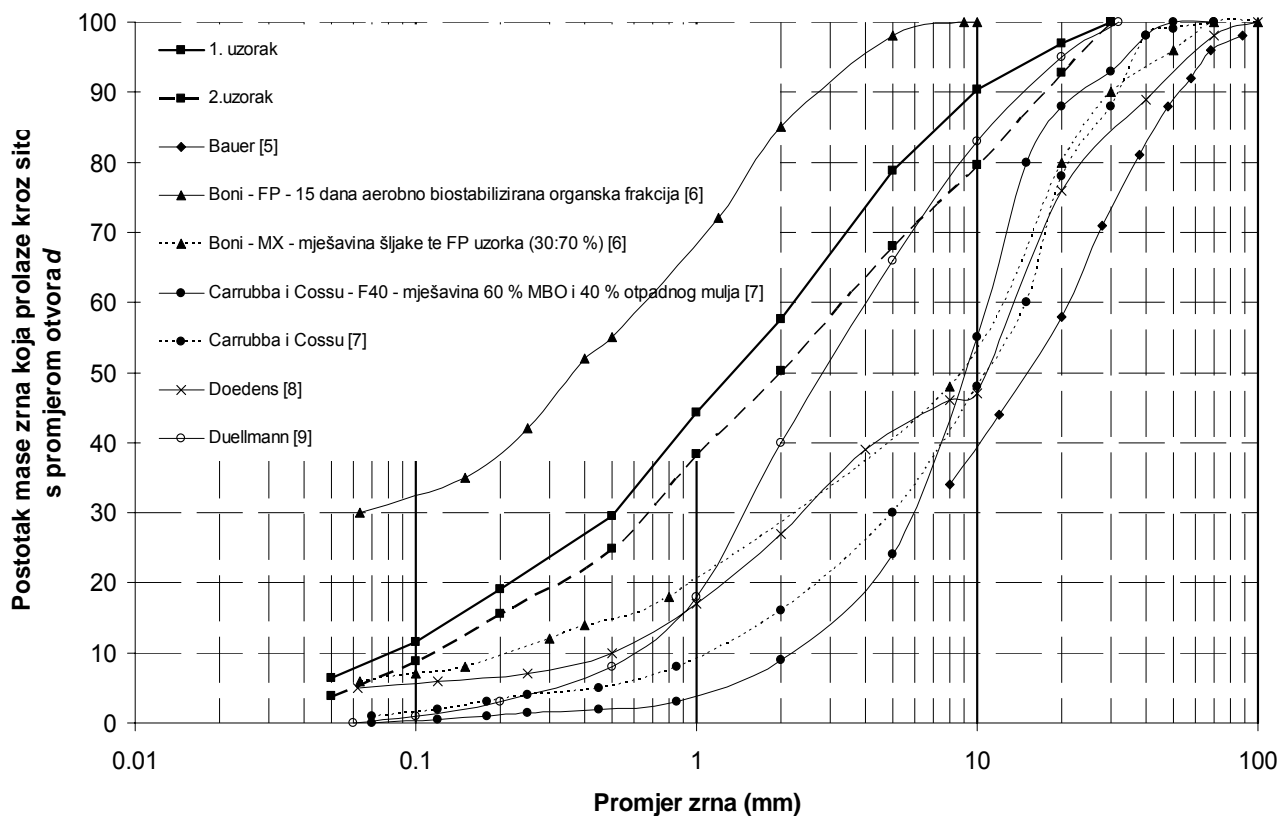
Za ispitivane uzorke dobivene su sljedeće vrijednosti koeficijenata:

- za prvi uzorak: $C_u = 26$ i $C_c = 1,5$
- za drugi uzorak: $C_u = 27$ i $C_c = 1,3$

Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da je ispitivani otpad dobro graduirani materijal (koji ima široki raspon veličina zrna), odnosno to je materijal koji se dobro može zbijati te ima relativno malen koeficijent propusnosti u odnosu na krupnozrnate materijale koji nisu dobro graduirani.

3.2 Gustoća čestica otpada

Gustoća čestica otpada određena je prema normi ASTM D 854 na uzorcima maksimalne veličine zrna 4,75 mm, dok su veća zrna uklonjena nakon prosijavanja. S granu-



Slika 6. Granulometrijske krivulje uzoraka otpada iz vlastitih ispitivanja i objavljeni rezultati drugih autora

lometrijskih krivulja prikazanih na slici 6., vidi se da 70 % do 80 % mase ispitivanog otpada sadrži zrna upravo veličine do 4,75 mm. Gustoća čestica otpada određena je pomoću piknometra poznatog volumena, kao za tlo. Zrak iz uzoraka uklonjen je njihovim prokuhavanjem u pješčanoj kupelji. Utvrđeno je da srednja vrijednost gustoće čestica ρ_s ispitivane frakcije otpada iznosi 2,147 g/cm³. Dobivena vrijednost gustoće čestica otpada rabljena je za proračun potrebnih masa otpada i vode prilikom pripreme uzoraka za ispitivanje stišljivosti otpada u velikom edometru.

U tablici 2. prikazani su rezultati ispitivanja gustoće čestica otpada prema drugim autorima [11, 12, 13]. Usporedbom vrijednosti gustoće čestica otpada iz tablice 2. i iz vlastitih istraživanja, može se zaključiti da je ovim istraživanjem dobivena nešto veća vrijednost gustoće čestica otpada u odnosu na druge autore iako je, prema Heiss-Ziegleru i Fehreru [12], moguće dobiti veću vrijednost koja približno odgovara vrijednosti gustoće čestica otpada dobivenoj ovim istraživanjem.

Tablica 2. Gustoće čestica mehaničko-biološki obrađenog otpada prema drugim autorima

Lit.	Gustoća čestica otpada ρ_s [g/cm ³]	Veličina zrna [mm]	Lokacija
[11]	1,62	0-50	Lueneburgu
	1,58	0-25	Groeborn (Dresden)
	1,84	0-50	Pohlsche Heide (Minden)
	1,71	0-100	Wilsum (sjeverozapadna Njemačka)
	1,69	0-100	Wilsum (sjeverozapadna Njemačka)
	1,86	-	Brake (sjeverozapadna Njemačka)
	1,98	-	Brake (sjeverozapadna Njemačka)
	1,61	-	Mansie (sjeverozapadna Njemačka)
[12]	2,214	≤ 25	Oberpullendorf
[13]	1,59	0-30	Lahe

4 Novi veliki edometar

U sklopu znanstvenoistraživačkog projekta „Karakterizacija krutog komunalnog otpada“, na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (voditelj projekta: prof. dr. sc. Davorin Kovačić) pokrenuta je izrada velikog edometra u kojem je moguće ispitivati stišljivost mehaničko-biološki obrađenog komunalnog otpada. Pri tom je rabljena britanska norma za ispitivanje stišljivosti tla (BS 1377: Part 5: 1990) i dodatne podloge za dimenzioniranje uređaja, standard ASTM D 2435 i prednorma HRN ENV 1997-2:1999. Za tehničke specifikacije novog edometra dobivene su savjetodavne usluge varaž-

dinskih tvrtki iz područja strojarstva te industrijskog upravljanja. Tehnički zahtjevi proizvodnje i isporuke traženog uređaja objavljeni su kao sastavni dio dokumentacije za nadmetanje, no tek se u drugom raspisanom natječaju prijavila tvrtka Femis d.o.o. koja je izradila veliki edometar i radni stol s dizalicom zbog lakšeg upravljanja uzorkom (slika 7.). Pokusi u novom edometru potpuno su automatizirani pomoću upravljačke elektronike i odgovarajućega računalnog programa.



Slika 7. Novi veliki edometar na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu

Promjer nove edometarske ćelije je 500 mm, a visina 200 mm. Omjer promjera i visine uzorka je 2,5, a to je minimalni omjer koji za ove dvije veličine definira britanski standard kako bi se pri interpretaciji rezultata mogla zanemariti posmična naprezanja na kontaktu uzorka i prstena ćelije. Prsten ćelije izrađen je od visokolegiranog krom-nikal austenitnoga nehrđajućeg čelika INOX tip W.N. 1.4301. Unutrašnjost prstena obrađena je poliranjem na visoki sjaj kako bi se pojava posmičnih naprezanja na kontaktu uzorka i prstena svela na najmanju moguću mjeru.

Predviđeno je maksimalno opterećenje na uzorak od 2000 kN/m². Sila na uzorak nanosi se po kružnom vijencu (unutar gumene membrane je voda) putem računalom upravljanog hidrauličkog agregata. Mjerilo opterećenja na uzorak ima minimalnu točnost ± 0,05 % FRO.

Mjerilo pomaka ima minimalnu točnost $\pm 0,05$ % FRO i minimalni hod od 7 cm.

Donji i gornji poklopac, kao i pokretna ploča sa svim pripadajućim elementima, izrađeni su od konstrukcijskog čelika i zaštićeni od korozije. Progibi gornjeg i donjeg poklopca ne prelaze 0,7 mm po pojedinom poklopcu pri maksimalnom opterećenju.

Proizvodnja uređaja započela je u rujnu 2008. godine. Statički proračun edometarske ćelije izvela je tvrtka STA-KON d.o.o. Uređaj je dostavljen na Geotehnički fakultet početkom ožujka 2009. godine. Tijekom proizvodnje uređaja načinjena je fotodokumentacija pojedinih faza izrade.

Na slikama 8. do 14. prikazani su dijelovi uređaja prema fazama izrade.



Slika 8. Postolje ćelije velikog edometra



Slika 9. Gornji i donji poklopac velikog edometra



Slika 10. Prsten za učvršćivanje brtve



Slika 11. Hidraulički agregat



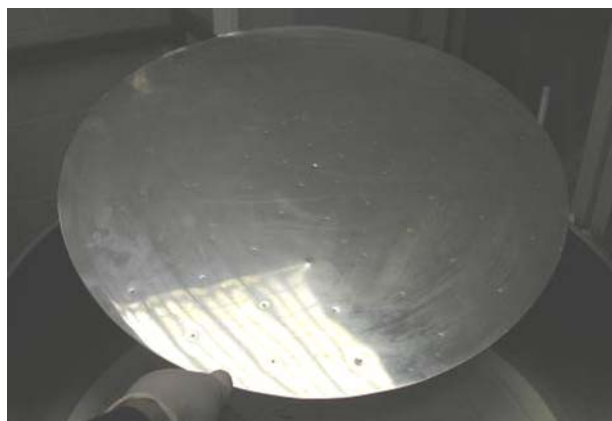
Slika 12. Pokretna ploča s vodicom



Slika 13. Prsten ćelije od nehrđajućeg čelika

Slika 15. prikazuje upravljačku elektroniku kojom se omogućuje automatizirano vođenje pokusa.

Budući da su dijelovi velikog edometra, koji imaju inovativni karakter, upućeni u postupak pravne zaštite (registracije), detaljne tehničke specifikacije uređaja ne mogu biti publicirane dok postupak pravne zaštite ne bude okončan.



Slika 14. Porozna ploča od nehrđajućeg čelika



Slika 15. Upravljačka elektronika

5 Priprema uzoraka za ispitivanje stišljivosti mehaničko-biološki obrađenog otpada

Pripremljena su tri uzorka otpada. Uzorci su pripremani tako da su za poznati obujam edometarske ćelije, poznatu gustoću čestica otpada i proračunski sadržaj vlage uzoraka od 7 %, proračunane ukupne mase potrebnog otpada i mase vode za različite sadržaje vlage uzoraka pri ugradnji (tablica 3.).

Tablica 3. Potrebne mase otpada i vode za različite sadržaje vlage uzoraka

Uzorak	Masa otpada [kg]	Masa vode [kg]	Sadržaj vlage [%]
1. uzorak	37,8	20,4	65
2. uzorak	52,3	12,1	31
3. uzorak	44,6	15,7	45

Dobivene su se mase otpada i vode postupno, u više slojeva, u posudi miješale priručnim alatom da bi se dobili što homogeniji uzorci što se tiče ravnomjerne raspodjele vlažnosti. Voda se po uzorcima raspršivala vinogradarskom prskalicom kapaciteta 5 l. Ovako pripremljeni uzorci ostavljeni su mirovati 24 sata, kako bi se voda još ravnomjernije po njima raspodijelila (slika 16.). Izgled uzorka prije ugradnje u edometarsku ćeliju prikazan je na slici 17.



Slika 16. Raspršivanje vode vinogradarskom prskalicom



Slika 17. Homogenizirani uzorak nakon 24 sata

6 Ugradnja uzoraka u edometarsku ćeliju

Zbog veličine uzoraka nije primijenjen Proctorov postupak njihova zbijanja. Prvi se pripremljeni uzorak zbijao u edometarsku ćeliju u više slojeva. Svaki se sloj nasipavao iz PVC kante kapaciteta otprilike 10 litara (slika 18.). Nasipani je materijal priručnim alatom zatim razgrnut i zbijan vlastitom težinom tijela (slika 19.) u posudom promjera oko 20 centimetara. Preostala dva uzorka ugrađena su na isti način kao i prvi uzorak, s tim da je zbijanje provedeno dinamičkim putem uz pomoć utega mase 11,2 kg (slika 20.) koji je na uzorak pao sa visine od oko 10 cm.

Ukupne gustoće i gustoće suhog otpada za ugrađene uzorke prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Ukupne gustoće (ρ) i gustoće suhog otpada (ρ_d) za ugrađene uzorke

Uzorak	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]
1. uzorak	1366	828
2. uzorak	1093	834
3. uzorak	1350	931



Slika 18 Nasipavanje novog sloja uzorka u edometarsku ćeliju



Slika 19. Zbijanje uzorka vlastitom težinom tijela

Tablica 5. Gustoće suhog otpada pri ugradnji uzoraka u razne uređaje drugih autora

Lit.	Gustoća suhog uzorka ρ_d [g/cm ³]	Veličina zrna [mm]	Ugrađeno u uređaj za mjerenje	Odlagalište	Vrsta materijala
[7]	0,59	-	stišljivosti	Legnago (I)	100 % MBO
	0,76	-			90 % MBO + 10 % šljake
	0,86	-			90 % MBO + 10 % šljake
	0,93	-			60 % MBO + 40 % šljake
	0,78	-			90 % MBO + 10 % otp. mulja
	0,76	-			60 % MBO + 40 % otp. mulja
[12]	0,71	< 25	stišljivosti	Oberpullendorf (D)	MBO
	0,54	< 12		Allerheiligen (D)	
	0,44	< 30		Allerheiligen	
[13]	0,90	0-20	posmične čvrstoće	okrug Schaumburg (D)	
	0,90	0-20			
	0,90	0-40			
	0,90	0-40			
	0,90	0-60			
	0,80	0-60			
	0,80	0-20	propusnosti	okrug Schaumburg (D)	
	0,80	0-20			
	0,80	0-20			
	0,70	0-40			
	0,70	0-40			
	0,90	0-40			
	0,80	0-60			
	0,60	0-60			
	0,90	0-60			
[15]	0,82	< 60	stišljivosti	Meisenheim (D)	
	0,63	< 100		Lueneburg (D)	
[16]	0,70	< 60	propusnosti		potpuna digestija*
	0,60	< 60			djelomična digestija*
	0,70	< 35			djelomična digestija*
	0,90	< 60			1:1 MBO + šljaka
[17]	0,62	≤ 30	propusnosti	Lahe (D)	MBO
[18]	1,10	0-20	stišljivosti	okrug Schaumburg (D)	
	1,10	0-40			
	1,20	0-60			

* Digestija je anaerobna obrada otpada pri čemu nastaje metan; potpunom se digestijom obrađuje cijeli otpad dok djelomična digestija uključuje samo frakciju otpada veličine < 40 mm [19]



Slika 20. Uteg mase 11,2 kg za dinamičko zbijanje uzorka

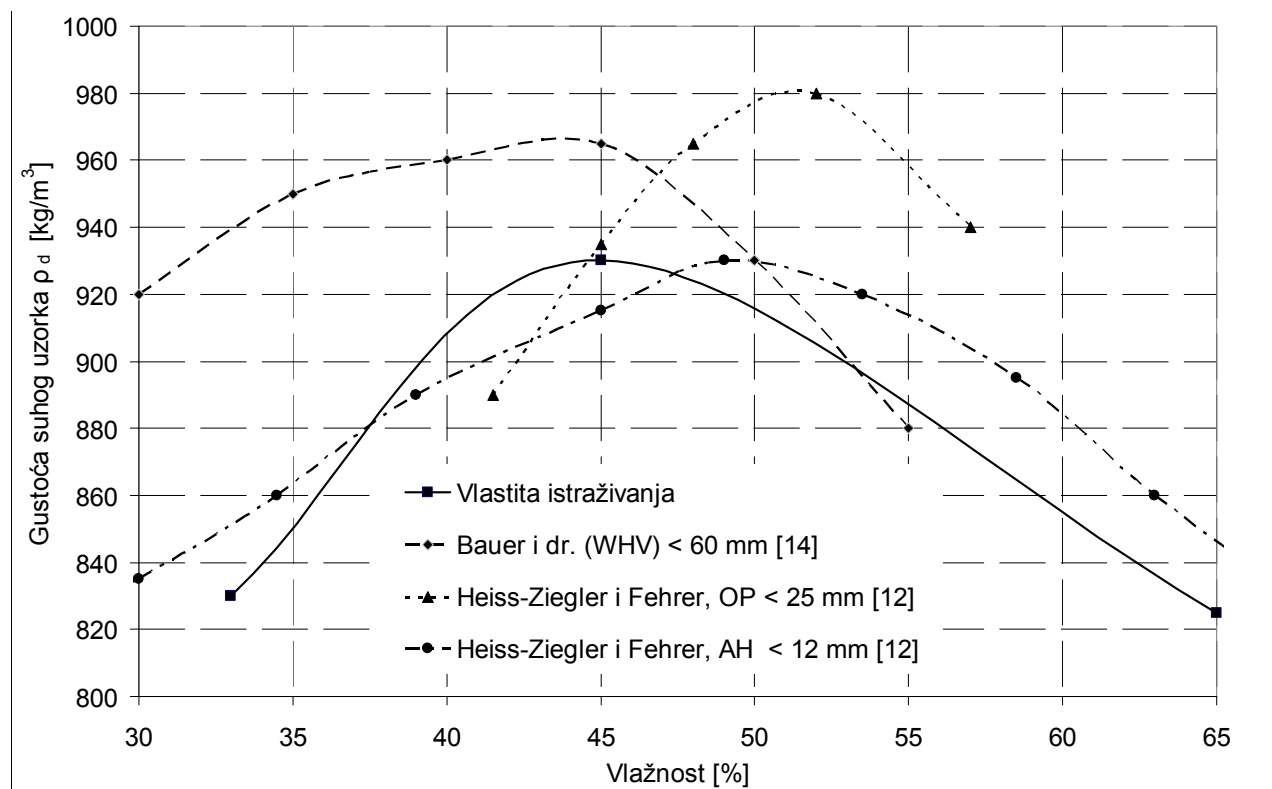
Gustoće suhog otpada ρ_d pri ugradnji uzoraka u razne laboratorijske uređaje, objavljene u literaturi, prikazane su u tablici 5. Iz ove se tablice može zaključiti da je primijenjeni postupak ugradnje triju uzoraka u edometarsku ćeliju zadovoljavajući što se tiče njihovih

gustoća u suhom stanju jer se izmjerene vrijednosti uklapaju u gornji raspon vrijednosti iz literature. Za usporedbu su, na slici 21., prikazani dijagrami odnosa sadržaja vlage uzoraka i njihovih gustoća u suhom stanju iz ovih ispitivanja, rezultati Bauera i dr. [14] i rezultati Heiss-Zieglera i Fehrera [12] za uzorke otpada zbijene Proctorovim postupkom. Vidi se da je podudarnost ovih krivulja zadovoljavajuća.

7 Zaključak

Iz prikazanih postupaka i rezultata laboratorijskih ispitivanja osnovnih geotehničkih karakteristika mehaničko-biološki obrađenog otpada može se zaključiti sljedeće:

- dobivene granulometrijske krivulje pokazale su da je MBO otpad dobro graduirani krupnozrnati materijal, kao što su pokazali i drugi autori
- iako je dobivena vrijednost gustoće čestica otpada u suglasju s rezultatima Heiss-Zieglera i Fehrera [12], preporučljivo je da se ubuduće u rezultat uključuje i vrijednost gustoće čestica otpada krupnozrnate frakcije (zrna veća od 4,75 mm) određenih, primjerice, prema normi ASTM C 127
- provjereno je da je pri ugradnji uzoraka u edometarsku ćeliju velikog promjera, čak i jednostavnim postupcima zbijanja, moguće postići gustoću suhog uzorka unutar opće prihvaćenih granica od 0,70 do 1,20 g/cm³ [14].



Slika 21. Dijagrami odnosa sadržaja vlage uzoraka i njihovih gustoća u suhom stanju

Potporna projektu

Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta „Karakterizacija krutog komunalnog otpada“ (160-0831529-3031), uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

LITERATURA

- [1] Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2007.-2015. godine NN 85/07
- [2] Koerner, R. M.; Soong, T.: *Assessment of Ten Landfill Failures Using 2-D and 3-D Stability Analysis Procedures*, 2. Österreichische geotechniktagung, Februar 1999
- [3] Izvješće o stanju okoliša Varaždinske županije, Varaždinska županija, Županijski zavod za prostorno uređenje i zaštitu okoliša, 2002.
- [4] Levačić, E.: *Osnove geokemije vode*, Geotehnički fakultet Varaždin, 1997
- [5] Bauer, J.; Münnich, K.; Fricke, K.: *Influence of Hydraulic Properties on the Stability of Landfills*, Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1-5 October 2007
- [6] Boni, M. R.; Chiavola, A.; Scaffoni, S.: *Pretreated waste landfilling: Relation between leachate characteristics and mechanical behaviour*, Waste Management, 26 (2006) 1156-1165
- [7] Carrubba, P.; Cossu, R.: *Investigation on Compressibility and Permeability of Pre-treated Waste Mixture*, Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6-10 October 2003
- [8] Doedens, H.; von Felde, D.; Cuhls, C.; Ketelsen, K.; Broeker, E.; Fehre, E.; Giebel, B.: *Wissenschaftliche Begleitung der drei großtechnischen Demonstrationsanlagen zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen in Niedersachsen*. Endbericht. Institut fuer Siedlungswasserwirtschaft u. Abfalltechnik der Universitaet Hannover, Hannover und Ingenieurbuero fuer Abfallwirtschaft und Entsorgung, Hannover., 2000
- [9] Duellmann, H.: *Untersuchungen zum Einbau von MBA-Abfällen auf der Zentraldeponie Hannover*, Laboruntersuchungen zum Verdichtungs-, Durchlaessigkeits-, Last-Setzungs- und Scherverhalten. Februar 2002. Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Hannover, 2002
- [10] ASTM D 2487-00: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- [11] Entenmann, W.; Wendt, P.: *Placement and Compaction of Treated Municipal Solid Waste in Modern Landfills – Results of Geotechnical and Hydraulic Tests and Monitoring*, Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1-5 October 2007
- [12] Heiss-Ziegler, C.; Fehrer, K.: "Geotechnical Behaviour of Mechanically-Biologically Pretreated Municipal Solid Waste (MSW)", Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6-10 October 2003
- [13] Kuehle-Weidemeier, M.: *Geomechanical properties of mechanically and biologically treated municipal solid waste – Review of literature in German language and own investigations*, Wasteconsult International, Langenhagen, Germany, 2007
- [14] Bauer, J.; Münnich, K.; Fricke, K.: *Investigation of Mechanical Properties of MBT Waste*, Proceedings of the Fourth Asian-Pacific Landfill Symposium, Shangai, China, 2006
- [15] Bidlingmaier, W.; Scheelhaase, T.; Maile, A.: *Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmuell auf der Deponie*, Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3.1 des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Universitaet Gesamthochschule Essen, Fachbereich 10 – Bauwesen, Fachgebiet Abfallwirtschaft, 1999
- [16] Friedrich, K.; Weichgrebe, D.: *Determination of Parameters for Description of Water Balance in Landfills With Stabilised Municipal Solid Wastes*, Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1-5 October 2007
- [17] Kuehle-Weidemeier, M.: *Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien fuer mechanisch – biologisch behandelte Siedlungsabfaelle*, Veroeffentlichungen des Institutes fuer Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universitaet Hannover, Band 127. ISBN 3-921421-57-8, 2004
- [18] Langer, U.: *Untersuchung der Scherfestigkeit, Kompressibilität und Durchlaessigkeit von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall*, Studienarbeit, IGBE, Universitaet Hannover, 2001
- [19] Kuehle – Weidemeier, M.: *Mehaničko-biološka obrada (MBO) komunalnog krutog otpada kao učinkovit način smanjenja unosa organske tvari na odlagališta*, VIII. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom, Zagreb, 17-19 studeni 2004