

UTJECAJ PROMJENE VLAŽNOSTI NA PARAMETRE STIŠLJIVOSTI METANOGENE FRAKCIJE BIOOSUŠENOGA OTPADA

Kaniški, Nikola

Doctoral thesis / Disertacija

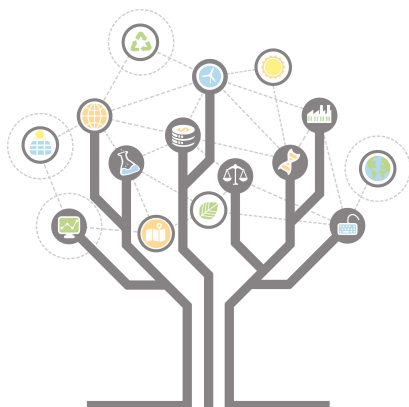
2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:186322>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)





Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Nikola Kaniški

**UTJECAJ PROMJENE VLAŽNOSTI NA
PARAMETRE STIŠLJIVOSTI
METANOGENE FRAKCIJE
BIOOSUŠENOGA OTPADA**

DOKTORSKI RAD

Varaždin, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Nikola Kaniški

**UTJECAJ PROMJENE VLAŽNOSTI NA
PARAMETRE STIŠLJIVOSTI
METANOGENE FRAKCIJE
BIOOSUŠENOGA OTPADA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Varaždin, 2023.



University of Zagreb

Faculty of Geotechnical Engineering

Nikola Kaniški

**INFLUENCE OF HUMIDITY CHANGE ON
COMPRESSIBILITY PARAMETERS OF
METHANOGENIC FRACTION OF
BIODRIED WASTE**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Associate Professor Igor Petrović

Varaždin, 2023.

Mentor rada: izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Izv.prof.dr.sc. Boris Kavur
2. Doc.dr.sc. Mario Gazdek
3. Izv.prof.dr.sc. Dubravko Domitrović

Zahvala:

Ovim doktorskim radom završava se jedan kratak i intenzivan put u mom životu. Htio bih zahvaliti svima koji su mi pomogli u ostvarenju ovog cilja.

Posebne zahvale idu izv.prof.dr.sc. Igoru Petroviću koji me vodio i usmjeravao još od vremena izrade diplomskog rada. Veliko hvala na pruženoj prilici i zaposlenju na Uspostavnom istraživačkom projektu Hrvatske zaklade za znanost. Hvala na brojnim savjetima i strpljenju koje je iskazivao tijekom mog studija. Izrada ovog rada potrebnog za stjecanje stupnja doktora znanosti bila bi nemoguća bez vaše pomoći.

Profesoru Erichu Baueru s Tehničkog Sveučilišta u Grazu koji je svojim bogatim iskustvom i savjetima pridonio provedbi edometarskih pokusa te interpretaciji rezultata.

Doc.dr.sc. Ivanu Hipu koji je svojim znanjem i savjetima u interpretaciji rezultata laboratorijskih istraživanja obogatio ovu disertaciju.

Hrvatskoj zakladi za znanost koja je financirala Uspostavni istraživački projekt UIP-05-2017-5157 pod nazivom: „Ispitivanje i modeliranje mehaničkog ponašanja bioosušenog otpada kao preduvjet energetske uporabe“ u sklopu koje je izrađena ova doktorska disertacija.

Svim kolegama i djelatnicima Geotehničkog fakulteta koji su mi na bilo koji način pomogli na putu do izrade doktorske disertacije, a posebno izv.prof.dr.sc. Borisu Kavuru na brojnim korisnim savjetima i iskustvu koje je podijelio s autorom ove disertacije.

Veliko hvala mojim roditeljima koji su najveća potpora od početka mog obrazovanja još od osnovne škole i bez kojih ne bih bio na mjestu gdje sam danas. Naučili ste me da je uz trud i zalaganje sve moguće, što ću naučiti i svoju djecu.

Najljepše zahvaljujem svojoj supruzi Ivani. Moja velika i bezuvjetna podrška.

Uz naše kćeri Emu, Miju i Anu niti jedan put nije težak.

Najljepša Hvala svima!

SAŽETAK

Planom gospodarenja otpadom od 2017.-2022. godine, centar za gospodarenje otpadom definiran je kao građevina od državnog značaja kojom se Republika Hrvatska (dalje u tekstu RH) približava odredbama Direktive o otpadu (2008/98/EZ). Do danas, u RH postoje dva Županijska centra za gospodarenje otpadom koji otpad obrađuju mehaničkim i biološkim postupcima, i koji kao jedan od izlaznih tokova otpada imaju takozvanu metanogenu frakciju pogodnu za odlaganje na bioreaktorsko odlagalište. Bioreaktorsko odlagalište podrazumijeva nakon popunjenja kapaciteta odlagališnog prostora, vlaženje ugrađenog otpadnog materijala te recirkulaciju procjednih voda (tzv. filtrata) s ciljem poticanja mikrobiološke razgradnje organske komponente otpada i proizvodnje bioplina. Očito, s geotehničkog aspekta projektiranje bioreaktorskih odlagališta predstavlja kompleksan problem.

Za pravilno projektiranje i upravljanje bioreaktorskim odlagalištem neophodni su eksperimentalni podaci o geotehničkim parametrima metanogene frakcije otpada. Iz tog razloga, u okviru ove doktorske disertacije, provedeno je opsežno laboratorijsko ispitivanje geotehničkih parametara metanogene frakcije otpada. Budući da je istraživanje provedeno na materijalu proizvedenom u Županijskom centru za gospodarenje otpadom Marišćina koje se nalazi na području Primorsko-goranske županije, zbog mogućeg utjecaja turističke sezone ispitani materijal uzorkovan je izvan i unutar turističke sezone godine. Ispitivanja na materijalu uzorkovanom izvan turističke sezone (materijal A) i unutar turističke sezone (materijal B) napravljena su odvojeno kako bi se ispitao utjecaj sezonskih varijacija na sastav i mehaničke parametre otpadnog materijala.

U prvom redu određene su osnovne karakteristike i osnovni geotehnički parametri otpada: prosječni sastav ispitivanog otpada po pojedinim komponentama, sastav otpada prema obliku podijeljen na 0D, 1D, 2D i 3D veličine čestica, granulometrijska analiza, utvrđen je udio organske tvari, i udio vlage. Dobiveni rezultati ovih ispitivanja, poslužili su za preliminarnu procjenu karakteristika ispitivanog materijala. Utvrđeno je da je maksimalna veličina zrna u više od 90% ispitivanog materijala manja od 25 mm, kao i da se granulometrijske krivulje dobro uklapaju u istovrsne rezultate drugih istraživača. Visok udio organske tvari, više od 50% za materijal A i B, sugerira velik potencijal za proizvodnju bioplina. Utvrđeni zatečeni udio vlažnosti nakon procesa obrade bio je manji od 20% (u odnosu na ukupnu masu), što ga čini pogodnim za odlaganje na bioreaktorsko odlagalište zbog smanjene mikrobiološke aktivnosti.

Budući da se u bioreaktorskom odlagalištu očekuje pojava većih slijeganja, mogućnost njegovog predviđanja podrazumijeva točno poznavanje gustoće čvrstih čestica ρ_s , neophodne veličine za utvrđivanje početnog koeficijenta pora e_0 . Iz tog razloga mjerena je gustoća čvrstih čestica metanogene frakcije ρ_s , uz pomoć plinskog piknometra sastavljenog isključivo od laboratorijskih uređaja koji se tipično nalaze u geotehničkim laboratorijima. Gustoća čvrstih čestica jedno je od osnovnih svojstava materijala te se vrlo često koristi u projektnim izračunima i za predviđanje mehaničkog ponašanja materijala. Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica uspoređeni su s nekoliko parametara kao što su koeficijent pora, poroznost, suha gustoća te je utvrđena njihova međusobna ovisnost. Osim plinskim piknometrom, gustoća čvrstih čestica utvrđena je i uz pomoć velikog vodenog piknometra te su rezultati mjerenja uspoređeni međusobno te s rezultatima objavljenim u literaturi. Metoda mjerenja gustoće čvrstih čestica plinskim piknometrom pokazala se kao lako dostupno, isplativo i brzo rješenje. Budući da je metoda nedestruktivna, ispitani uzorci mogu se sačuvati za daljnje analize.

Ugradnjom metanogene frakcije u tijelo bioreaktorskog odlagališta u suhom stanju i kasnijim vlaženjem, potrebno je poznavati ovisnost suhe gustoće ρ_d o vlažnosti materijala. Za tu potrebu, ispitana je mogućnost zbijanja metanogene frakcije vibro pločom te standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom u suhom i vlažnom stanju materijala. Ispitivanjima je utvrđeno kako se procesom zbijanja materijala utegom pri određenoj energiji zbijanja, povećanjem sadržaja vlage do određene granice suha gustoća materijala ρ_d povećava do svoje maksimalne vrijednosti $\rho_{d,max}$, nakon čega se daljnjim povećanjem vlažnosti, vrijednost suhe gustoće smanjuje, neovisno o primijenjenoj metodi ispitivanja. Također su za oba materijala utvrđene i vrijednosti optimalne vlažnosti w_{opt} kod koje se postiže maksimalna suha gustoća $\rho_{d,max}$. Osim maksimalne suhe gustoće, na materijalu A utvrđena je i minimalna suha gustoća $\rho_{d,min}$ laganim nasipavanjem materijala u kalup standardnog volumena pod atmosferskim tlakom. Nadalje, određeni su i pripadni koeficijenti pora, odnosno kod minimalne suhe gustoće $\rho_{d,min}$ izračunat je maksimalan koeficijent pora e_{max} , dok je kod maksimalne suhe gustoće $\rho_{d,max}$ izračunat pripadni minimalni koeficijent pora e_{min} čime je utvrđen mogući raspon zbijenosti razmatranog materijala.

U funkcionalnom bioreaktorskom odlagalištu, uslijed vlaženja otpada povećava se zapreminska težina otpada, dok se efektivna naprezanja smanjuju. U odnosu na način ugradnje metanogene frakcije u tijelo odlagališta, kao i na očekivana slijeganja nakon vlaženja materijala, za kvalitetno

upravljanje bioreaktorskim odlagalištem potrebno je poznavati svojstva stišljivosti metanogene frakcije u suhim i vlažnim uvjetima. U tu svrhu, proveden je edometarski pokus za nekoliko stanja materijala: za suho stanje, za vlažno stanje, za inicijalno suho stanje do određenog naprezanja, nakon čega je materijalu promijenjena vlažnost te je proveden dugotrajni edometarski pokus u kojem su mjerena slijeganja uzrokovana biorazgradnjom, uz kontinuirano praćenje temperature uzorka te postotnih udjela nastalih odlagališnih plinova u uzorku.

Rezultatima edometarskog pokusa utvrđeni su parametri stišljivosti, određena je relativna deformacija materijala u svakom od navedenih stanja te je potvrđeno kolapsibilno ponašanje metanogene frakcije bioosušenoga otpada.

Ključne riječi: MBO, gustoća čvrstih čestica, zbijenost otpada, kolapsibilno ponašanje, stišljivost MBO otpada

PROŠIRENI SAŽETAK NA ENGLESKOM JEZIKU

The waste management center was according to the waste management plan from 2017-2022 year, defined as a building of national importance, which brings the Republic of Croatia (hereinafter referred to as the RC) closer to the regulations of the Waste Directive (2008/98/EZ). To date, there are two County Waste Management Centers in the RC that process waste using mechanical and biological processes, and which, as one of the waste streams, have a so-called methanogenic fraction suitable for disposal at a bioreactor landfill.

A bioreactor landfill implies, after filling the capacity of the landfill space, moistening the embedded waste material and recirculating leachate (the so-called filtrate) with the aim of encouraging the microbiological decomposition of the organic component of the waste and the production of biogas. Obviously, from a geotechnical point of view, the design of bioreactor landfills is a complex problem.

Experimental data on the geotechnical parameters of the methanogenic waste fraction are necessary for the proper design and management of a bioreactor landfill. For this reason, as part of this doctoral dissertation, an extensive laboratory test of the geotechnical parameters of the methanogenic waste fraction was conducted. Since the research was conducted on material produced in the County Waste Management Center Marišćina, which is located in the Primorje-Gorski Kotar County, due to the possible impact of the tourist season, the examined material was sampled outside and inside the tourist season. Tests on material sampled outside the tourist season (material A) and inside the tourist season (material B) were done separately to examine the influence of seasonal variations on the composition and mechanical parameters of the waste material.

In the first place, the basic characteristics and basic geotechnical parameters of the waste were determined: the average composition of the examined waste by individual components, the composition of the waste according to the particle sizes 0D, 1D, 2D and 3D, granulometric analysis, the organic matter content and the moisture content were determined. The obtained results of these tests served for a preliminary assessment of the characteristics of the tested material. It was found that the maximum grain size in more than 90% of the examined material is less than 25 mm, and that the granulometric curves fit well with similar results of other researchers. The high proportion of organic matter, more than 50% for material A and B, suggests a great potential for biogas

production. The moisture content found after the treatment process was less than 20% (relative to the total mass), which makes it suitable for disposal in a bioreactor landfill due to reduced microbiological activity.

Since larger settlements are expected in the bioreactor landfill, the possibility of its prediction implies accurate knowledge of the density of solid particles ρ_s , the necessary parameter for determining the initial void ratio e_0 . For this reason, the solid particle density of the methanogenic fraction ρ_s was measured, with the help of a gas pycnometer composed exclusively of laboratory devices that are typically found in geotechnical laboratories. The solid particles density is one of the basic properties of materials and is very often used in design calculations and for predicting the mechanical behavior of materials. The solid particle density results were compared with several parameters such as the void ratio, porosity, dry density, and their mutual dependence was established. In addition to the gas pycnometer, the solid particle density was also determined with the help of a large water pycnometer, and the results were mutually compared and with the results published in the literature. The method of measuring the solid particle density with a gas pycnometer proved to be an easily accessible, cost-effective and quick solution. Since the method is non-destructive, the tested samples can be saved for further analyses.

By installing the methanogenic fraction into the bioreactor landfill body in a dry state and subsequent wetting, it is necessary to know the dependence of the dry density ρ_d on the moisture content of the material. For this purpose, the possibility of compacting the methanogenic fraction with a vibro plate and standard and modified Proctor's test in dry and wet state of the material was tested. Tests have established that by increasing the moisture content to a certain limit, the dry density of the material ρ_d increases to its maximum value $\rho_{d,max}$, after which, with a further increase in moisture, the value of the dry density decreases, regardless of the applied test method. Also, for both materials, the values of the optimal moisture content w_{opt} , at which the maximum dry density $\rho_{d,max}$ is achieved, were determined. In addition to the maximum dry density, the minimum dry density $\rho_{d,min}$ was determined on material A by pouring the material into a mold of standard volume under atmospheric pressure. Furthermore, the corresponding void ratios were determined, i.e., at the minimum dry density $\rho_{d,min}$ the maximum void ratio e_{max} was calculated, while at the maximum dry density $\rho_{d,max}$ the corresponding minimum void ratio e_{min} which determined the possible compaction range of the considered material.

In a functional bioreactor landfill, as a result of wetting the waste, the unit weight of the waste increases, while the effective stresses decrease. In relation to the method of installing the methanogenic fraction into the landfill body, as well as the expected settlement after wetting the material, for quality management of the bioreactor landfill it is necessary to know the compressibility properties of the methanogenic fraction in dry and wet conditions. For this purpose, an oedometer experiment was carried out for several states of the material: for a dry state, for a wet state, for an initially dry state up to a certain stress, after which the material's moisture was changed and a long-term oedometer experiment was carried out in which the settlements caused by biodegradation were measured, with continuous monitoring of the temperature of the sample and the percentage of landfill gases generated. The oedometer test results determined the compressibility parameters, relative deformation of the material in each of the mentioned states and confirmed the collapsible behavior of the methanogenic fraction of biodried waste.

Key words: MBT, solid particle density, waste compaction, collapsible behavior, compressibility of MBT waste

SADRŽAJ

1) UVOD	1
1.1 Definicija problema	2
1.2 Cilj istraživanja	3
1.3 Izvorni doprinos doktorskog rada	4
1.4 Obuhvat pregleda literature	4
1.5 Tehnologija obrade otpada u ŽCGO Mariščina	7
1.5.1 Bioreaktorsko odlagalište	11
1.6 Eksperimentalni dio	14
1.7 Uzorkovanje	16
1.8 Pregled poglavlja	18
2) OSNOVNE KARAKTERISTIKE I OSNOVNI GEOTEHNIČKI PARAMETRI ISPITIVANOG OTPADA	19
2.1 Sažetak poglavlja	19
2.2 Uvod	20
2.3 Teorijska podloga	20
2.3.1 Utvrđivanje granulometrijske krivulje	20
2.3.2 Definicija udjela organske tvari	21
2.3.3 Definicija udjela sadržaja vlage	21
2.3.4 Postupak utvrđivanja sastava otpada po komponentama	22
2.3.5 Postupak utvrđivanja sastava otpada prema obliku čestica	22
2.4 Pregled dosadašnjih istraživanja	23
2.4.1 Granulometrijske krivulje utvrđene na BMO/MBO otpadu	23
2.4.2 Utvrđeni udjeli organske tvari i udjeli vlage na uzorcima BMO/MBO otpada	28
2.4.3 Utvrđeni sastavi BMO/MBO otpada	30
2.4.4 Utvrđeni sastavi prema obliku čestica otpada	34
2.5 Materijal i metode za utvrđivanje osnovnih karakteristika i geotehničkih parametara BMO otpada korišteni u ovoj disertaciji	36
2.5.1 Postupak utvrđivanja granulometrijskog sastava otpada	36
2.5.2 Postupak utvrđivanja udjela organske tvari	37
2.5.3 Postupak određivanja udjela vlage	40
2.5.4 Postupak utvrđivanja sastava otpada	41
2.5.5 Postupak razvrstavanja otpada prema obliku čestica	43
2.6 Rezultati i rasprava	44
2.6.1 Utvrđeni granulometrijski sastav ispitivanog otpada	44
2.6.2 Utvrđeni udio organske tvari	46
2.6.3 Utvrđeni udio vlage	47
2.6.4 Utvrđeni sastav otpada	48
2.6.5 Utvrđena raspodjela otpada prema obliku čestica	52
2.7 Zaključak	60
2.8 Popis literature	62
3) GUSTOĆA ČESTICA OTPADA	65
3.1 Sažetak poglavlja	65
3.2 Uvod	66
3.3 Teorijska podloga	66
3.4 Pregled dosadašnjih istraživanja	68
3.4.1 Gustoća čvrstih čestica	68
3.4.2 Plinski i vodeni piknometar	78

3.5	Materijal i metode za utvrđivanje gustoće čestica otpada korišteni u ovoj disertaciji	79
3.5.1	Plinski piknometar	80
3.5.2	Vodeni piknometar	89
3.6	Rezultati i rasprava	92
3.6.1	Usporedba statističkih pokazatelja gustoće čestica otpada izmjerene plinskim i vodenim piknometrom	92
3.6.2	Direktna usporedba gustoće čestica otpada izmjerene plinskim i vodenim piknometrom ..	97
3.6.3	Gustoća čestica individualnih komponenata ispitivanog otpada i prosječna gustoća čestica otpada određena pomoću gustoća čestica individualnih komponenata	99
3.6.4	Korelacija suhe gustoće ρ_d i poroznosti n prirodnih i drobljenih uzoraka	103
3.6.5	Korelacija suhe gustoće ρ_d i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s	109
3.7	Zaključak	115
3.8	Popis literature	117
4)	ZBIJANJE OTPADA	123
4.1	Sažetak poglavlja	123
4.2	Uvod	124
4.3	Teorijska podloga	125
4.3.1	Minimalna $\rho_{d,min}$ i maksimalna $\rho_{d,max}$ suha gustoća	125
4.4	Pregled dosadašnjih istraživanja	126
4.4.1	Minimalna i maksimalna suha gustoća otpada u suhom stanju	126
4.4.2	Funkcijski odnos suhe gustoće otpada i vlažnosti	126
4.5	Materijal i metode za određivanje minimalne i maksimalne suhe gustoće otpada u suhom stanju te funkcionalnog odnosa između suhe gustoće i vlažnosti korišteni u ovoj disertaciji	140
4.5.1	Vibracijski (vibro) stol	141
4.5.2	Proctorov pokus	145
4.6	Rezultati	148
4.6.1	Vibro stol	148
4.6.2	Proctorov pokus	153
4.7	Rasprava	156
4.7.1	Vibrirajući stol	156
4.7.2	Proctorov pokus	157
4.7.3	Usporedba s rezultatima drugih istraživača	159
4.8	Zaključak	162
4.9	Popis literature	164
5)	KOLAPSIBILNO PONAŠANJE BMO OTPADA	168
5.1	Sažetak poglavlja	168
5.2	Uvod	169
5.3	Teorijska podloga	170
5.4	Pregled dosadašnjih istraživanja	178
5.4.1	Parametri stišljivosti neobrađenog otpada	178
5.4.2	Parametri stišljivosti obrađenog otpada	191
5.5	Materijal i metode	197
5.6	Rezultati	208
5.6.1	Modificirani indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C'_c , C'_α , $C'_{\alpha B}$	214
5.6.2	Indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C_c , C_α , $C_{\alpha B}$	220
5.6.3	Modul stišljivosti M_v	222
5.6.4	Odlagališni plinovi	222

5.7	Rasprava.....	225
5.7.1	Modificirani indeksi inicijalne i sekundarne kompresije $C'_c, C'_\alpha, C'_{\alpha B}$	228
5.7.2	Indeksi inicijalne i sekundarne kompresije $C_c, C_\alpha, C_{\alpha B}$	230
5.7.3	Modul stišljivosti M_ν	232
5.8	Zaključak.....	233
5.9	Popis literature.....	236
6)	ZAKLJUČAK	244
7)	Preporuke za daljnja istraživanja	249
8)	PRILOZI	251
9)	ŽIVOTOPIS I POPIS OBJAVLJENIH RADOVA	258
10)	POPIS TABLICA	262
11)	POPIS SLIKA	265

1) UVOD

Prema Strategiji gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 130/05) (dalje u tekstu: Strategija), gospodarenje otpadom najveći je pojedinačni problem zaštite okoliša u Hrvatskoj. Iz tog razloga, najvažnije zadaće Hrvatske u sektoru gospodarenja otpadom su u kratkoročnom smislu primjenjivati Plan gospodarenja otpadom i u srednjoročnom smislu povećati ulaganja u infrastrukturu, s osobitim naglaskom na skupljanje i obradu otpadnih voda, vodoopskrbu i gospodarenje otpadom. Iako je Planom gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2007.-2015. godine (NN 85/07, 126/10 i 31/11) predviđena izgradnja 13 centara za gospodarenje otpadom (dalje u tekstu: CGO), prema novom Planu gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017.-2022. godine (NN 3/17, 1/22) do sada su javnim sredstvima izgrađena dva centra za gospodarenje otpadom s tehnologijom biološko-mehaničke obrade (dalje u tekstu: BMO) i to: ŽCGO Kaštijun u Puli u Istarskoj županiji i ŽCGO Marišćina (Marčelji, općina Viškovo, Rijeka) u Primorsko-goranskoj županiji te jedan centar za gospodarenje otpadom s tehnologijom mehaničko-biološke obrade (dalje u tekstu: MBO) i to ŽCGO Bikarac (Šibenik) u Šibensko-kninskoj županiji. Prema saznanjima autora trenutno je u postupku izgradnje i ŽCGO Biljane Donje u Zadarskoj županiji.

Vrlo često u primjeni, i široko prihvaćeni biološki proces obrade otpada u postrojenjima za obradu otpada, je proces biostabilizacije (tzv. kompostiranje). U takvim postrojenjima, glavni cilj je dobivanje inertnog toka otpada čije bi se daljnje fizikalne, biološke ili kemijske promjene bile svedene na minimum. To se postiže u prvom redu mehaničkom obradom otpada i razvrstavanjem. Nerazvrstani dio materijala podvrgava se procesu biostabilizacije čime se razgrađuju gotovo sve organske komponente u otpadu. Nakon biostabilizacije, otpad se odlaže na odlagalište potkategorije 2 sukladno Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada, NN [114/15](#), [103/18](#), [56/19](#).

Drugi način obrade koji u posljednjem desetljeću privlači sve veću pozornost i koji se primjenjuje u do sada izgrađenim ŽCGO u Republici Hrvatskoj je proces sušenja otpada (tzv. biosušenje). U takvim postrojenjima, otpadni materijal se podvrgava prisilnoj aeraciji koja

potiče mikrobiološku aktivnost i porast temperature uslijed čega dolazi do sušenja otpada evaporacijom. Suprotno procesu biostabilizacije, u procesu biosušenja glavni je cilj uklanjanje sadržaja vode u vrlo visokom postotku kako bi se smanjila njegova adhezivnost i povećala ogrjevnost vrijednost. Tako osušeni materijal naknadno se podvrgava mehaničkom razvrstavanju materijala te se kao jedan od konačnih tokova otpada dobiva i takozvana metanogena frakcija. Dobivena frakcija sadrži značajnu količinu organske tvari i potencijal za daljnju energetska oporabu što je čini pogodnom za odlaganje na odlagalište potkategorije 1 - bioreaktorsko odlagalište (vidi Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada, NN [114/15](#), [103/18](#), [56/19](#)). U bioreaktorskim odlagalištima ponovno se povećava vlažnost bioosušenog otpadnog materijala čime se stvaraju povoljni okolišni uvjeti za bržu mikrobiološku razgradnju s ciljem proizvodnje bioplina. (Reinhart i Townsend, 1998.; Qian, 2001; Cossu & Stegman, 2019)

Budući da čvrsti komunalni otpad nakon biološke i mehaničke obrade mijenja svoja svojstva, mehanički parametri neobrađenog komunalnog otpada nisu direktno primjenjivi na BMO otpad. Nadalje, uslijed recirkulacije i porasta razine procjedne vode u bioreaktorskom odlagalištu povećava se zapreminska težina odloženog materijala, dok se istovremeno efektivna naprezanja smanjuju. Metanogena frakcija odložena u bioreaktorsko odlagalište može biti popraćena i učincima kolapsibilnog ponašanja, što je svojstvo materijala da se uslijed povećanja vlažnosti pri konstantom vertikalnom naprežanju pojavljuju dodatne deformacije/slijeganja.

1.1 Definicija problema

Kontrola recirkulacije vode kroz tijelo bioreaktorskog odlagališta postaje vrlo zahtjevan zadatak za operatere odlagališta, stoga je poznavanje osnovnih geotehničkih karakteristika kao što su gustoća čvrstih čestica, optimalna zbijenost i vlažnost, koeficijent pora, kao i poznavanje kompresibilnog ponašanja metanogene frakcije dobivene procesom biosušenja u BMO postrojenju od velike važnosti za inženjere i projektante bioreaktorskih odlagališta.

Trenutno u Republici Hrvatskoj postoje dva funkcionalna postrojenja izgrađena financijskim sredstvima Europske unije za BMO otpada s tehnološkim procesom obrade čiji je izlazni

proizvod pogodan za odlaganje na bioreaktorsko odlagalište. To su Županijski centri za gospodarenje otpadom (dalje u tekstu: ŽCGO) Marišćina i Kaštijun. Rezultati ove doktorske disertacije omogućit će racionalniji pristup u projektiranju novih bioreaktorskih odlagališta otpada, poboljšanje rada postojećih, kao i možebitnu nadopunu Strategije.

1.2 Cilj istraživanja

Nakon postizanja pune projektirane visine bioreaktorskog odlagališta započinje proces recirkulacije procjedne vode s ciljem proizvodnje bioplina. Cilj ovog istraživanja je utvrditi funkcionalni odnos između vertikalnih naprezanja i deformacija metanogene frakcije bioosušenog otpada odloženog na bioreaktorsko odlagalište, kao i devijacije tog odnosa uzrokovane promjenom udjela vlage. Rezultati ovog istraživanja omogućit će učinkovito projektiranje bioreaktorskih odlagališta. Budući da se porastom vlažnosti odloženog materijala očekuje povećanje stišljivosti, odnosno pojava tzv. kolapsibilnog ponašanja materijala, posljedično se na bioreaktorskom odlagalištu očekuje pojava većih slijeganja i smanjenje poroznosti odloženog otpadnog materijala što direktno utječe na rad odlagališta. Iz tog razloga, u ovom radu provedena istraživanja podijeljena su u četiri grupe:

1. utvrđivanje osnovnih geotehničkih parametara,
2. prilagodba standardne geotehničke opreme u funkcionalni plinski piknometar te određivanje gustoće čvrstih čestica metanogene frakcije u plinskom i velikom vodenom piknometru,
3. određivanje funkcijskog odnosa suhe gustoće ρ_d o vlažnosti metanogene frakcije ispitivanjima u standardnom i modificiranom Proctorovom pokusu te ispitivanjima na vibracijskom stolu, i
4. provođenje više pokusa stišljivosti pri različitim vlažnostima u nestandardnom edometru promjera 15 cm.

Izučavanje ovih fenomena dat će nove spoznaje koje će omogućiti pouzdanije projektiranje bioreaktorskih odlagališta s ciljem učinkovitije energetske oporabe odloženog otpada.

1.3 Izvorni doprinos doktorskog rada

Izvorni doprinos ove doktorske disertacije očituje se kroz slijedeća četiri koraka:

- pomoću standardne laboratorijske opreme za geomehanička ispitivanja utvrđena je gustoća čvrstih čestica otpada (ρ_s) oponašanjem principa rada plinskog piknometra,
- na temelju ispitivanja promjene stišljivosti metanogene frakcije bioosušenoga otpada uzrokovane porastom vlažnosti materijala definirani su optimalni rasponi projektnih parametara bioreaktorskog odlagališta,
- višestrukim izvođenjem pojedinih pokusa utvrđen je utjecaj nehomogenosti uzorka na mehaničko ponašanje bioosušenoga otpada,
- ova doktorska disertacija govori o sveobuhvatnim geotehničkim karakteristikama bioosušenoga otpada nakon biološko-mehaničke obrade i predstavlja vrijedan skup podataka koji mogu poslužiti u projektiranju odlagališta za takvu vrstu otpada kao i za nadopunu Strategije gospodarenja otpadom RH.

1.4 Obuhvat pregleda literature

Pregledom literature ustanovljen je najnoviji stupanj dostignuća iz područja mehaničkog ponašanja BMO/MBO otpada. Pregledom literature obuhvaćen je period od proteklih 30 godina. Pregledane su inozemne baze podataka iz područja tehničkih znanosti (www.online-baze.hr), zatim baze [Hrčak](#) i [CROSBI](#) te zbornici radova i stručna literatura iz predmetnog područja. Domaćim bazama podataka pristupa se putem [Hrvatskog znanstvenog portala](#) koji objedinjuje informacije o hrvatskim znanstvenicima, njihovim radovima i znanstvenim projektima te informacije o znanstvenim i stručnim časopisima.

Pretražena je dostupna literatura objavljena na engleskom i hrvatskom jeziku.

Pregledane inozemne baze podataka:

- [Academic Search Complete](#),
- [ProQuest Dissertations & Theses Global \(PQDT\)](#),

- [ScienceDirect](#),
- [Scopus](#),
- [Springer](#),
- [Web of Science \(WOS\)](#),
- [Wiley Online Library](#),
- [Current Contents Connect](#).

Pregledane akademske mreže za znanstvenike i istraživače:

- [ResearchGate](#),
- [Google Scholar](#).

Pregledane domaće baze podataka:

- [Hrvatska znanstvena bibliografija \(CROSBİ\)](#),
- [Portal znanstvenih i stručnih časopisa Republike Hrvatske \(Hrčak\)](#).

Pregledane knjige:

- Cossu and Stegmann, Solid Waste Landfilling: concepts, processes, technologies, Elsevier, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02435-0>,
- Sustainable landfilling, Edited by Cossu R., Sloot H. v.d., IWWG International Waste Working Group 2014.

Pregledani zbornici radova:

- 13th, 14th, 15th, 16th, 17th, 18th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Italy; 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021,
- 4th, 5th, 6th, 7th, 8th International symposium on energy from biomass and waste, Venice, Italy; 2012, 2014, 2016, 2018, 2020,
- 8th International Congress on Environmental Geotechnics Vol. 1, 2 & 3 (2019), Editors Liangtong Zhan, Yunmin Chen, Abdelmalek Bouazza.

Upotrijebljene ključne riječi tijekom pretrage:

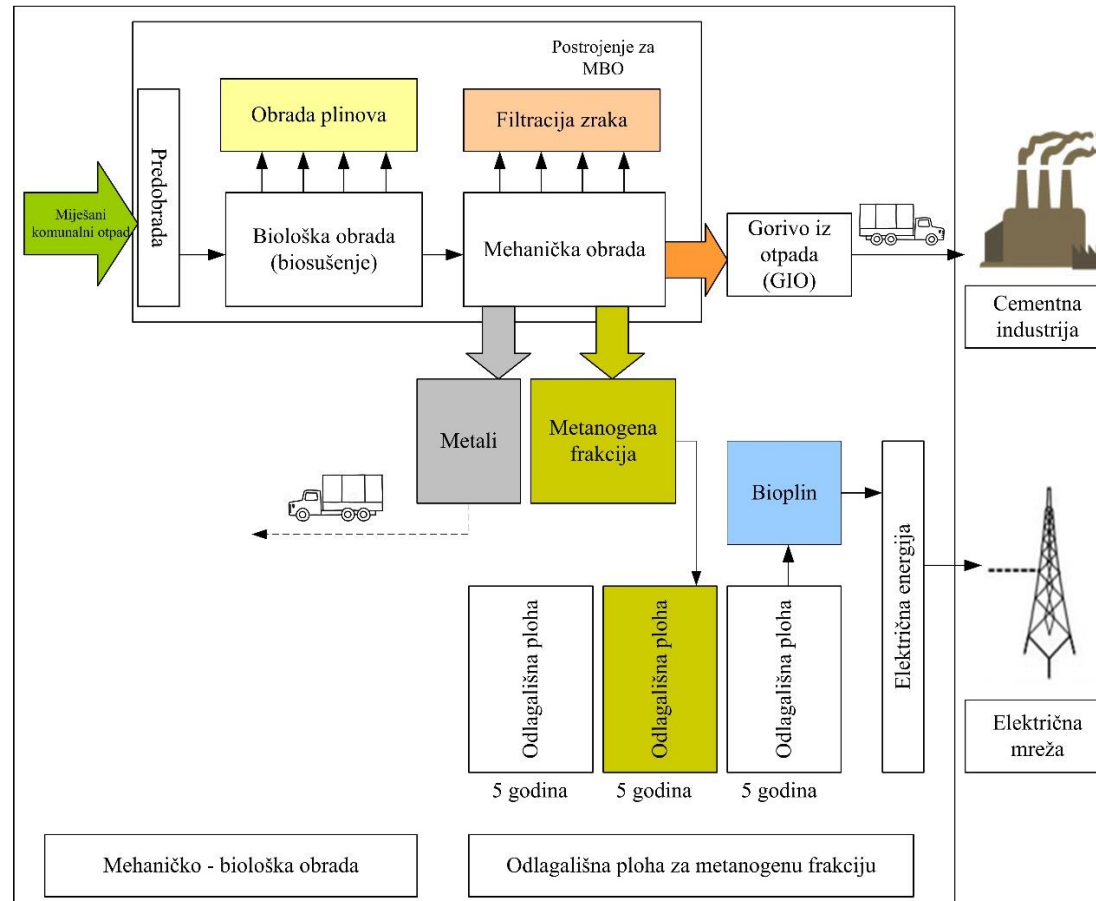
- bioreactor landfill,

- MBT waste,
- pretreated waste,
- settlement,
- waste mechanics,
- oedometer test,
- solid particle density of waste,
- compressibility of waste.

Kako bi se osiguralo kontinuirano pretraživanje literature kreirane su tzv. „e-mail“ obavijesti na online bazama iz područja mehanike otpada. Na temelju spomenutih ključnih riječi, automatski su se dobivale obavijesti o najrecentnijim radovima iz pretraživanog područja čime je osiguran kontinuitet u praćenju objave najnovijih radova.

1.5 Tehnologija obrade otpada u ŽCGO Marišćina

ŽCGO Mariščina je postrojenje za obradu otpada, u kojem se prihvća i obrađuje čvrsti komunalni otpad. Na Slici 1 prikazan je dijagram toka otpada koji se odvija u postrojenju.



Slika 1. Dijagram toka miješanog komunalnog otpada u ŽCGO Marišćina (Prilagođeno i preuzeto iz: Ekoplus d.o.o., 2010)

Vozila s otpadom, kamioni tegljači i kamioni smećari, na ulazu u ŽCGO važu se na mosnoj vagi, otpad se vizualno pregledava te se provjeravaju dokumenti i popratna dokumentacija pojedine vrste otpada prema navedenim ključnim brojevima iz kataloga otpada. Nakon toga, vozila se usmjeravaju prema prihvatnoj jami postrojenja koja ima 6 istovarnih mjesta. U prihvatnoj jami se otpad privremeno skladišti do trenutka upućivanja u proces biološke i mehaničke obrade.

Budući da je cijelo postrojenje projektirano na godišnju količinu od 100.000 t otpada i 312 dana prihvata otpada godišnje, volumni kapacitet prihvatne jame od 2765 m³, što uz nasipnu gustoću komunalnog otpada od 0,35 Mg/m³ osigurava otprilike trodnevni prihvata komunalnog otpada odnosno oko 967,75 tona otpada.

Prihvatna jama nalazi se ispod razine platoa koji služi za pristup kamionima tijekom istovara i u stalnom je podtlaku kako bi se spriječilo širenje neugodnih mirisa kroz prihvatna vrata hale. Zrak koji se odsisava iz prostora jame obrađuje se u biofilteru.

Unutar prihvatne jame, otpadom se rukuje prihvatnim kranom čime se osigurava optimalna iskoristivost volumena bunkera, miješanje različitih sastavnih frakcija otpada te vađenje nepoželjnih materijala iz otpada.

Prvi korak nakon prihvata otpada u prihvatnu jamu je njegova prethodna prerada prije biološke obrade.

Ključni brojevi otpada koji ulaze u taj proces kao i ključni broj otpada koji izlazi iz procesa prethodne prerade sažeti su u Tablici 1:

Tablica 1. Ključni brojevi otpada na ulazu i izlazu iz prethodne prerade prije biološke obrade u postrojenju (Hidroplan d.o.o., 2014.)

Otpad koji ulazi u proces		Otpad koji izlazi iz procesa	
Klj. br.	Naziv	Klj. br.	Naziv
20 03 01	Miješani komunalni otpad		
20 03 02	Otpad s tržnice	20 03 01	Miješani komunalni otpad
20 03 03	Ostaci od čišćenja ulica		
20 03 99	Komunalni otpad koji nije specificiran na drugi način		

Prethodna prerada prihvaćenog otpada odvija se u istoj hali kao i prihvatanje otpada. Otpad se prihvatnim kranom dozira u predusitnjivač u kojem se usitnjava na dimenziju manju od 200 mm. Usitnjivač se na pokretnom mostu može kretati duž čitave širine hale, a usitnjeni otpad se pohranjuje u privremeni bunker koji se nalazi ispod usitnjivača i pokretnog mosta. Bunker na sebi ima izvedenu rešetku kojom se procjedna voda upućuje na sustav odvodnje.

Ulazni otpad na biološkom dijelu postrojenja naziva se miješani komunalni otpad i ima ključni broj otpada 20 03 01. Nakon obrade u biološkom dijelu, izlazni materijal dobiva ključni broj otpada 19 05 01, nekompostirana frakcija komunalnog i sličnog otpada.

Otpad se u biološkom dijelu obrade obrađuje u istoj hali u kojoj se odvija prihvatanje i prethodna prerada otpada prije biološke obrade – biosušenja.

Glavni ciljevi biosušenja su sljedeći:

- uklanjanje viška vlage iz otpada,
- stabilizacija i higijenizacija organskog dijela otpada,
- povećanje ogrjevnog vrijednosti otpada.

Biosušenje se odvija u 12 betonskih komora (bioreaktora) u trajanju od 7-10 dana, a otpad se puni i prazni iz komora u potpunosti automatski uz pomoć procesnog kрана (Slika 2). Nakon biosušenja u betonskim komorama, osušeni materijal se transportira tračnim transporterom do daljnje mehaničke obrade.



Slika 2. Premještanje bioosušenog otpada procesnim kranom iz betonske komore (Preuzeto iz: Hidroplan d.o.o., 2014.)

Svaka od 12 betonskih komora opremljena je vlastitim sustavom za ventilaciju kojom se ostvaruje sušenje otpada. Svaki ventilacijski krug pojedine komore opremljen je i izmjenjivačima topline kojima se omogućuje hlađenje zraka i uklanjanje vode iz otpada tijekom ljetnih mjeseci.

Uloga izmjenjivača topline je da odvede toplinu nastalu u procesu biorazgradnje u rashladnu vodu, koja se nakon toga hladi u rashladnom tornju, a toplina se predaje u atmosferu.

Nakon završetka biosušenja u biološkom dijelu obrade, otpad se procesnim kranom odvodi tračnim transporterom u dio postrojenja za mehaničku obradu (tzv. rafinaciju), gdje se odvajaju različite frakcije iz otpada kao što su gorivo iz otpada (GIO), metali, plastika, teška frakcija i takozvana metanogena frakcija koja je pogodna za proizvodnju bioplina i koja je predmet laboratorijskih ispitivanja u ovom doktorskom radu. Suha metanogena frakcija ugrađuje se u tzv. bioreaktorsko odlagalište koje se nalazi u sklopu ŽCGO Marišćina.

Prema projektnoj dokumentaciji (Elaborat gospodarenja otpadom, ispravljena verzija, 2019), produkti obrade u BMO postrojenju Marišćina su slijedeći:

- 34,79% metanogena frakcija,
- 4,12% reciklabilni materijali (3,06% željezni metali i 1,06% neželjezni metali),
- 14,35% gubitak vlage kod biosušenja,
- 46,74% gorivo iz otpada.

Nakon biološke i mehaničke obrade miješanog komunalnog otpada u postrojenju, produkti obrade se odvojeno prihvaćaju po svojstvu i vrsti u odgovarajućim posudama i spremnicima. Metanogena frakcija se u kontejnerima odvozi na odlagališnu plohu, željezni i neželjezni metali predaju se ovlaštenom sakupljaču, a GIO se odvozi s lokacije postrojenja i koristi se kao gorivo u cementnoj industriji.

Metanogena frakcija koja se odlaže u bioreaktorsko odlagalište (ključni broj otpada: 19 05 01) predstavlja oko 35% od ukupne količine komunalnog otpada koji se prihvaća na prostoru ŽCGO. (Elaborat gospodarenja otpadom, ispravljena verzija, 2019)

1.5.1 Bioreaktorsko odlagalište

Prema Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN [114/15](#), [103/18](#), [56/19](#)): „*Bioreaktorsko odlagalište je odlagalište otpada u sklopu centra za gospodarenje otpadom u okviru postupka mehaničko-biološke obrade otpada, a koje se smatra građevinom u kojoj je pospješen proces biorazgradnje odloženog otpada*“.

Iako se kod miješanog komunalnog otpada trenutna slijeganja uobičajeno realiziraju tijekom ugradnje u tijelo odlagališta, značajan dio slijeganja komunalnog otpada u vremenu uzrokovan je biorazgradnjom odloženog materijala. Za razliku od klasičnih odlagališta otpada, bioreaktorska odlagališta optimiziraju parametre mikrobioloških aktivnosti kako bi ubrzali proces biorazgradnje organskog dijela otpada. To se obično postiže recirkulacijom prikupljene procjedne vode s dna odlagališta. Za pravilno projektiranje i održavanje bioreaktorskog odlagališta, bitno je znati kako se komunalni otpad ponaša i sliježe tijekom same ugradnje, vlaženja i naknadno tijekom razgradnje i izvlačenja bioplina. (Hettiarachchi i sur., 2009).

Pojedini parametri kao što su vlažnost i pH prate se i održavaju na optimalnoj razini čime se povećava raspoloživi volumen odlagališta i do 30%.

Prednosti stečene poboljšanjem procesa biorazgradnje u bioreaktorskim odlagalištima (ovisno o modelu odlagališta) mogu uključivati sljedeće:

- skraćivanje faze monitoringa nakon zatvaranja odlagališta,
- smanjenje utjecaja na okoliš,
- smanjenje troškova održavanja i monitoringa nakon zatvaranja odlagališta,
- smanjenje ekološke odgovornosti upravitelja odlagališta,
- poboljšanje kvalitete procjedne vode,
- brža i vremenski specifična proizvodnja bioplina,
- brža mehanička i biološka stabilizacija otpadnog materijala,
- povećano slijeganje i gustoća otpada čime se stvara novi odlagališni prostor,
- potrebno je manje radova nakon faze zatvaranja.

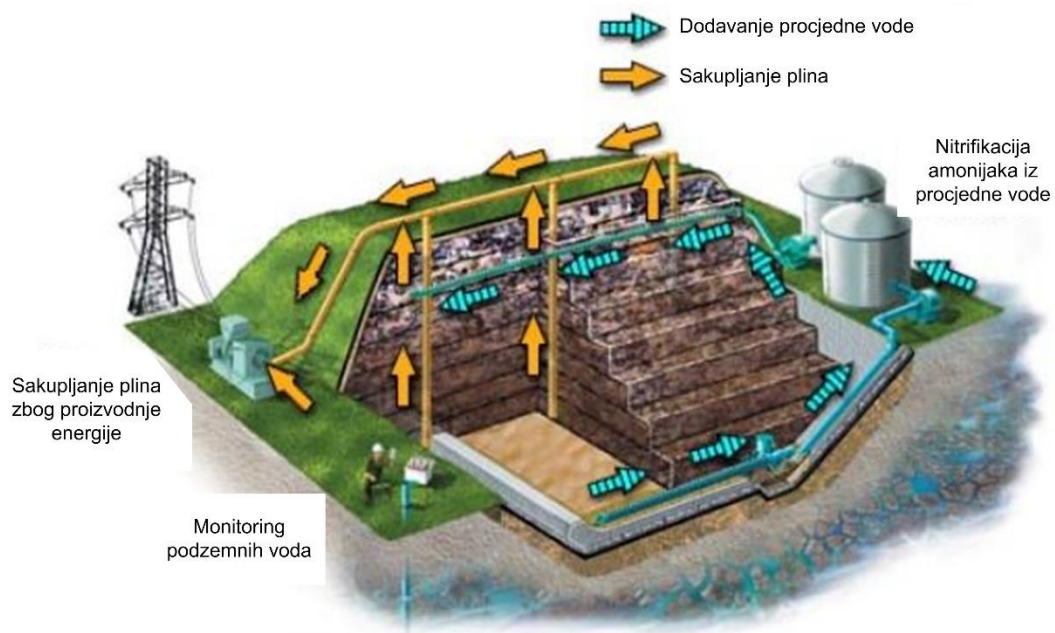
Neki od nedostataka bioreaktorskih odlagališta su:

- potrebno je utrošiti energiju za aeriranje i recirkulaciju filtrata,

- kompleksniji program upravljanja i monitoringa,
- specifični nedostaci mogu se pojaviti prilikom recirkulacije procjedne vode kao npr.:
 - povećana proizvodnja neugodnih mirisa,
 - rizik od mehaničke nestabilnosti (stabilnost pokosa) uslijed povećanja vlažnosti,
 - nastajanje većih količina procjednih voda. (Cossu i Stegmann, 2019)

U odnosu na uvjete biorazgradnje, bioreaktorska odlagališta mogu se podijeliti u tri grupe:

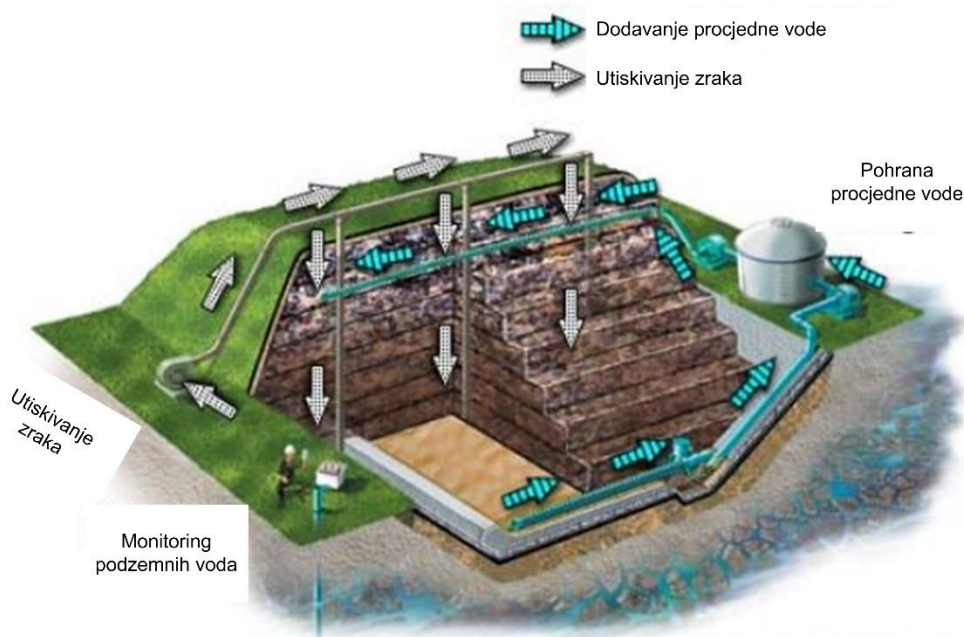
1. Anaerobna – biološka razgradnja otpada ugrađenog u anaerobno bioreaktorsko odlagalište odvija se bez prisustva kisika djelovanjem anaerobnih bakterija. Stabilizacija otpadnog materijala odvija se brže nego u konvencionalnim odlagalištima, a produkti takve razgradnje su metan i ugljični dioksid uz pomoć kojih se može proizvoditi električna ili toplinska energija (Slika 3).



Slika 3. Anaerobno bioreaktorsko odlagalište (Prilagođeno iz Repa, 2003)

2. Aerobna – procjedna voda se skuplja u donjem dijelu odlagališta, pročišćava se, a zatim se opet dovodi do gornjeg dijela odlagališta i opet recirkulira u tijelo odlagališta u kontroliranim uvjetima. Uz recirkulaciju procjedne vode, u tijelo odlagališta se utiskuje i određena količina zraka bogatog kisikom pomoću horizontalnih ili vertikalnih zdenaca

čime se pojačava djelovanje mikroorganizama (Slika 4). Ovim načinom rada, u odlagalištu prvenstveno nastaju ugljični dioksid i procjedna voda.



Slika 4. Aerobno bioreaktorsko odlagalište (Prilagođeno iz Repa, 2003)

3. Hibridna – kod ove vrste bioreaktorskih odlagališta, u gornjim slojevima odlagališta prisutni su aerobni uvjeti dok su anaerobni uvjeti pretežito u donjim dijelovima tijela odlagališta.

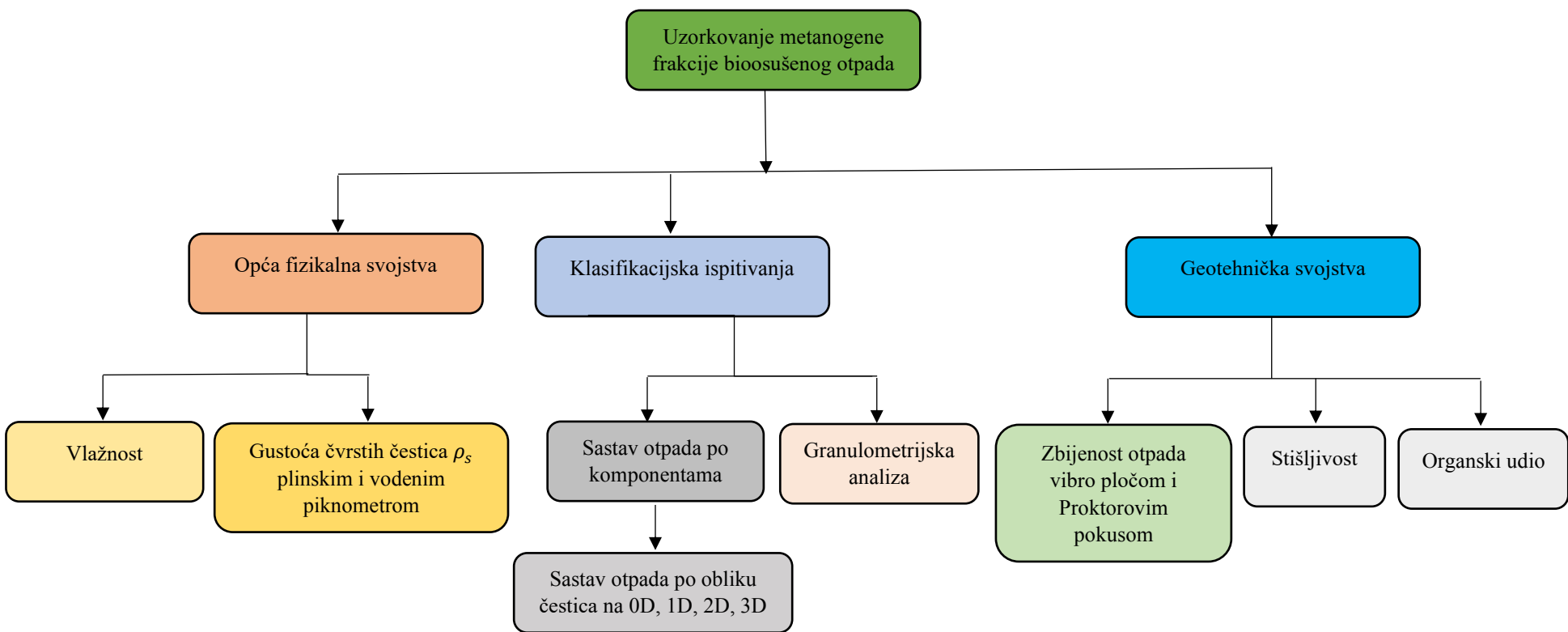
Najvažniji uvjeti koje je potrebno zadovoljiti kako bi bioreaktorsko odlagalište dobro funkcioniralo su:

- vlažnost otpada odgovara volumetrijskoj vlažnosti otpada ostvarenoj nakon dugotrajnog gravitacijskog dreniranja,
- pH vrijednost približno 7 (pH vrijednost u rasponu od 6,7 do 7,5 omogućava brzi rast mikroorganizama koji proizvode metan, čime se stabilizacija odloženog otpada postiže već nakon 5 godina ovisno o veličini odlagališta). (Petrović, 2006)

1.6 Eksperimentalni dio

Ispitivanja su provedena na uzorcima BMO komunalnog otpada (tzv. metanogena frakcija) uzorkovanih u ŽCGO Mariščina. Ovaj materijal pogodan je za odlaganje na bioreaktorsko odlagalište u kojem će se nakon postizanja punog kapaciteta odlagališta uz pomoć prisilne recirkulacije procjedne vode proizvoditi bioplin.

Plan provedenih eksperimentalnih istraživanja prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Plan eksperimentalnog dijela istraživanja u laboratoriju

1.7 Uzorkovanje

Uzorkovanje metanogene frakcije u postrojenju BMO otpada Mariščina provedeno je u prvoj polovici 2019. godine te u ljetnom razdoblju 2020. godine. Dalje u tekstu, materijal uzorkovan u prvoj polovici 2019. godine označavat će se oznakom A, dok će se materijal uzorkovan u drugoj polovici 2020. godine označavati oznakom B. Uzorci su manualno, lopatom uzorkovani direktno iz prihvatnog kontejnera (Slika 6 i 7) u kojem se otpad skladišti i doprema uz pomoć tračnog transportera. Uzorkovani uzorci su dostavljeni u Laboratorij za inženjerstvo okoliša Geotehničkog fakulteta u plastičnim vrećama iz kojih se pumpom isisao zrak kako bi se smanjila biorazgradnja i neugodni mirisi tijekom transporta (Slika 8).



Slika 6. Uzorkovanje metanogene frakcije u zimskom periodu 2019. godine



Slika 7. Uzorkovanje metanogene frakcije u ljetnom periodu 2020. godine



Slika 8. Skladištenje i transport uzoraka u Laboratorij za inženjerstvo okoliša

1.8 Pregled poglavlja

Poglavlje 1 sadrži uvod, definiciju problema, cilj istraživanja, izvorni doprinos doktorskog rada, obuhvat pregleda literature, opisanu tehnologiju obrade otpada u ŽCGO Mariščina, pregled poglavlja, opis eksperimentalnog dijela istraživanja i uzorkovanje korištenog materijala u ovom radu.

Poglavlje 2 sadrži detaljan opis određivanja osnovnih geotehničkih karakteristika i parametara metanogene frakcije otpada, a to su redom: granulometrijska krivulja, organski udio, zatečena vlažnost, sastav otpada po komponentama i sastav otpada prema obliku čestica.

Poglavlje 3 prikazuje postupak i rezultate određivanja gustoće čvrstih čestica uz pomoć plinskog i vodenog piknometra.

U poglavlju 4 detaljno je opisano zbijanje otpada vibro pločom i Proctorovim pokusom, a rezultati su prikazani kao odnos suhe gustoće i vlažnosti.

U poglavlju 5 opisana je serija edometarskih pokusa te su interpretirani rezultati prikazani u obliku parametara stišljivosti metanogene frakcije.

Poglavlje 6 daje zaključak doktorske disertacije.

U Poglavlju 7 dane su preporuke za daljnja istraživanja, Poglavlje 8 prikazuje priloge i Poglavlje 9 životopis i popis objavljenih radova doktoranda.

2) OSNOVNE KARAKTERISTIKE I OSNOVNI GEOTEHNIČKI PARAMETRI ISPITIVANOG OTPADA

2.1 Sažetak poglavlja

U ovom poglavlju prikazana su laboratorijska ispitivanja osnovnih karakteristika i geotehničkih parametara biološki i mehanički obrađenog otpada, odnosno metanogene frakcije, kao jedan od tokova otpada iz postrojenja za BMO obradu čvrstog komunalnog otpada koja se odlaže u bioreaktorsko odlagalište. Ispitivanja su provedena na metanogenoj frakciji uzorkovanoj u prvoj polovici (materijal A) i drugoj polovici (materijal B) godine iz postrojenja za BMO otpada u Marišćini (Marčelji, općina Viškovo, Rijeka). Neposredno nakon dopremanja uzoraka otpada u laboratorij, utvrđena je prosječna vlažnost otpada sušenjem u sušioniku na 60 °C koja je za materijal A iznosila 11,04%, a za materijal B 10,15%. Granulometrijska krivulja utvrđena je prosijavanjem na setu sita, i to na 25 uzoraka materijala A i 14 uzoraka materijala B. Utvrđen je prosječan sastav otpada ručnim razvrstavanjem reprezentativnih uzoraka prema sljedećim komponentama: plastika, staklo, metal, kamenje, papir/karton, drvo, metali, tekstil, kosti/koža, kuhinjski otpad, keramika, guma, i neidentificirana frakcija. Najzastupljenija frakcija u materijalu A i B je neidentificirana komponenta koja je naknadno prosijana kroz sito otvora 2 mm te tako podijeljena na komponentu < 2 mm i > 2mm. Organska tvar izmjerena paljenjem u peći za žarenje na temperaturi od 440 °C iznosila je 51,62% za materijal A i 55,26% za materijal B. Prema obliku čestica materijal je unutar svake komponente otpada ručno razvrstan u četiri skupine, 0D – svaka dimenzija manja od minimalne značajne duljine, u ovom radu to su zrna otpada premale veličine koje je bilo nemoguće razvrstati prema određenoj komponenti; 1D – vlakna, štapići ili žice kod kojih je jedna dimenzija bitno izraženija, odnosno bitno dulja u odnosu na preostale dvije dimenzije čestice; 2D – folije, listovi i plahte otpada, to su čestice plošnog oblika koje imaju dvije izraženije dimenzije (širina i duljina) i jednu manje izraženu (debljina); 3D – glomazne/volumne čestice kod kojih su sve tri dimenzije izražene. Utvrđeno je da oko 70% materijala pripada 0D obliku čestica, a nakon toga, većina oblika ispitivanog materijala pripada 2D obliku čestica koje u odnosu na vrstu otpadnog materijala mogu zaustavljati ili samo preusmjeravati tok recirkulirane procjedne vode kroz tijelo odlagališta. Dobiveni rezultati pružili su osnovni uvid u mehaničke karakteristike ispitivanog otpadnog materijala.

2.2 Uvod

Budući da se miješani komunalni otpad nakon BMO znatno razlikuje od neobrađenog komunalnog otpada te je po mehaničkom ponašanju sličan ponašanju tla, uobičajeno je da se mehanički parametri BMO otpada utvrđuju ispitnim metodama mehanike tla. Od osnovnih karakteristika i geotehničkih parametara otpada u sklopu ove doktorske disertacije utvrđen je prosječni sastav ispitivanog otpada po pojedinim komponentama, zatim sastav otpada prema dominantnim dimenzijama zrna na 0D, 1D, 2D i 3D čestice, napravljena je granulometrijska analiza otpada, utvrđen je početni udio organske tvari, kao i početni udio vlage.

2.3 Teorijska podloga

2.3.1 Utvrđivanje granulometrijske krivulje

Određivanje granulometrijske krivulje ispitivanog materijala služi za indirektnu ocjenu mehaničkih i fizičkih karakteristika materijala.

Uzorci otpada se nakon sušenja u sušioniku važu (m), stavljaju na vrh seta sita koja su složena od najvećeg otvora prema najmanjem te se prosijavaju kroz najmanje 10 minuta na uređaju za vibriranje.

Masa otpada koja ostane na pojedinom situ (m_u) se na kraju svakog prosijavanja odredi vaganjem, a masa ostatka (m_o) na svakom situ se računa kao postotak ukupne mase (Jednadžba 1).

$$m_o = \frac{m_u}{m} \times 100 \quad (1)$$

Rezultati prosijavanja prikazuju se standardnom granulometrijskom krivuljom u polulogaritamskom mjerilu, gdje se na ordinati prikazuju postotni udjeli mase uzorka koja je prošla kroz otvor pojedinog sita, a na apscisi u logaritamskom mjerilu promjer zrna u milimetrima.

Uobičajeno, u mehanici tla, karakteristike granulometrijske krivulje izražavaju se pomoću efektivnog promjera zrna (D_{10}), koeficijenta zakrivljenosti (C_c) te koeficijenta jednolikosti (C_u).

- D_{10} , otvor sita kroz kojeg prolazi 10% mase ispitanog uzorka
- D_{30} , otvor sita kroz kojeg prolazi 30% mase ispitanog uzorka
- D_{60} , otvor sita kroz kojeg prolazi 60% mase ispitanog uzorka

Očitanjem vrijednosti promjera zrna (mm) kroz kojeg prolazi 10%, 30% i 60% ispitanog materijala mogu se izračunati slijedeće vrijednosti Jednadžbama (2) i (3):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} - \text{koeficijent jednolikosti} \quad (2)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} - \text{koeficijent zakrivljenosti} \quad (3)$$

Prema klasičnoj mehanici tla, tlo je dobro graduirano ukoliko je koeficijent zakrivljenosti $1 < C_c < 3$, a koeficijent jednolikosti $C_u > 4$ za šljunak, odnosno $C_u > 6$ za pijesak.

2.3.2 Definicija udjela organske tvari

Sadržaj organske tvari u uzorcima otpada određuje se žarenjem reprezentativnog uzorka u peći za žarenje na 440 °C do konstantne mase. Razlika u masi prije i nakon paljenja određuje se vaganjem. Maseni postotak udjela organske tvari iskazuje se kao omjer utvrđene razlike u masi i početne mase uzorka.

2.3.3 Definicija udjela sadržaja vlage

Udio vlage u ispitivanom materijalu može se izraziti preko suhe ili preko vlažne mase uzorka.

Vlažnost otpada w preko suhe mase definira se kao omjer mase vode u uzorku m_w i mase suhog uzorka m_s (Jednadžba 4).

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (4)$$

Vlažnost otpada w' preko vlažne mase definira se kao omjer mase vode u uzorku m_w i ukupne mase uzorka m (Jednadžba 5):

$$w' = \frac{m_w}{m} \quad (5)$$

Veza između suhe i vlažne mase prikazana je u nastavku Jednadžbom (6):

$$w' = \frac{w}{1+w} \quad (6)$$

2.3.4 Postupak utvrđivanja sastava otpada po komponentama

Sastav otpada na pojedinom području je promjenjiv što proizlazi kao posljedica u promjeni godišnjih doba, geografske lokacije, načina života stanovništva na određenom području, demografije, turističke sezone, ali ovisi i o zakonskim odredbama. Iz prosječnog sastava otpada može se saznati stupanj razvijenosti određenog područja kao i svijest stanovništva o gospodarenju otpadom. Sastav otpada razlikuje se ovisno o različitim razinama prihoda pri čemu se odražavaju različiti obrasci potrošnje.

Sastav otpada određuje se nakon pripreme reprezentativnih uzoraka metodom četvrtanja. Pojedinačni sastavni dijelovi otpada ručno se odvajaju i važu čime se određuje sastav otpada.

2.3.5 Postupak utvrđivanja sastava otpada prema obliku čestica

Osim veličine čestica i vrste materijala, oblik čestica također može utjecati na mehaničko ponašanje i stvaranje pornih prostora u materijalu (Velkushanova, 2011). Prema obliku čestice se mogu podijeliti na četiri kategorije i to su redom:

0D: zrna - svaka dimenzija manja je od minimalne značajne duljine.

1D: vlakna, štapići i žice – jedna dimenzija je bitno izraženija, odnosno bitno dulja u odnosu na preostale dvije dimenzije čestice. Ovakve čestice mogu djelovati kao armatura čime se povećava posmična čvrstoća materijala.

2D: folije i listovi/plahte – ove čestice su plošnog oblika, imaju dvije izraženije dimenzije (širina i duljina) i jednu manje izraženu (debljina). Pretpostavlja se da djeluju povoljno na čvrstoću materijala ili kao elementi koji usmjeruju tok fluida kroz veće nakupine takvog materijala.

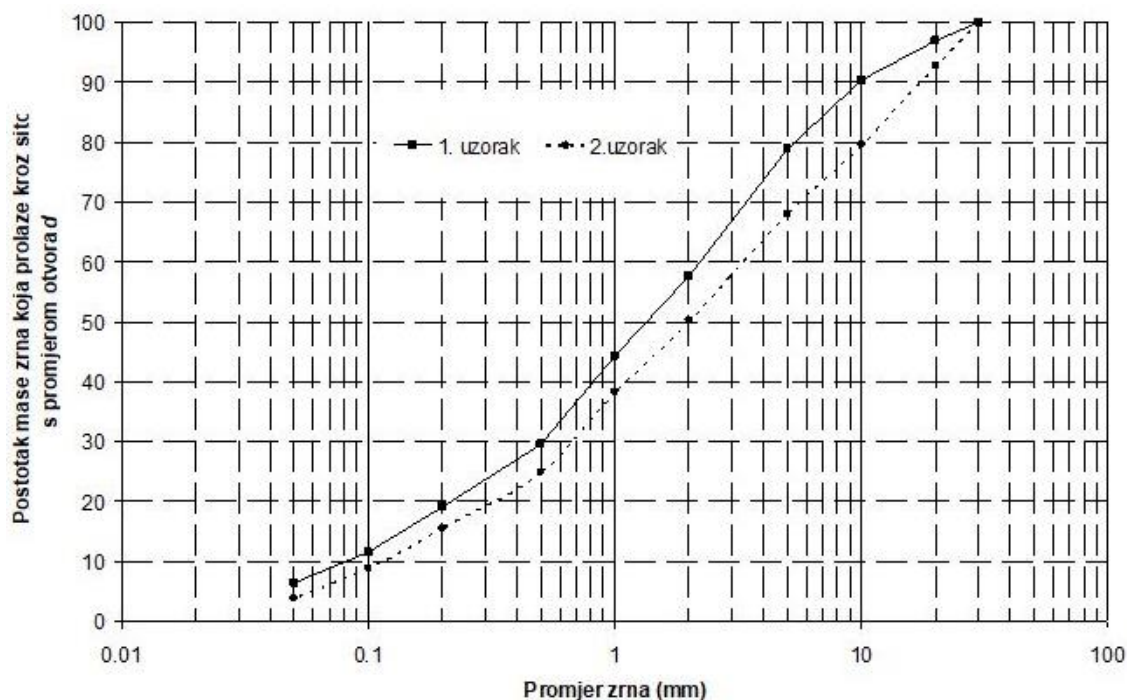
3D: glomazne čestice – to su volumne čestice, s izraženim svima trima dimenzijama. Smatra se da je njihovo djelovanje na posmičnu čvrstoću i smjer toka fluida neutralno (Velkushanova, 2011). Mogu se podijeliti na stišljive i nestišljive.

Nakon određivanja sastava otpada i ručnog izdvajanja pojedine komponente reprezentativnog uzorka otpada, sastav prema obliku čestica ponovo se radi ručnim izdvajanjem te vaganjem masa izdvojenih različitih dimenzija čestica otpada.

2.4 Pregled dosadašnjih istraživanja

2.4.1 Granulometrijske krivulje utvrđene na BMO/MBO otpadu

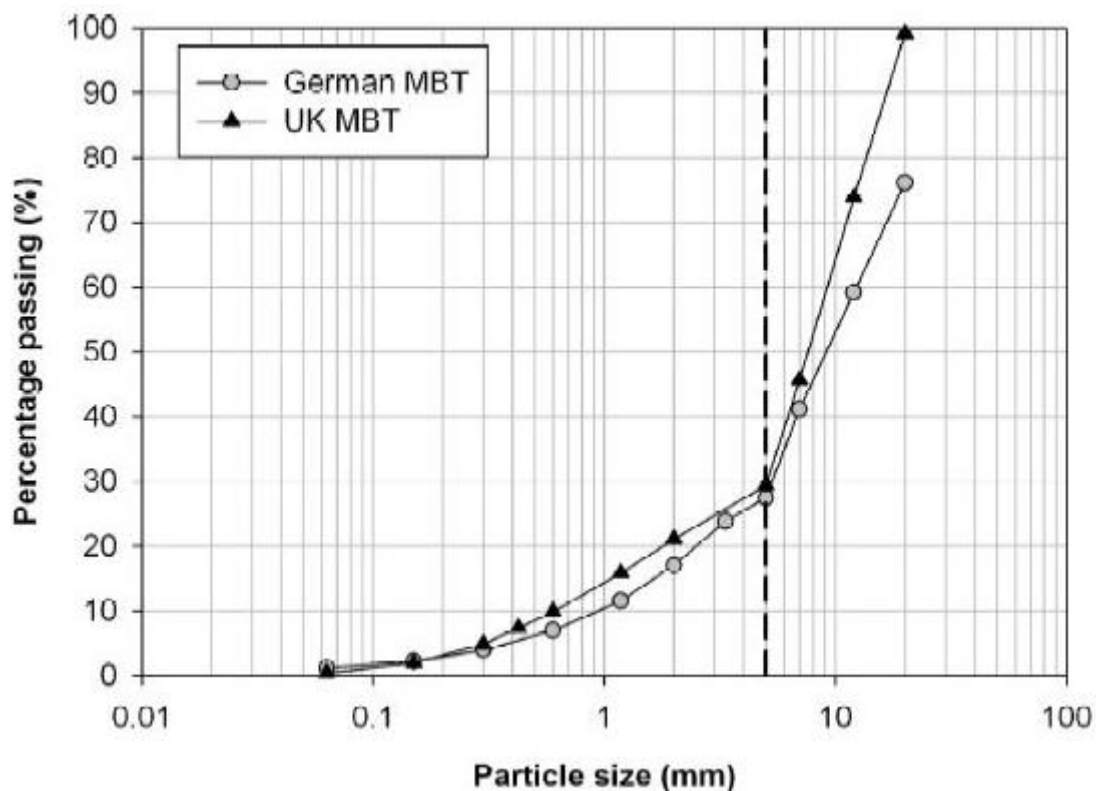
Petrović (2010) je objavio rezultate granulometrijske analize za kompostirane čestice iz odlagališta MBO otpada u Austriji (Slika 9). Masa dva prosijana uzorka bila je oko 1 kg. Granulometrijski sastav otpada određen je sukladno HRN.U.B1.018. normi. Maksimalna veličina čestica iz objavljenih rezultata granulometrijske analize iznosi oko 30 mm.



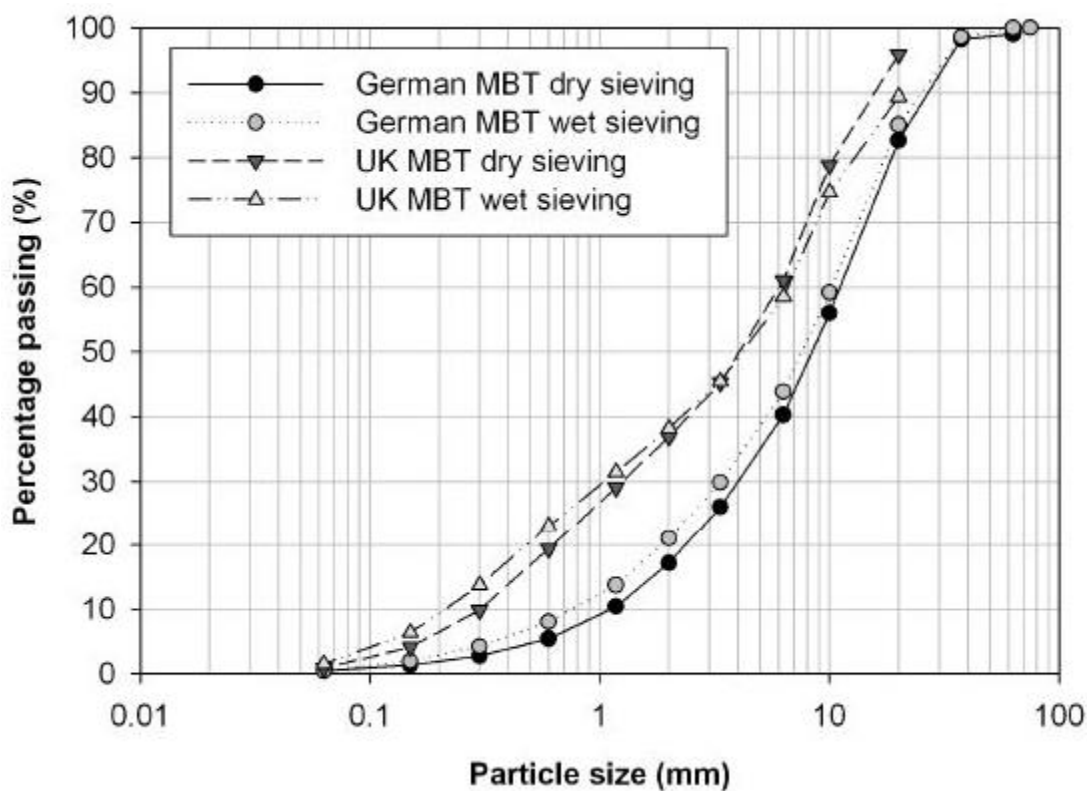
Slika 9. Granulometrijska krivulja kompostiranog otpada iz MBO odlagališta u Austriji (Petrović, 2010)

Velkushanova (2011) je u svom radu objavila granulometrijske krivulje MBO otpada iz Engleske i Njemačke. MBO otpad iz Engleske u biološkom dijelu postupka podvrgnut je kompostiranju, dok je MBO otpad iz Njemačke u prvom stupnju obrađen anaerobnim postupkom, a u drugom aerobnim postupkom obrade. Maksimalna veličina zrna otpada iz Engleske iznosi 20 mm, dok je maksimalna veličina zrna otpada iz Njemačke 60 mm. Autorica je oba uzorka podijelila u dvije frakcije (<5 mm i >5 mm). Reprezentativnim uzorkom od 1 kg za materijal <5 mm napravljena je granulometrijska analiza prema BS 1377-2 (1990) standardu (Slika 10). Reprezentativni uzorak za materijal >5 mm

iznosio je 25 kg pri čemu nije slijeđen niti jedan određen standard, a prosijavanje je napravljeno suhim i vlažnim postupkom (Slika 11).

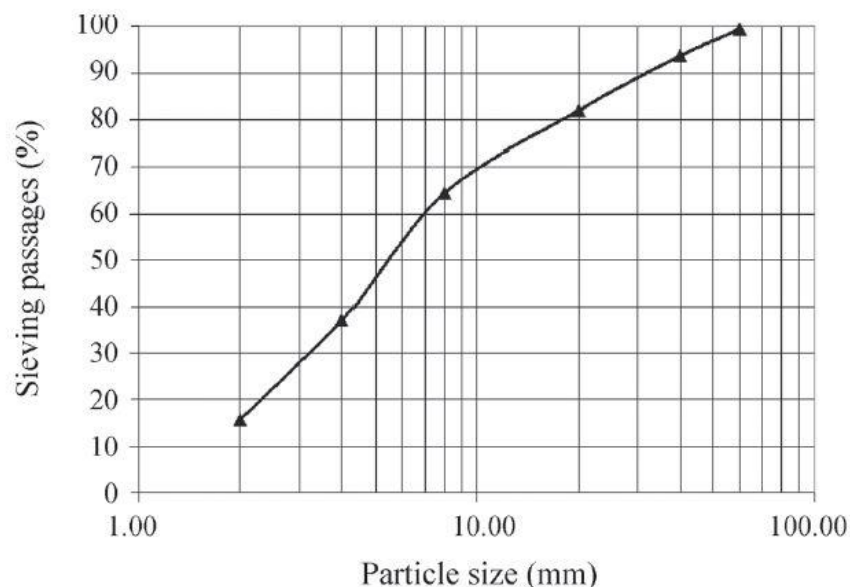


Slika 10. Granulometrijske krivulje MBO otpada iz Engleske i Njemačke za frakciju <5 mm (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – percentage passing (%) – udio prolaza kroz sito)



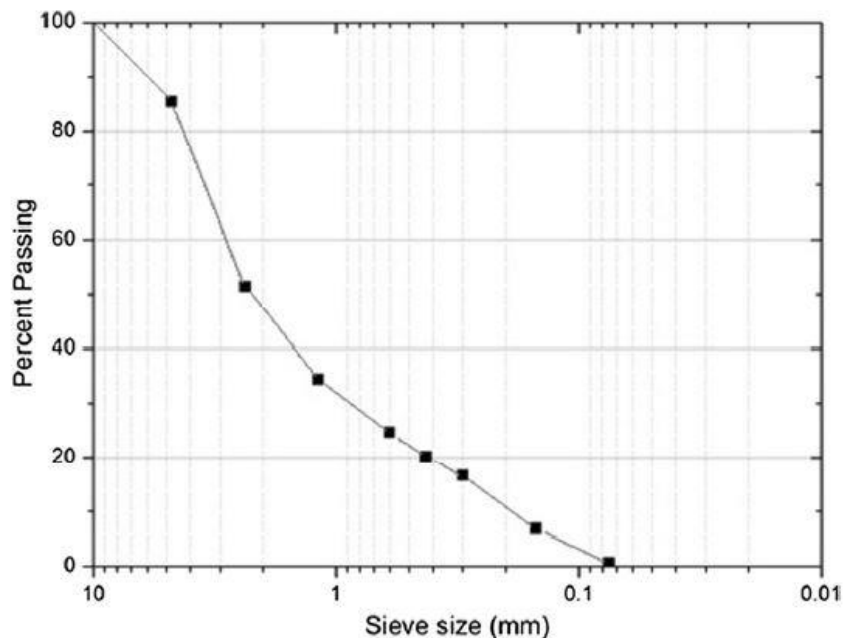
Slika 11. Granulometrijske krivulje MBO otpada iz Engleske i Njemačke za frakciju >5 mm, suho (dry) i vlažno (wet) prosijavanje (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – percentage passing (%) – udio prolaza kroz sito)

Borgato i sur., (2014) objavili su granulometrijsku krivulju MBO otpada maksimalne veličine zrna od 60 mm (Slika 12). Ispitali su otpad iz sanitarnog odlagališta otpada u Blankenhagenu u Njemačkoj u kojem se odlaže otpad nakon kompostiranja i mehaničke obrade.



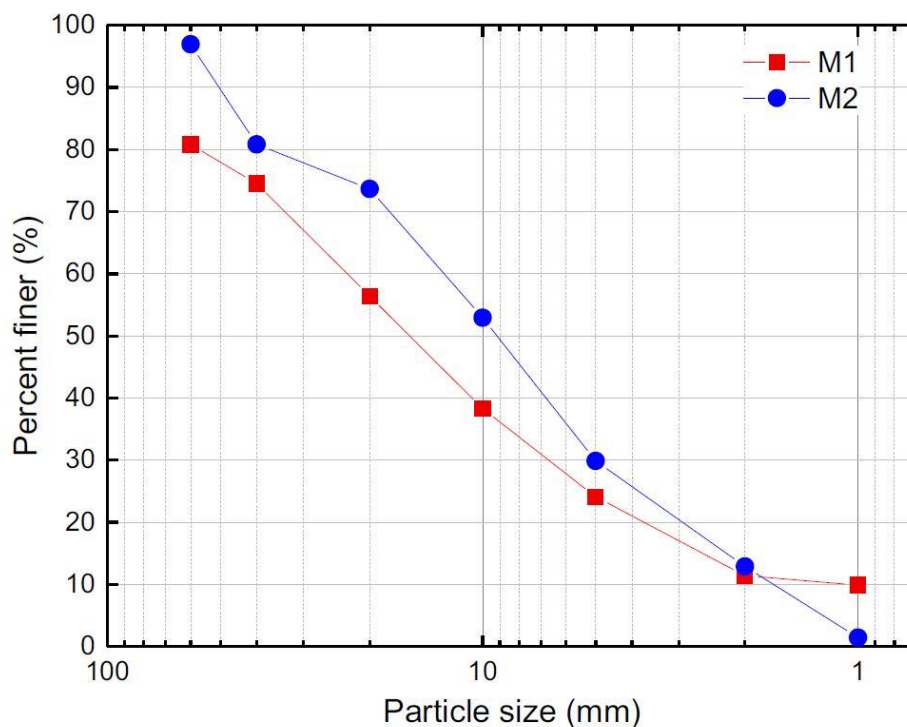
Slika 12. Granulometrijska krivulja kompostiranog otpada iz Njemačke (Borgato i sur., 2014)
(Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – sieving passages (%) – udio prolaza kroz sito)

Lakshmikanthan i sur., (2018) odredili su granulometrijsku krivulju MBO otpada sukladno ASTM D 422-63 standardu (Slika 13). Dominantna veličina čestica promatranog uzorka bila je <35 mm, dok su za potrebe laboratorijskih ispitivanja uzorci otpada prosijani na situ otvora 10 mm. Ispitani materijal je u postupku MBO otpada u postrojenju bio podvrgnut procesu kompostiranja. Promatrani materijal uzorkovan je s odlagališta MBO otpada Mavallipura, Bangalore. Objavljenim koeficijentom jednolikosti za ispitani MBO materijal od 15, i koeficijentom zakrivljenosti od 1,66 autori su zaključili da se radi o dobro graduiranom uzorku otpada.



Slika 13. Granulometrijska analiza MBO uzoraka s odlagališta Mavallipura, Bangalore (Lakshmikanthan i sur., 2018) (Prijevod: Os x – sieve size (mm) – veličina sita u mm; Os y – percent passing – udio prolaza kroz sito)

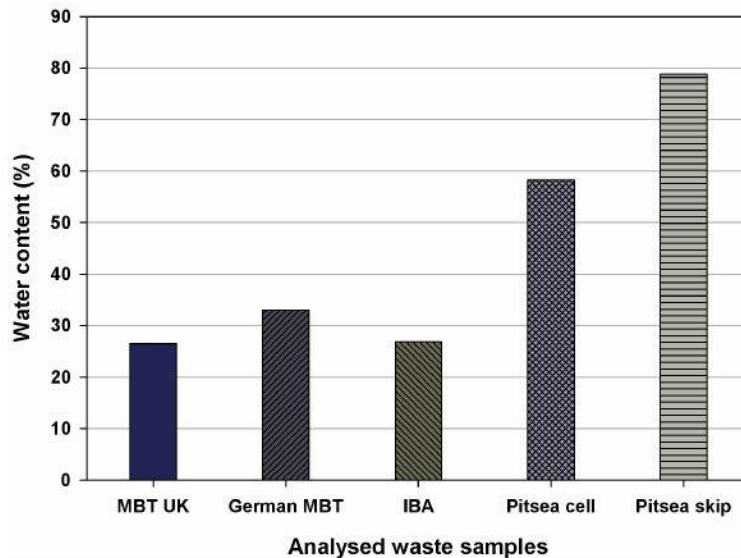
Zhang i sur., (2020) proučavali su BMO otpad iz Tianziling odlagališta u Hangzhou u Kini. Prikazali su rezultate granulometrijske analize dva uzorka otpada, M1 i M2 (Slika 14) koji su u biološkom dijelu obrade prošli postupak biosušenja koji je trajao 9 dana. M1 uzorak uzorkovan je u zimskom periodu, dok je M2 uzorak uzorkovan u ljetnom periodu. Iz prikazane krivulje granulometrijske analize spomenutih autora (Slika 14), očito je da se veličina čestica za oba uzorka kreće između 1 i 60 mm. Srednji promjer zrna čestica D_{50} iznosi 15,7 mm za M1 uzorak i 8,97 mm za M2 uzorak BMO otpada. Koeficijent jednolikosti za uzorak M1 iznosi 21,4, a za M2 iznosi 6,96. Koeficijenti zakrivljenosti su za uzorak M1 1,93 i 1,02 za uzorak M2. Budući da su koeficijenti jednolikosti oba uzorka veći od 5, a koeficijenti zakrivljenosti nalaze se u rasponu između 1 i 3, autori su ispitivani materijal klasificirali kao dobro građirani.



Slika 14. Granulometrijska analiza BMO uzoraka (Zhang i sur., 2020) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – percent finer (%) – udio prolaza kroz sito)

2.4.2 Utvrđeni udjeli organske tvari i udjeli vlage na uzorcima BMO/MBO otpada

Velkushanova (2011) je u svom radu objavila udio vlage za MBO otpad iz Engleske (MBT UK), 26,5% i Njemačke (German MBT), 33% (Slika 15). Osim spomenutih materijala iz Engleske i Njemačke, autorica je obradila još dvije vrste materijala. IBA (incinerator bottom ash) materijal iz Veolia Marchwood postrojenja za energetske oporabu u Hampshire-u, Ujedinjenom Kraljevstvu je pepeo s dna postrojenja za termičku obradu otpada, dok je Pitsea usitnjeni neobrađeni komunalni otpad iz odlagališta otpada White's Pit u Dorsetu.



Slika 15. Udio vlage MBO otpada iz Engleske (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – Analysed waste samples – analizirani uzorci otpada; Os y – water content (%) – udio vlage)

Siddiqui i sur., (2012) su za MBO otpad iz Engleske i Njemačke objavili udio organske tvari dobivene paljenjem u peći. Ovdje se radi o istom otpadnom materijalu koji je ispitala i Velkushanova (2011) u svom radu. Iz uzoraka otpada prethodno je izdvojen metal, staklo, keramika i kamenje, a ostatak materijala je osušeno i usitnjeno u fini prah. Izračunati postotak organske tvari (u odnosu na suhu masu) za MBO otpad iz Engleske iznosi 42,91%, a za MBO otpad iz Njemačke 34,84%. Zanimljivo je primijetiti da su autori, unatoč relativno visokom udjelu organske tvari, utvrdili da ispitivani otpad generira samo 8 do 20% metana u odnosu na količinu generiranog metana neobrađenog otpada. Otpad iz Engleske je prethodno biološki obrađen u trajanju od 6 tjedana kompostiranjem, dok je otpad iz Njemačke tretiran 9 tjedana, prvo anaerobnom digestijom a zatim aerobnim postupkom kompostiranja. Niži udio organske tvari MBO otpada iz Njemačke može se pripisati dužoj obradi kojom se udio organske tvari smanjio u većoj mjeri od materijala iz Engleske.

Organska tvar za otpad frakcije 0-10 mm nakon MBO u radu Bortoluzzi (2014) iznosi 55,7%. Ispitivani otpad uzorkovan je u postrojenju za MBO otpada New Earth Solutions, u Dorsetu, Engleskoj. Nakon mehaničke obrade i izdvajanja reciklabilnih materijala slijedilo je kompostiranje u trajanju od 6 tjedana te je materijal na kraju prosijan kroz sito otvora 10 mm kako bi se uklonili ostaci reciklabilnih materijala. Udio vlage u spomenutom radu određen je na 5 uzoraka otpada sušenjem na 70 °C, a rezultati su prikazani u Tablici 2. Rezultati su prikazani u odnosu na ukupnu,

vlažnu masu otpada. Uzorci su nakon sušenja u sušioniku, ostavljeni na sobnoj temperaturi te je nakon toga, masa bilježena svakih 24 h, sve dok očitavanja nisu postala konstantna ili razlika manja od 1%.

Tablica 2. Udio vlage MBO otpada (Bortoluzzi, 2014)

	1	2	3	4	5
Udio vlage [%]	79	81,2	79	74,83	78,89

Lakshmikanthan i sur., (2018) su za MBO otpad iz odlagališta Mavallipura, Bangalore, Indija za materijal frakcije manje od 10 mm odredili udio vlage sušenjem uzoraka na temperaturi od 60 °C. Udio organske tvari odredili su prema standardnoj metodi Američkog udruženja za javno zdravstvo žarenjem na temperaturi od 550 °C u peći za žarenje. Udio vlage ispitivanog materijala varirao je između 18 i 40%, dok je izmjerena organska tvar iznosila 54%.

Zhang i sur. (2020) odredili su udio vlage i organske tvari za dva uzorka, M1 i M2, uzorkovanih u zimskom, odnosno u ljetnom periodu iz Tianziling odlagališta, Hangzhou, Kina. Udio vlage određen je sušenjem na temperaturi od 70 °C u sušioniku, dok je udio organske tvari određen paljenjem uzorka u peći. Rezultati su prikazani u Tablici 3.

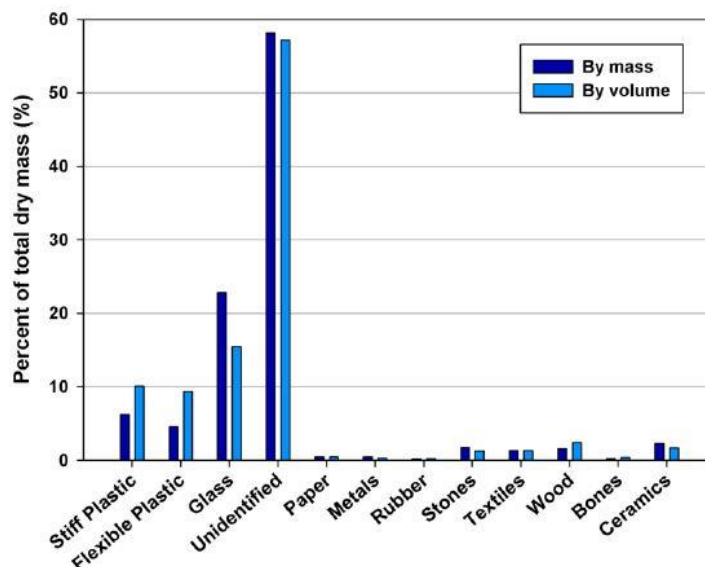
Tablica 3. Udio organske tvari i vlage BMO otpada (Zhang i sur., 2020)

	M1	M2
Udio organske tvari [%]	31,07 ± 4,15	35,15 ± 3,23
Udio vlage [%]	20,21 ± 0.75	15,41 ± 0,44

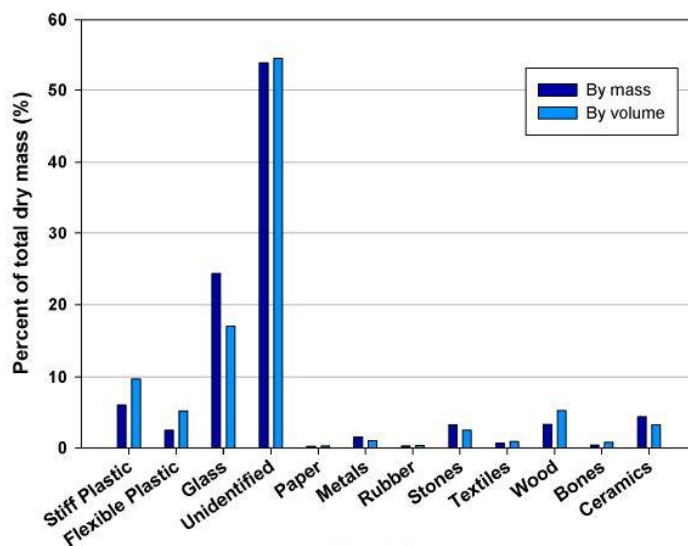
Pregledom rezultata organske tvari različitih istraživača u ovom poglavlju može se vidjeti da se objavljene vrijednosti organske tvari kreću od 30-56% neovisno o tome radi li se o MBO ili BMO materijalu.

2.4.3 Utvrđeni sastavi BMO/MBO otpada

Velkushanova (2011) je objavila maseni i volumni sastav otpada za MBO otpad iz Engleske (Slika 16) i Njemačke (Slika 17).



Slika 16. Volumni i maseni sastav MBO otpada iz Engleske (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – Stiff plastic, flexible plastic, glass, unidentified, paper, metals, rubber, stones, textiles, wood, bones, ceramics – kruta plastika, fleksibilna plastika, staklo, neidentificirano, papir, metal, guma, kamen, tekstil, drvo, kosti, keramika; Os y – percent of total dry mass (%) –udio ukupne suhe mase)



Slika 17. Volumni i maseni sastav MBO otpada iz Njemačke (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – Stiff plastic, flexible plastic, glass, unidentified, paper, metals, rubber, stones, textiles, wood, bones, ceramics – kruta plastika, fleksibilna plastika, staklo, neidentificirano, papir, metal, guma, kamen, tekstil, drvo, kosti, keramika; Os y – percent of total dry mass (%) –udio ukupne suhe mase)

Veliki udio komponenata svrstan je u kategoriju neidentificirano što čini za MBO otpad iz Engleske oko 58%, i 53,8% za MBO otpad iz Njemačke. Druga po redu najzastupljenija komponenta kod oba uzorka bila je staklo.

Bortoluzzi (2014) je u svom radu objavio sastav MBO otpada frakcije 0-10 mm u kojoj prevladavaju neidentificirana komponenta >5 mm i sitnica <5 mm, a slijedi ih staklo s masenim udjelom od 17% (Tablica 4). Iz prikazane Tablice 4 očito je da neidentificirana i sitna frakcija predstavljaju veliki udio u ukupnom sastavu otpada nakon MBO otpada.

Tablica 4. Sastav MBO otpada iz postrojenja New Earth Solutions, u Dorsetu, Engleskoj, frakcija 0-10 mm (Bortoluzzi, 2014)

Komponenta	% ukupne suhe mase
Plastika (fleksibilna)	2
Plastika (kruta)	4
Staklo	17
Keramika	2
Kamenje	1
Metal	Mali udio
Papir	Mali udio
Tekstil	Mali udio
Neidentificirano >5 mm	30
Sitnica <5 mm	43

Sastav otpada nakon kompostiranja, odnosno MBO obrade prije odlaganja u Mavallipura odlagalište u Bangaloru, Indiji prikazan je u Tablici 5. (Lakshmikanthan i sur., 2018) Najdominantniji udio u sastavu imaju kompost i plastika zajedno s preko 80% mase ukupno ispitanog uzorka.

Tablica 5. Sastav kompostiranog komunalnog otpada (Lakshmikanthan i sur., 2018)

Komponenta	Udio [%]
Odjeća	6,34
Plastika	28
Staklo	1,28
Koža	0,8
Kokos	5,56
Metal	-
Kamenje	1,96
Guma	0,88
Drvo	0,16
Kompost	54,2

Zhang i sur., (2020) odredili su sastav BMO otpada iz Tianziling odlagališta, Hangzhou, Kina. Prikazali su rezultate sastava BMO otpada za dva uzorka, M1 i M2 (Tablica 6). M1 uzorkovan je u zimskom periodu, dok je M2 uzorkovan u ljetnom periodu.

Tablica 6. Sastav MBO otpada iz Tianziling odlagališta u Hangzhou u Kini (Zhang i sur., 2020)

Komponenta	M1 [%]	M2 [%]
Papir	0,0	0,3
Guma i plastika	31,5	31,1
Tekstil	8,3	17,1
Drvo	4,7	21,7
Kamenje	8,2	6,4
Staklo	17,1	11,8
Metal	2,7	1,8
Tlo	10,9	6,6
Ostalo	16,6	3,2

Najzastupljeniji materijal u oba uzorka je guma i plastika. Razlog tome može se pripisati slabijoj razgradnji gume i plastike, ali i u nedovoljnoj osviještenosti stanovništva o odvojenom prikupljanju

otpada. Uzorak M1 ima znatno veći udio stakla i komponente ostalo dok u uzorku M2 ima više drva i tekstila.

2.4.4 Utvrđeni sastavi prema obliku čestica otpada

Dixon i Langer (2006) predložili su sustav klasifikacije otpada kako bi olakšali procjenu stišljivosti i posmične čvrstoće otpada. Između ostalih zahtjeva koji su potrebni za klasifikaciju otpada objavili su da je potrebno odrediti oblik komponenata kako bi mogli razlikovati komponente slične tlu (npr. trodimenzionalne čestice) i komponente koje nisu slične tlu (dvodimenzionalne, npr. list papira). Poznavanje tih oblika, omogućilo bi klasifikaciju komponenti u odnosu na njihov potencijal utjecaja na mehaničko ponašanje otpada, vlačnu i posmičnu čvrstoću te stišljivost.

Nastavljajući i proširujući rad Dixona i Langer (2006), Velkushanova (2011) je predstavila klasifikaciju MBO otpada na četiri različita oblika zrna:

0D: zrna - to su čestice kod kojih su sve tri dimenzije manje od određene minimalne značajne duljine. U radu spomenute autorice, odabrana je dimenzija od 5 mm, tako da su sve komponente čije su sve tri stranice <5 mm svrstane u kategoriju 0D.

1D: vlakna, štapići ili žice – to su linijske čestice kod kojih je jedna dimenzija izraženija u odnosu na preostale dvije dimenzije čestice. Takve čestice mogu djelovati kao armatura na način da povećavaju posmičnu čvrstoću otpada.

2D: folije, listovi, papir - ovakve čestice su plošne te imaju dvije izraženije dimenzije i jednu vrlo malu. Autor je pretpostavio da bi takvi oblici mogli pozitivno djelovati na čvrstoću materijala, ili kao elementi koji preusmjeruju ili sprječavaju protok tekućine/fluida kroz otpad.

3D: glomazne čestice - to su prostorne čestice kojima su sve tri dimenzije veće od neke minimalne značajne vrijednosti. Za ovakav oblik čestica smatra se da ne utječe na posmičnu čvrstoću otpada ili na protok filtrata kroz otpad.

Navedena podjela na ova četiri oblika čestica napravljena je na MBO otpadu iz Engleske i Njemačke čiji sastav po komponentama je prikazan u poglavlju 2.4.3 Utvrđeni sastavi BMO/MBO otpada. Kod komponente otpada fleksibilne plastike, dominantan oblik čestica pripada u 2D grupu

oblika, s time da u ovoj komponenti nema 3D oblika čestica. Komponenta stakla za uzorke MBO otpada iz Engleske i Njemačke ne sadrži 1D oblik čestica. U nastavku su dominantni oblici čestica za pojedinu grupu otpada prikazani u Tablici 7 za MBO otpad iz Engleske, i u Tablici 8 za MBO otpad iz Njemačke. Potrebno je naglasiti kako je spomenuta autorica, osim prema obliku čestica, otpad podijelila na 5 različitih dimenzija čestica metodom prosijavanja (>20 mm, 20-12 mm, 12-7 mm, 7-5 mm i <5 mm).

Tablica 7. Dominantan oblik čestica MBO materijala iz Engleske (Velkushanova, 2011)

Komponenta	>20 mm	20-12 mm	12-7 mm	7-5 mm	<5 mm
Fleksibilna plastika	2D	2D	2D	2D	
Kruta plastika	3D	2D	2D	2D	
Tekstil	1D/2D	1D/2D	1D/2D	1D/2D	
Staklo	2D	2D	2D	2D	
Keramika		3D	3D		
Kamenje		3D	3D	3D	
Metal	2D	2D	2D	2D	
Papir	2D	2D	2D	2D	
Drvo		1D	1D	1D	
Kosti		3D	3D	3D	
Guma		3D	3D	3D	
Neidentificirano <5 mm					0D
Neidentificirano >5 mm	3D	3D	3D	3D	

Tablica 8. Dominantan oblik čestica MBO materijala iz Njemačke (Velkushanova, 2011)

Komponenta	>20 mm	20-12 mm	12-7 mm	7-5 mm	<5 mm
Fleksibilna plastika	2D	2D	2D	1D	
Kruta plastika	3D	2D	2D	1D/2D	
Tekstil	2D	1D	1D	1D/2D	
Staklo	2D	2D	2D	2D	
Keramika	3D	3D	3D	3D	
Kamenje	3D	3D	3D	3D	
Metal	2D	2D	2D	2D	

Papir	2D	2D	2D	2D	
Drvo	3D	1D	1D	1D	
Kosti	3D	3D	3D	3D	
Guma		3D	3D	3D	
Neidentificirano <5 mm					0D
Neidentificirano >5 mm	3D	3D	3D	3D	

MBO otpad iz Engleske sastoji se od 43,2% 3D oblika čestica, 23,3% materijala ima 2D oblik čestica, 1D oblik čestica ima udio od 3,4% materijala te 29,1% čestica ima 0D oblik.

MBO otpad iz Njemačke ima 46,8% 3D oblika čestica, 23,2% materijala ima 2D oblik čestica, 1D oblik čestica ima udio od 2,7% materijala te 27% čestica ima 0D oblik.

Generalno, jedna trećina uzoraka MBO otpada iz Engleske i Njemačke imala je dimenzije komponenti <5 mm što predstavlja 0D oblik čestica. 2D oblik čestica čini oko 23% ukupnog materijala. Budući da gotovo trećina promatranog MBO otpadnog materijala otpada na 2D oblik čestica koji s jedne strane može povećati čvrstoću materijala, dok s druge strane može zaustaviti ili preusmjeriti protok kroz otpad (ovisno radi li se o propusnom ili slabo propusnom materijalu, npr. tekstil, plastika, staklo, metalne folije) potrebno je posebnu pažnju posvetiti ovom obliku čestica.

2.5 Materijal i metode za utvrđivanje osnovnih karakteristika i geotehničkih parametara BMO otpada korišteni u ovoj disertaciji

2.5.1 Postupak utvrđivanja granulometrijskog sastava otpada

Postupak za određivanje granulometrijske krivulje preuzet je iz standarda ASTM D 422 (Particle-Size Analysis of Soils).

Pribor koji je korišten za prosijavanje i određivanje granulometrijske krivulje je slijedeći:

- set sita s otvorima okana kako slijedi: 31,5, 16, 8, 4, 2, 1 i 0,5 mm, s posudom na dnu i poklopcem,
- laboratorijska vaga kapaciteta do 15 kg, s točnošću očitavanja od 1 g,
- uređaj za vibriranje.

Uzorci otpada su nakon sušenja u sušioniku na 60 °C vagani, stavljeni na vrh seta sita koja su složena od najvećeg otvora prema najmanjem te prosijani kroz najmanje 10 minuta na uređaju za vibriranje (Slika 18).



Slika 18. Uređaj za vibriranje i set sita korišteni za određivanje granulometrijske krivulje ispitivanog materijala

Masa otpada koji zaostane na pojedinom situ izračunata je Jednadžbom (1). Rezultati prosijavanja prikazani su standardnom granulometrijskom krivuljom u polulogaritamskom mjerilu. Ukupno je prosijano 25 uzoraka materijala A i 14 uzoraka materijala B metodom suhog postupka.

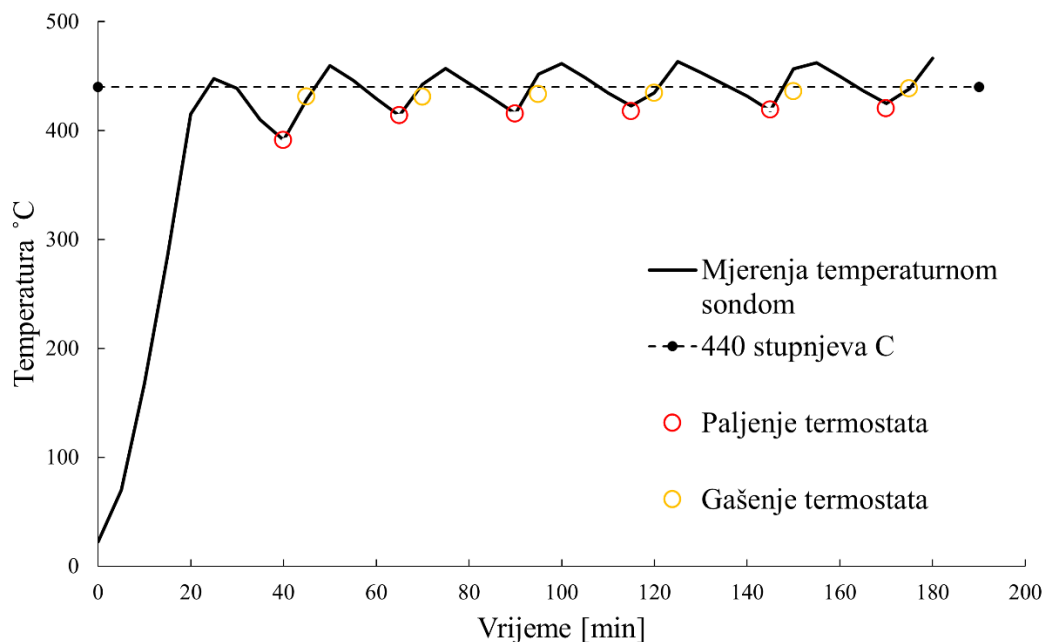
2.5.2 Postupak utvrđivanja udjela organske tvari

Postupak mjerenja udjela organske tvari prilagođen je i usvojen iz ASTM D 2974 standarda. Prije mjerenja udjela organske tvari na uzorcima otpada, mufolna peć umjerena je uz pomoć temperaturene sonde TP-100 mjernog raspona od 0 do 600 °C. Temperaturena sonda postavljena je u središte peći kroz otvor koji se nalazi na vratima kao što je prikazano na Slici 19.



Slika 19. Mjerenje temperature u središtu peći za žarenje temperaturnom sondom

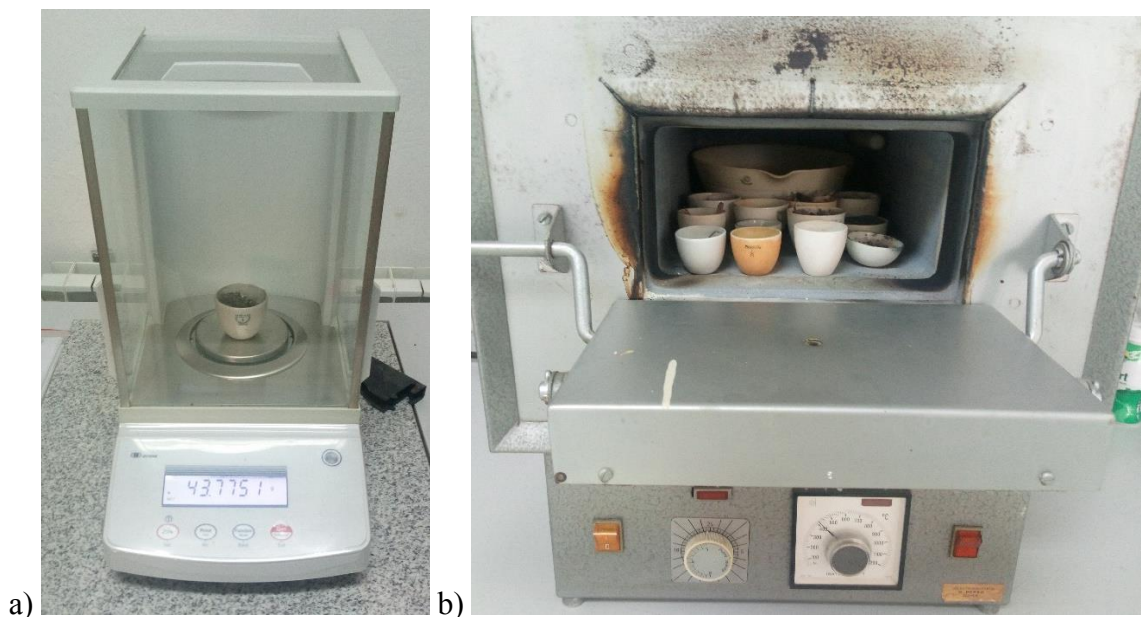
Na termostatu peći, ciljana temperatura prilikom umjeravanja postavljena je na 420 °C. Vrijednosti temperature na temperaturnoj sondi bilježene su u intervalima od 5 minuta u ukupnom trajanju mjerenja od 3 h. Rezultati umjeravanja prikazani su na Slici 20. Slika također prikazuje temperaturu zadanu ASTM 2974 D standardom (440 °C).



Slika 20. Mjerena temperatura u peći za žarenje OMEGA sondom

Iz prikazanog grafa na Slici 20, može se zaključiti da se termostat u peći za žarenje periodički pali kad se temperatura u peći spusti ispod 420 °C. Nakon toga, kad temperatura u peći dosegne temperaturu od 430 °C, termostat gasi grijače peći dok temperatura unutar peći za žarenje i dalje raste do vrijednosti od 460 °C, nakon čega se spušta do temperature od 420 °C kod koje se termostat ponovo pali. Raspon temperature u peći varira od 420-460 °C sa srednjom vrijednosti od 440 °C. Iz prikazanog grafa može se zaključiti da prosječna temperatura u peći za žarenje zadovoljava vrijednost temperature zadanu ASTM D 2974 standardom – metoda c (440 °C).

Nakon umjeravanja mufolne peći, reprezentativni uzorci od 50 g pripremljeni su za uzorke materijala A i B prema masenim postocima određenim ručnim razvrstavanjem ispitivanog otpada na komponente (plastika, staklo, metal, itd.) prikazanih u poglavlju sastav otpada po komponentama. Svaka komponenta otpada izvagana je zasebno laboratorijskom vagom i stavljena u keramičke posude (Slika 21a i b). Sadržaj organske tvari u uzorcima otpada određen je žarenjem na 440°C do konstantne mase. Na temelju razlike u masi prije i nakon procesa paljenja određen je maseni udio organskog sadržaja svake pojedine komponente za uzorak A i B.



Slika 21. a) Laboratorijska vaga; b) Reprezentativni uzorak od 50 g u keramičkim posudicama

2.5.3 Postupak određivanja udjela vlage

Sadržaj vlage određen je prema ASTM D 2216-98 standardu za određivanje vlažnosti tla mjerenjem mase prije i nakon sušenja u sušioniku. Budući da se radi o materijalu bogatom organskom tvari, temperatura u sušioniku namještena je na 60°C kako ne bi došlo do gubitka organske tvari spaljivanjem. (Slika 22 a i b).

Pribor koji je korišten za određivanje vlažnosti je sljedeći:

- limena posuda za sušenje uzoraka,
- laboratorijska vaga kapaciteta do 15 kg s točnošću očitavanja od 1 g,
- veliki laboratorijski sušionik,
- priručna lopatica.

Uzorci metanogene frakcije su netom nakon dopreme u Laboratorij za inženjerstvo okoliša razastrti na stol. Limene posude su označene te je određena masa prazne posude. Nakon toga su vlažni uzorci metanogene frakcije priručnom lopaticom stavljeni u posude i izvagana je masa pojedinog uzorka u posudi. Nakon sušenja u sušioniku do konstantne mase, uzorci s posudama su ponovo vagani te je određena masa suhog materijala. Vlažnost se uobičajeno u mehanici tla izražava preko

suhe mase, no za otpad se vlažnost najčešće izražava preko vlažne, odnosno ukupne mase uzorka (Jednadžba (5)). U ovoj disertaciji vlažnost otpada iskazana je preko vlažne mase uzorka.



a)



b)

Slika 22. Pripremljeni uzorci metanogene frakcije za određivanje vlažnosti: a) u posudama; b) u sušioniku

Ukupno je osušeno i određena vlažnost na 42,13 kg materijala A, odnosno na 5,73 kg materijala B.

2.5.4 Postupak utvrđivanja sastava otpada

Za pripremu reprezentativnih uzoraka za određivanje sastava otpada korištena je metoda četvrtanja. Metoda četvrtanja uključuje stavljanje uzorka na čvrstu podlogu i dobro miješanje (Slika 23).



Slika 23. Metanogena frakcija nakon sušenja

Zatim se pomoću ručnog alata podijeli na četiri jednaka dijela (Slika 24a), od kojih se dva dijagonalno suprotna dijela odbacuju (Slika 24b).



a)



b)

Slika 24. a) Metoda četvrtanja; b) Odbacivanje dvije nasuprotne četvrtine

S preostala dva dijela uzorka postupak se ponavlja sve dok se ne dobije dovoljno mala količina reprezentativnog uzorka za ispitivanje. Za uzorak A i uzorak B pripremljena su po dva reprezentativna uzorka (A1, A2, B1 i B2), masa svakog uzorka oko 1 kg. Primijenjeni postupak usvojen je iz ASTM D6323-19 standarda. Pojedinačni sastavni dijelovi ručno su odvojeni i izvagani kako bi se odredio sastav otpada.

Dio otpada koji se nije mogao identificirati ili odvojiti je mješavina komponenti te je svrstan u kategoriju neidentificirano.

2.5.5 Postupak razvrstavanja otpada prema obliku čestica

Nakon što je otpad ručno razvrstan prema komponentama, unutar svake komponente otpada na temelju osobne procjene istraživača, napravljena je i klasifikacija čestica po obliku na 0D, 1D, 2D i 3D.

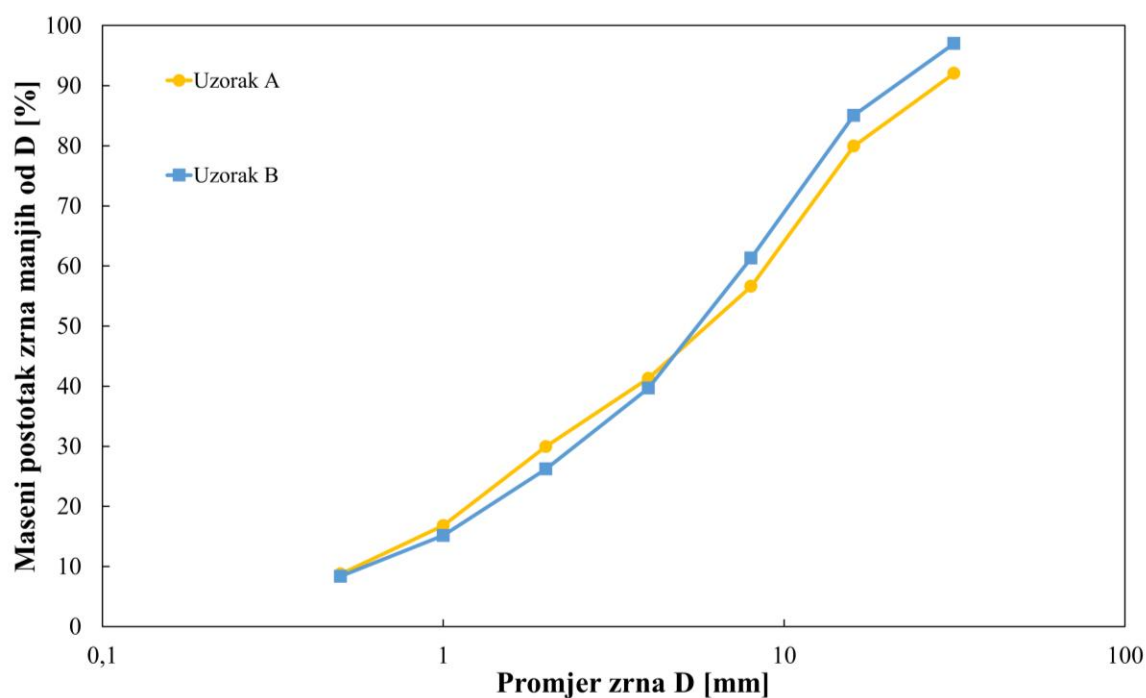
Komponenta neidentificirano smještena je u kategoriju 0D oblika čestica i prosijana na situ otvora 2 mm i tako razdvojena na frakciju <2 mm koja doprinosi posmičnoj čvrstoći trenjem te na >2 mm koja doprinosi vlačnoj čvrstoći (Velkushanova, 2011).

Temeljem masenih udjela izdvojenih 0D, 1D, 2D i 3D oblika čestica unutar svake komponente razvrstanog otpada, za uzorke A1, A2 i B1, B2, izračunata je učestalost pojedinog oblika čestica unutar svake komponente otpada. Osim toga, za svaki od navedenih uzoraka napravljena je i analiza učestalosti pojedinog oblika čestica (1D, 2D, 3D) u odnosu na masu ukupno izdvojenog uzorka.

2.6 Rezultati i rasprava

2.6.1 Utvrđeni granulometrijski sastav ispitivanog otpada

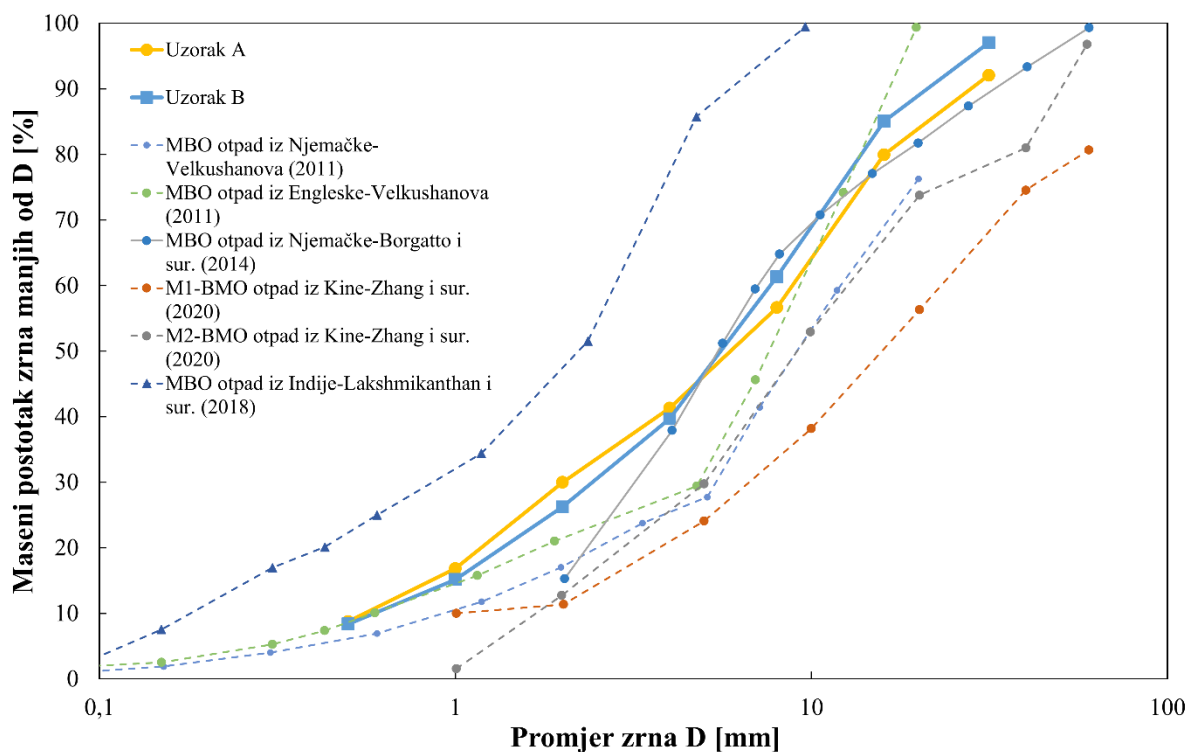
Srednje vrijednosti utvrđenih granulometrijskih krivulja uzoraka A i B prikazane su na Slici 25, dok su rezultati prosijavanja svih 25 uzoraka materijala A i 14 uzoraka materijala B dostupni na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>.



Slika 25. Granulometrijske krivulje uzoraka bioosušenog otpada

Koeficijenti zakrivljenosti i jednoličnosti za uzorak A sa slike 25 su $C_c = 0,76$, i $C_u = 15,86$, dok su za uzorak B, vrijednosti $C_c = 1,36$, i $C_u = 12,49$ što znači da je ovo dobro građirani materijal s

širokim rasponom veličine zrna. Slične granulometrijske krivulje za BMO/MBO otpad dobili su Lakshmikanthan i sur., (2018) te Zhang i sur., (2020) – Slika 26.



Slika 26. Granulometrijske krivulje vlastitih ispitivanja i ostalih istraživača

Sa Slike 26 može se zaključiti da se raspon veličina zrna otpada nakon BMO/MBO kreće u granicama karakterističnim za šljunkovite materijale (promjer zrna od 2 do 60 mm), stoga se općenito BMO/MBO otpad može klasificirati kao krupnozrnati materijal, iako će svojstva stišljivosti i nosivosti takvih otpadnih materijala biti znatno drugačija od šljunkovitog tla.

2.6.2 Utvrđeni udio organske tvari

U Tablicama 9 i 10, prikazan je organski sadržaj svake komponente otpada posebno, iz čega se može vidjeti da je ukupna količina organskog sadržaja u ispitivanom uzorku A, 51,62%, a u uzorku B, 55,26%. Nešto veći udio organske tvari u uzorku B pripisan je utjecaju turističke sezone. Detaljni rezultati određivanja organske tvari uzoraka A i B dostupni su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>.

Tablica 9. Maseni udio organske tvari određen žarenjem u peći za uzorak A

Komponenta	Masa uzorka [g]	Gubitak mase nakon žarenja u peći [g]	Maseni udio u odnosu na ukupnu masu uzorka [%]
Plastika	3,30	2,407	4,81
Tekstil	0,14	0,103	0,21
Staklo	5,32	0,007	0,01
Metali	0,33	0,091	0,18
Papir/karton	2,44	1,929	3,86
Drvo	0,60	0,538	1,07
Kosti/koža	0,09	0,036	0,07
Kamenje	1,51	0,016	0,03
Keramika	0,26	0,027	0,05
Guma	0,05	0,021	0,04
Kuhinjski otpad	1,19	0,944	1,89
Neidentificirano >2 mm	21,00	14,00	27,98
Neidentificirano <2 mm	13,82	5,711	11,41
Ukupno	50,04	25,83	51,62

Tablica 10. Maseni udio organske tvari određen žarenjem u peći za uzorak B

Komponenta	Masa uzorka [g]	Gubitak mase nakon žarenja u peći [g]	Maseni udio u odnosu na ukupnu masu uzorka [%]
Plastika	2,62	2,15	4,29
Tekstil	0,27	0,26	0,52
Staklo	4,36	0,01	0,02
Metali	0,48	0,42	0,84

Papir/karton	2,75	2,20	4,39
Drvo	2,64	2,43	4,84
Kosti/koža	0,19	0,11	0,22
Kamenje	2,50	0,39	0,78
Keramika	0,38	0,01	0,02
Guma	0,20	0,08	0,16
Kuhinjski otpad	1,42	1,11	2,21
Neidentificirano >2 mm	17,90	11,70	23,33
Neidentificirano <2 mm	14,45	6,85	13,66
Ukupno	50,16	27,72	55,26

Dobiveni rezultati udjela organske tvari bioosušenog otpada uzoraka A i B dobro se uklapaju u raspon vrijednosti organske tvari od 30-56% objavljene od strane različitih istraživača, no bliže su gornjoj granici utvrđenog raspona koju čine MBO materijali autora Bortoluzzi, (2014) i Lakshmikanthan i sur., (2018).

2.6.3 Utvrđeni udio vlage

Na seriji od 38 uzoraka materijala A utvrđene su vlažnosti u rasponu od 5,44 do 19,90% sa srednjom vrijednosti 11,24%. Ukupno je ispitano 8 uzoraka materijala B. Utvrđene su vlažnosti u rasponu od 9,35% do 11,04% sa srednjom vrijednosti 10,15%. Izmjerene vrijednosti svih 38 uzoraka materijala A i 8 uzoraka materijala B dostupne su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>.

Analizom otpada koja je provedena u kolovozu 2012. godine, određen je sadržaj vode u otpadu koji ulazi u postrojenje za BMO otpada u ŽCGO Marišćina od oko 51%. (Hidroplan d.o.o., 2014.)

U odnosu na određeni udio vlage metanogene frakcije uzorkovane u postrojenju za BMO otpada u ŽCGO Marišćina, može se zaključiti da tehnološki proces biosušenja otpada koji se koristi u postrojenju ima visok stupanj učinkovitosti.

Vrijednost udjela vlage nakon BMO/MBO otpada objavljena je od nekoliko autora (Velkushanova, 2011; Bortoluzzi, 2014; Lakshmikanthan i sur., 2018; Zhang i sur., 2020). Iako su za MBO otpada u radu Bortoluzzi, (2014) objavljene visoke vrijednosti vlažnosti nakon obrade otpada (74,83 - 81,2%), većina postrojenja za MBO otpada proizvodi materijal čije su vrijednosti vlažnosti na

izlazu slične onima izmjerenim u ovom istraživanju. Isto tako, vrijednosti vlažnosti nakon BMO obrade u radu Zhang i sur., (2020) dobro se podudaraju s rezultatima iz ovog istraživanja.

2.6.4 Utvrđeni sastav otpada

Rezultati za uzorak A i B prikazani su u nastavku Tablicama 11 i 12, dok je izračunata aritmetička sredina dva uzorka (A1, A2, i B1, B2) za pojedini materijal prikazana u Tablici 13.

Tablica 11. Masene vrijednosti i postotni udjeli pojedinačno izdvojenih komponenti za metanogenu frakciju proučavanog materijala – uzorak A

Komponenta	Uzorak A1		Uzorak A2	
	Masa odvojenih komponenti [g]	Maseni udio [%]	Masa odvojenih komponenti [g]	Maseni udio [%]
Plastika	69	6,36	50	6,49
Tekstil	2	0,18	2	0,26
Staklo	129	11,90	72	9,34
Metali	12	1,11	6	0,78
Papir/karton	50	4,61	37	4,80
Drvo	13	1,20	9	1,17
Kosti/koža	3	0,28	1	0,13
Kamenje	29	2,68	22	2,85
Keramika	1,6	0,15	6	0,78
Guma	0	0,00	2	0,26
Kuhinjski otpad	34	3,14	9	1,17
Neidentificirano >2 mm	475	43,84	317	41,12
Neidentificirano <2 mm	266	24,55	238	30,87
Ukupno	1083,60	100,00	771,00	100,00

Razlike u sastavu otpada između uzoraka A1 i A2 (maseni udjeli) su vrlo male što ukazuje da komunalni čvrsti otpad nakon BMO pokazuje ujednačeniji sastav od npr. neobrađenog komunalnog otpada. Od ukupno ispitane mase uzorka A1 (1083,6 g), 342,6 g otpada (sve komponente osim Neidentificirano >2 i <2 mm) u sljedećem koraku je razvrstano prema obliku

čestica na 1D, 2D, i 3D oblik. Za uzorak A2, od ukupno ispitane mase (771 g), ispitana masa otpada prema obliku čestica (1D, 2D, 3D) iznosi 216 g (sve komponente osim Neidentificirano <2 i >2 mm). Komponente otpada Neidentificirano >2 i <2 mm svrstane su prema obliku čestica u 0D oblik, što za uzorak A1 iznosi 741 g, a za uzorak A2, 555 g.

Tablica 12. Masene vrijednosti i postotni udjeli pojedinačno izdvojenih komponenti za metanogenu frakciju proučavanog materijala – uzorak B

Komponenta	Uzorak B1		Uzorak B2	
	Masa odvojenih komponenti [g]	Maseni udio [%]	Masa odvojenih komponenti [g]	Maseni udio [%]
Plastika	73	6,26	47	4,24
Tekstil	5	0,43	7	0,63
Staklo	100	8,58	103,6	9,34
Metali	11	0,94	11	0,99
Papir/karton	54	4,63	70	6,31
Drvo	80	6,86	40	3,61
Kosti/koža	5	0,43	3	0,27
Kamenje	100	8,58	14	1,26
Keramika	7	0,60	10	0,90
Guma	7	0,60	2	0,18
Kuhinjski otpad	17	1,46	47,4	4,27
Neidentificirano >2 mm	369	31,65	439	39,59
Neidentificirano <2 mm	338	28,99	315	28,40
Ukupno	1166,00	100,00	1109,00	100,00

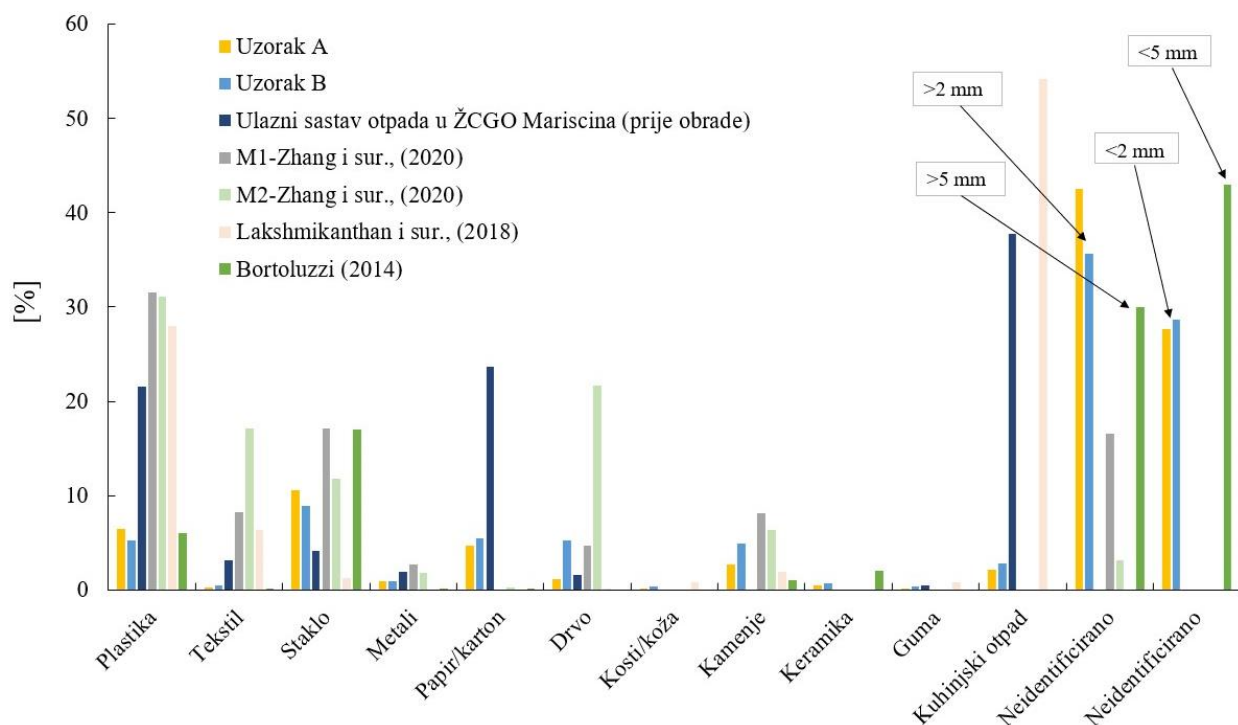
Slično kao i kod uzoraka A1 i A2, većina komponenata uzoraka B1 i B2 su slične. Razlika se može primijetiti kod uzorka B1 koji ima nešto veći udio drva i kamenja, dok uzorak B2 ima nešto veći udio kuhinjskog otpada. Od ukupno ispitane mase uzorka B1 (1166 g), 459 g otpada (sve komponente osim Neidentificirano >2 i <2 mm) dalje je razvrstano prema obliku čestica na 1D, 2D, i 3D oblik. Za uzorak B2, od ukupno ispitane mase (1109 g), prema obliku čestica (1D, 2D,

3D) razvrstano je 355 g. Komponente otpada Neidentificirano >2 i <2 mm svrstane su prema obliku čestica u 0D oblik, što za uzorak B1 iznosi 707 g, a za uzorak B2, 754 g.

Tablica 13. Srednje vrijednosti masenih udjela komponenata metanogene frakcije bioosušenog otpada - uzorci A i B

Komponenta	Maseni udio [%]	Maseni udio [%]
	Uzorak A	Uzorak B
Plastika	6,43	5,25
Tekstil	0,22	0,53
Staklo	10,62	8,96
Metali	0,94	0,97
Papir/karton	4,71	5,47
Drvo	1,18	5,23
Kosti/koža	0,20	0,35
Kamenje	2,76	4,92
Keramika	0,46	0,75
Guma	0,13	0,39
Kuhinjski otpad	2,15	2,87
Neidentificirano >2 mm	42,48	35,62
Neidentificirano <2 mm	27,71	28,70
Ukupno	100,00	100,00

Usporedbom srednjih vrijednosti masenih udjela uzoraka A i B iz Tablice 13, može se zaključiti da uzorak B sadrži nešto više drva i kamenja, dok su udjeli ostalih komponenti otpada uglavnom ujednačeni. Slika 27 prikazuje usporedbu rezultata uzoraka A i B iz Tablice 13, s masenim udjelima procijenjenog sastava otpada na ulazu u postrojenje (prije BMO obrade) te usporedbu s masenim udjelima BMO/MBO otpada utvrđenih od strane drugih istraživača.



Slika 27. Usporedba rezultata aritmetičkih sredina masenih postotaka uzoraka A i B i ostalih istraživača

Na slici 27 vidi se da sastav otpada i nakon obrade pokazuje ovisnost o mjestu nastanka kao i navikama potrošača u pojedinoj zemlji budući da je porijeklo bioosušenog otpada prikazano u radu Zhang i sur., (2020) iz odlagališta u Kini, Lakshmikanthan i sur., (2018) objavili su podatke za kompostirani otpad iz Indije, dok je otpad u radu Bortoluzzi (2014) kompostirani materijal porijeklom iz Engleske. No, generalno, iz BMO/MBO otpada najveći maseni udio pripada frakciji koja se ne može vizualno raspoznati, tzv. komponenta „neidentificirano“. U radu Zhang i sur., (2020) autori su uz komponentu plastike uključili i komponentu gume, no u odnosu na mali udio gume prisutne u sastavu većine autora, pretpostavlja se da je i udio gume u sastavu otpada koji je prikazao Zhang i sur., (2020) zanemariv. Za uzorke A i B u ovom radu, komponenti otpada „neidentificirano“ pripada 70,19% odnosno 64,32%. Slične rezultate za neidentificiranu komponentu objavilo je nekoliko autora. U biostabiliziranom otpadu ispitanom u radu Velkushanove (2011) na neidentificiranu frakciju iz Njemačke otpada 53,8%, dok za otpad iz Engleske taj udio iznosi 58%. Bortoluzzi (2014) je za neidentificiranu komponentu <5 mm i >5 mm objavio vrijednost od 73% od ukupne suhe mase ispitanog uzorka. Na Slici 27 također je prikazan ulazni sastav otpada dobiven iz dvije analize komunalnog otpada u Primorsko-goranskoj

županiji tijekom srpnja i kolovoza 2012. godine (Hidroplan d.o.o., 2014.). Usporedbom sastava otpada na ulazu i sastava otpada nakon BMO obrade u postrojenju može se primijetiti kako su se udjeli plastike, papira/kartona, kuhinjskog otpada, tekstila i gume prividno smanjili između 70-90%. S obzirom da više od polovice sastava ispitivanog materijala nakon BMO pripada komponenti neidentificirano, pojedine komponente unutar frakcije neidentificirano ne mogu se golim okom raspoznati te se iz tog razloga navedeno smanjenje mora uzeti s oprezom.

2.6.5 Utvrđena raspodjela otpada prema obliku čestica

Za uzorak otpada A1, masa komponentata otpada neidentificirano >2 i <2 mm iznosila je 741 g, što na ukupno izdvojenu masu uzorka A1 (1083,6 g) iznosi 68,38%.

Za uzorak otpada A2, masa komponentata otpada neidentificirano >2 i <2 mm iznosila je 555 g, što na ukupno izdvojenu masu uzorka A2 (771 g) iznosi 71,98%.

Za uzorak otpada B1, masa komponentata otpada neidentificirano >2 i <2 mm iznosila je 707 g, što na ukupno izdvojenu masu uzorka B1 (1166 g) iznosi 60,63%.

Za uzorak otpada B2, masa komponentata otpada neidentificirano >2 i <2 mm iznosila je 754 g, što na ukupno izdvojenu masu uzorka B2 (1109 g) iznosi 67,99%.

Navedeni udjeli svrstani su prema obliku čestica u 0D.

Izgled pojedinih komponente prema obliku čestica na 0D, 1D, 2D i 3D za uzorak A1 prikazan je na Slikama 28 i 29, dok su udjeli pojedine komponente razvrstane prema obliku na 1D, 2D, i 3D za uzorke A1 i A2 prikazani u Tablici 14, a za uzorke B1 i B2 u Tablici 15.



Slika 28. Komponente otpada uzorka A1 razvrstane prema obliku čestica na 1D, 2D i 3D



Slika 29. Neidentificirana komponenta uzorka A1 prosijana na situ otvora 2 mm a) frakcija <2 mm; b) frakcija >2mm (0D)

Tablica 14. Rezultati razvrstavanja dva uzorka (A1 i A2) materijala A prema obliku čestica

	Maseni udio odvojenog otpada prema obliku					
	Uzorak A1			Uzorak A2		
Komponenta	1 D	2 D	3 D	1 D	2 D	3 D
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Plastika	12,35	23,21	8,96	27,78	27,27	11,99
Tekstil	1,23	0,26	1,79	0,00	1,30	0,00
Staklo	0,00	48,30	0,00	0,00	46,75	0,00
Metali	61,73	1,12	5,97	16,67	0,26	8,56
Papir/karton	0,00	14,83	14,93	0,00	16,23	20,55
Drvo	24,69	1,87	8,96	55,56	3,25	3,42
Kosti/koža	0,00	0,07	4,18	0,00	0,00	1,71
Kamenje	0,00	0,00	43,28	0,00	0,00	37,67
Keramika	0,00	0,60	0,00	0,00	0,65	8,56
Guma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	2,40
Kuhinjski otpad	0,00	9,73	11,94	0,00	3,90	5,14
Ukupno [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Postotni udjeli prikazani u Tablici 14 izračunati su u odnosu na ukupno izdvojenu masu pojedinog oblika čestica. Tako npr., za uzorak A1, najveći udio 1D oblika čestica pripada komponenti metala (61,73%), za 2D oblik čestica najveći udio pripada komponenti stakla, a za 3D oblik čestica to je komponenta kamenje. Iako je vidljiva razlika u udjelima pojedinih oblika (1D, 2D, 3D) između uzoraka A1 i A2, njihova razlika je zanemariva i može se pripisati nehomogenosti materijala. Kod 1D oblika čestica, najveći udio pripada komponentama plastike, metala i drva kod oba uzorka (A1 i A2). Kod 2D oblika čestica, najveći udio pripada komponentama plastike, stakla, papira/kartona i kuhinjskog otpada ponovo kod oba uzorka, A1 i A2.

Tablica 15. Rezultati razvrstavanja dva uzorka (B1 i B2) materijala B prema obliku čestica

	Maseni udio odvojenog otpada prema obliku					
	Uzorak B1			Uzorak B2		
Komponenta	1 D	2 D	3 D	1 D	2 D	3 D
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Plastika	8,43	33,50	5,42	6,83	23,55	2,95
Tekstil	0,87	0,44	1,74	2,18	1,58	2,38
Staklo	8,14	33,81	19,13	21,80	36,28	23,79
Metali	5,43	1,19	1,79	4,36	4,87	0,00
Papir/karton	5,62	20,21	8,08	4,65	14,49	35,27
Drvo	68,51	2,12	3,02	51,31	1,16	2,30
Kosti/koža	0,00	0,37	2,25	1,31	0,37	1,23
Kamenje	0,00	0,31	50,90	0,00	0,91	10,25
Keramika	0,00	1,87	2,05	0,00	1,22	6,56
Guma	0,29	0,81	2,76	1,45	0,61	0,00
Kuhinjski otpad	2,71	5,36	2,86	6,10	14,97	15,26
Ukupno [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Postotni udjeli prikazani u Tablici 15 izračunati su u odnosu na ukupno izdvojenu masu pojedinog oblika čestica (1D, 2D, 3D) za uzorke B1 i B2. Kao i kod uzoraka A1 i A2, razlike u postotnim udjelima između uzoraka B1 i B2 za pojedine, ručno izdvojene oblike čestica, mogu se pripisati nehomogenosti materijala.

Iz rezultata prikazanih u Tablicama 14 i 15 za uzorke A1, A2, i B1, B2, napravljena je aritmetička sredina. Rezultati aritmetičke sredine prikazani su u Tablici 16 za uzorak A te u Tablici 17 za uzorak B.

Tablica 16. Postotni udio uzorka A razvrstan prema obliku čestica (1D, 2D, 3D)

Aritmetička sredina – udio otpada			
	1 D	2 D	3 D
	%	%	%
Plastika	20,06	25,24	10,47
Tekstil	0,62	0,78	0,90
Staklo	0,00	47,52	0,00
Metali	39,20	0,69	7,27
Papir/karton	0,00	15,53	17,74
Drvo	40,12	2,56	6,19
Kosti/koža	0,00	0,04	2,95
Kamenje	0,00	0,00	40,48
Keramika	0,00	0,62	4,28
Guma	0,00	0,19	1,20
Kuhinjski otpad	0,00	6,82	8,54
Ukupno [%]	100,00	100,00	100,00

Tablica 17. Postotni udio uzorka B razvrstan prema obliku čestica (1D, 2D, 3D)

Aritmetička sredina – udio otpada			
	1 D	2 D	3 D
	%	%	%
Plastika	7,63	28,53	4,19
Tekstil	1,53	1,01	2,06
Staklo	14,97	35,04	21,46
Metali	4,89	3,03	0,9
Papir/karton	5,14	17,35	21,68
Drvo	59,91	1,64	2,66
Kosti/koža	0,65	0,37	1,74
Kamenje	0,00	0,61	30,58
Keramika	0,00	1,54	4,30
Guma	0,87	0,71	1,38
Kuhinjski otpad	4,41	10,17	9,06
Ukupno [%]	100,00	100,00	100,00

Budući da je ukupno odvojena masa uzorka A1 prema obliku čestica 1083,6 g, a ukupno odvojena masa uzorka A2 je 771 g, udio pojedinog oblika (0D, 1D, 2D, 3D) u ukupnoj masi uzorka A1 i A2 prikazan je u nastavku u Tablici 18.

Tablica 18. Udio pojedinog oblika čestica u odnosu na ukupno odvojenu masu uzoraka A1 i A2

	Maseni udio odvojenog otpada prema obliku							
	Uzorak A1				Uzorak A2			
Komponenta	0D	1 D	2 D	3 D	0D	1 D	2 D	3 D
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Plastika	-	0,09	5,72	0,55	-	0,13	5,45	0,91
Tekstil	-	0,01	0,06	0,11	-	0,00	0,26	0,00
Staklo	-	0,00	11,90	0,00	-	0,00	9,34	0,00
Metali	-	0,46	0,28	0,37	-	0,08	0,05	0,65
Papir/karton	-	0,00	3,65	0,92	-	0,00	3,24	1,56
Drvo	-	0,18	0,46	0,55	-	0,26	0,65	0,26
Kosti/koža	-	0,00	0,02	0,26	-	0,00	0,00	0,13
Kamenje	-	0,00	0,00	2,68	-	0,00	0,00	2,85
Keramika	-	0,00	0,15	0,00	-	0,00	0,13	0,65
Guma	-	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,08	0,18
Kuhinjski otpad	-	0,00	2,40	0,74	-	0,00	0,78	0,39
Ukupno		0,75	24,65	6,18	-	0,47	19,97	7,57
Neidentificirano >2 mm	68,38	-	-	-	71,98	-	-	-
Neidentificirano <2 mm		-	-	-		-	-	-

Iz Tablice 18 može se uočiti da je kod uzoraka A1 i A2, najučestaliji oblik čestica 0D (68,38% za A1 i 71,98% za A2), nakon toga, dominantan udio pripada 2D obliku čestica s vrlo sličnim udjelima i za uzorak A1 i za A2. Najmanji udio u ukupno odvojenim uzorcima A1 i A2 pripada obliku čestica 1D s udjelom manjim od 1% za oba uzorka.

Budući da je ukupno odvojena masa uzorka B1 prema obliku čestica 1166 g, a ukupno odvojena masa uzorka B2 je 1109 g, udio pojedinog oblika (0D, 1D, 2D, 3D) u ukupnoj masi uzorka B1 i B2 prikazan je u nastavku u Tablici 19.

Tablica 19. Udio pojedinog oblika čestica u odnosu na ukupno odvojenu masu uzoraka B1 i B2

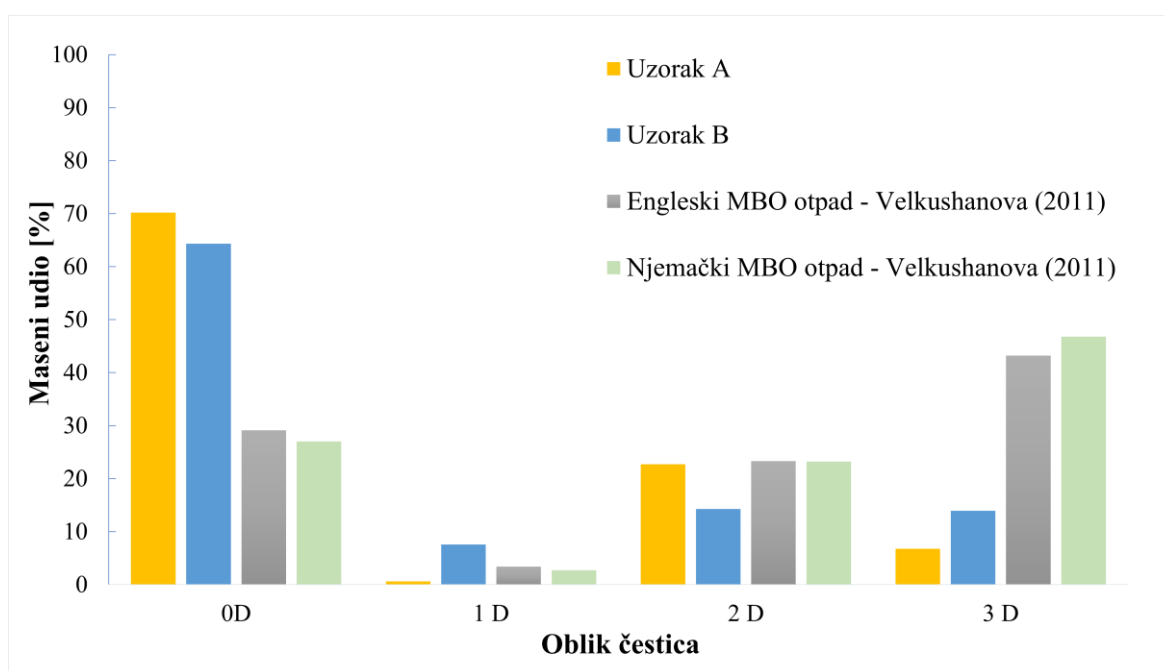
	Maseni udio odvojenog otpada prema obliku							
	Uzorak B1				Uzorak B2			
Komponenta	0D	1 D	2 D	3 D	0D	1 D	2 D	3 D
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Plastika	-	0,75	4,61	0,91	-	0,42	3,49	0,32
Tekstil	-	0,08	0,06	0,29	-	0,14	0,23	0,26
Staklo	-	0,72	4,65	3,21	-	1,35	5,37	2,61
Metali	-	0,48	0,16	0,30	-	0,27	0,72	0,00
Papir/karton	-	0,50	2,78	1,36	-	0,29	2,15	3,88
Drvo	-	6,06	0,29	0,51	-	3,18	0,17	0,25
Kosti/koža	-	0,00	0,05	0,38	-	0,08	0,05	0,14
Kamenje	-	0,00	0,04	8,53	-	0,00	0,14	1,13
Keramika	-	0,00	0,26	0,34	-	0,00	0,18	0,72
Guma	-	0,03	0,11	0,46	-	0,09	0,09	0,00
Kuhinjski otpad	-	0,24	0,74	0,48	-	0,38	2,22	1,68
Ukupno		8,85	13,75	16,77	-	6,20	14,82	10,99
Neidentificirano >2 mm	60,63	-	-	-	67,99	-	-	-
Neidentificirano <2 mm		-	-	-		-	-	-

Iz Tablice 19 može se uočiti da je kod uzoraka B1 i B2, najučestaliji oblik čestica 0D (60,63% za B1 i 67,99% za B2), nakon toga, dominantan udio pripada 3D obliku čestica za uzorak B1 (16,77%), i 2D obliku za uzorak B2 (14,82%). Najmanji udio u ukupno odvojenim uzorcima B1 i B2 pripada obliku čestica 1D.

Iz rezultata prikazanih u Tablici 18 iz uzoraka A1 i A2 te Tablici 19 iz uzoraka B1 i B2 izračunata je prosječna vrijednost za uzorak A i B koja je prikazana na Slici 30.

Na Slici 30 može se vidjeti da je za uzorke A i B dominantan oblik čestica 0D, a to su čestice koje imaju neutralan doprinos na čvrstoću otpada. Ukoliko veliki udio komponenata u 0D obliku čestica pripada biorazgradivom otpadu ili česticama koje su po prirodi stišljivije kao što je npr., kuhinjski otpad, papir/karton, plastika i slično, iako se ne mogu raspoznati golim okom, može se očekivati veći doprinos takvih čestica slijeganju cjelokupnog materijala.

Oblici čestica 1D i 2D djeluju kao armaturni elementi, djelujući povoljno na posmičnu čvrstoću materijala (1D i 2D oblici) ili samo zaustavljajući ili preusmjerujući protok kroz materijal (samo 2D oblici). Budući da udio 1D oblika čestica za uzorak A iznosi <1%, a za uzorak B <8% (Slika 30) ukupan doprinos 1D oblika čestica ojačanju materijala ili povećanju njegove posmične čvrstoće, može se zanemariti što je u skladu s rezultatima za 1D oblik čestica drugih istraživača. (Velkushanova, 2011). Iako 3D oblik čestica zauzima udio od otprilike 7% i 14% za uzorak A odnosno uzorak B, njihov doprinos je neutralan u odnosu na posmičnu čvrstoću i smjer kretanja fluida kroz otpad tako da se može zanemariti. Najveći doprinos u ojačanju materijala ili samo u smjeru protoka fluida kroz otpad imat će 2D oblik čestica, budući da udio spomenutog oblika čestica za uzorak A iznosi oko 23%, dok za uzorak B iznosi oko 14%.



Slika 30. Sastav otpada prema obliku čestica uzoraka A i B i rezultati iz Velkushanova (2011)

Uspoređujući bioosušeni materijal iz ovog rada i kompostirani materijal iz Engleske i Njemačke objavljen u radu Velkushanova (2011), bioosušeni otpad sadrži otprilike 50% više 0D oblika čestica, dok kompostirani otpad sadrži više od 50% 3D oblika čestica dok su udjeli 1D i 2D oblika čestica oba materijala vrlo slični.

2.7 Zaključak

Rezultati ispitivanja poslužili su za dobivanje osnovnog uvida i preliminarnu procjenu karakteristika ispitivanog materijala. Ispitivanja su provedena na bioosušenom materijalu uzorkovanom u prvoj polovici godine (materijal A) i na materijalu uzorkovanom u drugoj polovici godine (Materijal B) koji su prošli postupak biološko-mehaničke obrade (BMO) u Županijskom centru za gospodarenje otpadom (ŽCGO), Mariščina.

Pregled srednjih vrijednosti granulometrijskih krivulja uzoraka A i B pokazuje da je više od 90% frakcije promatranog bioosušenog otpada manje od 25 mm što je u pogledu ispitivanja i ugradnje materijala u edometar zadovoljavajuće. Masa na zadnjem situ kod oba uzorka je manja od 10% tako da sastav sitne frakcije postupkom areometriranja nije određivan. U odnosu na koeficijente zakrivljenosti i jednoličnosti uzoraka A i B, očito je da se radi o dobro graduiranom materijalu. Prihvaćena je opća klasifikacija BMO otpada kao krupnozrnatog materijala, iako će svojstva stišljivosti i nosivosti ovakvog otpadnog materijala biti znatno drugačija od npr. šljunkovitog tla. Granulometrijske krivulje bioosušenog otpada iz ŽCGO Mariščina dobro se uklapaju u rezultate granulometrijskih krivulja bioosušenog i kompostiranog otpada ostalih istraživača.

Visoki udio organske tvari materijala A i B (preko 50% masenog udjela) koji su uzorkovani u različitim periodima godine pokazuje potencijal bioosušenog materijala za proizvodnju bioplina koji se proizvodi u biorektorskom odlagalištu otpada.

Udio vlage nakon procesa biosušenja u ŽCGO Mariščina je ispod 20%. Ugradnjom bioosušenog materijala niže vlažnosti u tijelo biorektorskog odlagališta sprječava se biorazgradnja BMO otpada mikroorganizmima (Feltrim i sur., 2021) prije postizanja potpunog kapaciteta odlagališta, njegovog zatvaranja završnim pokrovnim slojevima i početka vlaženja, odnosno prije pokretanja postupka proizvodnje bioplina.

Sastav BMO otpada, iako ovisi o različitim čimbenicima, može se usporediti sa sastavom BMO/MBO otpada iz drugih zemalja, a generalni zaključak je da BMO/MBO otpada proizvodi najveći udio sitne frakcije koja se golim okom ne može identificirati po komponentama. To su uglavnom zrnasti materijali, tzv. 0D oblik čestica koji prema literaturi (Velkushanova, 2011) djeluju neutralno na mehaničko ponašanje cjelokupnog otpada na odlagalištu. Najveći udio u bioosušenom otpadu u ovom radu nakon 0D oblika čestica, pripada 2D obliku čestica koje djeluju

povoljno na posmičnu čvrstoću BMO otpadnog materijala s udjelom od oko 23% za uzorak A i oko 14% za uzorak B. No, iako navedene čestice djeluju kao ojačanje, s druge strane, ovisno o količini propusnih (npr. tekstil) ili manje propusnih (npr. plastika, metal) komponenata koji spadaju u 2D oblik, mogu zaustavljati ili preusmjeravati protok fluida kroz otpad što može predstavljati određene probleme u pogledu recirkulacije procjednih voda kroz tijelo odlagališta.

2.8 Popis literature

ASTM D 422-63 (Reapproved 2002). Standard test method for Particle-Size Analysis of Soils.

ASTM D 2216-98. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

ASTM D 2974-00. Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils.

ASTM D 6323-19. Standard Guide for Laboratory Subsampling of Media Related to Waste Management Activities.

Borgato A. V. A., Mahler C. F., Münnich K., Webler A. D., (2014). Influence of the Fibre Component of Soft Plastic on Shear Strength Parameters of Pre-Treated Municipal Solid Waste. Soils and Rocks, São Paulo, Vol. 37(2): pp 151-15.

Bortoluzzi A., (2014). Behaviour of an MBT waste in monotonic triaxial shear test. PhD dissertation, Università degli Studi di Padova.

BS 1377-2 (1990). British standard methods of test for soils for civil engineering purposes. Part . Classification tests.

Cossu i Stegmann, (2019). Solid Waste Landfilling: concepts, processes, technologies, Elsevier, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02435-0>.

Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva.

Dixon i Langer, (2006). Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. Waste Management, 26(3), pp: 220-232.

Ekoplus d.o.o., 2010. Županijski centar za gospodarenje otpadom Marišćina – Sažeti izvještaj o provedenom postupku procjene utjecaja na okoliš, Rijeka, Hrvatska.

Elaborat gospodarenja otpadom, ispravljena verzija, (2019). Ekoplus d.o.o., Marčelji, Pogled 2/4, 51216 Viškovo. Nositelj izrade elaborata: Dragica Pašović, dipl.ing.građ.

Feltrim F., Izzo R. L. S., Rose J. L., Machado A. B., Oro S. R., (2021). Evaluation of the bio-drying process of municipal solid waste using rotating drums Bio-drying rotary drum. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*. Vol. 93(4). DOI: 10.1590/0001-3765202120200085.

Hettiarachchi, H., Meegoda, J., Hettiaratchi, P., (2009). Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement. *Waste Management*, Vol. 29, pp: 1018-1025.

Hidroplan d.o.o. (2014.) Glavni strojarski projekt – izmjena i dopuna. GP02/D-T, ZOP IGP02/D, TD 11/2014. Interni dokument.

HRN.U.B1.018/80. Određivanje granulometrijskog sastava.

Lakshmikanthan P., Sughosh P., Sivakumar Babu G. L., (2018). Studies on Characterization of Mechanically Biologically Treated Waste from Bangalore City. *Indian Geotechnical Journal*. Vol. 48, pp: 293-304.

Petrović, I., (2006). Bioreaktorska odlagališta otpada. Zbornik radova. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin.

Petrović I., (2010). Modeliranje ponašanja mehaničko-biološki obrađenog komunalnog krutog otpada. Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.

Plan gospodarenja otpadom 2007.-2015. (NN 85/07, 126/10 i 31/11).

Plan gospodarenja otpadom 2017.-2022. (NN 3/17, 1/22).

Portal znanstvenih i stručnih časopisa Republike Hrvatske (Hrčak). Dostupno na: <http://baze.nsk.hr/>.

Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 114/2015, 103/18, 56/19).

Qian X., Koerner R.M., Gray D.H (2001): Geotechnical aspects of landfill design and construction, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2001.

Reinhart, D. R., Townsend, T. G., (1998). Landfill Bioreactor Design & Operation. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press LLC.

Repa, E. W., (2003). Bioreactor landfills: a viable technology. NSWMA Research Bulletin 03-02-
pronađi tu referencu: <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills>.

Roje-Bonacci, T., (2007). Mehanika tla, treće izdanje. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-
Arhitektonski fakultet, Split.

Siddiqui A. A., Richards D. J., Powrie W., (2012). Investigations into the landfill behaviour of
pretreated wastes. Waste Management, Vol. 32, pp: 1420-1426. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.016>.

Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 130/05).

Velkushanova K., (2011). Characterization of wastes towards sustainable landfilling by some
physical and mechanical properties with an emphasis on solid particles compressibility. PhD
dissertation, University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment.

Zhang Z., Fang Y., Wang Y., Xu H., (2020). Compression behaviors of mechanically biologically
treated wastes of Tianziling landfill in Hangzhou, China. Environmental Science and Pollution
Research, Vol. 27, pp 43970–43986. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10253-w>.

3) GUSTOĆA ČESTICA OTPADA

3.1 Sažetak poglavlja

Osnovno fizikalno svojstvo koje se koristi u utvrđivanju početnog koeficijenta pora (ili poroziteta) zrnatih materijala i predviđanju iznosa slijeganja takvog materijala, je gustoća čvrstih čestica. Za potrebe određivanja gustoće čvrstih čestica metanogene frakcije u sklopu ove disertacije razvijen je plinski piknometar konstantnog volumena sastavljen isključivo od standardne geotehničke opreme. Osim plinskim piknometrom, gustoća čvrstih čestica metanogene frakcije određena je i metodom velikog vodenog piknometra. Ukupno je ispitano 115 uzoraka otpada u plinskom i velikom vodenom piknometru. Od ukupnog broja ispitanih uzoraka, 93 uzoraka ispitano je metodom plinskog piknometra, a 22 uzoraka ispitano je metodom velikog vodenog piknometra. Od 93 uzorka ispitanih metodom plinskog piknometra, 23 uzorka pripadaju materijalu A, dok preostalih 70 uzoraka pripadaju materijalu B. Od 22 uzoraka ispitanih metodom velikog vodenog piknometra, 12 uzoraka pripada materijalu A, dok preostalih 10 uzoraka pripada materijalu B. Temeljem rezultata mjerenja gustoće čvrstih čestica materijala A i B, predloženo je više međusobno zavisnih odnosa:

- funkcijski odnos između gustoće čvrstih čestica, suhe gustoće i koeficijenta pora,
- funkcijski odnos između suhe gustoće i poroziteta na prirodnim i drobljenim uzorcima,
- funkcijski odnos poroziteta i gustoće čvrstih čestica.

U odnosu na rezultate mjerenja gustoće čvrstih čestica te izračuna pripadajućeg koeficijenta pora može se zaključiti da ispitivani BMO otpad ima velik koeficijent pora i visoko je porozni materijal. Isto tako, ispitivanjima je potvrđeno kako način ugradnje materijala u tijelo bioreaktorskog odlagališta utječe na vrijednost poroznosti i posljedično na recirkulaciju procjedne vode. Srednja vrijednost mjerenja gustoće čvrstih čestica ρ_s metodom plinskog piknometra za materijal A iznosila je 1,88 g/cm³, a za materijal B 1,82 g/cm³. Metoda velikog vodenog piknometra dala je niže vrijednosti gustoće čvrstih čestica, i to za materijal A, 1,54 g/cm³, a za materijal B, 1,62 g/cm³.

U usporedbi s metodom velikog vodenog piknometra, postupak mjerenja metodom plinskog piknometra pokazao se točnijim, lako dostupnim, isplativim i brzim rješenjem za određivanje

gustoće čvrstih čestica BMO/MBO otpada. Budući da je metoda mjerenja plinskim piknometrom brza i nedestruktivna metoda, kao takva ispitane uzorke može sačuvati za daljnje analize.

3.2 Uvod

Gustoća čvrstih čestica jedno je od osnovnih svojstava materijala koje se koristi u projektnim izračunima, kao i u numeričkom modeliranju za predviđanje mehaničkog ponašanja materijala. Gustoća čvrstih čestica obično se koristi za određivanje osnovnih faznih odnosa kao što su na primjer porozitet, koeficijent pora, zapreminska težina, volumetrijski udio vlage te stupanj zasićenosti. Gustoća čvrstih čestica intenzivno se koristi iz mehanike tla, no, vrlo često se koristi i u mehanici otpada (Cossu i Stegmann, 2019) iako se čestice otpada i tla po svojim karakteristikama bitno razlikuju. U ovom poglavlju doktorskog rada, naglasak je stavljen na određivanje volumena V_s i gustoće čvrstih čestica otpada ρ_s plinskim i vodenim piknometrom. Na osnovi rezultata mjerenja utvrđeni su slijedeći korelacijski odnosi:

- funkcijski odnos između gustoće čvrstih čestica, suhe gustoće i koeficijenta pora,
- funkcijski odnos između suhe gustoće i poroziteta na prirodnim i drobljenim uzorcima,
- funkcijski odnos poroziteta i gustoće čvrstih čestica.

3.3 Teorijska podloga

Gustoća čvrstih čestica (ρ_s) definira se kao omjer između mase čvrstih čestica (m_s) i volumena čvrstih čestica (V_s) što je prikazano Jednadžbom (7).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (7)$$

Iz Jednadžbe (7) jasno je da je za određivanje gustoće čvrstih čestica potrebno odrediti masu i volumen uzorka. Određivanje mase čestica vrlo je jednostavno i izravno, dok je s druge strane određivanje volumena čestica kompleksan problem.

Uzorak otpada sastoji se od različitih čestica i šupljina (pora). Pore se mogu podijeliti na zatvorene pore, nedostupne s površine uzorka te na otvorene pore, koje imaju pristup površini uzorka. Iz navedenog slijedi i više vrsta volumena koji se mogu definirati, kao na primjer prividni volumen

čestica ili apsolutni/totalni volumen. Prividni volumen čestica definiran je kao ukupan volumen svih čestica koji u sebi uključuje i volumen zatvorenih pora. S druge strane, apsolutni volumen definiran je kao volumen čvrste tvari nakon isključivanja zatvorenih i otvorenih pora u uzorku (Webb, 2001).

Osim gustoće čvrstih čestica, u literaturi se vrlo često koristi pojam specifična gustoća (G_s). Veza između gustoće čvrstih čestica definirane Jednadžbom (7) i specifične gustoće određenog materijala prikazana je Jednadžbom (8):

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (8)$$

gdje je G_s specifična gustoća, a ρ_w gustoća vode pri čemu je bitno napomenuti kako je specifična gustoća veličina bez mjerne jedinice. Pretpostavimo li da je standardna gustoća vode 1 g/cm^3 , rezultati prikazani u obliku specifične gustoće mogu se jednostavno izraziti kao gustoća čvrstih čestica množeći specifičnu gustoću s 1 g/cm^3 . Zbog usporedbe i ujednačenosti svih rezultata, u ovom su radu sve vrijednosti specifičnih gustoća objavljene u literaturnim referencama izražene kao gustoća čvrstih čestica pomoću Jednadžbe (8).

Mjera poroznosti znatog materijala obično se iskazuje koeficijentom pora e ili pak porozitetom n . Koeficijent pora definira se kao omjer volumena pora V_v i volumena čvrstih čestica V_s (Jednadžba 9).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (9)$$

Za razliku od koeficijenta pora, porozitet se definira kao omjer volumena pora V_v i ukupnog volumena uzorka V (Jednadžba 10).

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (10)$$

Veza između koeficijenta pora i poroziteta glasi (Jednadžba 10):

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (11)$$

Osim iz Jednadžbi (9 i 10), koeficijent pora e i porozitet n mogu se izračunati i na osnovi poznate gustoće čvrstih čestica ρ_s , i suhe gustoće uzorka ρ_d , prema Jednadžbama (12) i (13).

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (12)$$

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (13)$$

gdje se suha gustoća ρ_d iz Jednadžbi (12) i (13) definira se kao omjer suhe mase (m_s) i ukupnog volumena (V).

Jednadžbe (12) i (13) zorno pokazuju da je porozitet odnosno koeficijent pora zrnatog materijala u načelu ovisan o gustoći čvrstih čestica otpada i suhoj gustoći otpada. U većini zrnatih materijala poput tla gustoća čvrstih čestica može se smatrati konstantom materijala. No zbog nehomogenosti otpada i procesa razgradnje organske komponente sadržane u otpadnim materijalima, gustoća čvrstih čestica otpada ne može se smatrati konstantom. Iz tog razloga su porozitet i koeficijent pora prema Jednadžbama (12) i (13) funkcije dviju varijabli: gustoće čvrstih čestica (ρ_s) i suhe gustoće (ρ_d).

3.4 Pregled dosadašnjih istraživanja

3.4.1 Gustoća čvrstih čestica

Različiti istraživači objavili su gustoću čvrstih čestica za različite vrste otpada. Primjerice, Agnew i sur., (2003) proučavali su za različite organske materijale (kompost od gnojiva, compost od komunalnog čvrstog otpada, slama, drvena sječka i lišće) utjecaj sadržaja vlage na vrijednost gustoće čvrstih čestica, ρ_s . Za potrebe istraživanja autori su koristili plinski piknometar. Dobiveni rezultati pokazali su da povećani sadržaj vlage smanjuje ρ_s zbog povećanog volumena čvrstih čestica uzrokovanih bubrenjem. Suprotno tome, povećani sadržaj vlage također može oslabiti strukturu čestica ovisno od materijala od kojeg su napravljene čestice, uzrokujući kolaps čestica i posljedično smanjenje volumena čvrstih čestica što dovodi do povećanja gustoće čvrstih čestica.

Reddy i sur., (2011) ispitali su uzorke sintetičkog komunalnog otpada pri različitim stupnjevima razgradnje. Sintetički uzorci su pripremljeni u odnosu na prosječni sastav otpada iz SAD-a, a biorazgradnja se odvijala u bioreaktorima s recirkulacijom procjedne vode. Omjer biorazgradivih i inertnih komponenti otpada u uzorku bio je 60:40. Gustoća čvrstih čestica otpada određena je u skladu s ASTM D 854-02 standardom. Jedina prilagodba postupka određivanja gustoće čvrstih čestica u odnosu na standard je u tome da je korišten cjelokupan uzorak, bez prosijavanja uzorka

na situ veličine okana 4,75 mm. Autori su utvrdili gustoću čvrstih čestica svježeg otpada od 1,09 g/cm³; za otpad u anaerobnom kiselom stanju ona iznosi 2,05 g/cm³ pri 50% razgradnje; u fazi ubrzanе proizvodnje metana gustoća čvrstih čestica iznosi 2,26 g/cm³ pri 53% razgradnje; kod usporene proizvodnje metana gustoća čvrstih čestica iznosi 2,30 g/cm³ pri 70% razgradnje; u stabilnoj fazi proizvodnje metana a gustoća čvrstih čestica iznosi 2,47 g/cm³ pri 86% razgradnje otpada.

Sudarshana, (2011) je u svom doktorskom radu odredio gustoće čestica kompostiranog otpada metodom vodenog piknometra slijedeći BS 1377-2: 1990 standard uz nekoliko prilagodbi. Komponente otpada zastupljene s malim udjelom, (npr. udio određene komponente iznosi 1% u ukupnom uzorku od 20 kg, što iznosi 200 g određene komponente) ispitane su u piknometru manjeg volumena od preporučenog u standardu. Nekim komponentama koje imaju manju gustoću čestica (npr. fleksibilna plastika), gdje bi uzorak fleksibilne plastike od 200 g bio prevelik za volumen vodenog piknometra smanjena je veličina uzorka. Uzorci su ručno protreseni i ostavljeni najmanje 24 sata da odstoje. Izmjerena gustoća čestica frakcije 0-10 mm iznosila je 1,69 g/cm³ dok je za frakciju 0-20 mm iznosila 1,93 g/cm³.

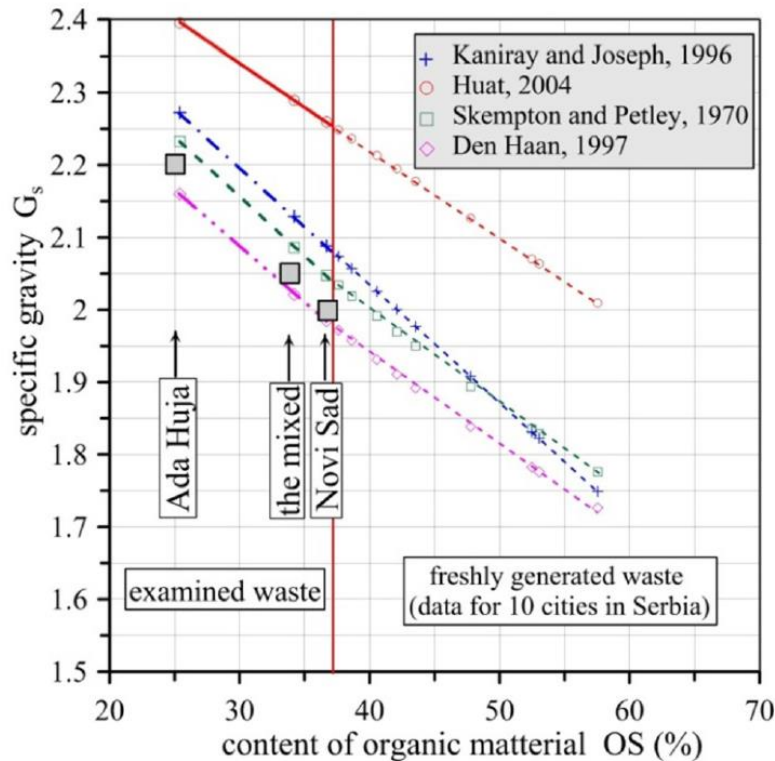
Velkushanova, (2011) je objavila vrijednost gustoće čvrstih čestica 0-10 mm za kompostirani otpad utvrđen metodom vodenog piknometra slijedeći BS 1377-2: 1990 standard. Utvrđena vrijednost gustoće čvrstih čestica iznosila je 1,63 g/cm³.

Yesiller i sur., (2014) ispitivali su specifičnu gustoću neobrađenog komunalnog otpada vodenim piknometrom. Za potrebe ispitivanja korišten je veliki piknometar (ASTM D 854-02 standard), volumena 2000 mL i uzorci otpada s masama u rasponu od 100 do 350 g te 50-65 mm maksimalnom veličinom čestica. Ispitivanja su podijeljena u tri kategorije (I, II, i III) kako bi utvrdili raspon vrijednosti specifične gustoće čvrstog komunalnog otpada te parametre koji utječu na te vrijednosti. Ispitivanja kategorije I napravljena su na industrijskom komunalnom otpadu kojim se umanjuje utjecaj nehomogenosti uzoraka, budući da je sastav proizvodnog otpada ujednačeniji od čvrstog komunalnog otpada. Ispitivanja kategorije II napravljena su na čvrstom komunalnom otpadu uzorkovanom s regionalnog odlagališta Santa Maria u mjestu Santa Maria u Kaliforniji. Otpad je uzorkovan s aktivne plohe odlagališta neposredno prije i nakon zbijanja. Ispitivanja kategorije III napravljena su na uzorcima starijeg otpada (starost otpada od 0,7 do 6 godina) uzorkovana na različitim dubinama odlagališta. Autori su ispitivali utjecaj vremena,

razgradnje organske komponente i težine nadsloja otpada na vrijednost gustoće čestica čvrstog komunalnog otpada. Objavljene srednje vrijednosti gustoća čvrstih čestica otpada iznosile su 1,38 g/cm³ za nezbijeni i 1,53 g/cm³ za zbijeni proizvodni otpad, za nezbijeni svježi otpad s odlagališta 1,07 g/cm³, a za zbijeni svježi otpad 1,26 g/cm³. Za otpad kategorije III, srednja vrijednost izmjerene gustoće čvrstih čestica iznosila je 2,20 g/cm³. Autori su otkrili da se ρ_s povećava sa smanjenjem veličina čestica, zbijenošću i stupnjem razgradnje (ostarjeli otpad). Autori su povećanje gustoće čvrstih čestica pripisali smanjenju veličine čestica, zbijanju i potencijalnom pristupu prethodno zatvorenim porama. Za stari otpad, povećanje gustoće čvrstih čestica pripisano je gubitku biorazgradivih komponenata s niskim vrijednostima ρ_s . Sličan utjecaj procesa razgradnje na povećanje gustoće čvrstih čestica otpada uočili su Reddy i sur., (2011.) u svom radu.

Petrović i sur., (2014) objavili su gustoću čestica otpada od 2,15 g/cm³. Autori su ispitali kompostirani otpad maksimalne veličine čestica 4,75 mm slijedeći ASTM D 854-02 standard i odredili gustoću čvrstih čestica metodom vodenog piknometra.

Rakić i sur., (2021) pokazali su da se poznavanjem sadržaja organske tvari može procijeniti gustoća čestica otpada. Za potrebe procjene autori su koristili korelacije između sadržaja organske tvari i gustoće čestica utvrđenih na tresetu od strane raznih istraživača: Skempton i Petley, (1970); Kanirajand i Joseph, (1996); De Haan, (1997); Huat, (2004). Koristeći korelacije spomenutih autora, Rakić i sur., (2021) su za otpad odredili raspon vrijednosti gustoće čvrstih čestica u intervalu od 1,98 do 2,39 g/cm³. Nadalje, za komunalni otpad s odlagališta Novi Sad i Ada Huja, koji su bili predmetom istraživanja u radu Rakić i sur. (2021), temeljem spomenutih korelacija usvojene prosječne vrijednosti gustoće čestica otpada iznosile su 2,0 i 2,2 g/cm³.



Slika 31. Odnos specifične gustoće i udjela organske tvari neobrađenog otpada (Rakić i sur., 2021) (Prijevod: Os x - content of organic materijal OS (%) - udio organske tvari materijala izražena kao postotak; Os y – specific gravity (G_s) - specifična gustoća (G_s))

Nešto opširniji pregled gustoće čvrstih čestica prikupljenih iz dostupne literature za BMO/MBO otpad prikazane su u Tablici 20, dok su rezultati gustoće čvrstih čestica neobrađenog otpada prikazani u Tablici 21. Vrijednosti gustoće čvrstih čestica leže u širokom rasponu od $0,88 \text{ g/cm}^3$ do $2,21 \text{ g/cm}^3$ za BMO/MBO otpad i u još širem rasponu od $0,77 \text{ g/cm}^3$ do $2,76 \text{ g/cm}^3$ za neobrađeni komunalni otpad. Srednja vrijednost objavljenih rezultata za BMO/MBO otpad iznosi $1,63 \text{ g/cm}^3$ uz standardnu devijaciju od $\pm 0,32 \text{ g/cm}^3$ dok je srednja vrijednost objavljenih rezultata za neobrađeni otpad $1,93 \text{ g/cm}^3$ uz standardnu devijaciju od $\pm 0,51 \text{ g/cm}^3$.

Tablica 20. Gustoće čvrstih čestica, ρ_s , BMO/MBO otpada objavljene u literaturi

Izvor	ρ_s [g/cm ³]	Standard	Karakteristike uzorka	Lokacija
Heiss-Ziegler i Fehrer, 2003	2,214	Nema podataka	Veličina čestica <25 mm, otpad je obrađen zajedno s otpadnim muljem u dvo- stupanjskom procesu kroz period duži od 20 tjedana	Odlagalište Oberpullendorf, Austrija
Hudson i sur., 2004	0,876- 1,303	Nema podataka	Otpad je prije ispitivanja obrađen DANO tehnologijom. Dobivena je ovisnost gustoće čvrstih čestica s vertikalnim naprezanjem. Vertikalno naprezanje u rasponu od 34 do 463 kPa	Nema podataka
Entenmann i Wendt, 2007	1,58; 1,61; 1,62; 1,69; 1,71; 1,84; 1,86; 1,98	Nema podataka	Različite mješavine otpada	Nekoliko odlagališta u Njemačkoj
Rose i sur., 2009	1,902	NBR 7181/1984 (ABNT (a), 1984)	Kompostirani komunalni čvrsti otpad	Nema podataka

Sudarshana, 2011	1,69	Metoda vodenog piknometra	Veličina frakcije 0-10 mm, srednja vrijednost	NES MBT postrojenje, Whites Pit, Engleska
	1,929		Veličina frakcije 10-20 mm, srednja vrijednost	
Velkushanova, 2011	1,63	BS1377-2 metoda plinske posude	Veličina frakcije 0-10 mm	Postrojenje za MBO, Engleska
Petrovic i sur., 2014	2,147	ASTM D 854- 02	Maksimalna veličina čestica 4,75 mm	Odlagalište MBO otpada u Austriji
Sivakumar Babu i sur., 2015	1,26	Vodeni piknometar	MBO kompost Lokacija: odlagalište Mavallipura	Odlagalište Mavallipura, Bangalore, India
Lakshmikanthan i sur., 2018	1,05-1,68	Vodeni piknometar	Čestice manje od 20 mm	Odlagalište Mavallipura, Bangalore, India
Zhang i sur., 2020a	1,58	Vodeni piknometar	Zimski uzorak- bioosušeni	Odlagalište Tianziling, Hangzhou, Kina
	1,38		Ljetni uzorak- bioosušeni	
Zhang i sur., 2020b	1,4	Nema podataka	Bioosušeni komunalni čvrsti otpad	Odlagalište Tianziling, Hangzhou, Kina

Tablica 21. Gustoće čvrstih čestica, ρ_s , neobrađenog komunalnog otpada objavljene u literature

Izvor	ρ_s [g/cm ³]	Standard	Karakteristike uzorka	Lokacija
Gabr i Valero, 1995	2,00	ASTM D854- 83	Otpad star 15 do 30 godina, pet uzoraka s varijancom od 0,0032	Nema podataka
	2,40	ASTM D854- 83	Ispitana jedna frakcija (Otvor okana <br. 200), pet uzoraka s varijancom od 0,0355	Nema podataka
Zhu i sur., 2003	1,96- 2,62		Karakteristike uzorka: otpadni materijal s česticama većim od 5 mm je uklonjen	Odlagalište Tianziling, Kina
Olivier i Gourc, 2007	0,767- 1,136		Dobivena je ovisnost gustoće čvrstih čestica s vertikalnim naprežanjem. Vertikalno naprežanje u rasponu od 0 do 130 kPa. Svježi komunalni otpad, prije ispitivanja usitnjen	Nema podataka
Reddy i sur., 2009	0,85±0,1 3	ASTM D 854	Svježi komunalni čvrsti otpad.	Odlagalište Orchard Hills, Illinois, SAD
	0,97±0,0 6	ASTM D 854	Odloženi komunalni čvrsti otpad podvrgnut malim količinama recirkulacije eluata, starost otpada 1,5 godina	

Stoltz i sur., 2010	1,65		Svježi komunalni čvrsti otpad. Prikazana srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica sa standardnom devijacijom od 0,05	Odlagalište u Francuskoj
Breitmeyer, 2011	1,34±0,0 2	ASTM D 854	Suhi, usitnjeni komunalni čvrsti otpad	Nema podataka
Hyun i sur., 2011	2,44- 2,54		Stari, razgrađeni otpad	Nema podataka
Reddy i sur., 2011	1,09*	ASTM D854	Svjež uzorak	
	2,05*		Anaerobna kisela faza	
	2,26*		Faza ubrzane proizvodnje metana	
	2,30*		Faza usporene proizvodnje metana	
	2,47*		Stabilizacija metana	
Yesiller i sur., 2014	1,377/1,5 30*	ASTM D 854	Nezbijeni/zbijeni uzorak	Santa Maria regionalno odlagalište, Kalifornija, SAD
	1,072/1,2 58		Nezbijeni/zbijeni - svjež otpad	
	2,201		Otpad starosti 0,7-6 godina	
Pulat i Yukselen- Aksoy, 2017	1,62*	ASTM D 854-14	Srednja vrijednost komunalnog čvrstog otpada iz Europe	
	1,24*		Srednja vrijednost komunalnog čvrstog otpada iz Turske	

	1,84*		Srednja vrijednost otpada iz SAD-a	Odlagalište Manisa, Turska
	1,12		Svjež uzorak,	
	1,43		Razgrađen uzorak	
Ke i sur., 2017	1,38*	CJJ176-2012	Svjež uzorak	
	2,19*		Uzorak nakon 18 mjeseci razgradnje	
Ramaiah i Ramana, 2017	1,90-2,15	ASTM D 854-14		Odlagalište Ghazipur, Delhi
	1,95-2,55			Odlagalište Okhla, Delhi
Thakur i sur., 2019	1,83-1,92	ASTM D 854	Svjež uzorak	Odlagalište Okruga Una u Himachal Pradesh
	1,85-2,28		Razgrađen uzorak, starost 5-6 godina	
Mokhtari i sur., 2019	1,80	ASTM D 854-10	Svjež uzorak	Odlagalište Kahrizak, Tehran
	2,31		Otpad starosti 5,5 godina	
	2,56		Otpad starosti 14 godina	
	2,61		Otpad starosti 21 godinu	
	1,85-2,28		Razgrađen uzorak	
Nawagamuwa i Thirojan, 2020	1,66; 1,73	ASTM D 854-14	Otpad star do 2 godine	Odlagalište Karadiyana, Sri Lanka
	1,84; 2,08; 2,24		Otpad star 7-15 godina	Odlagalište Jaffna, Sri Lanka

	1,75		Otpad star 1-3 godine	Odlagalište Matara, Sri Lanka
Xu i sur., 2020	1,31*		Visoki udio kuhinjskog otpada:	
	1,30*		Uzorak bez kuhinjskog otpada	
Rashid Iqbal i sur., 2022	2,26; 2,26; 2,35; 2,66	ASTM D 854-14	Otpad star >20 godina	Karadiyana, Sri Lanka
	1,69; 1,81; 1,96		Otpad star do 3 godine	Odlagalište Udapalatha, Sri Lanka
	1,99; 2,1; 2,12		Otpad starosti 7-11 godina	
	2,52		Otpad star manje od 1 godine	Odlagalište Hambantota, Sri Lanka
	2,64; 2,66; 2,72; 2,76		Otpad starosti 7-8 godina	

* Sintetski – umjetno izrađen uzorak otpada

3.4.2 Plinski i vodeni piknometar

Prikupljeni podaci u Tablicama 20 i 21 uglavnom se odnose na neobrađeni komunalni te MBO biostabilizirani otpad. Podaci o gustoći čvrstih čestica za BMO otpad pronađeni su tek u dva rada (Zhang i sur., 2020a; 2020b). Temeljem dostupnih podataka iz Tablica 20 i 21 zaključuje se da je vodeni piknometar najčešće korištena metoda za određivanje gustoće čvrstih čestica. Ipak, primjena ove metode na komunalni otpad ima neke značajne nedostatke kao npr. moguća pojava „zračnih džepova“, poteškoće vezane na višestruko ponavljanje ispitivanja zbog ispiranja sitnih čestica vodom na istom uzorku, plutanje laganijih komponenata otpada (Breitmeyer, 2011) te pojava bubrenja ili pak kolapsibilnog ponašanja čestica otpada. Spomenuti razlozi, čine metodu plinskog piknometra prikladnijom metodom za određivanje gustoće čvrstih čestica BMO/MBO otpada (Stoltz i sur., 2010, Cossu i Stegmann, 2019).

No, u tipičnom geotehničkom laboratoriju plinski piknometar obično nije sastavni dio dostupne opreme. Slijedom toga, laboratorijsko osoblje obično vrši odgovarajuće izmjene postojeće laboratorijske opreme s ciljem dobivanja funkcionalnog plinskog piknometra. Na primjer, Stoltz i sur., (2010) su modificirali edometarski uređaj kako bi napravili plinski piknometar. Različito dizajnirani plinski piknometri, s različitim vrstama materijala, tlakovima u sustavu i volumenima ćelija predstavljeni su u objavljenim radovima različitih istraživača (Oppenheimer i sur., 1997; Annan i White, 1998; Agnew i Leonard, 2002; Agnew i sur., 2003; Richard i sur., 2004; Berthe i sur., 2007; Ahn i sur., 2008). No, budući da ovi uređaji nisu komercijalno dostupni, mogućnost upotrebe standardne geotehničke opreme kao plinskog piknometra predstavlja značajno poboljšanje ispitnih mogućnosti geotehničkog laboratorija.

Osim toga, zbog velike heterogenosti uzoraka otpada dimenzije ispitnog uzorka također mogu biti ograničavajući čimbenik (Agnew i sur., 2003).

3.5 Materijal i metode za utvrđivanje gustoće čestica otpada korišteni u ovoj disertaciji

Gustoća čvrstih čestica otpada utvrđena je uz pomoć dvije metode:

- plinskim piknometrom prema ASTM D 5550-00 standardu oponašajući rad plinskog piknometra koristeći se isključivo standardnom laboratorijskom opremom za geotehnička istraživanja,
- vodenim piknometrom u skladu s BS 1377: Part 2: 1990 standardom za određivanje gustoće čvrstih čestica metodom velikog piknometra.

Uzorci otpada uzorkovani u prvom dijelu godine (dalje u tekstu materijal A) i uzorci otpada uzorkovani u drugom dijelu godine (dalje u tekstu materijal B) iz ŽCGO Mariščina, prije određivanja gustoće čvrstih čestica stavljeni su na sušenje u sušionik na 60°C kroz 24 sata. Nakon toga, svaki od uzoraka je vagan i ugrađen u ćeliju plinskog odnosno vodenog piknometra.

Ukupno je ispitano 115 uzoraka otpada u plinskom i velikom vodenom piknometru. Od ukupnog broja ispitanih uzoraka, 93 uzoraka ispitano je metodom plinskog piknometra, a 22 uzorka ispitano je metodom velikog vodenog piknometra. Velika razlika u broju ispitanih uzoraka između ove dvije metode pripisuje se vremenu izvođenja pojedinog pokusa. Dok je za pojedini uzorak u plinskom piknometru potrebno približno 30 minuta, za ispitivanje metodom velikog vodenog piknometra potrebno je približno 25 sati. Od 93 testirana uzorka metodom plinskog piknometra, rezultati 23 ispitana uzorka pripadaju materijalu A, dok se rezultati preostalih 70 uzoraka odnose na materijal B. Od 22 uzoraka ispitanih metodom velikog vodenog piknometra, rezultati 12 uzoraka pripadaju materijalu A, dok se rezultati preostalih 10 uzoraka odnose na materijal B. U odnosu na postupak mjerenja metodom velikog vodenog piknometra opisane u potpoglavlju 3.5.2 Vodeni piknometar, od 12 uzoraka materijala B, četiri uzorka su dodatno podvrgnuta, nakon primjene vakuuma, procesu zagrijavanja u pješčanoj kupelji kako bi se dodatno povećala učinkovitost odzračivanja uzoraka.

Većina uzoraka nije istovremeno ispitana na plinskom piknometru i neposredno zatim metodom velikog vodenog piknometra, pa se stoga dobiveni podaci ne mogu izravno uspoređivati. Iz tog razloga napravljena je usporedba osnovnih statističkih pokazatelja (aritmetička sredina, medijan, ukupni raspon vrijednosti, donji i gornji kvartil, standardna devijacija) izmjerenih gustoća čvrstih

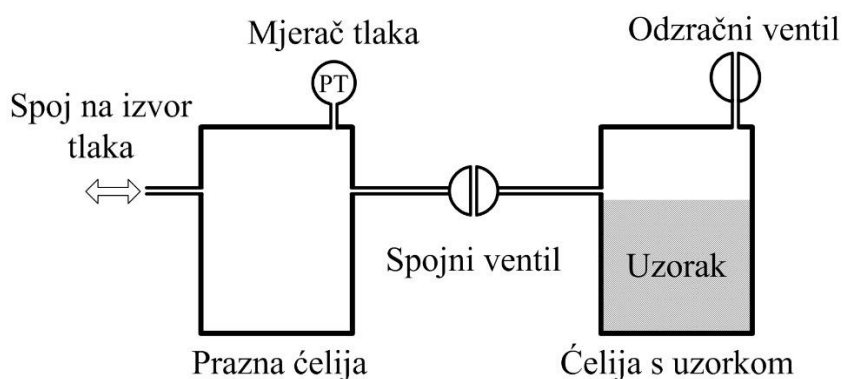
čestica s navedenim metodama. Detaljna procedura mjerenja plinskim i vodenim piknometrom bioosušenog otpada opisana je u nastavku.

3.5.1 Plinski piknometar

Postoje tri vrste plinskih piknometara koji se mogu koristiti za određivanje volumena zrnatih materijala (Agnew i sur., 2003; Tamari i Aguilar-Chavez, 2005). To su piknometar konstantnog volumena, piknometar promjenjivog volumena i usporedni (eng. comparative) piknometar.

Za potrebe ovog istraživanja korišten je plinski piknometar konstantnog volumena. Plinski piknometar konstantnog volumena sastoji se od dvije ćelije koje su povezane cijevima i spojnim ventilom (Slika 32). Prazna ćelija je spojena na izvor tlaka (tlačna ćelija), dok ćelija za uzorke ima ventil koji može biti otvoren i/ili zatvoren.

Osnovni princip rada plinskog piknometra konstantnog volumena je sljedeći: plin se uvodi u (ili izvlači iz) tlačnu ćeliju poznatog volumena dok je spojni ventil zatvoren; ćelija za uzorke je pod atmosferskim tlakom; mjeri se početni tlak unutar tlačne ćelije; odzračni ventil na ćeliji za uzorke se zatvara, a zatim se otvara spojni ventil, dopuštajući plinu da se proširi između dvije spojene ćelije; nakon što je širenje plina završeno, mjeri se tlak plina u ravnotežnom stanju; na temelju zakona idealnog plina i izmjerenih podataka moguće je izračunati volumen čvrstih čestica otpada.



Slika 32. Shema plinskog piknometra konstantnog volumena

Prema zakonu idealnog plina, stanje količine plina određeno je njegovim tlakom, volumenom i temperaturom. Jednadžba za idealni plin može se napisati za:

$$\text{Tlačnu ćeliju: } p_1 V_1 = n_1 R T \quad (14)$$

$$\text{Ćeliju s uzorkom: } p_a V_2 = n_2 R T \quad (15)$$

gdje je:

p_1 = početni apsolutni tlak plina u tlačnoj komori (Pa)

V_1 = volumen plina u tlačnoj komori (m^3)

n_1 = broj molova plina u tlačnoj komori

p_a = atmosferski tlak (Pa)

V_2 = volumen plina u komori za uzorke (m^3)

n_2 = broj molova plina u komori za uzorke

R = univerzalna plinska konstanta (J/mol K)

T = apsolutna temperatura plina (K)

kada je spojni ventil otvoren (Slika 32), ukupni volumen plina u sustavu je

$$V_3 = V_1 + V_2 \quad (16)$$

a ukupan broj molova plina pod apsolutnim tlakom p_3 je

$$n_3 = n_1 + n_2 \quad (17)$$

p_3 je uravnoteženi tlak zraka dobiven nakon otvaranja spojnog ventila.

Kada temperatura sustava postane jednaka temperaturi okoline, vrijedi sljedeći izraz:

$$p_3 V_3 = n_3 R T \quad (18)$$

Umetanje Jednadžbi (14) i (15) u Jednadžbu (16) daje

$$p_3 (V_1 + V_2) = (n_1 + n_2) R T = n_1 R T + n_2 R T \quad (19)$$

Uzimajući u obzir Jednadžbe (14) i (15) te rješavanje Jednadžbe (19) po V_2 , slijedi:

$$V_2 = \frac{V_1 (p_1 - p_3)}{p_3 - p_a} \quad (20)$$

Analiza osjetljivosti Jednadžbe (20) otkriva značajnu osjetljivost V_2 na male varijacije u vrijednostima p_3 i V_1 . Stoga je ključno da mjerilo tlaka ima razlučivost od najmanje 0,1 kPa, dok

se V_1 treba točno izmjeriti prema postupku opisanom u poglavlju 3.5.1.2 Postupak utvrđivanja ukupnog volumena V_1 plinskog piknometra.

Volumen čvrstih čestica (V_s) sada se može izračunati oduzimanjem volumena plina u komori za uzorke (V_2) od volumena prazne komore za uzorke (V_{sc}):

$$V_s = V_{sc} - V_2 \quad (21)$$

Gustoća čvrstih čestica (ρ_s) sada se može izračunati Jednadžbom (7). Ukoliko je komora za uzorke prazna, izmjerena vrijednost V_2 trebala bi biti jednaka V_{sc} . Ukoliko se radi o suhom materijalu, izmjereni volumen plina u komori za uzorke (V_2) predstavlja porozitet (n) uzorka.

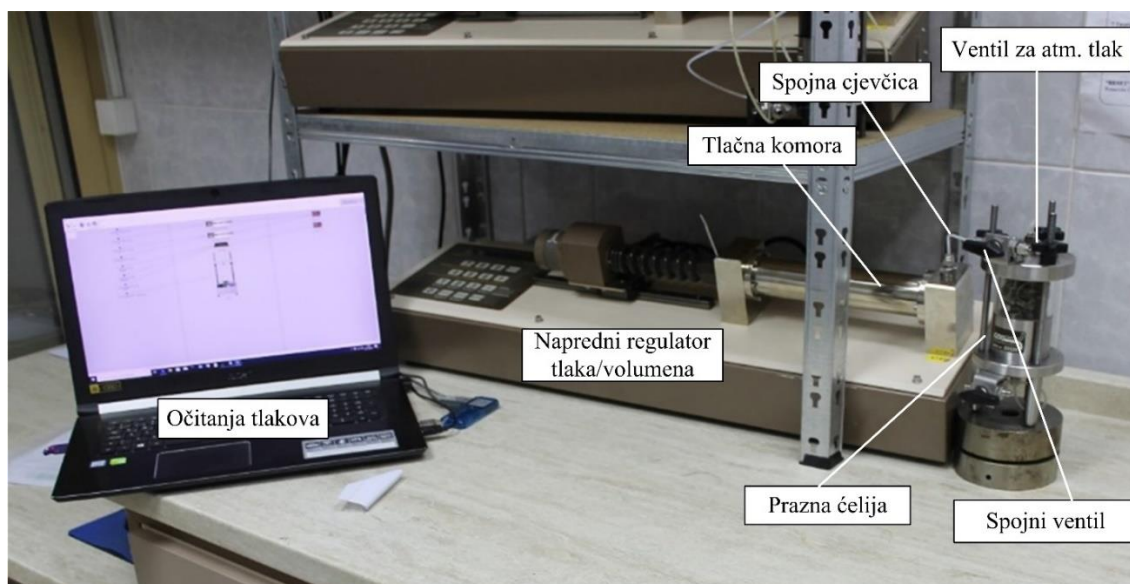
3.5.1.1 Geotehnička oprema korištena za oponašanje plinskog piknometra

U ovom poglavlju opisan je način korištenja standardne opreme za geotehnička istraživanja koja se vrlo često koristi u laboratorijima diljem svijeta, kako bi se oponašao plinski piknometar.

Za ćeliju za uzorke (Slika 32) korištena je tzv. „toksična“ ćelija. Primarna namjena toksične ćelije je da spriječi ulazak kontaminiranih tekućina i para u regulator tlaka/volumena kod triaksijalnih ili edometarskih pokusa te tako ukloni rizik od bilo kakvog oštećenja opreme od potencijalno korozivnih tekućina (<https://www.gdsinstruments.com/gds-products/toxic-interface-unit>). Za potrebe ovog istraživanja uklonjena je gumena membrana koja se nalazi unutar toksične ćelije, dok su za stvaranje odgovarajućeg brtvljenja između metalnih i plastičnih dijelova toksične ćelije njihovi rubovi podmazani silikonskom masti.

Kao prazna ćelija (Slika 32) koristi se napredni regulator tlaka/volumena (<https://www.gdsinstruments.com/gds-products/advanced-pressure-volume-controller>). U njoj se, u početnoj fazi ispitivanja zadaje određeni tlak. To je instrument koji se sastoji od mikroprocesorski kontrolirane hidrauličke preše koja može precizno kontrolirati i mjeriti promjenu tlaka i volumena fluida. Točnost korištenog regulatora tlaka bolja je od 0,1% FRO (eng. full range output; hrv. izlaz punog raspona) dok je rezolucija tlaka 0,1 kPa. Volumetrijska točnost korištenog regulatora bolja je od 0,1%.

Cijeli sklop za mjerenje prikazan je na Slici 33.



Slika 33. Sustav plinskog piknometra (regulator tlaka/volumena, toksična ćelija i softver za očitavanje tlaka i volumena); klip regulatora tlaka/volumena zajedno sa spojnom cijevi određuje volumen V_1 ; toksična ćelija određuje volumen V_2

3.5.1.2 Postupak utvrđivanja ukupnog volumena V_1 plinskog piknometra

Kako bi se ispravno postavio cijeli sustav za mjerenje plinskim piknometrom postupak utvrđivanja ukupnog volumena V_1 provodi se u tri koraka:

(1) Provjera brtvljenja toksične ćelije

Toksična ćelija stavljena je pod relativni tlak od 75 kPa tijekom 24 sata uz pomoć naprednog regulatora tlaka/volumena. Budući da tijekom vremena pod tlakom, u toksičnoj ćeliji nisu uočeni padovi tlaka i promjene volumena, smatralo se da je toksična ćelija bila hermetički zatvorena dovoljno dugo da se može koristiti u navedene svrhe.

(2) Mjerenje volumena toksične ćelije V_2

Mjerenjem mase suhe ćelije i mase ćelije potpuno napunjene deaeriranom vodom, utvrđen je volumen (V_2) prazne toksične ćelije. Na temelju razlike u masi i gustoće vode izmjerene na trenutnoj sobnoj temperaturi, utvrđen je prosječni volumen toksične ćelije od 221,21 cm³.

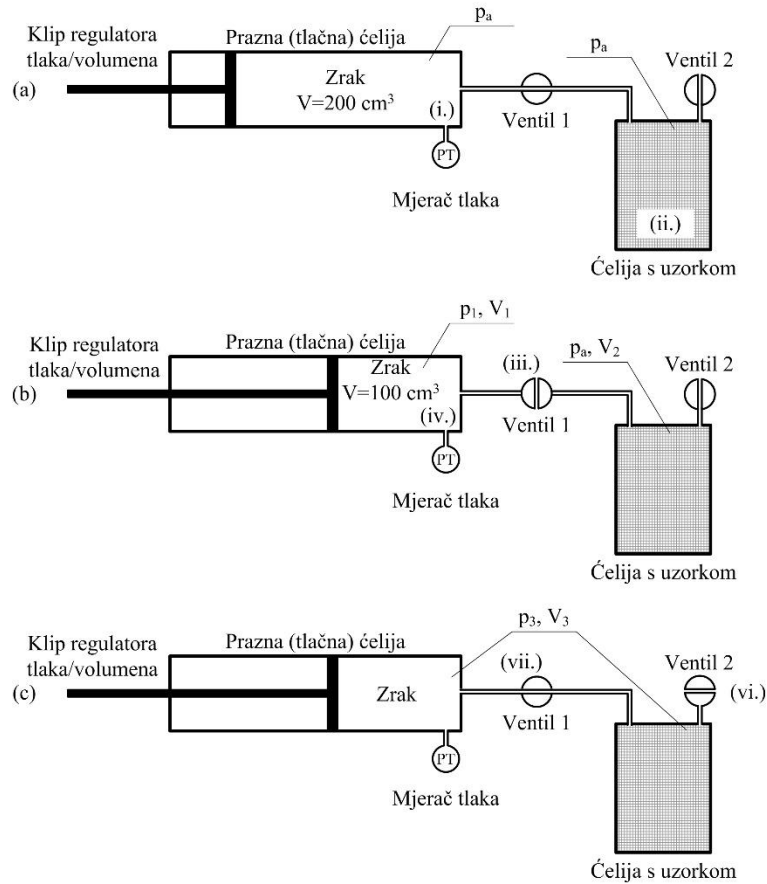
(3) Mjerenje volumena tlačne ćelije V_1

Zbog nepravilnog oblika, ukupni volumen tlačne ćelije V_1 sastoji se od volumena klipnog cilindra naprednog regulatora tlaka/volumena i volumena spojne cijevi kojom su spojene prazna (tlačna) ćelija i napredni regulator tlaka/volumena (Slika 33). Ukupni volumen V_1 utvrđen je u skladu s postupkom mjerenja opisanom u poglavlju 3.5.1.3 *Postupak mjerenja plinskim piknometrom* koristeći se praznom toksičnom ćelijom. Preuređivanje Jednadžbe (20) za V_1 , a na temelju poznatog volumena prazne toksične ćelije (V_2) izmjenjenog vodom, moguće je izračunati ukupni volumen V_1 .

3.5.1.3 Postupak mjerenja plinskim piknometrom

Shematski dijagram sustava za mjerenje prikazan je na Slici 34. Plin korišten u eksperimentima bio je okolni zrak, dok se postupak mjerenja sastojao od sljedećih koraka:

1. Volumen klipa naprednog regulatora tlaka/volumena postavljen je na 200 cm^3 .
2. Uzorak je stavljen u ćeliju za uzorke, dok su ventili 1 i 2 bili otvoreni tako da je cijeli sustav bio pod atmosferskim tlakom.
3. Ventil 1 prema toksičnoj ćeliji je zatvoren.
4. Tlak u praznoj (tlačnoj) ćeliji povećan je na način da je volumen klipa naprednog regulatora tlaka/volumena smanjen s 200 na 100 cm^3 .
5. Zabilježen je apsolutni tlak u ćeliji p_1 .
6. Ventil 2 je zatvoren te je zabilježen atmosferski tlak p_a .
7. Ventil 1 je otvoren i zrak iz tlačne ćelije je ostavljen da se proširi u ćeliju za uzorke.
8. Zabilježen je ravnotežni tlak p_3 (nakon što je mjerilo tlaka postiglo stanje ravnoteže).
9. Volumen čvrstih čestica V_s izračunat je u skladu s Jednadžbom (21).



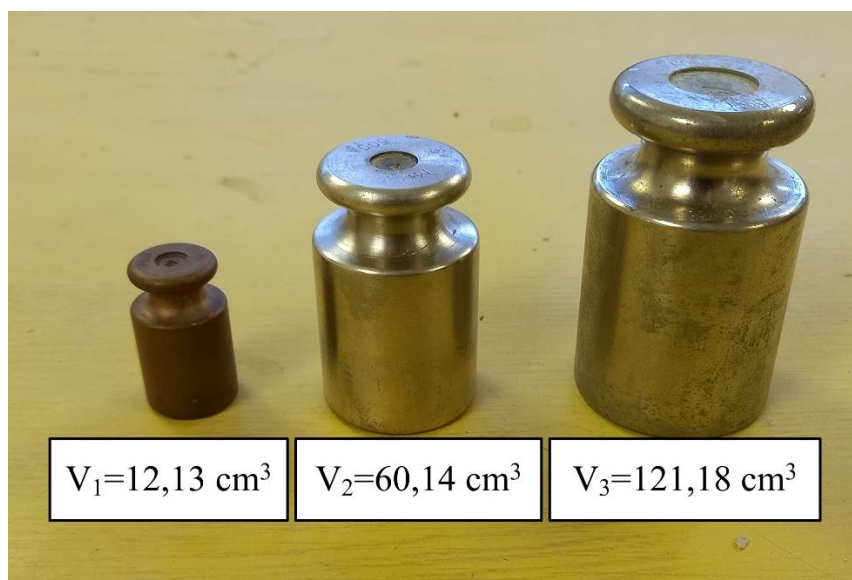
Slika 34. Shematski prikaz mjerenja modifikiranim plinskim piknometrom konstantnog volumena

3.5.1.4 Točnost mjerenja plinskim piknometrom

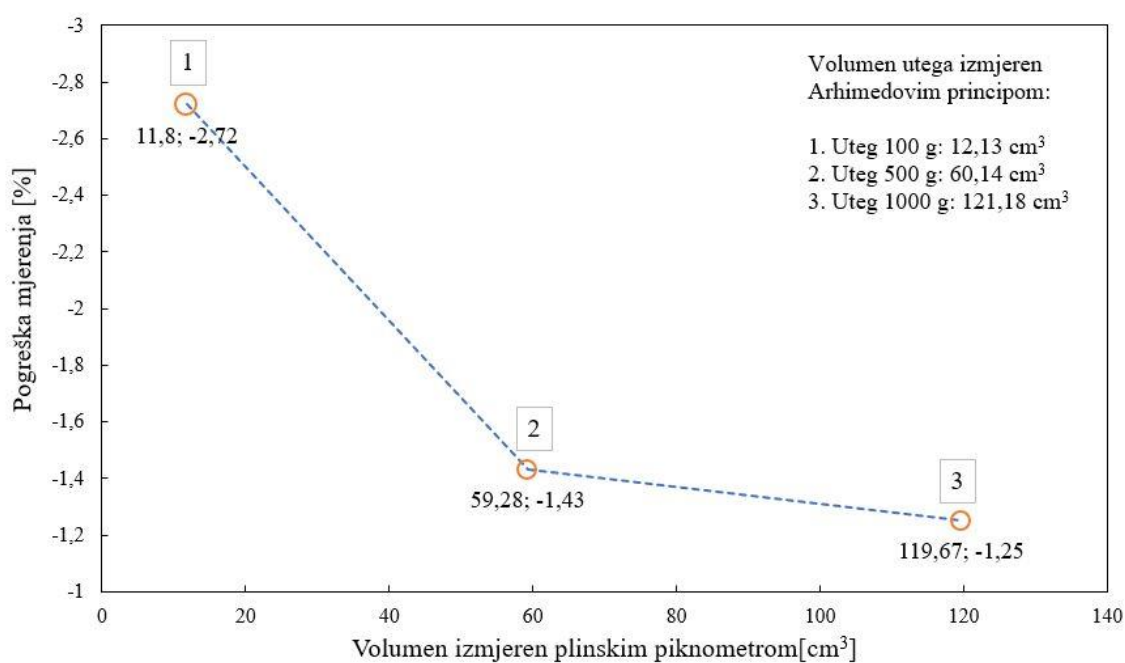
Kako bi se utvrdila točnost mjerenja predloženog sustava kao i njegova mjerna pogreška, plinski piknometar je ispitan:

- korištenjem standardiziranih utega poznatih volumena (Slika 35).

Referentni volumen utega određen je na temelju Arhimedovog principa. Usporedbom volumena utega izmjerenih Arhimedovim principom uranjanjem u vodu i metodom plinskog piknometra utvrđena je i pogreška mjerenja (Slika 36).



Slika 35. Utezi mase (redom s lijeva na desno) 100, 500 i 1000 g



Slika 36. Odnos volumena izmjerenih Arhimedovim principom i plinskim piknometrom te pogreška mjerenja

Slika 36 prikazuje pogrešku u mjerenju manju od 3% za uteg najmanjeg volumena. Iz prikazanih rezultata mjerenja očito je kako se volumen utega povećava, pogreška mjerenja se smanjuje. Budući da će ćelija za uzorke biti potpuno ispunjena otpadnim materijalom, očekuje se da će

točnost plinskog piknometra V_s biti u zadovoljavajućim granicama, odnosno da će pogreška mjerenja biti manja od 3%.

- mjerenjem gustoće čvrstih čestica pijeska

Mjerenjem gustoće čvrstih čestica na dva uzorka pijeska napravljena je dodatna provjera točnosti mjerenja plinskog piknometra. Prvi uzorak imao je veličinu frakcije od 0 do 1 mm, dok je drugi uzorak imao veličinu frakcije od 0 do 4 mm. Sitniji uzorak kupljen je u lokalnoj trgovini građevinskog materijala, dok je drugi uzet iz lokalne šljunčare.

Prema tehničkoj deklaraciji proizvođača (Prilog A), gustoća čvrstih čestica pijeska kupljenog u lokalnoj trgovini je $2,63 \text{ g/cm}^3$. Gustoća čvrstih čestica istog uzorka izmjerena referentnom metodom u akreditiranom ispitnom laboratoriju Geotehničkog fakulteta (Geotehnički laboratorij) prema ASTM D854-02 standardu iznosi $2,66 \text{ g/cm}^3$. Srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica izmjerena metodom plinskog piknometra iznosi $2,66 \text{ g/cm}^3$. Srednja vrijednost spomenutih rezultata temelji se na pet mjerenja prikazanih u Tablici 22 sa standardnom devijacijom od $\pm 0,05$. Detaljniji prikaz rezultata mjerenja gustoće čvrstih čestica zajedno sa svim mjerenim parametrima tijekom eksperimenta, na pet uzoraka pijeska kupljenog u lokalnoj trgovini dostupan je na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>. U Tablici 22 prikazana je i pogreška mjerenja u odnosu na krivulju prikazanu na Slici 36. Pogreška mjerenja gustoće čvrstih čestica plinskim piknometrom za frakciju 0-1 mm iznosi u prosjeku za svih pet izmjerenih uzoraka -1,34%.

Tablica 22. Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica pijeska kupljenog u lokalnoj trgovini u plinskom piknometru

Frakcija 0-1 mm				
Mjerenje br.	Masa suhog uzorka	Volumen suhog uzorka	Gustoća čvrstih čestica	Pogreška mjerenja
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	200	73,38	2,73	-1,39
2	250	93,20	2,68	-1,33
3	205,1	79,12	2,59	-1,37
4	235,9	88,86	2,65	-1,34
5	277	104,68	2,65	-1,29

Za uzorak veće granulacije (0-4 mm) ne postoji tehnička deklaracija gustoće čvrstih čestica. Gustoća čvrstih čestica istog uzorka izmjerena u akreditiranom ispitnom laboratoriju

Geotehničkog fakulteta (Geotehnički laboratorij) referentnom metodom prema ASTM D854-02 standardu iznosi $2,72 \text{ g/cm}^3$, dok je s metodom plinskog piknometra izmjerena vrijednost $2,73 \text{ g/cm}^3$ sa standardnom devijacijom od $\pm 0,03$. Ova se vrijednost također temelji na srednjoj vrijednosti od pet mjerenja prikazanih u Tablici 23 dok su detaljni rezultati mjerenja plinskim piknometrom dostupni na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>. U Tablici 23 prikazana je i pogreška mjerenja u odnosu na krivulju prikazanu na Slici 36. Pogreška mjerenja gustoće čvrstih čestica plinskim piknometrom za frakciju 0-4 mm iznosi u prosjeku za svih pet izmjerenih uzoraka -1,33%.

Tablica 23. Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica pijeska granulacije 0-4 mm u plinskom piknometru

Frakcija 0-4 mm				
Mjerenje br.	Masa suhog uzorka	Volumen suhog uzorka	Gustoća čvrstih čestica	Pogreška mjerenja
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	267,4	99,02	2,70	-1,31
2	210,8	76,11	2,77	-1,38
3	220	80,16	2,74	-1,37
4	320,9	117,86	2,72	-1,25
5	245,8	90,82	2,71	-1,33

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je navedeni sustav za mjerenje plinskim piknometrom dovoljno točan. Posebno je važno naglasiti da je postupak umjeravanja potrebno provesti prije svakog ispitivanja, a posebno nakon duljeg razdoblja korištenja opreme u druge svrhe kako bi se uvjerali u točnost mjerenja predloženim postupkom.

Mogući izvori pogrešaka prilikom mjerenja plinskim piknometrom su neidealno ponašanje plina, deformacija komponenti piknometra, nesigurnost zbog rukovanja piknometrom, pogreške zbog umjeravanja piknometra, neizotermni uvjeti, pogreške zbog nesigurnosti mjerenja tlaka plina te istjecanje plina iz ćelija o čemu više detalja opisuju Tamari i Aguilar-Chavez (2005).

3.5.2 Vodeni piknometar

Volumen korištenog vodenog piknometra je 1 dm^3 , što se smatralo dovoljno velikim budući da je najveća veličina čestica ispitanog otpadnog materijala u ovom radu manja od 25 mm. Kako bi se spriječilo plutanje „lakih“ komponenti kao što su npr. plastika, stiropor, karton, na dno konusnog poklopca na navoj, postavljena je aluminijska mrežica, rješenje predloženo u radu Breitmeyer, (2011).

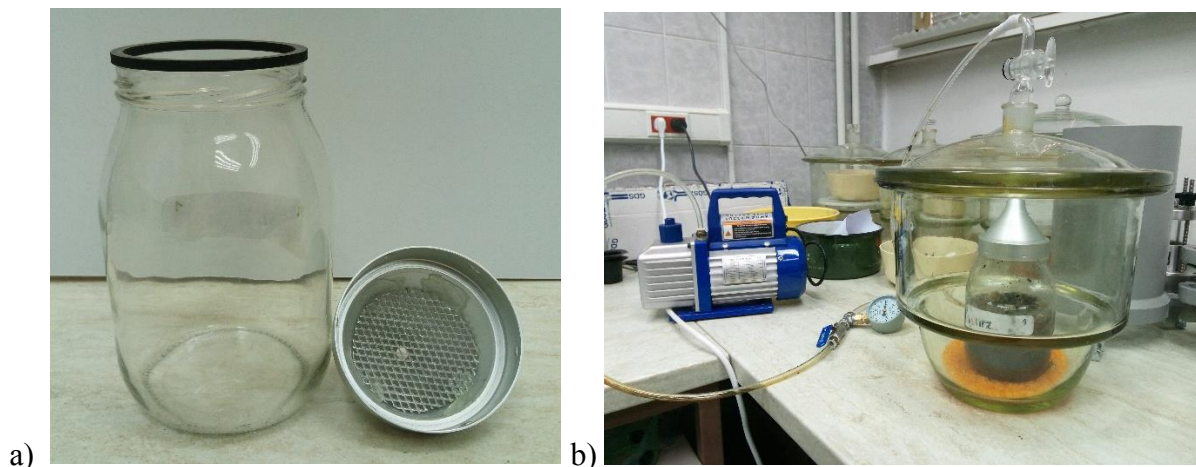
Postupak mjerenja velikim vodenim piknometrom može se prikazati u nekoliko koraka:

- 1) Čišćenje i vaganje praznog piknometra s poklopcem i mrežicom (utvrđivanje mase m_1).
- 2) Dio uzorka otpada stavlja se u piknometar i važe se masa uzorka i piknometra s poklopcem i mrežicom (utvrđivanje mase m_2).
- 3) Otprilike na polovicu visine piknometra dodaje se de-aerirana voda sobne temperature. Uzorak i voda se zatim promiješaju staklenim štapićem kako bi se uklonili mjehurići zraka u uzorku. Potom se piknometar zatvara tako da se prethodno označeni marker na poklopcu poklapa s markerom na piknometru.
- 4) Nakon zatvaranja, piknometar se protrese i valja na čvrstoj površini. Otvor na poklopcu piknometra zatvara se prstom, dopuštajući da zrak izađe iz piknometra i da se pjena otopi. Piknometar se ostavlja minimalno 24 sata na sobnoj temperaturi, koja mora biti konstantna s tolerancijom od $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ prema korištenom BS 1377-2: 1990 standardu. Za dodatno odzračivanje, piknometar se postavlja u eksikator i podtlak od 80 kPa uz korištenje vakuum pumpe.
- 5) Piknometar se zatim puni do vrha poklopca de-aeriranom vodom, ne ostavljajući mjehuriće zraka ispod poklopca.
- 6) Zatim se mjeri masa piknometra (s točnošću očitavanja od 0,5 g) (utvrđivanje mase m_3).
- 7) Nakon toga piknometar se prazni, čisti i do vrha konusnog poklopca puni de-aeriranom vodom sobne temperature. Posebna pažnja prilikom postupka punjenja posvećuje se uklanjanju mjehurića zraka i zadržavanju vode na vrhu poklopca (da se voda ne prolije iz piknometra). Piknometar se zatim suši izvana i važe se masa piknometra napunjenog deaeriranom vodom (utvrđivanje mase m_4).

Nakon opisanog postupka, gustoća čvrstih čestica ρ_s računa se uz pomoć Jednadžbe (22).

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} [\text{g/cm}^3] \quad (22)$$

Cijeli sustav korišten za mjerenje gustoće čvrstih čestica prikazan je na Slici 37 a) i b).



Slika 37. a) Veliki vodeni piknometar volumena 1 dm³ i konusni poklopac s aluminijskom mrežicom; b) Uzorak metanogene frakcije u velikom piknometru i eksikatoru s vakuum pumpom

3.5.1.5 Točnost mjerenja velikim vodenim piknometrom (VVP)

Kako bi se utvrdila točnost mjerenja metodom velikog vodenog piknometra, napravljena su četiri uzastopna ispitivanja na homogenim uzorcima pijeska (frakcija 0-1 mm) s gustoćom čvrstih čestica objavljenoj na tehničkoj deklaraciji proizvođača od 2,63 g/cm³. Srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica izmjerena metodom velikog vodenog piknometra iznosi 2,72 g/cm³ sa standardnom devijacijom od ±0,11 (Tablica 24). Pogreška mjerenja srednje vrijednosti u odnosu na referentnu vrijednost (2,63 g/cm³) je 3,4% u pozitivnom smjeru, dok ta pogreška u odnosu na vrijednost izmjerenu plinskim piknometrom (2,66 g/cm³) iznosi 2,3% u pozitivnom smjeru. Bitno je naglasiti kako su pogreške mjerenja prikazane u Tablici 24 izračunate u odnosu na referentnu vrijednost gustoće čestica od proizvođača budući da se metodom VVP ne mjeri volumen već masa istisnute tekućine. Dok su u Tablicama 22 i 23 za metodu mjerenja plinskim piknometrom pogreške mjerenja izračunate u odnosu na krivulju prikazanu na Slici 36, gdje se pogreška mjerenja prikazala u odnosu na izmjereni volumen metodom plinskog piknometra.

Tablica 24. Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica pijeska granulacije 0-1 mm velikim vodenim piknometrom

Frakcija 0-1 mm		
Mjerenje br.	Gustoća čvrstih čestica	Pogreška mjerenja
	[g/cm ³]	[%]
1	2,55	-3,04
2	2,81	6,84
3	2,68	1,90
4	2,83	7,61
Srednja vrijednost	2,72	3,42

Iz navedenog se može zaključiti da metoda mjerenja velikim vodenim piknometrom, čak i za inertne materijale kao što je pijesak daje grešku veću od 3%.

3.6 Rezultati i rasprava

Predstavljenim postupkom mjerenja plinskim piknometrom u poglavlju 3.5 Materijal i metode, izmjereni su volumeni slobodnog pornog prostora svakog od uzoraka iz čega je izračunat volumen čvrstih čestica. Poznavajući masu i ukupan volumen svakog od ugrađenih uzoraka u plinski piknometar konstantnog volumena, dolazi se do rezultata gustoće čvrstih čestica promatranog otpadnog materijala (Jednadžba 7, poglavlje 3.3 Teorijska podloga). No, poznavajući ukupan volumen svakog uzorka i volumen pora, moguće je izračunati i druge parametre kao što su poroznost i koeficijent pora. Slijedom toga, u ovom poglavlju bit će prikazani rezultati mjerenja, kao i različiti odnosi spomenutih parametara proizašli iz rezultata mjerenja.

3.6.1 Usporedba statističkih pokazatelja gustoće čestica otpada izmjerene plinskim i vodenim piknometrom

Opisanom metodom velikog vodenog piknometra (dalje u tekstu VVP) ispitano je 12 uzoraka materijala A i 10 uzoraka materijala B. Rezultati su prikazani u Tablici 25. Manji broj ispitanih uzoraka u odnosu na plinski piknometar može se pripisati vremenu potrebnom za ispitivanje jednog uzorka koji traje više od 24 sata. Od 12 uzoraka materijala A, četiri uzorka su dodatno zagrijavana u pješčanoj kupelji u pokušaju dodatnog uklanjanja zraka iz vode što nije bitno utjecalo na rezultate mjerenja u odnosu na srednju vrijednost gustoće čvrstih čestica uzoraka koji nisu podvrgnuti zagrijavanju u pješčanoj kupelji. Rezultati 93 uzoraka izmjerenih metodom plinskog piknometra prikazani su u Tablici 26. Detaljni rezultati mjerenja metodom plinskog piknometra i metodom VVP dostupni su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>.

Tablica 25. Rezultati ispitivanja gustoće čvrstih čestica VVP

Uzorak broj	ρ_s [g/cm ³]
	Materijal A
1	1,35
2	1,37
3	1,77
4	1,63
5	1,47
6	1,55
7	1,61
8	1,42
9	1,54

10	1,66
11	1,49
12	1,59
Aritmetička sredina	1,54
Stand. dev.	±0,11
Materijal B	
1	1,44
2	1,49
3	1,42
4	1,52
5	1,51
6	1,55
7	1,63
8	2,15
9	1,72
10	1,78
Aritmetička sredina	1,62
Stand. dev.	±0,22

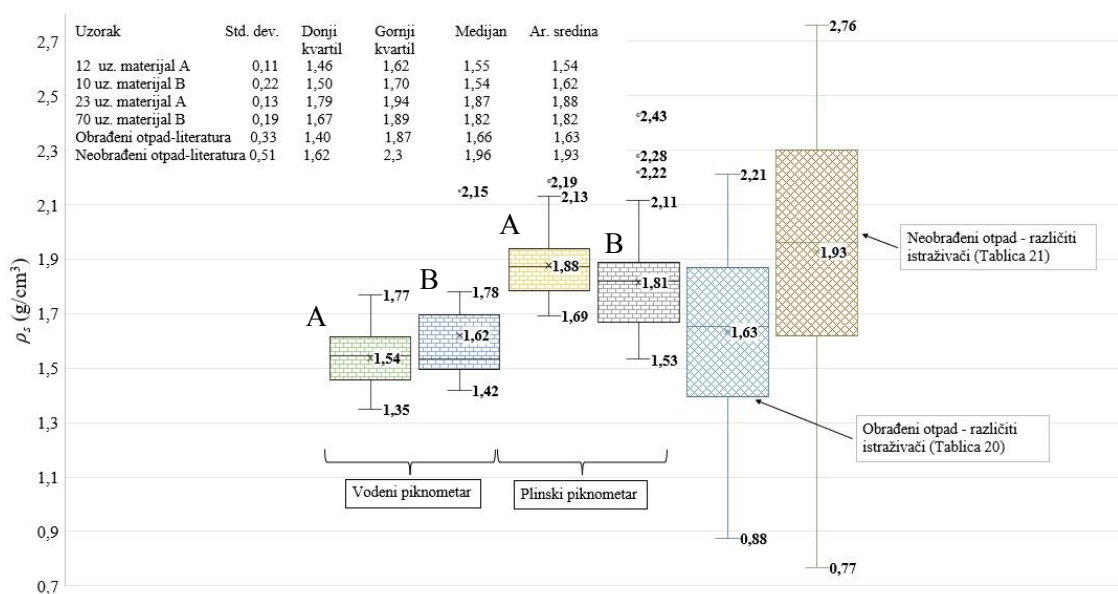
Tablica 26. Rezultati ispitivanja gustoće čvrstih čestica plinskim piknometrom

Uzorak broj	ρ_s [g/cm ³]
Materijal A	
1	1,86
2	1,81
3	1,97
4	1,82
5	2,00
6	1,88
7	1,77
8	1,88
9	1,96
10	1,82
11	1,74
12	1,91
13	1,87
14	2,19
15	2,13
16	1,69
17	1,90
18	1,94
19	1,69
20	1,79
21	1,79
22	1,87
23	2,03

Aritmetička sredina	1,88
Stand. dev.	±0,13
	Materijal B
1	1,67
2	1,67
3	2,06
4	1,67
5	1,78
6	1,78
7	1,87
8	1,87
9	1,83
10	1,83
11	1,53
12	1,57
13	1,57
14	1,55
15	1,86
16	1,80
17	1,92
18	1,92
19	1,72
20	1,83
21	1,58
22	1,55
23	1,56
24	1,55
25	1,65
26	1,65
27	1,65
28	1,60
29	1,65
30	1,65
31	1,72
32	1,79
33	1,79
34	1,79
35	1,58
36	1,79
37	1,73
38	1,70
39	1,83
40	1,77
41	1,80
42	1,86
43	1,97
44	1,91

45	1,97
46	1,84
47	1,88
48	1,82
49	1,89
50	1,83
51	1,99
52	1,98
53	2,11
54	1,86
55	1,82
56	1,91
57	1,90
58	1,82
59	1,68
60	1,87
61	1,77
62	1,85
63	1,86
64	1,90
65	2,04
66	1,70
67	2,22
68	2,28
69	2,43
70	2,43
Aritmetička sredina	1,82
Stand. dev.	±0,19

Temeljem 22 rezultata mjerenja vodenim piknometrom te 93 rezultata mjerenja u plinskom piknometru utvrđeni su sljedeći statistički pokazatelji (Slika 38): aritmetička sredina, medijan, ukupni raspon vrijednosti, donji i gornji kvartil, standardna devijacija i netipične vrijednosti.



Slika 38. Statistički pokazatelji gustoće čvrstih čestica izmjereni metodama VVP i plinskog piknometra na materijalu A i B

Metodom VVP, za 12 uzoraka materijala A srednja vrijednost izmjerene gustoće čvrstih čestica iznosi $1,54 \text{ g/cm}^3$, dok je za 10 uzoraka materijala B, srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica $1,62 \text{ g/cm}^3$.

Srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica 23 uzoraka materijala A prikazana na Slici 38 izmjerena metodom plinskog piknometra iznosi $1,88 \text{ g/cm}^3$. Za 70 uzoraka materijala B, ta vrijednost iznosi $1,82 \text{ g/cm}^3$. Na Slici 38 može se primijetiti kako su vrijednosti medijana između materijala A i B za obje metode mjerenja u ovom radu znatno bliži od vrijednosti aritmetički sredina istih. Može se zaključiti kako je medijan pouzdaniji pokazatelj skupa mjerenih podataka s bitno manjim varijacijama.

Usporedba rezultata pokazuje da, iako je svaka metoda dala prilično slične rezultate prosječne gustoće čvrstih čestica između materijala A i materijala B, srednje vrijednosti i vrijednosti medijana izmjerene metodom plinskog piknometra značajno su veće od srednjih vrijednosti i vrijednosti medijana izmjerenih metodom VVP. Gotovo sve vrijednosti gustoća čvrstih čestica objavljene u literaturi za obrađeni i neobrađeni otpad izmjerene su metodom vodenog piknometra. Iako se vrijednosti donjih i gornjih kvartila materijala A i B za obje metode mjerenja u ovom radu dobro uklapaju u vrijednosti donjih i gornjih kvartila gustoća čvrstih čestica obrađenog otpada

objavljene od različitih autora, donji i gornji kvartili dobiveni metodom VVP bliže su donjim kvartilima, dok su kvartili dobiveni metodom plinskog piknometra bliži gornjim kvartilima obrađenog otpada na Slici 38.

Skup od 70 uzoraka materijala B ispitanih metodom plinskog piknometra dao je širi raspon vrijednosti gustoće čvrstih čestica u odnosu na 23 ispitana uzorka materijala A iz čega se može zaključiti kako povećanjem broja ispitanih uzoraka, „rasipanje“ statističkih parametara raste što potvrđuje da se radi o nehomogenim uzorcima.

Od ukupnog broja izmjerenih uzoraka objema metodama, pravilom interkvartilnog raspona zabilježeno je pet vrijednosti koje značajno odstupaju od ostalih rezultata (netipične vrijednosti). Kod materijala B ispitnog metodom VVP, otkrivena je jedna vrijednost (2,15), dok su u nizu od 70 uzoraka materijala B ispitanih metodom plinskog piknometra otkrivene četiri vrijednosti (2,22, 2,28 i dva puta 2,43). Na temelju niza od 70 ispitanih uzoraka zaključuje se da će oko 6 % dobivenih rezultata biti nerealno.

3.6.2 Direktna usporedba gustoće čestica otpada izmjerene plinskim i vodenim piknometrom

Za potrebe usporedne analize, 10 uzoraka materijala B prvo je ispitano metodom plinskog piknometra, a zatim su ti isti uzorci ispitani i metodom velikog vodenog piknometra. Volumen ćelije ispitanih uzoraka metodom plinskog piknometra bio je $221,21 \text{ cm}^3$, što uz konstantnu masu svih 10 uzoraka od 26 grama, daje nasipnu gustoću ρ od $0,12 \text{ g/cm}^3$. Nakon ispitivanja uzoraka metodom plinskog piknometra, zbog nesavršenog prijenosa uzoraka iz ćelije plinskog piknometra u vodeni piknometar, došlo je do manjih gubitaka mase uzoraka. Utvrđeno odstupanje mase uzorka u plinskom i vodenom piknometru uzrokovalo je grešku od 0,39% između vrijednosti gustoće čvrstih čestica izračunatih sa stvarnom (izmjerenom) masom uzorka i teorijskom masom uzorka od 26 grama (Tablica 27). Rezultati mjerenja metodom plinskog piknometra i metodom VVP za 10 uzoraka materijala B prikazani su u Tablici 27.

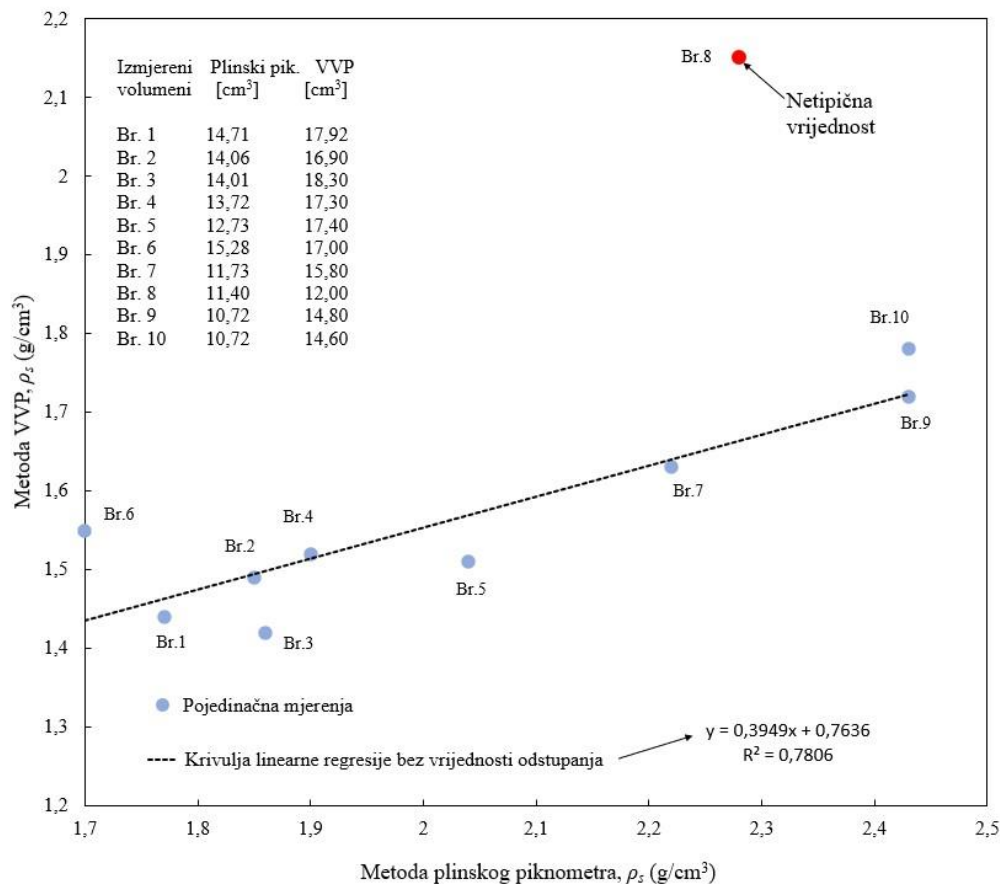
Tablica 27. Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica materijala B metodom VVP i plinskim piknometrom

Uzorak	Plinski piknometar		VVP			
	Masa uzorka	ρ_s	Masa uzorka	ρ_s	Teorijska masa	ρ_s
	[g]	[g/cm ³]	[g]	[g/cm ³]	[g]	[g/cm ³]
1	26	1,77	25,8	1,44	26	1,45
2	26	1,85	25,2	1,49	26	1,54
3	26	1,86	26,0	1,42	26	1,42
4	26	1,90	26,0	1,52	26	1,50
5	26	2,04	26,0	1,51	26	1,49
6	26	1,70	26,0	1,55	26	1,53
7	26	2,22	25,8	1,63	26	1,65
8	26	2,28	25,8	2,15	26	2,17
9	26	2,43	25,5	1,72	26	1,76
10	26	2,43	26,0	1,78	26	1,78

Na Slici 39 prikazani su rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica s obje metode na 10 uzoraka materijala B. Na istoj slici prikazani su i izmjereni volumeni čvrstih čestica s obje metode.

Primjenom pravila interkvartilnog raspona može se pokazati da se rezultat dobiven na uzorku br. 8 metodom VVP može smatrati kao netipična vrijednost odnosno kao vrijednost koja značajno odstupa od skupa podataka te je stoga ova vrijednost isključena iz daljnje analize. Isto pravilo primijenjeno na skup vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerenih metodom plinskog piknometra nije pokazalo slična odstupanja. Linearnom regresijom nad dobivenim skupom podataka dobiven je linearni odnos koji se može koristiti kao korekcijski faktor za vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerene metodom VVP (Jednadžba 23). Koeficijent korelacije spomenutog odnosa iznosi relativno visokih $R^2 = 0,78$.

$$\rho_{s,VVP,korigirano} = \frac{(\rho_{s,VVP,izmjereno} - 0,7636)}{0,3949} \quad (23)$$



Slika 39. Korelacija vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerenih plinskim piknometrom i metodom VVP

Sa Slike 39 može se zaključiti kako metoda mjerenja VVP daje konstantno niže vrijednosti gustoća čvrstih čestica u odnosu na metodu plinskog piknometra. Slična ispitivanja proveli su Stoltz i sur., (2010) u kojima je indirektno, mjerenjem poroznosti i suhe gustoće uzorka plinskim piknometrom i uz pomoć metode zasićivanja uzorka vodom izračunata gustoća čvrstih čestica. Rezultati ispitivanja metodom plinskog piknometra kao i u ispitivanjima u ovom radu, pokazali su višu vrijednost gustoće čvrstih čestica u odnosu na metodu zasićivanja vodom.

3.6.3 Gustoća čestica individualnih komponenata ispitivanog otpada i prosječna gustoća čestica otpada određena pomoću gustoća čestica individualnih komponenata

Osim mjerenja gustoće čvrstih čestica kompozitnog uzorka otpada piknometrom, Stoltz i sur., (2010) pokazali su da je ρ_s moguće odrediti i na osnovi jednadžbe (24) koja u obzir uzima udio

pojedine komponente u mješavini otpada te vrijednosti gustoća čvrstih čestica pojedinih komponenti otpada. Primjerice, Stoltz i sur., (2010) su piknometrom odredili srednju vrijednost gustoće čvrstih čestica iz 12 uzoraka jednaku $1,65 \text{ g/cm}^3$. Koristeći Jednadžbu (24), uz poznati sastav ispitivanog otpada po komponentama i masenim udjelima te reprezentativnih gustoća individualnih komponenata otpada preuzetih iz radova Beaven i Powrie, (1995) te Landva i Clark, (1990) Stoltz i sur., (2010) izračunali su teorijsku vrijednost gustoće čvrstih čestica koja iznosi $1,37 \text{ g/cm}^3$. Znatnija odstupanja teorijske i izmjerene vrijednosti mogu se opravdati činjenicom da Stoltz i sur., (2010) nisu mjerili ρ_s pojedinačnih komponenata stvarnog uzorka, već su ih procijenili na temelju dostupnih literaturnih podataka.

$$\rho_s = \frac{1}{\sum \frac{w_i}{\rho_{si}}} \quad (24)$$

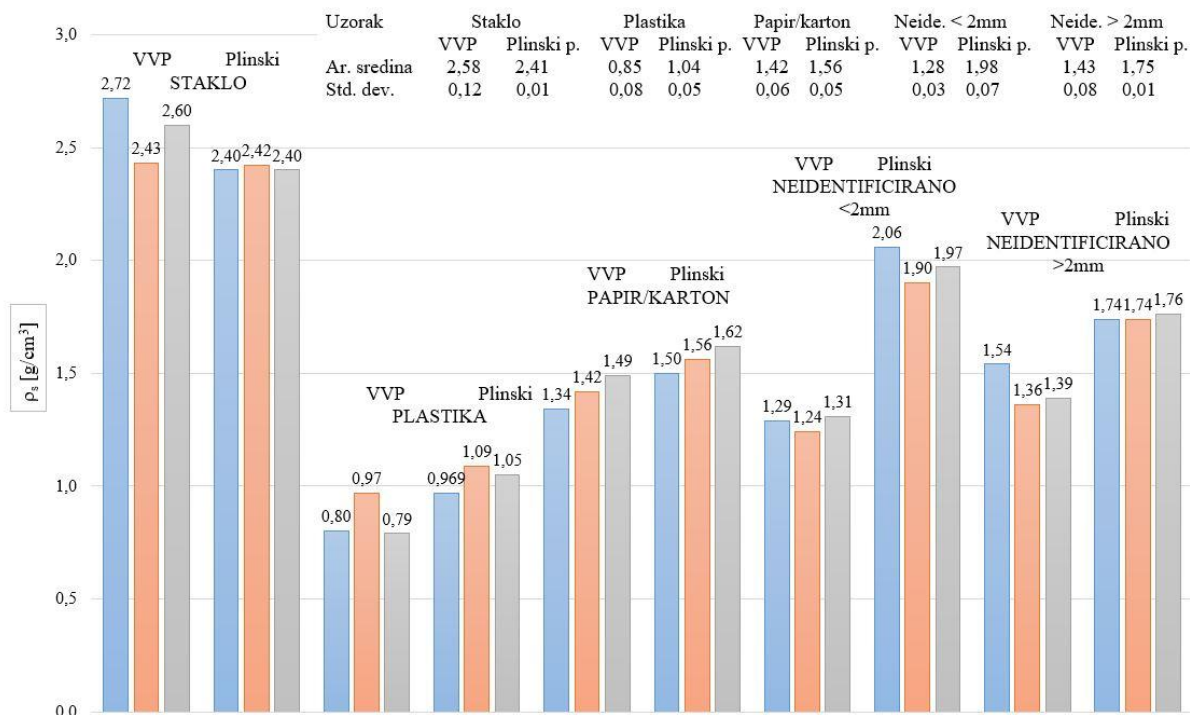
gdje je ρ_{si} gustoća čvrstih čestica i-te komponente, a w_i , maseni udio pojedine i-te komponente otpada.

Kako bi se testirala jednadžba (24), u ovom radu provedena su ispitivanja metodom VVP i metodom plinskog piknometra na pet pojedinačnih komponenata koje su najzastupljenije u cjelokupnom uzorku materijala B. To su redom, neidentificirana komponenta $<2 \text{ mm}$ i $>2 \text{ mm}$, staklo, plastika i papir/karton. Od svake komponente pripremljena su po tri uzorka. Uzorci su prvo ispitani metodom plinskog piknometra, a zatim su ti isti uzorci ispitani metodom VVP.

Izmjerene gustoće čvrstih čestica pojedinačnih komponenti otpada prikazane su na Slici 40, a detaljniji rezultati mjerenja dostupni su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>. Za čestice čija je zapreminska težina veća od zapremine težine vode, npr. komponenta stakla, metoda velikog vodenog piknometra precjenjuje vrijednosti gustoće čvrstih čestica dobivene metodom plinskog piknometra za oko 10%. Dobiveni rezultati dobro se slažu s rezultatima provjere točnosti VVP izmjerenih na pijesku, gdje je također metoda VVP procijenila vrijednost gustoće čvrstih čestica u odnosu na rezultate izmjerene metodom plinskog piknometra (poglavlje 3.5.2.1 Točnost mjerenja velikim vodenim piknometrom). No, u slučaju komponenti čija je zapreminska težina manja od zapremine težine vode, metoda VVP daje značajno niže vrijednosti gustoće čvrstih čestica u odnosu na vrijednosti dobivene metodom plinskog piknometra.

Najveća razlika između mjerenja istih uzoraka s obje metode zabilježena je za kategoriju neidentificirano $<2 \text{ mm}$ gdje su vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerene metodom VVP manje

od vrijednosti izmjerene metodom plinskog piknometra za gotovo 35%. Slična odstupanja uočavaju se i kod ispitanih uzoraka koji nisu odvojeni na pojedine komponente već je ispitan cjelokupan uzorak (Slika 39).



Slika 40. Gustoća čvrstih čestica, ρ_s , stakla, plastike, papira/kartona i neidentificiranih komponenti izmjerenih objema metodama

Razlike u srednjim vrijednostima gustoća čvrstih čestica (Slika 40) izmjerenih metodama VVP i plinskog piknometra su za staklo, plastiku, papir/karton, neidentificirano <2 mm i neidentificirano >2 mm redom: 0,18; 0,18; 0,14; 0,70 i 0,32. Za lake komponente, tj. plastiku i papir/karton, dobivene razlike kreću se u rasponu između $2 \times SD$ i $3 \times SD$ (SD – standardna devijacija). Za komponentu stakla koja ima veću zapreminsku težinu u odnosu na ostale komponente u promatranom materijalu, utvrđena razlika je blizu vrijednosti $1,5 \times SD$. Za komponente neidentificirano <2 mm i >2 mm, utvrđena razlika između mjerenja obje metoda značajno je veća od $3 \times SD$ što jasno ukazuje da metoda VVP nije prikladna za određivanje gustoće čvrstih čestica sitnozrnatog otpada materijala čije čestice imaju zapreminsku težinu manju od vode.

U odnosu na rezultate mjerenja na referentnim uzorcima pijeska metodom VVP (poglavlje 3.5.2.1 Točnost mjerenja velikim vodenim piknometrom), rezultati prikazani na Slici 40 pokazuju da je mjerna pogreška na otpadnom materijalu bila puno veća nego što se očekivalo.

Mogući uzrok pogreške u metodi VVP u odnosu na rezultate mjerenja u ovom radu je kombinacija plutanja lakih otpadnih čestica i povećanje volumena čvrstih čestica zbog vlaženja (bubrenja) koje je u konačnici smanjilo gustoću čvrstih čestica. Osim toga, drugi uzrok mogao bi se pripisati zračnim „džepovima“ unutar uzorka zbog nesavršene zasićenosti malih pora u odnosu na komponentu neidentificirano.

U Tablici 28 prikazane su vrijednosti gustoće čvrstih čestica pojedinih komponenti otpada objavljene u literaturi. Vrste plastike koje se spominju u Tablici 28 su redom: LDPE (eng. low density polyethylene; hrv. polietilen niske gustoće), HDPE (eng. high density polyethylene; hrv. polietilen visoke gustoće), PET (eng. polyethylene terephthalate; hrv. polietilen tereftalat) i PP (eng. polypropylene; hrv. polipropilen).

Tablica 28. Gustoće čvrstih čestica, ρ_s , pojedinačnih komponenti otpada, prikupljene iz literature

	ρ_s [g/cm ³]								
Izvor	Staklo			Papir/karton		Plastika			
Wong, (2009)*	Pod-kategorija								
	/			Usitnjeni	Karton	Plastični čips		Plastične vrećice	
	2,6			1,53	1,53	0,95		0,92	
Stoltz i sur., (2010)	2,9			2		1			
Web stranica: The Engineering ToolBox	Pod-kategorija								
	Obično	Optičko	Borosili -katno	Papir		LDPE	HDPE	PET	PP
	2,4-2,8	2,9-5,9	2,2	0,7-1,15		0,91	0,96	1,35	0,91-0,94

*Prikupljeno iz više različitih izvora

Usporedba podataka prikazanih u Tablici 28 i Slici 40 otkriva da metoda VVP daje konstantno niže vrijednosti gustoće čvrstih čestica lakih čestica u odnosu na vrijednosti objavljene u literaturi. Primjerice, pregled literature (Tablica 28) pokazuje da se gustoća čvrstih čestica plastike, s izuzetkom PET-a, kreće u uskom rasponu vrijednosti između 0,91-1 g/cm³. Međutim, dobivene vrijednosti gustoće čvrstih čestica plastike izmjerene metodom VVP bile su značajno niže kao što je prikazano na Slici 40. Metoda VVP kod mjerenja gustoće čvrstih čestica papira/kartona također je dala niže vrijednosti od objavljenih u radu Wong, (2009) i Stoltz i sur., (2010). Suprotan trend može se uočiti kod komponente stakla gdje je metoda VVP u ovom radu dala vrijednosti gustoće

čvrstih čestica koje dobro odgovaraju vrijednostima gustoće čvrstih čestica iz prikupljene literature (Stoltz i sur., 2010; Wong, 2009). Vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerene plinskim piknometrom za sve pojedinačne komponente mogu se dobro usporediti s podacima objavljenim u literaturi.

Maseni udjeli (μ_i) svakog uzorka pojedinačno ispitanih komponenata materijala B za metodu plinskog piknometra i metodu VVP preuzeti su iz Tablice 13 (poglavlje 2.6.4 Utvrđeni sastav otpada) u kojoj su prikazane srednje vrijednosti sastava otpada određene na dva uzorka materijala B (B1 i B2) ručnim razvrstavanjem otpada po komponentama. Primjenom jednadžbe (24), uz izmjerene gustoće čvrstih čestica za svaku komponentu prikazanu na Slici 40, određena je vrijednost gustoće čvrstih čestica miješanog uzorka. Za metodu plinskog piknometra u ovom radu, vrijednost gustoće čvrstih čestica miješanog uzorka iznosi $2,12 \text{ g/cm}^3$, dok ta vrijednost za metodu VVP iznosi $1,64 \text{ g/cm}^3$. Izračunata vrijednost gustoće čvrstih čestica ($2,12 \text{ g/cm}^3$) za materijal B dobivena Jednadžbom (24) veća je od prosječne vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerena metodom plinskog piknometra prikazane na Slici 38 ($1,82 \text{ g/cm}^3$) za 16,5%, dok je vrijednost izračunata jednadžbom (24) za metodu VVP od srednje vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerene metodom VVP na Slici 38 ($1,62 \text{ g/cm}^3$) veća za 1,2%. Za obje metode Jednadžba 24 dala je veće vrijednosti gustoće suhih čestica miješanih uzoraka u odnosu na izmjerene vrijednosti, što je u suprotnosti s rezultatima objavljenim u Stoltz i sur. (2010). Ipak, za donošenje konačnog zaključka potrebno je provesti dodatna mjerenja na komponentama koje još nisu bile ispitane.

3.6.4 Korelacija suhe gustoće ρ_d i poroznosti n prirodnih i drobljenih uzoraka

U ovom poglavlju prikazani su rezultati mjerenja poroznosti i suhe gustoće na ukupno 33 uzoraka materijala A i 20 uzoraka materijala B. Plinskim piknometrom mjeren je volumen pora uzoraka dok su odgovarajući parovi vrijednosti poroznosti i suhe gustoće izračunati. Volumen ćelije plinskog piknometra, a time i ispitivanih uzoraka, iznosio je $221,9 \text{ cm}^3 \pm 1,4 \text{ cm}^3$.

Ispitani uzorci materijala A podijeljeni su u dvije skupine, pri čemu mase svih ugrađenih uzoraka ovog materijala nisu imale konstantnu vrijednost. Prvu skupinu čine 23 uzorka (skupina A I), dok su preostali uzorci materijala A smješteni u drugu skupinu (A II). Prva skupina uzoraka ispitana je u prirodnom stanju. Gustoće suhih uzoraka ρ_d materijala A I ugrađenih u ćeliju plinskog piknometra u prirodnom stanju varirale su od $0,09 \text{ g/cm}^3$ do $0,22 \text{ g/cm}^3$. Na drugoj skupini uzoraka

proveden je proces drobljenja zbijanjem na vibracijskom stolu, u skladu s ASTM D4253-16e1 – metoda ispitivanja 1A standardom. Nakon drobljenja navedenim postupkom, uzorci su ugrađeni u ćeliju plinskog piknometra. Gustoće suhih uzoraka ρ_d materijala A II ugrađenih u plinski piknometar nakon što su čestice otpada bile podvrgnute drobljenju u vibro ploči varirale su od 0,11 g/cm³ do 0,26 g/cm³. Ovim postupkom želio se ispitati utjecaj drobljenja čestica na promjenu poroznosti.

Uzorci materijala B također su podijeljeni u dvije skupine, s po 10 uzoraka u svakoj skupini, s time da su mase kod ovog materijala za svaku skupinu bile konstantne i cjelokupni materijal nalazio se u prirodnom stanju. U prvoj skupini materijala B (B I), masa svakog uzorka iznosila je 26 g, dok su u drugoj skupini, uzorci imali masu od 82 g (B II). Tako su vrijednosti suhe gustoće ρ_d materijala B iznosile 0,12 g/cm³ za prvu skupinu (B I), odnosno 0,37 g/cm³ za drugu skupinu (B II) uzoraka.

Izmjereni volumeni pora te izračunate poroznosti i suhe gustoće za ispitane uzorke iz ovog rada prikazani su u Tablici 29 u nastavku, a odnos izračunate poroznosti i suhe gustoće prikazan je na Slici 41.

Tablica 29. Odnos poroznosti i suhe gustoće materijala A i B

Uzorak br.	V_v [cm ³]	n – izračunato kao V_v/V temeljem rezultata mjerjenja [%]	Suha gustoća [g/cm ³]
Materijal A I – (prirodni uzorci)			
1	194,85	88,08	0,22
2	200,51	90,64	0,17
3	202,77	91,66	0,17
4	198,62	89,79	0,19
5	199,89	90,36	0,19
6	206,88	92,41	0,14
7	205,18	91,65	0,15

8	199,90	89,29	0,20
9	201,99	90,22	0,19
10	203,00	90,67	0,17
11	201,99	90,22	0,17
12	207,09	92,50	0,14
13	201,99	90,22	0,18
14	206,05	92,04	0,17
15	206,05	92,04	0,17
16	202,59	90,49	0,16
17	204,93	91,53	0,16
18	199,63	89,17	0,21
19	200,27	89,46	0,18
20	198,67	88,74	0,20
21	206,51	92,24	0,14
22	212,62	94,97	0,09
23	200,69	89,64	0,21
Aritmetička sredina	202,73	90,78	0,17
Stand. dev.	±3,81	±1,54	±1,54
Materijal A II (drobljeni uzorci)			
1	204,28	91,24	0,17
2	210,84	94,18	0,11
3	202,62	90,50	0,18
4	193,88	86,60	0,26
5	203,62	90,95	0,18
6	202,32	90,37	0,20
7	208,46	93,11	0,13
8	203,33	90,82	0,15
9	195,78	87,45	0,23
10	204,37	91,29	0,17

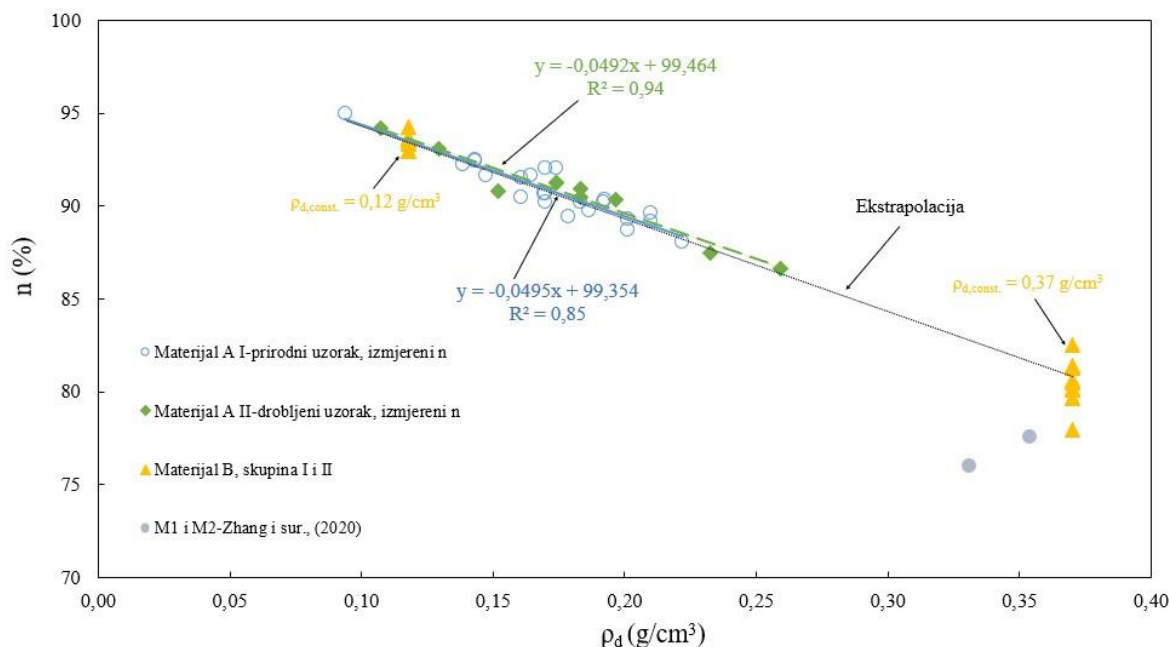
Aritmetička sredina	202,95	90,65	0,18
Stand. dev.	±5,07	±2,26	±0,04
	Materijal B I		
1	206,5	93,35	0,12
2	207,15	93,64	0,12
3	207,2	93,67	0,12
4	207,49	93,80	0,12
5	205,93	93,09	0,12
6	208,48	94,25	0,12
7	209,48	94,7	0,12
8	209,81	94,85	0,12
9	210,49	95,15	0,12
10	210,49	95,15	0,12
Aritmetička sredina	208,30	94,16	0,12
Stand. dev.	±1,68	±0,76	±0,00
	Materijal B II		
1	171,97	77,93	0,37
2	175,73	79,63	0,37
3	175,72	79,63	0,37
4	176,83	80,13	0,37
5	176,96	80,19	0,37
6	177,68	80,51	0,37
7	177,94	80,63	0,37
8	179,43	81,31	0,37
9	179,67	81,41	0,37
10	182,04	82,49	0,37
Aritmetička sredina	177,40	80,39	0,37

Stand. dev.	$\pm 2,72$	$\pm 1,23$	$\pm 0,00$
-------------	------------	------------	------------

Odnos poroznosti n i suhe gustoće ρ_d izmjereni u okviru ovog rada za 23 rahla uzorka materijala A I može se pomoću linearne regresije izraziti Jednadžbom (25).

$$n [\%] = -0,0495 \times \rho_d + 99,354 \quad (25)$$

Koeficijent korelacije spomenutog odnosa iznosi $R^2 = 0,85$. Za usporedbu sezonske varijacije, na Slici 41 prikazane su i izmjerene vrijednosti poroznosti n za dvije skupine materijala B. Iako je vrijednost suhe gustoće za skupine materijala B I i B II imala konstantnu vrijednost, poroznost uzoraka se kretala u značajnim rasponima što se može pripisati heterogenosti otpadnog materijala. Ekstrapolacija vrijednosti suhe gustoće do $0,37 \text{ g/cm}^3$ koristeći jednadžbu (25) pokazuje da se Jednadžbom (25) također mogu točno predvidjeti vrijednosti poroznosti n materijala B koji je uzorkovan u drugom dijelu godine. Za usporedbu, na Slici 41 prikazani su i rezultati dobiveni na bioosušenom otpadu istraživača Zhang i sur., (2020a). Kao što se može vidjeti sa slike, pri istim suhim gustoćama bioosušeni otpad ispitivan od strane spomenutih istraživača pokazao je nešto manju poroznost u odnosu na poroznost materijala skupine B II, no i dalje se radi o vrlo poroznom materijalu. Autori su ispitivali BMO otpad koji je u biološkom dijelu obrade prošao isti proces obrade kao i materijal u ovom radu.



Slika 41. Korelacija poroznosti n i suhe gustoće ρ_d (Petrović i sur., 2022b)

Izmjerene vrijednosti volumena slobodnog pornog prostora V_v na materijalu A I kretale su se u rasponu od 194,85 do 212,62 cm³ sa srednjom vrijednošću od 202,73 cm³ i standardnom devijacijom od $\pm 3,81$ cm³. Izmjerene vrijednosti volumena slobodnog pornog prostora V_v 10 uzoraka materijala A II kretale su se u rasponu od 193,88 do 210,84 cm³ sa srednjom vrijednošću od 202,95 cm³ i standardnom devijacijom od $\pm 5,07$ cm³. Razlika u vrijednosti izmjerenog volumena pornog prostora prirodnog i drobljenog materijala iznosi 0,1% što ukazuje na to da je zbijanje na vibro stolu imalo zanemariv utjecaj na drobljenje čestica i formiranje skeleta uzorka prilikom nasipavanja u ćeliju piknometra. Očito je kako drobljenje čestica tijekom ugradnje ispitivanog bioosušenog otpadnog materijala u tijelo bioreaktorskog odlagališta ne bi trebalo bitno utjecati na porozitet odloženog materijala.

Odnos između suhe gustoće i poroznosti izračunat za 10 drobljenih uzoraka materijala A II (Slika 41) može se izraziti Jednadžbom (26).

$$n [\%] = -0,0492 \times \rho_d + 99,464 \quad (26)$$

Koeficijent korelacije spomenutog odnosa iznosi $R^2 = 0,94$. Ipak, budući da se varijacije u mjerenjima između A I i A II uzoraka, kako volumena tako i gustoća suhih čestica, nalaze unutar standardne devijacije, potrebna su daljnja istraživanja za uvjerljivije dokaze utjecaja procesa zbijanja na gustoću čvrstih čestica ispitivanog bioosušenog materijala.

Volumen pornog prostora V_v materijala B I, kreće se u rasponu od 205,93 do 210,49 cm³ sa srednjom vrijednošću 208,30 cm³ i standardnom devijacijom $\pm 1,68$ cm³. Volumen pornog prostora V_v materijala B II, kreće se u rasponu od 171,97 do 182,04 cm³ sa srednjom vrijednošću 177,40 cm³ i standardnom devijacijom $\pm 2,72$ cm³.

U odnosu na ukupan volumen svakog od izmjerenih uzoraka (221,9 cm³ $\pm 1,4$ cm³) i rezultate mjerenja volumena slobodnog pornog prostora prikazanih u Tablici 29, može se zaključiti da je BMO otpad visoko porozan te posljedično vrlo stišljiv materijal.

Kod materijala B, povećanjem suhe gustoće ugrađenih uzoraka ρ_d , s 0,12 g/cm³ (B I) na 0,37 g/cm³ (B II), srednja vrijednost poroznosti se smanjila za 17,13% što potvrđuje da zbijanje bioosušenog materijala u tijelo bioreaktorskog odlagališta utječe na vrijednost poroznosti i posljedično na koeficijent propusnosti i mogućnost recirkulacije filtrata kroz tijelo odlagališta.

3.6.5 Korelacija suhe gustoće ρ_d i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s

U ovom poglavlju prikazani su rezultati mjerenja plinskim piknometrom na ukupno 60 uzoraka materijala B. Uzorci su podijeljeni u šest grupa, po 10 uzoraka u svakoj grupi. Svi uzorci jedne grupe imali su istovjetnu vrijednost suhe gustoće ρ_d kako slijedi: 0,12 g/cm³, 0,17 g/cm³, 0,22 g/cm³, 0,27 g/cm³, 0,32 g/cm³ odnosno 0,37 g/cm³. Odgovarajuće trojke (e , ρ_d , ρ_s) vrijednosti utvrđene za svaku grupu ispitivanog materijala B prikazane su u Tablici 30. Koeficijent pora e i gustoća čvrstih čestica ρ_s , nakon mjerenja volumena pora V_v i volumena čvrstih čestica V_s pojedinog uzorka, izračunati su Jednadžbom (9) i Jednadžbom (7). Prikazane izračunate standardne devijacije pojedinih grupa uzoraka odnose se na standardnu devijaciju populacije.

Tablica 30. Izmjerene (e , ρ_d , ρ_s) vrijednosti bioosušenog materijala B

Uzorak broj	e [-]	ρ_s [g/cm ³]	e [-]	ρ_s [g/cm ³]	e [-]	ρ_s [g/cm ³]
	#1		#2		#3	
	$\rho_d = 0,12$ [g/cm ³]		$\rho_d = 0,17$ [g/cm ³]		$\rho_d = 0,22$ [g/cm ³]	
1	13,14	1,67	8,02	1,53	6,18	1,58
2	13,14	1,67	8,25	1,57	6,04	1,55
3	16,45	2,06	8,25	1,57	6,11	1,56
4	13,14	1,67	8,13	1,55	6,04	1,55
5	14,09	1,78	9,92	1,86	6,51	1,65
6	14,09	1,78	9,59	1,80	6,51	1,65
7	14,85	1,87	10,28	1,92	6,51	1,65
8	14,86	1,87	10,28	1,92	6,29	1,60
9	14,50	1,83	9,14	1,72	6,51	1,65
10	14,50	1,83	9,76	1,83	6,51	1,65
Aritmetička sredina	14,28	1,80	9,16	1,73	6,32	1,61
Stand. dev.	±0,97	±0,11	±0,87	±0,15	±0,20	±0,04
	$\rho_d = 0,27$ [g/cm ³]		$\rho_d = 0,32$ [g/cm ³]		$\rho_d = 0,37$ [g/cm ³]	
	#4		#5		#6	
1	5,37	1,72	4,61	1,80	4,38	1,99
2	5,61	1,79	4,80	1,86	4,35	1,98
3	5,61	1,79	5,16	1,97	4,71	2,11
4	5,61	1,79	4,96	1,91	4,03	1,86

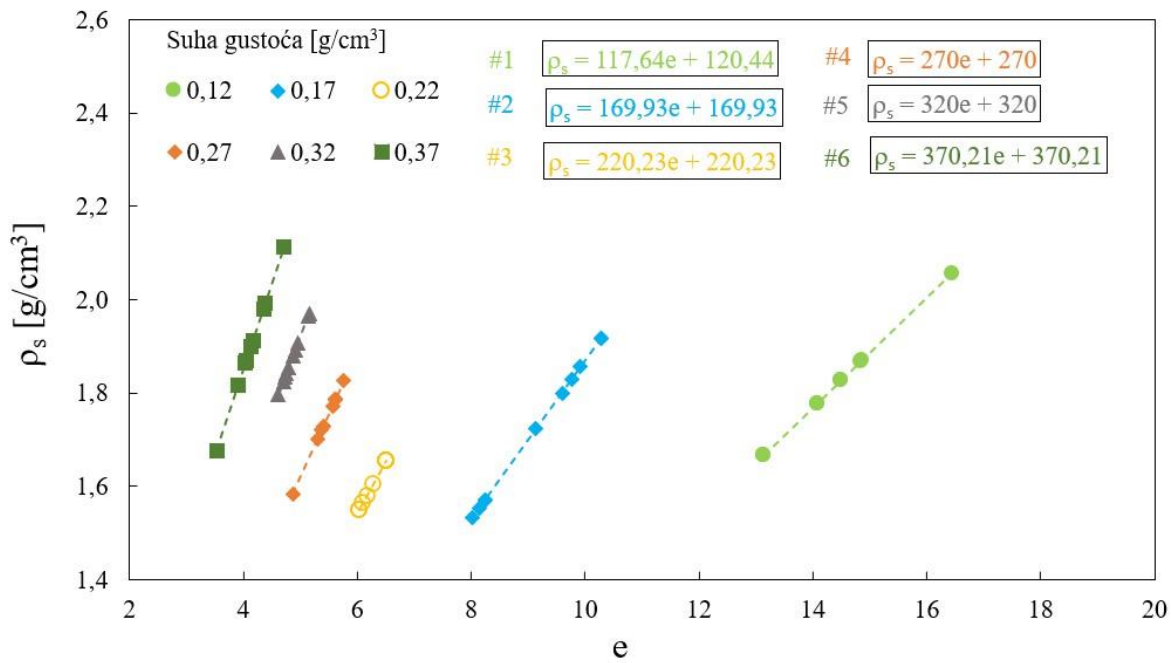
5	4,86	1,58	5,14	1,97	3,91	1,82
6	5,61	1,79	4,75	1,84	4,16	1,91
7	5,40	1,73	4,88	1,88	4,13	1,90
8	5,30	1,70	4,70	1,82	3,91	1,82
9	5,76	1,83	4,91	1,89	3,53	1,68
10	5,56	1,77	4,73	1,83	4,05	1,87
Aritmetička sredina	5,47	1,75	4,86	1,88	4,12	1,89
Stand. dev.	±0,24	±0,065	±0,17	±0,06	±0,30	±0,11

Izmjerene vrijednosti gustoće čvrstih čestica, ρ_s te pripadni koeficijenti pora e zajedno s konstantnom vrijednosti suhe gustoće ρ_d svake skupine prikazane su na Slici 42 a). Na slici 42 b) prikazane su suhe gustoće ρ_d svake grupe uzoraka te utvrđene varijacije pripadnih koeficijenata pora e i gustoće čvrstih čestica, ρ_s . Na obje slike uočljiva je velika varijabilnost u gustoćama čvrstih čestica i to unutar svake ispitivane grupe uzoraka, što potvrđuje nehomogenost ispitivanog otpadnog materijala. U odnosu na prikazano, a suprotno očekivanom, postupak BMO nije značajno povećao homogenost otpada.

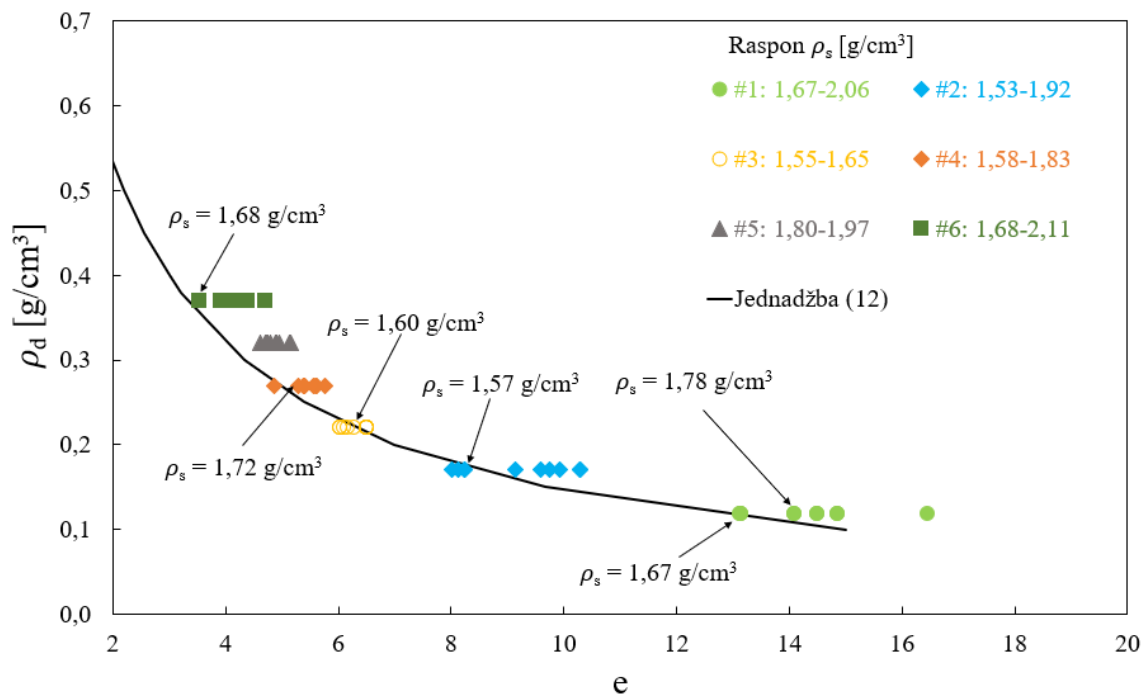
Na Slici 42 a) vidljiva je jaka linearna zavisnost između gustoće čvrstih čestica i koeficijenta pora pri konstantnom iznosu suhe gustoće u skladu s Jednadžbom (12) uzimajući u obzir konstantnu suhu gustoću. Slika 42 b) otkriva hiperboličan odnos između suhe gustoće i koeficijenta pora pri konstantnom iznosu gustoće čvrstih čestica što je također u skladu s Jednadžbom (12) uzimajući u obzir konstantnu gustoću suhih čestica. Budući da su tijekom ispitivanja masa i volumen svakog uzorka iz pojedine grupe bili konstantni, može se zaključiti da gustoća čvrstih čestica pojedine grupe uzoraka raste isključivo zbog smanjenja volumena čvrstih čestica V_s . Ovo zapažanje ukazuje na to da oblik čestica, njihova orijentacija kao i veličina pojedinih čestica imaju značajnu ulogu u formiranju skeleta i ukupnog volumena uzorka.

Dobivene standardne devijacije (SD) gustoća čvrstih čestica i koeficijenata pora (Tablica 30) otkrile su da je najmanja heterogenost otpada unutar skupine #3. Skupine #1 i #2 s druge strane, sastoje se od najheterogenijih uzoraka. U Tablici 30 može se primijetiti da iako su skupine #1 i #6 imale slične vrijednosti SD gustoća čvrstih čestica, pripadne vrijednosti SD koeficijenata pora unutar tih dviju skupina značajno su se razlikovale. Prikazani rezultati mjerenja pokazuju da velika

varijacija gustoće čvrstih čestica ne ukazuje nužno i na veliku varijaciju pripadnog koeficijenta pora. No, za provjeru ovih zaključaka, potrebna su daljnja istraživanja u tome smjeru.



a)



b)

Slika 42. a) Linearni odnos koeficijenta pora i gustoće čvrstih čestica uz konstantne suhe gustoće; b) Hiperbolični odnos koeficijenta pora i suhe gustoće uz konstantne gustoće čvrstih čestica (Petrović i sur., 2022a)

Slika 42 b) prikazuje i teoretsku krivulju dobivenu Jednadžbom (12) za konstantnu vrijednost gustoće čvrstih čestica od $1,6 \text{ g/cm}^3$. Može se primijetiti kako su određeni uzorci čija je izmjerena vrijednost gustoće čvrstih čestica blizu $1,6 \text{ g/cm}^3$, jako blizu teoretskoj krivulji prikazanoj na Slici 42 b). Ovi rezultati upućuju da za otpadne materijale kakvi su ispitivani u okviru ove disertacije, postoji skup hiperboličkih krivulja u kojima je svaka krivulja određena jedinstvenom vrijednosti gustoće čvrstih čestica.

Pregledom Tablice 20 u poglavlju 3.4 Pregled dosadašnjih istraživanja, može se primijetiti da se gustoća čvrstih čestica obrađenog otpada kreće u širokom rasponu, od $0,88 \text{ g/cm}^3$ do $2,21 \text{ g/cm}^3$. Iako se u praksi vrlo često vrijednosti gustoće čvrstih čestica otpada procjenjuju iz dostupne literature, očito je da takav pristup može dovesti do netočnih predviđanja gustoće čvrstih čestica, a posljedično i do netočinog predviđanja početnog koeficijenta pora. Sa Slike 42 a) i b) može se primijetiti da čak i unutar iste grupe uzoraka s konstantnom suhom gustoćom, vrijednosti gustoće čvrstih čestica imaju velika odstupanja. Povećanjem gustoće čvrstih čestica, povećava se i početni koeficijent pora pa se iz tog razloga preporuča da se gustoća čvrstih čestica obrađenog otpada treba određivati isključivo eksperimentalnim putem.

Matematički izraz korelacije izmjerenih (e, ρ_d, ρ_s) podataka plinskim piknometrom na 60 uzoraka materijala B prikazanih u Tablici 30, izračunat je s XLSurfFit 3D Surface Fitter programom (Jednadžba 27).

$$e = \frac{\rho_s^b}{\rho_d^c} - a \quad (27)$$

pri čemu su koeficijenti $a=0,966128$, $b=1,003598$, $c=1,005804$.

Jednadžba (27) i Jednadžba (12) su vrlo slične. Koeficijent a predstavlja asimptotu na $e = -0,966128$, a koeficijenti b i c predstavljaju faktore korekcije u odnosu na utvrđene eksperimentalne rezultate gustoću čvrstih čestica i suhe gustoće. Iako su tijekom BMO otpadnih materijala zatvorene pore uklonjene procesom obrade ulaznog otpada u postrojenje za BMO

otpada, sličnost Jednadžbi (12) i (27) otkriva da je teoretska Jednadžba (12) u potpunosti primjenjiva za takvu vrstu materijala.

Jednadžbe (12) i (27) mogu se preurediti na sljedeći način:

$$\rho_s = (e + 1)\rho_d \quad (28)$$

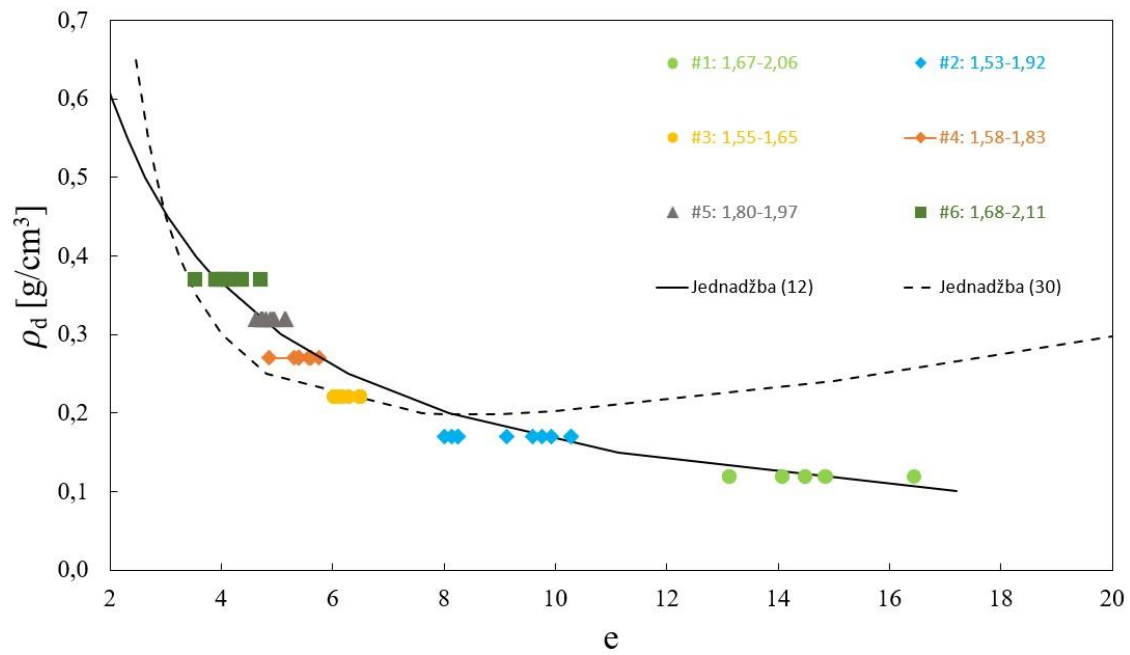
$$\rho_s = \sqrt[b]{(e + a)\rho_d^c} \quad (29)$$

Izravna korelacija između suhe gustoće ρ_d i odgovarajućeg koeficijenta pora e dobiva se izjednačavanjem teorijske i empirijske jednadžbe (28) i (29) i rješavanjem po ρ_d (Jednadžba 30).

$$\rho_d = 10^{\frac{\text{Log}(e+a) - b \times \text{Log}(1+e)}{b-c}} = \left(\frac{(1+e)^b}{a+e}\right)^{\frac{1}{-b+c}} \quad (30)$$

U usporedbi s Jednadžbom (12), Jednadžbom (30) može se procijeniti odnos suhe gustoće ρ_d i koeficijenta pora e , bez poznavanja točne vrijednosti gustoće čvrstih čestica obrađenog otpada. No, korištenje Jednadžbe (30) preporučuje se samo u slučajevima kada je postupak obrade otpadnog materijala sličan postupku obrade te ima slična geotehnička svojstva kao i otpadni materijal iz kojeg je Jednadžba (30) izvedena.

Predložena Jednadžba (30) ipak pokazuje pogrešne procjene vrijednosti suhe gustoće kod koeficijenata pora većih od 7,6 (Slika 43), odnosno vrijednosti suhe gustoće manje od 0,20 g/cm³. No, budući da je početna suha gustoća otpada obično mnogo veća od navedene graniče vrijednosti, ovo ograničenje nema bitnijeg utjecaja na primjenu predloženog izraza u praktične svrhe. Slika 43 prikazuje i teoretsku krivulju dobivenu Jednadžbom (12) za konstantnu vrijednost gustoće čvrstih čestica od 1,6 g/cm³.



Slika 43. Odnos koeficijenta pora e i suhe gustoće ρ_d izračunat Jednadžbom (30) (Petrović i sur., 2022a)

3.7 Zaključak

Budući da se na bioreaktorskim odlagalištima, postizanjem potpunog kapaciteta prostora za odlaganje i kasnijim vlaženjem materijala očekuje pojava većih količina slijeganja, mogućnost njegovog predviđanja zahtijeva točno poznavanje nekoliko parametara kao što su gustoća čvrstih čestica, nasipna gustoća, suha gustoća, poroznost i koeficijent pora.

Ukoliko je poznata trenutna poroznost (n) odloženog BMO otpadnog materijala, za procjenu odgovarajuće suhe gustoće predložena je linearna korelacija između ρ_d i n parametara.

Bitno je naglasiti kako se korelacije mogu koristiti ukoliko materijal na koji se korelacija primjenjuje ima slična granulometrijska svojstva kao i materijal predstavljen u ovom radu.

Analiza Jednadžbe (12) pokazala je da koeficijent pora ovisi ne samo o suhoj gustoći već i o gustoći čvrstih čestica za što je u najvećoj mjeri zaslužna razgradnja organskog dijela otpada. Pogrešnom procjenom gustoće čvrstih čestica moglo bi doći do pogrešnog predviđanja slijeganja, a posljedično se ne može točno procijeniti kapacitet odlagališta. Iz tog razloga predložen je jednodimenzionalni funkcionalni odnos $\rho_d = f(e)$ s kojim se koeficijent pora BMO otpadnog materijala može procijeniti bez poznavanja odgovarajuće gustoće čvrstih čestica materijala. Budući da je predloženi odnos napravljen za BMO otpadni materijal u kojem su zatvorene pore uklonjene tijekom procesa obrade u postrojenju, za druge vrste otpadnih materijala koje sadrže samo manju količinu zatvorenih pora ili ih uopće ne sadrže, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se dobio sličan odnos. Predloženi funkcionalni odnos (Jednadžba 30) ne preporuča se koristiti u slučajevima kada otpad ne posjeduje slična geotehnička svojstva kao i otpad iz ovog rada, kao ni u slučaju neobrađenog čvrstog komunalnog otpada koji sadrži velike količine zatvorenih pora.

Osim plinskog piknometra, za određivanje gustoće čvrstih čestica BMO otpadnog materijala korištena je i metoda velikog vodenog piknometra prema BS 1377: Part 2: 1990. standardu. Ispitani su uzorci BMO otpada sa svim sastavnim komponentama kao i najzastupljenije pojedinačne komponente (plastika, staklo, papir/karton te neidentificirano <2 mm i >2 mm). Dodatno je 10 uzoraka materijala B ispitano prvo u plinskom piknometru, a nakon toga su isti uzorci ispitani metodom VVP. Dobiveni rezultati pokazuju da metoda mjerenja VVP daje konstantno niže vrijednosti u odnosu na metodu plinskog piknometra.

Za 23 uzorka materijala A, srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica ρ_s izmjerena metodom plinskog piknometra iznosi $1,88 \text{ g/cm}^3$, za 70 uzoraka materijala B, ta vrijednost iznosi $1,82 \text{ g/cm}^3$.

Metoda VVP za 12 uzoraka materijala A dala je srednju vrijednost gustoće čvrstih čestica ρ_s od $1,54 \text{ g/cm}^3$, dok je za materijal B ta vrijednost $1,62 \text{ g/cm}^3$.

Usporedba izmjerenih rezultata s literaturom pokazuje da iako se vrijednosti donjih i gornjih kvartila materijala A i B za obje metode mjerenja u ovom radu dobro uklapaju u vrijednosti donjih i gornjih kvartila gustoća čvrstih čestica obrađenog otpada objavljene od različitih autora, donji i gornji kvartili dobiveni metodom VVP bliže su donjim kvartilima, dok su kvartili dobiveni metodom plinskog piknometra bliži gornjim kvartilima obrađenog otpada različitih autora.

U usporedbi s metodom VVP, postupak mjerenja metodom plinskog piknometra s dostupnom opremom standardnog geotehničkog laboratorija pokazao se lako dostupnim, isplativim i brzim rješenjem za određivanje gustoće čvrstih čestica BMO otpada budući da je za jedno mjerenje potrebno oko 30 minuta, a istovremeno su emisije neugodnih mirisa i opasnosti za zdravlje svedene na minimum. Budući da je metoda mjerenja plinskim piknometrom brza i nedestruktivna metoda, kao takva, ispitane uzorke može sačuvati za daljnje analize.

3.8 Popis literature

Agnew J. M., Leonard J. J., (2002). Using a modified pycnometer to determine free air space and bulk density of compost mixture while simulating compressive loading. In: Michel F. C., Rynk R. F., Hoiting H. A. J. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium Composting and Compost Utilization*, Columbus, OH, USA, pp: 183–204.

Agnew J. M., Leonard J. J., Feddes J., Feng Y., (2003). A modified air pycnometer for compost volume and density determination. *Canadian Biosystems Engineering*. Vol. 45, pp: 27–34.

Ahn H. K., Richard T. L., Glanville T. D., (2008). Laboratory determination of compost physical parameters for modeling of airflow characteristics. *Waste Management*. Vol. 28. pp: 660-670.

Annan J. S., White R. K., (1998). Evaluation of techniques for measuring air filled-porosity in composts of municipal biosolids and wood chips. In: Das K. C., Graves, E. F. (Eds.), *Composting in the Southeast, Proceedings of the 1998 Conference*, SC, USA, pp: 88-96.

ASTM D854-02. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.

ASTM D4253-16e1. Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.

ASTM D 5550-00. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer.

Beaven, R.P., Powrie, W., 1995. Hydrogeological and geotechnical properties of refuse using a large scale compression cell. In: *Proceedings of the Sardinia 1995, Fifth International Waste Management and Landfill Symposium*, vol. 2. Cagliari, Italy, pp. 745–760.

Berthe L., Druilhe C., Massiani C., Tremier A., de Guardia A., (2007). Coupling a respirometer and a pycnometer, to study the biodegradability of solid organic wastes during composting. *Biosystems Engineering*. Vol. 97., pp: 75-88.

Breitmeyer R. J., (2011). Hydraulic characterization of municipal solid waste. PhD dissertation, University of Wisconsin-Madison.

BS 1377-2 (1990). British standard methods of test for soils for civil engineering purposes. Part . Classification tests.

Cossu i Stegmann, (2019). Solid Waste Landfilling: concepts, processes, technologies, Elsevier, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02435-0>.

De Haan E. J., (1997). An overview of the mechanical behavior of peats and organic soils and some appropriate construction techniques. Proceedings of Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Huat & Bahia, Sarawak, pp 17-20.

Entenmann W., Wendt P., (2007). Placement and compaction of treated municipal solid waste in modern landfills, results of geotechnical and hydraulic tests and monitoring. In: Proc. of the Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy.

Gabr A., Valero S. N., (1995). Geotechnical properties of municipal solid waste. Geotechnical Testing Journal. Vol. 18(2), pp: 241–251.

Heiss-Ziegler C., Fehrer K., (2003). Geotechnical behaviour of mechanically-biologically pretreated municipal solid waste (MSW). In: Proc. of the Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy.

Huat B. K., (2004). Organic and Peat Soils Engineering, Serdang: University Putra Malaysia Press, 146.

Hudson A. P., White J. K., Beaven R. P., Powrie W., (2004). Modelling the compression behaviour of landfilled domestic waste. Waste Manage. 24, 259–269.

Hyun I. P., Borinara P., Hong K. D., (2011). Geotechnical considerations for end-use of old municipal solid waste landfills. International Journal of Environmental Research. Vol. 5(3), pp: 573–584.

Kanirajand S. R., Joseph R. R., (1996). Geotechnical behavior of organic soils of North Sarawak. 4th International Conference on Soft Soil Engineering, Vancouver, Canada. Pp 267-274.

Ke H., Jie H., Xu X. B., Wang W. F., Chen Y. M., Zhan L. T., (2017). Evolution of saturated hydraulic conductivity with compression and degradation for municipal solid waste. Waste Management. Vol. 65, pp: 63–74.

Lakshmikanthan P., Sughosh P., Sivakumar Babu G. L., (2018). Studies on Characterization of Mechanically Biologically Treated Waste from Bangalore City. *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 48, pp 293-304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0296-4>.

Landva, A.O., Clark, J.I., 1990. Geotechnics of waste fill. In: Landva, A.O., Knowles, G.D. (Eds.), *Geotechnics of waste fills*, ASTM STP 1070. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 86–103.

Mokhtari M., Heshmati Rafasnjani A. A., Shariatmadari N., (2019). The effect of aging on the compressibility behavior and the physical properties of municipal solid wastes: a case study of Kahrizak landfill, Tehran. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 78(16), pp: 1-14. DOI: 10.1007/s12665-019-8523-6.

Nawagamuwa U. P., Thirojan J., (2020). Determination of the Age of Municipal Solid Waste through Soil Tests. *Engineer, Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*. Vol. 50 (4), pp 53-62. DOI: DOI: 10.4038/engineer.v53i4.7428.

Olivier F., Gourc J.-P., (2007). Hydro-mechanical behaviour of municipal solid waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell. *Waste Management*. Vol. 27, pp: 44–58.

Oppenheimer J. R., Martin A. G., Walker L. P., (1997). Measurements for air-filled porosity in unsaturated organic matrices using a pycnometer. *Bioresource Technology*. Vol. 59, pp: 241–247.

Petrovic I., Stuhec D., Kovacic D., (2014). Large oedometer for measuring stiffness of MBT waste. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 37, pp: 296–310.

Petrovic I., Kaniski N., Hrcic N., Bosilj D., (2022a). Variability in the Solid Particle Density and Its Influence on the Corresponding Void Ratio and Dry Density: A Case Study Conducted on the MBT Reject Waste Stream from the MBT Plant in Mariš'cina, Croatia. *Applied Sciences*. Vol. 12, 6136. <https://doi.org/10.3390/app12126136>.

Petrovic I., Kaniski N., Hrcic N., Hip I., (2022b). Correlations between field capacity, porosity, solid particle density and dry density of a mechanically and biologically (biodried) treated reject waste stream. *Bioresource Technology Reports*. Vol. 17. ISSN 2589-014X, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100996>.

Pulat H. F., Yukselen-Aksoy Y., (2017). Factors affecting the shear strength behaviour of municipal solid wastes, *Waste Management*. Vol. 69, pp: 215–224.

Rakić D., Basaric Ikodinovic I., Jankovic J., Djuric T., (2021). Phase relations and physical indicators of municipal waste from old landfills in Serbia. *Third International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, October 20-21, Kyoto University, Japan. Vol. 9(4), pp 105-110.

Ramaiah B. J., Ramana G. V., (2017). Study of stress–strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. *Waste Management*. Vol. 63, pp: 366–379.

Rashid Iqbal M., Piumali A. B. K. T., Priyankara N. H., Alagiyawanna A. M. N., Kurukulasuriya L. C., Kawamoto K., (2022). Characterization of Physicochemical and Mechanical Properties of Dumped Municipal Solid Waste in Sri Lanka as Affected by the Climate Zone and Dumping Age. *Sustainability*, Vol. 14 (8), 4706. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084706>.

Reddy K. R., Hettiarachchi H., Parakalla N. S., Gangathulasi J., Bogner J. E., (2009). Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. *Waste Management*. Vol. 29(2), pp: 952–959.

Reddy K. R., Hettiarachchi H., Gangathulasi J., Bogner J. E., (2011). Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. *Waste Management*. Vol. 31, pp: 2275–2286.

Richard T. L., Veeken A. H. M., de Wilde V., Hamelers (Bert) H. V. M., (2004). Air-Filled Porosity and Permeability Relationships during Solid-State Fermentation. *Biotechnology Progress*. Vol. 20(5), pp: 1372-1381. DOI: 10.1021/bp0499505.

Rose J. L., Izzo R. L. S., Mahler C. F., (2009). Effect of MSW compost-soil mixtures in compaction and permeability tests. In: *Proc. of the Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.

Sivakumar Babu G. L., Lakshmikanthan P., Santhosh L. G., (2015). Shear strength characteristics of mechanically biologically treated municipal solid waste (MBT-MSW) from Bangalore. *Waste Management*. Vol. 39, pp: 63–70.

Skempton A. W., i Petley J., (1970). Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's Lynn, and Cranberry Moss. *Geotechnique*. Vol. 20(4), pp 343-356.

Stoltz G., Gourc J. P., Oxarango L., (2010). Characterisation of the physico-mechanical parameters of MSW. *Waste Management*, Vol. 30, pp 1439-1449. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.03.016.

Sudarshana C. K. F., (2011). Strength characteristics of mechanically biologically treated (MBT) waste. PhD dissertation., University of Southampton.

Tamari S., Aguilar-Chavez A., (2005). Optimum Design of Gas Pycnometers for Determining the Volume of Solid Particles. *Journal of Testing and Evaluation*. Vol. 33(2).

Thakur D., Gupta A.K., Ganguly R., (2019). Geotechnical Properties of Fresh and Degraded MSW In the Foothill of Shivalik Range Una, Himachal Pradesh. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-2, pp 363-374. DOI: DOI: 10.35940/ijrte.B1479.078219.

Velkushanova K., (2011). Characterization of wastes towards sustainable landfilling by some physical and mechanical properties with an emphasis on solid particles compressibility. PhD dissertation., University of Southampton.

Webb P. A., (2001). Volume and Density Determinations for Particle Technologists. Micromeritics Instrument Corp. Dostupno: https://www.micromeritics.com/Repository/Files/Volume_and_Density_determinations_for_Particle_Technologists_0.pdf. Pristupljeno: 12.12.2021.

Web stranica: The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html. Pristupljeno: 01.07.2022.

Wong W. W. Y., (2009). Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions. PhD dissertation. Faculty of California Polytechnic State University.

Xu H., Wang J.N., Zhan L.T., Zhang Z.Y., Xu X.B., Chen Y.M., Yao K., (2020). Characterization of compression behaviors of high food waste content (HFWC) MSW and no food waste content (NFWC) MSW in China. *Waste Management*, Vol. 103, pp 305-313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.036>

Yesiller N., Hanson J. L., Cox J. T., Noce D. E., (2014). Determination of specific gravity of municipal solid waste. *Waste Management*. Vol. 34(5), pp: 848–858.

Zhang Z., Fang Y., Wang Y., Xu H., (2020a). Compression behaviors of mechanically biologically treated wastes of Tianziling landfill in Hangzhou, China. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27, pp 43970–43986. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10253-w>

Zhang Z., Pan X., Fang Y., Wang Y., Zhang Y., Xu H., (2020b). Laboratory study on the hydraulic characteristics of mechanically and biologically treated waste in China. *Waste Management*, Vol. 102, pp 686-697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.026>.

Zhu X., Jin J., Fang P., (2003). Geotechnical behavior of the MSW in Tianziling landfill. *Journal of Zhejiang University – Science A: Applied Physics & Engineering*. Vol. 4(3), pp: 324–330. DOI: 10.1631/jzus.2003.0324.

4) ZBIJANJE OTPADA

4.1 Sažetak poglavlja

Bioreaktorsko odlagalište u sklopu Županijskog centra za gospodarenje otpadom Marišćina zaprima metanogenu frakciju u tijelo odlagališta s udjelom vlažnosti manjim od 20%. Smatra se da je pri tom udjelu vlage sva mikrobiološka aktivnost spriječena. Na taj način, operateri odlagališta mogu postići puni kapacitet odlagališne plohe bez prijevremene proizvodnje bioplina. Nakon što se bioreaktorsko odlagalište napuni do potpunog kapaciteta, pri čemu se otpad prilikom punjenja odlagališta zanemarivo malo vlaži uslijed prirodnih oborina, počinje vlaženje ugrađenog otpadnog materijala u svrhu kontrolirane proizvodnje bioplina. Povećanjem vlažnosti istovremeno se povećavaju prirodna ρ i suha ρ_d gustoća, smanjuje se koeficijent pora i otežava se mogućnost recirkulacije procjedne vode. Iz navedenih razloga potrebno je poznavati:

- a) Minimalnu i maksimalnu suhu gustoću ρ_d koju otpad može postići u suhom stanju kako bi se mogli jasno definirati uvjeti ugradnje otpadnog materijala u tijelo odlagališta.

Stoga je na osam uzoraka materijala A u suhom stanju utvrđena minimalna suha gustoća $\rho_{d,min}$ i pripadajući maksimalni koeficijent pora e_{max} . Srednja vrijednost minimalne suhe gustoće $\rho_{d,min}$ na osam uzoraka materijala A iznosila je 0,17 g/cm³ uz standardnu devijaciju $\pm 0,02$ g/cm³. Prosječan maksimalan koeficijent pora e_{max} za materijal A iznosi 9,97. Treba spomenuti da ukoliko se koristi kalup manjeg volumena, kao što je to bio slučaj u prethodnom poglavlju gdje se koristila ćelija manjeg volumena (220,68 cm³), moguće je postići i manju minimalnu suhu gustoću od 0,12 g/cm³ te nešto veći koeficijent pora od 14,50 (vidi poglavlje 3.6.5 Korelacija suhe gustoće ρ_d i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s).

Maksimalna suha gustoća uzoraka u suhom stanju utvrđena je pomoću vibro ploče kao prosječna vrijednost na sedam ispitanih uzoraka materijala A. Srednja vrijednost $\rho_{d,max}$ za suhi materijal iznosila je 0,38 g/cm³ uz standardnu devijaciju od $\pm 0,03$ g/cm³ i pripadajući prosječni minimalni koeficijent pora e_{min} od 3,96. Treba napomenuti da se utvrđena maksimalna vrijednost suhe gustoće otpada u suhom stanju dobro podudara s podacima operatera odlagališta Marišćina koji je potvrdio da slične gustoće postižu prilikom ugradnje otpada u tijelo odlagališta.

- b) Funkcijski odnos vlažnosti i suhe gustoće ρ_d kako bi se u kasnijoj fazi rada bioreaktorskog odlagališta mogao jasnije definirati režim recirkulacije filtrata s ciljem postizanja vlažnosti za optimalnu razgradnju otpada.

Za određivanje maksimalne suhe gustoće $\rho_{d,max}$ odnosno minimalnog koeficijenta pora e_{min} pri optimalnoj vlažnosti w_{opt} , u ovom radu korištene su dvije metode mjerenja, metoda vibro pločom i Proctorov pokus sa standardnom i modificiranom energijom zbijanja. Ukupno je ispitano 40 uzoraka otpada od čega 25 uzoraka vibro pločom i 15 uzoraka Proctorovim pokusom. Pet uzoraka materijala A ispitano je Proctorovim pokusom pri standardnoj energiji zbijanja i 10 uzoraka materijala B uz modificiranu energiju zbijanja uz također unaprijed određenu ciljanu vlažnost uzoraka. Ispitivanja vibro pločom materijala A podijeljena su u tri skupine (I, II, i III). U prvoj skupini ispitivanja, uzorci su pripremljeni na ciljane vlažnosti od 20%, 30%, 40% 60%, i 80%. U drugoj skupini uzorci su pripremljeni na ciljane vlažnosti od 20%, 40%, 60%, 80% i 100%. U trećoj skupini za svaku ciljanu vlažnost od 40 i 80% pripremljena su po dva uzorka kako bi se utvrdila ponovljivost rezultata ispitivanja. Rezultati dobiveni vibro pločom pokazuju da materijal A ima maksimalnu suhu gustoću od 0,61 g/cm³ uz pripadnu optimalnu vlažnost od 74,78%. Ciljane vlažnosti materijala A u ispitivanjima standardnim Proctorovim pokusom bile su redom 20%, 40%, 60%, 80%, i 100%. Zabilježena maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage standardnog Proctorovog pokusa za materijal A je 0,65 g/cm³ i 81,7%. Za ispitivanje modificiranim Proctorovim pokusom uzorci su pripremljeni na 20%, 40%, 60%, 80%, i 100% udjela vlage. Temeljem rezultata modificiranog Proctorovog pokusa, maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage za materijal B iznose 0,80 g/cm³ i 61,31%. Kroz rezultate ispitivanja potvrđeno je da se povećanjem energije zbijanja u Proctorovim pokusima povećava maksimalna suha gustoća i smanjuje optimalna vlažnost.

4.2 Uvod

Budući da se u bioreaktorsko odlagalište otpadni materijal ugrađuje u stanju vlažnosti u kojem je spriječena mikrobiološka aktivnost (vlažnost manja od 20%) te se nakon zatvaranja pristupa vlaženju i recirkulaciji procjedne vode zbog poticanja mikrobiološke razgradnje i proizvodnje bioplina, vrlo je važno poznavati raspon suhe gustoće koji odloženi materijal može postići. Posebice zbog činjenice što se očekuje da će se s povećanjem vlažnosti prirodna ρ i suha

ρ_d gustoća otpada također povećati. Posljedično, smanjit će se koeficijent pora te će recirkulacija procjedne vode kroz bioreaktorsko odlagalište biti znatno otežana. Za potrebe utvrđivanja odnosa optimalne vlažnosti (w_{opt}) i suhe gustoće (ρ_d) na BMO otpadu korištene su dvije metode mjerenja. Maksimalna suha gustoća i pripadajuća optimalna vlažnost (w_{opt}) metanogene frakcije bioosušenog otpada izmjerena je pokusima na vibro ploči sukladno ASTM D 4253 standardu. Za potrebe usporedbe rezultata mjerenja s vibro pločom kao i usporedbe rezultata ispitivanja s rezultatima objavljenim u literaturi, provedena su i istraživanja u standardnom i modificiranom Proctorovom pokusu sukladno ASTM D 698 i ASTM D 1557 standardu.

4.3 Teorijska podloga

4.3.1 Minimalna $\rho_{d,min}$ i maksimalna $\rho_{d,max}$ suha gustoća

Minimalna gustoća nekog uzorka $\rho_{d,min}$, može se odrediti kao odnos mase suhih čestica (m_s) te ukupnog volumena kalupa V_{max} Jednadžbom (31) nasipavanjem uzorka poznate mase u kalup standardnog volumena bez zbijanja i što je rahlije moguće. Ovaj postupak propisan je, primjerice, ASTM D 4254 standardom.

$$\rho_{d,min} = \frac{m_s}{V_{max}} \quad (31)$$

Temeljem poznate minimalne suhe gustoće materijala $\rho_{d,min}$, može se odrediti i maksimalni koeficijent pora e_{max} uz poznatu gustoću čvrstih čestica uzorka ρ_s koristeći Jednadžbu (32).

$$e_{max} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,min}} - 1 \quad (32)$$

Maksimalna suha gustoća nekog uzorka $\rho_{d,max}$ izražena je Jednadžbom (33) u kojoj se suha masa čestica uzorka (m_s) ugrađuje u kalup standardnog volumena i zbija utegom unaprijed utvrđene mase. Ovaj postupak propisan je, primjerice, ASTM D 4253 standardom.

$$\rho_{d,max} = \frac{m_s}{V_{min}} \quad (33)$$

Minimalni koeficijent pora nakon određivanja maksimalne suhe gustoće $\rho_{d,max}$, uz poznatu gustoću čvrstih čestica uzorka ρ_s može se izračunati Jednadžbom (34).

$$e_{min} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,max}} - 1 \quad (34)$$

Suhu gustoću ρ_d , moguće je dovesti u vezu s prirodnom gustoćom materijala ρ i vlažnosti w (Jednadžba 4) kao što je prikazano u nastavku Jednadžbom (35).

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (35)$$

Iz Jednadžbe (35) može se uočiti da između suhe gustoće ρ_d i vlažnosti w postoji međusobna zavisnost. Najčešće metode za određivanje ove zavisnosti jesu Proctorov pokus i pokus vibracijskim stolom. Pri korištenju standardnih laboratorijskih ispitivanja kao što su standardni ili modificirani Proctorov pokus ili vibracijski stol, na dobivene rezultate mogu utjecati različiti čimbenici, kao što su vrijeme zbijanja, amplituda vibracija, masa utega iznad uzorka, veličina kalupa, sadržaj organske tvari te granulometrija materijala. Što se tiče pokusa vibracijskim stolom, povećanjem amplitude vibracija pri konstantnoj masi utega dolazi i do povećanja zapreminske težine (odnosno povećanja suhe gustoće). S druge strane, povećanjem mase utega amplituda vibracija se smanjuje, što može dovesti i do smanjenja postignute gustoće zbijanih uzoraka otpada. Neki od problema s kojima se može susresti pri radu takvih uređaja detaljnije su opisani u radu Drnevich i sur. (2007).

4.4 Pregled dosadašnjih istraživanja

4.4.1 Minimalna i maksimalna suha gustoća otpada u suhom stanju

Zbog specifičnosti rada bioreaktorskog rada u sklopu BMO postrojenja potrebno je poznavanje minimalne i maksimalne suhe gustoće otpada u suhom stanju kao elementarnih parametara ugradnje otpada u tijelo odlagališta. Prema najboljem saznanju autora, nisu poznati radovi koji bi obrađivali ovu tematiku.

4.4.2 Funkcijski odnos suhe gustoće otpada i vlažnosti

Jedan od parametara i glavnih izazova kod projektiranja kasnijih faza rada bioreaktorskih odlagališta je poznavanje funkcionalnog odnosa sadržaja vode i suhe gustoće materijala (Bauer i sur., 2006). Naime, kada se otpadni materijal ugradi u bioreaktorsko odlagalište u suhom stanju, nakon postizanja potpunog kapaciteta odlagališta, operater odlagališta počinje s vlaženjem i recirkulacijom procjednih voda. Zbog svojih kolapsibilnih svojstava (detaljnije obrađeno u

poglavlju 5. Kolapsibilno ponašanje BMO otpada) otpad prilikom vlaženja povećava suhu gustoću, smanjuje mu se koeficijent pora te recirkulacija procjedne vode postaje složen inženjerski zadatak. Stoga je vrlo važno poznavati spomenuti funkcionalni odnos, kao i točan iznos vlažnosti pri kojoj odloženi otpad može postići svoju maksimalnu zbijenost i koliko ona pri optimalnoj vlažnosti iznosi.

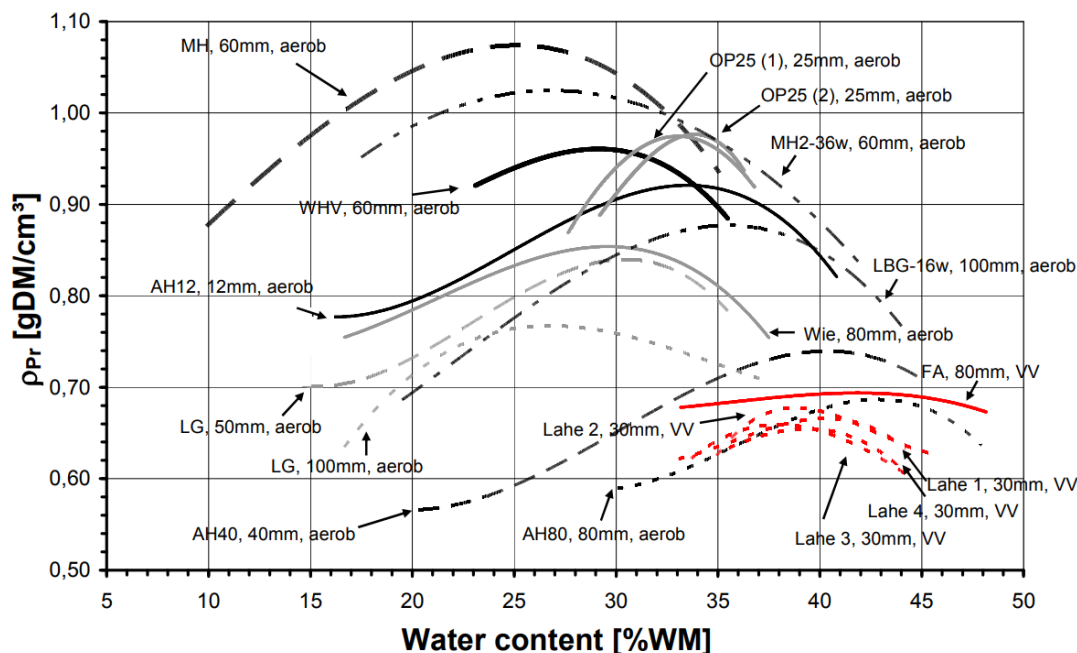
Zbog velike nehomogenosti otpadnog materijala vrlo je teško postići jednoliko vlaženje. Proces vlaženja kroz recirkulaciju procjednih voda te gustoća ugrađenog materijala uzajamno su ovisni. Odnos suhe gustoće otpadnog materijala i vlažnosti istraživali su mnogi autori (Kuehle-Weidemeier i Doedens, 2003; Heiss-Ziegler i Fehrer, 2003; Bauer i sur., 2006; Entenmann i Wendt, 2007; Pimolthai, 2010; Sudarshana, 2011; Reddy i sur., 2018), pri čemu treba naglasiti da istraživanja tog odnosa za BMO otpad nisu pronađena u literaturi.

U Tablici 31 prikazane su vrijednosti maksimalne suhe gustoće i optimalnog sadržaja vlage za neobrađeni komunalni otpad te za MBO (biostabilizirani) otpad objavljene u literaturi. Raspon optimalne vlažnosti za neobrađeni otpad kreće se od 16,05% do 162% sa srednjom vrijednosti optimalne vlažnosti od 69,17%. Vlažnost u objavljenim radovima iskazana je na ukupnu masu uzoraka (WM). Najveća optimalna vlažnost zabilježena je u radu Pulat i Yukselen Aksoy (2013) za neobrađeni otpad iz SAD-a, Europe i Turske. S druge strane, maksimalna suha gustoća ρ_d kreće se u rasponu od 0,37 g/cm³ do 1,69 g/cm³, uz srednju vrijednost 0,68 g/cm³ i standardnu devijaciju od $\pm 0,39$ g/cm³. Najviša suha gustoća (1,69 g/cm³) zabilježena je u radu Reddy i sur., (2018) uz optimalnu vlažnost od 16,05%. Za obrađeni otpad, optimalna vlažnost objavljena u literaturi kreće se u rasponu od 33% do 65% sa srednjom vrijednošću od 51,09%. Vlažnost u objavljenim radovima iskazana je na ukupnu masu uzoraka (WM). Maksimalna suha gustoća ρ_d obrađenog otpada kreće se u rasponu od 0,78 g/cm³ do 1,16 g/cm³ sa srednjom vrijednošću od 0,93 g/cm³ i standardnom devijacijom od 0,14 g/cm³.

Tablica 31. Maksimalna suha gustoća ρ_d i optimalna vlažnost w_{opt} prikupljene iz literature

Izvor	Postupak	Vrsta otpada	Veličina čestica	Maksimalna suha gustoća	Optimalna vlažnost	Napomena	
			mm	[g/cm³]	[%]		
Hanson J. L. i sur., (2010)	Modificirani Proctor 4x modificirani Proctor	Neobrađeni	<50	0,53 0,61	65 56	Proizvodni čvrsti komunalni otpad	
Pulat i Yukselen- Aksoy, (2013)	Standardni Proctor		0,425-25,4	0,39	158	SAD	
				0,38	162	Europa	
				0,37	138	Turska	
Tiwari D., (2014)			<64	0,38 0,41	62 58	Usitnjeni otpad	
Reddy i sur., (2018)			<20	1,69	16,05	Otpad s odlagališta Borabanda, Hyderabad, India	
Mondelli i sur., (2022)			-				Postrojenje za oporabu materijalnih sirovina
				0,97	20	Izlazni materijal-postrojenje Ecourbis	
				1,02	20		
				0,63	35	Izlazni materijal-postrojenje Loga	
		0,80		40			
Rose i sur., (2009)	Obrađeni	<1	0,82	65,6	Kompostirani komunalni otpad		
Pimolthai, (2010)		<10	1,04	42	Kompostirani materijal Njemačka Tajland Luksemburg		
		<10	0,98	33			
		<10	0,78	52			
Sudarshana, (2011)		<10	0,86	65	Veličina čestica 0-10 mm		
		<20	1,16	55	Veličina čestica 0-20 mm		
Lakshmikanthan i sur., (2018)			10	0,87	45	Kompostirani komunalni otpad s maks. veličinom čestica 20 mm	

Kuehle-Weidemeier (2007) je u svom radu napravio opsežan pregled literature njemačkog govornog područja u kojem je autor prikazao rezultate različitih istraživača kao i rezultate vlastitih istraživanja dobivenih na MBO otpadu (Slika 44).

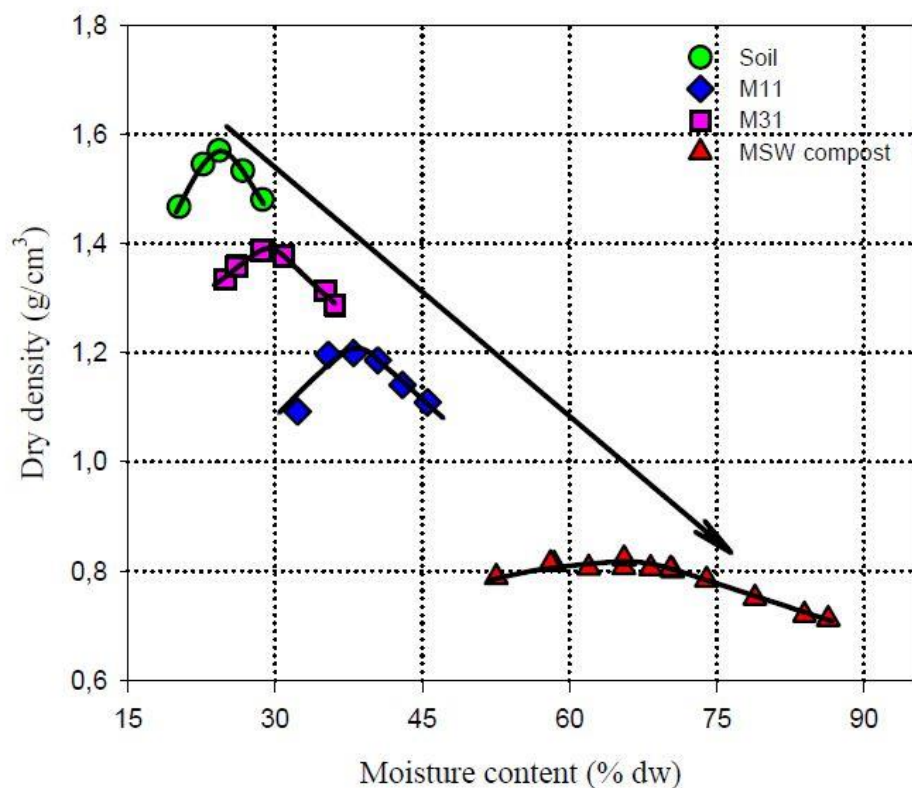


Slika 44. Proctorove krivulje MBO otpada prikupljene od različitih autora (Kuehle-Weidemeier, 2007) (Prijevod: Os x – water content (%WM) – udio vlage izražen kao postotak na ukupnu masu; Os y – ρ_d (g/cm³) – suha gustoća (g/cm³))

Optimalna vlažnost prikazana na Slici 44 za sve uzorke odnosi se na ukupnu masu (WM). Uzorci s nastavkom VV su obrađeni anaerobnom digestijom. Uzorci OP25 (1) i OP25(2) dolaze iz MBO postrojenja Oberpullendorf u Austriji u kojem je otpadni materijal obrađen aerobnim postupkom. Frakcija uzoraka je manja od 25 mm (Fehrer, 2002). Isti autor (Fehrer, 2002) je objavio i rezultate uzoraka AH12, AH40 i AH80. To su uzorci frakcije manje od 12 mm (AH12), manje od 40 mm (AH40) te manje od 80 mm (AH80). LAHE 2, LAHE 3, i LAHE 4 su uzorci MBO otpada s frakcijom manjom od 30 mm. Dolaze iz odlagališta otpada u Lahe, Hanover, Njemačke na kojem su izgrađene dvije probne plohe koje primaju otpad nakon MBO obrade (Duellmann, 2002). Uzorke LG, 50 mm, aerob i LG, 100 mm, aerob su ispitali Doedens i sur., (2000). To je otpad nakon MBO, frakcije manje od 50 mm, odnosno 100 mm. Uzorci MH 60 mm, i MH2-36w, 60 mm su MBO uzorci frakcije manje od 60 mm s postrojenja za MBO otpada u Mesenheimu, dok je

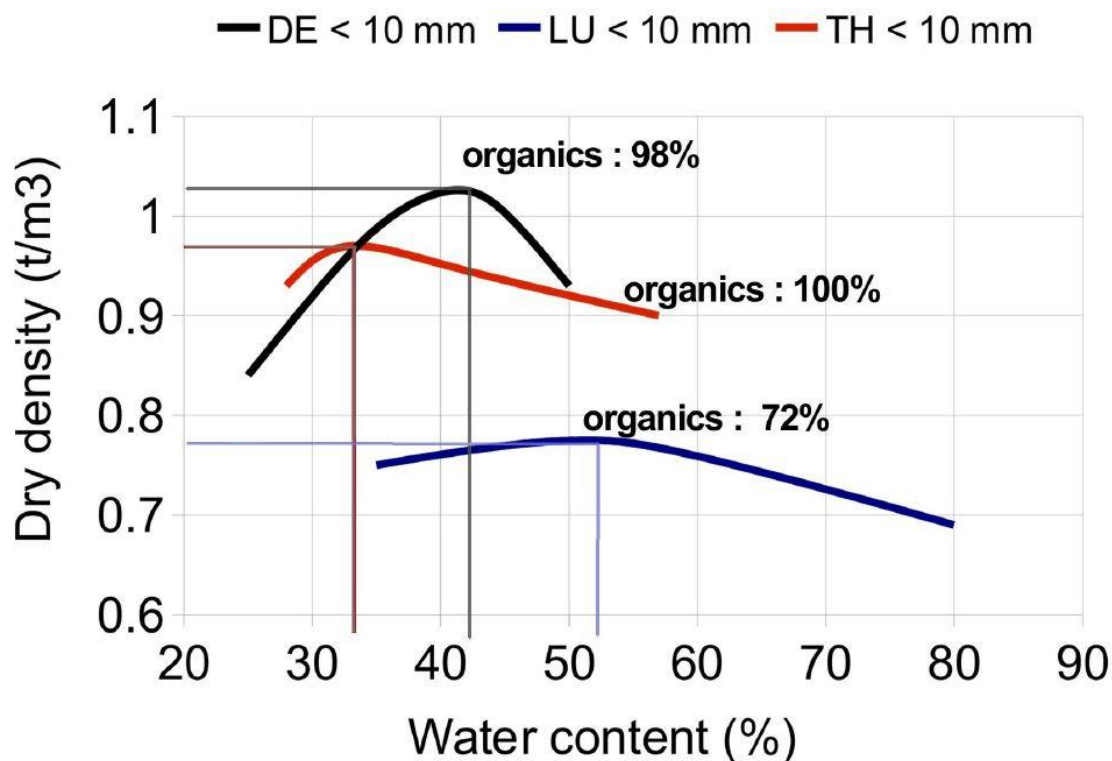
uzorak LBG-16w, 100 mm s postrojenja za MBO otpada u Lueneburgu (Bidlingmaier, 1998). Sa Slike 44 može se uočiti da aerobno obrađeni otpad u prosjeku postiže veće suhe gustoće pri manjoj optimalnoj vlazi u odnosu na anaerobno obrađeni otpad.

Rose i sur., (2009) su ispitivali utjecaj sastava materijala (mješavina tla i komposta) na rezultate laboratorijskih ispitivanja zbijanja i propusnosti. Tlo korišteno u pokusima uzeto je sa završnog pokrovnog sloja s odlagališta otpada u Brazilu. U standardnom Proctorovom pokusu ispitali su četiri uzorka, od kojih su dva uzorka mješavina tla i kompostiranog otpada u omjeru 1:1 (oznaka na Slici 45: M11) i omjeru 3:1 (oznaka na Slici 45: M31), jedan uzorak je kompostirani neobrađeni komunalni otpad (oznaka na Slici 45: MSW compost), i jedan uzorak je tlo uzorkovano sa završnog pokrovnog sloja odlagališta (oznaka na Slici 45: Soil). Krivulje zbijanja prikazane su na Slici 45. Na Slici 45 može se primijetiti kako kompostirani komunalni čvrsti otpad pokazuje znatno niže vrijednosti maksimalne suhe gustoće ($0,82 \text{ g/cm}^3$) u odnosu na tlo (označeno zelenim kružićem na Slici 45) no uz puno veću optimalnu vlažnost ($w_{opt} = 65,6\%$). U usporedbi s tlom, svi uzorci koji sadrže otpad (M11, M31, i MSW compost) pokazuju niže vrijednosti suhe gustoće. Porastom udjela tla u uzorku povećava se i suha gustoća, dok se vlažnost smanjuje. Budući da krivulje komposta (MSW compost) imaju položeniji oblik može se zaključiti da otpad ima puno veću toleranciju na raspon vlažnosti.



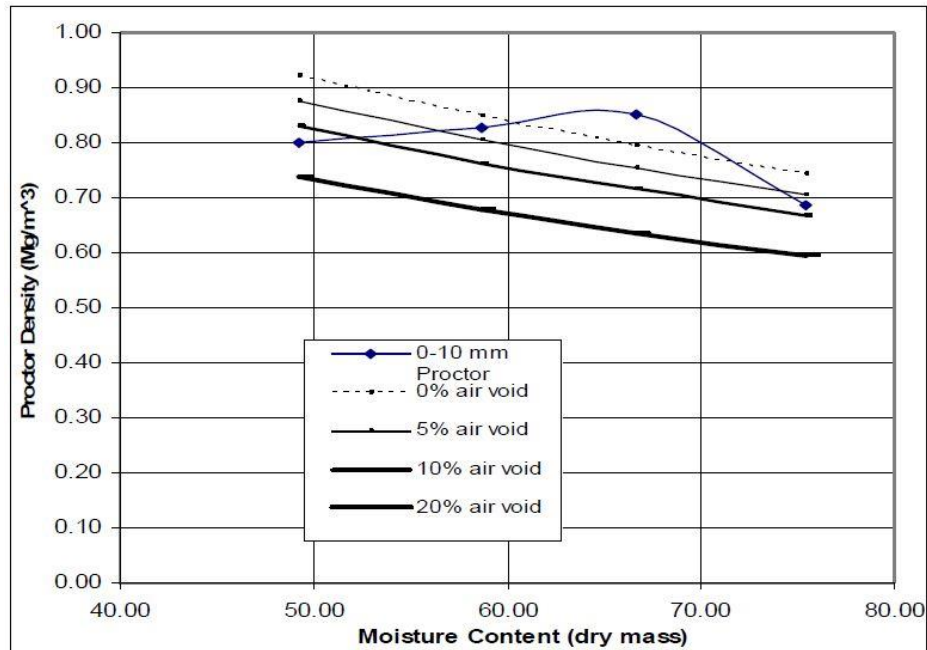
Slika 45. Krivulje zbijanja za četiri vrste materijala (Rose i sur., 2009) (Prijevod: Os x – moisture content (% dw) – udio vlage izražen kao postotak na suhu masu; Os y – dry density (g/cm³) – suha gustoća (g/cm³))

Pimolthai, (2010) je u svom radu proveo standardni Proctorov pokus na kompostiranom otpadu iz Njemačke, Tajlanda i Luksemburga. Kompostirani otpad iz Njemačke postigao je maksimalnu suhu gustoću od 1,04 g/cm³ uz optimalnu vlažnost od 42% (na slici 46 oznaka materijala: DE), materijal iz Tajlanda postigao je maksimalnu suhu gustoću od 0,98 g/cm³ i optimalnu vlažnost od 33% (na slici 46 oznaka materijala: TH), dok je maksimalna suha gustoća materijala iz Luksemburga 0,78 g/cm³ uz optimalnu vlažnost od 52% (na slici 46 oznaka materijala: LU)). Na Slici 46 je za svaki materijal naveden i udio organske tvari (organics) u postocima određen nakon MBO otpada, pa tako za otpad iz Njemačke on iznosi 98%, za otpad iz Luksemburga 72% i za otpad iz Tajlanda 100%. Autori zvonoliku krivulju materijala iz Njemačke (DE) pripisuju utjecaju anorganskog materijala (plastike) kojeg ima oko 2%.

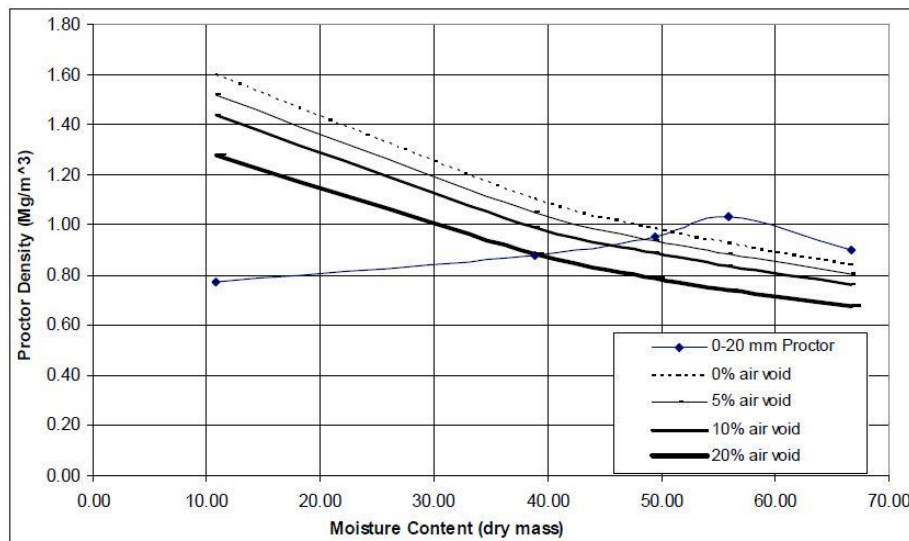


Slika 46. Rezultati zbijanja u standardnom Proctorovom pokusu neobrađenog otpada (Pimolthai, 2010) (Prijevod: Os x – water content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (t/m^3) – suha gustoća (t/m^3))

Sudarshana, (2011) je u svom radu ispitao kompostirani otpad veličine čestica od 0-10 mm i 0-20 mm Proctorovim pokusom. Postignuta maksimalna suha gustoća frakcije 0-10 mm je $0,86 \text{ g/cm}^3$ pri optimalnoj vlažnosti od 65% (Slika 47), a za frakciju 0-20 mm maksimalna suha gustoća iznosi $1,16 \text{ g/cm}^3$ uz optimalnu vlažnost od 55% (Slika 48). Na Slikama 47 i 48 može se primijetiti da vlažnost ne utječe u velikoj mjeri na rezultate maksimalne suhe gustoće budući da oblik krivulje nije klasično zvonolik kao npr. za tlo. Obje Proctorove krivulje na Slikama 47 i 48 pokazuju vršne vrijednosti maksimalne suhe gustoće iznad linije 0% zračnih pora (eng. zero air void) što je neočekivano. Iako su se kompaktirani uzorci činili zbijenijima, prema mišljenju autora nisu izgledali kao uzorci bez pora. Uzrok maksimalne suhe gustoće koja se nalazi iznad linije s 0% zračnih pora (eng. zero air void) autoru nije poznat, a kao vjerojatan razlog navodi da je donesena kriva pretpostavka prilikom izračuna da su čestice otpada nestlačive (kao i u mehanici tla) iako one to nisu.



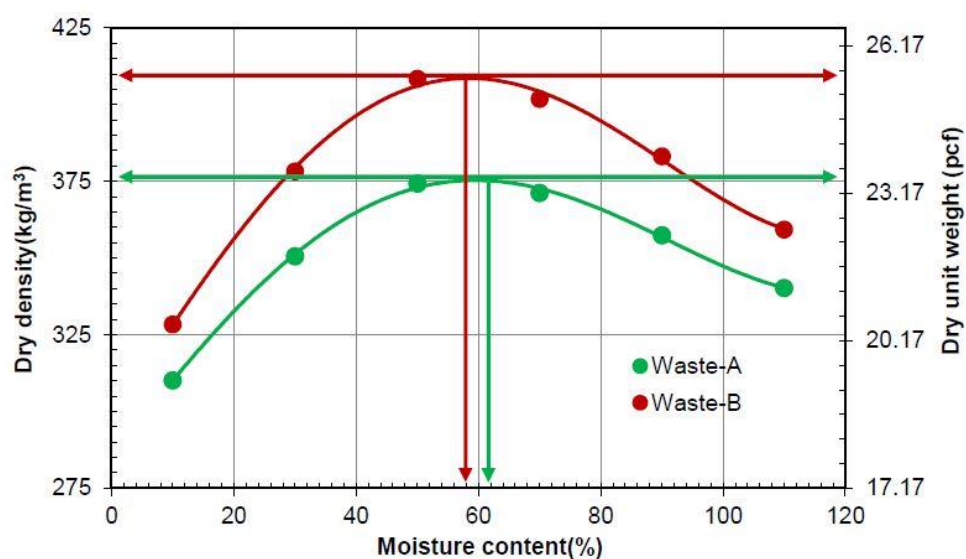
Slika 47. Krivulja zbijanja frakcije 0-10 mm (Sudarshana, 2011) (Prijevod: Os x – moisture content (dry mass) – udio vlage izražen preko suhe mase; Os y – proctor density (g/cm^3) – suha gustoća (g/cm^3))



Slika 48. Krivulja zbijanja frakcije 0-20 mm (Sudarshana, 2011) (Prijevod: Os x – moisture content (dry mass) – udio vlage izražen preko suhe mase; Os y – proctor density (g/cm^3) – suha gustoća (g/cm^3))

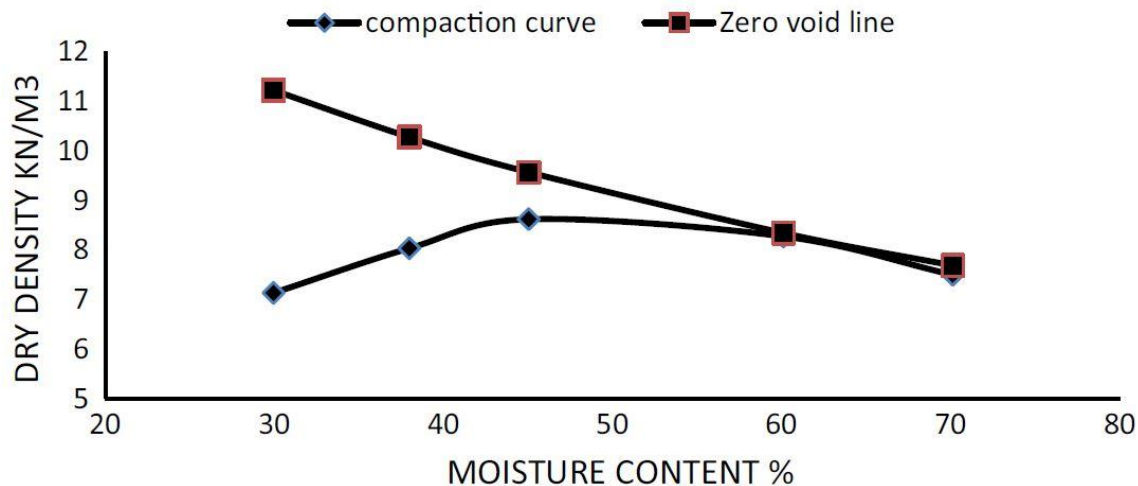
Istraživanje koje je proveo Tiwari, (2014) usmjereno je na učinak zbijanja na hidraulička svojstva različitog otpadnog materijala i određivanje optimalnog raspona gustoće za održavanje

recirkulacije u svježem, neobrađenom otpadu koje se odlaže u bioreaktorsko odlagalište. Za bioreaktorsko odlagalište potrebna je određena optimalna zbijenost kako bi se mogao održavati ujednačen protok s dovoljnim kapacitetom dreniranja procjedne vode. Osim kriterija protoka, potrebna je određena zbijenost materijala za mikrobiološku aktivnost što može dovesti do povećane proizvodnje bioplina. Kapacitet odvodnje čvrstog otpada važan je parametar potreban za stvaranje dovoljno procjedne vode na bioreaktorskom odlagalištu. Autori su zaključili da suha gustoća ugrađenog otpadnog materijala veća od $0,57 \text{ g/cm}^3$ nije pogodna za proizvodnju procjedne vode i posljedično, za proizvodnju bioplina na bioreaktorskom odlagalištu. Maksimalna suha gustoća koju su autori zabilježili standardnim Proctorovim pokusom za uzorak-A je $0,38 \text{ g/cm}^3$, dok je optimalna vlažnost pri toj gustoći 62%. Uzorak-B je u istom pokusu pokazao maksimalnu suhu gustoću od $0,41 \text{ g/cm}^3$ i optimalnu vlažnost od 58%. (Slika 49) Uzorci su uzorkovani s odlagališta otpada u Texasu, SAD u dva različita godišnja doba.



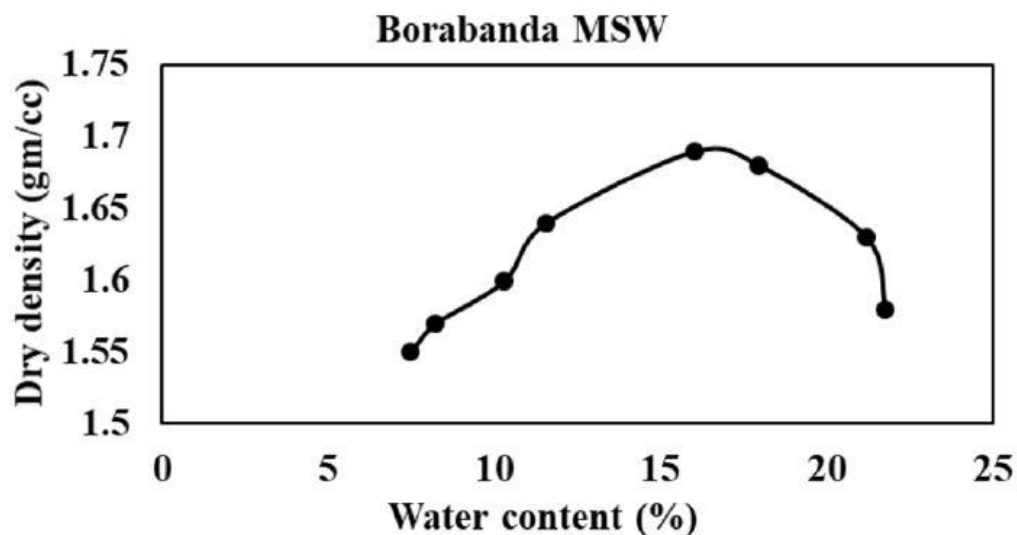
Slika 49. Krivulja zbijanja standardnim Proctorovim pokusom (Tiwari, 2014) (Prijevod: Os x – moisture content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (kg/m^3) – suha gustoća (kg/m^3))

Lakshmikanthan i sur., (2018) proveli su standardni Proctorov pokus na komunalnom kompostiranom otpadu veličine čestica 10 mm s udjelom organske tvari od 54%. Na setu od pet uzoraka s vlažnostima od 30%, 40%, 50%, 60% i 70% utvrdili su maksimalnu suhu gustoću od $0,87 \text{ g/cm}^3$ pri optimalnoj vlažnosti od 45% (Slika 50).



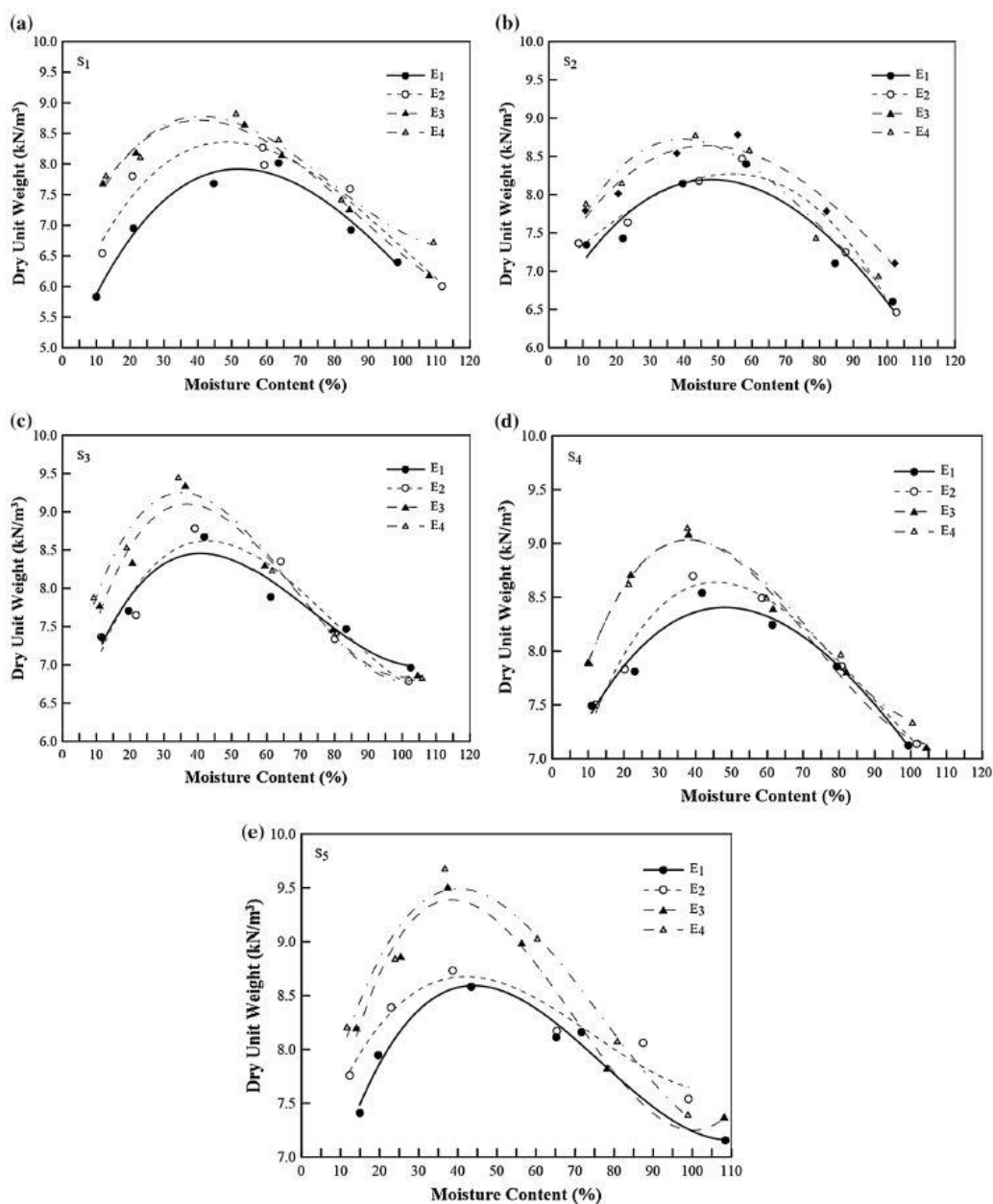
Slika 50. Odnos vlažnosti i suhe gustoće iz standardnog Proctorovog pokusa (Lakshmikanthan i sur., 2018) (Prijevod: Os x – moisture content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (kN/m³) – zapreminska težina (kN/m³))

Reddy i sur., (2018) utvrdili su standardnim Proctorovim pokusom maksimalnu gustoću neobrađenog komunalnog otpada od 1,69 g/cm³ uz optimalnu vlažnost od 16,05% (Slika 51). Standardni Proctorov pokus proveli su slijedeći IS: 2720: Part 7 (1980) standard na uzorku otpada uzorkovanom na Borabanda odlagalištu u Indiji.



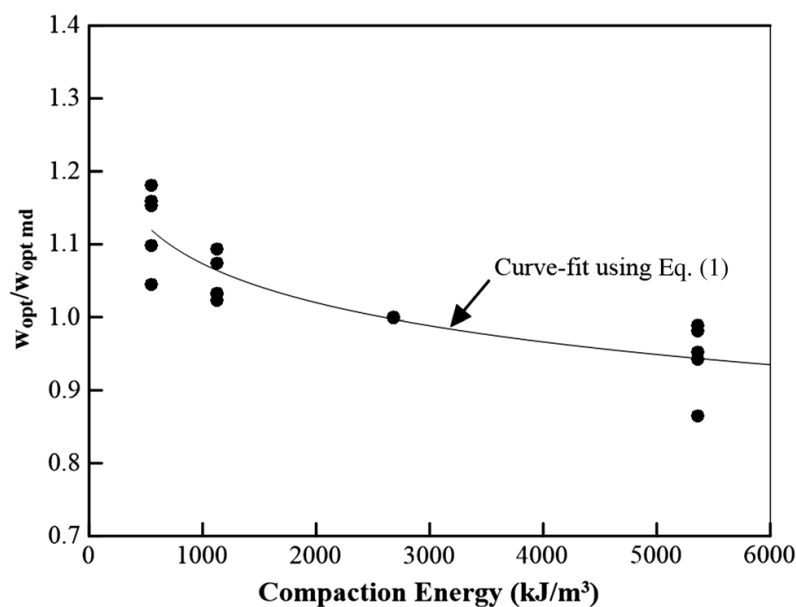
Slika 51. Krivulja zbijanja neobrađenog otpada s odlagališta Borabanda (Reddy i sur., 2018) (Prijevod: Os x – water content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (g/cm³) – suha gustoća (g/cm³))

Endait i Patil, (2020) u svom radu su predstavili rezultate laboratorijskih istraživanja karakteristika zbijanja svježeg i starog neobrađenog komunalnog čvrstog otpada uzorkovanog na aktivnom odlagalištu u Indiji. Autori su pet uzoraka otpada (S1-S5) zbijali u kalupu volumena 1000 cm^3 primjenom četiri različite energije zbijanja (uzorci E1-E4). Energije zbijanja su redom (E1) $551,8 \text{ kJ/m}^3$, (E2) 1125 kJ/m^3 , (E3) $2681,8 \text{ kJ/m}^3$, (E4) $5363,6 \text{ kJ/m}^3$. Pokazali su da se starošću otpada povećava maksimalna suha gustoća uz smanjenje optimalne vlažnosti što su pripisali procesu razgradnje (Slika 52). Zbijanjem neobrađenog otpada autori su dobili zvonolike krivulje (Slika 52). Takav oblik krivulje karakterističan je i kod ispitivanja tla. Za svježi uzorak otpada (uzorak S1, Slika 52 a) pri standardnoj energiji zbijanja, izmjereni karakteristični parametri su $\rho_{d,max}$ $0,82 \text{ g/cm}^3$ i w_{opt} 64% . Za uzorke starosti od 2 mjeseca do 15 godina (S2-S5), maksimalna suha gustoća kreće se u rasponu između $0,86 \text{ g/cm}^3$ i $0,87 \text{ g/cm}^3$, dok se optimalna vlažnost kretala između 42% i 58% kod standardne energije zbijanja. Rezultati svih uzoraka pri različitim energijama zbijanja prikazani su u Tablici 32.



Slika 52. Krivulje zbijanja kod različitih energija zbijanja E_1 - E_4 : a) svježi otpad; b) otpad star 2 mjeseca; c) otpad star 5 godina; d) otpad star 10 godina; e) otpad star 15 godina (Endait i Patil, 2020) (Prijevod: Os x – moisture content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry unit weight (kN/m^3) – suha zapreminska težina (kN/m^3))

Povećanjem energije zbijanja kod svih uzoraka, Endait i Patil, (2020) su primijetili da se maksimalna suha gustoća povećala uz istovremeno smanjenje optimalne vlažnosti (Slika 53).



Slika 53. Odnos energije zbijanja (apscisa) i optimalne vlažnosti (ordinata) (Endait i Patil, 2020)

(Prijevod: Os x – compaction energy (kJ/m³) – energija zbijanja (kJ/m³); Os y – $\frac{w_{opt}}{w_{opt md}}$ – $\frac{\text{optimalna vlažnost}}{\text{optimalna vlažnost kod maksimalne gustoće}}$)

Na Slici 53 prikazana je i krivulja dobivena Jednadžbom (36) s koeficijentom korelacije R²=0,76.

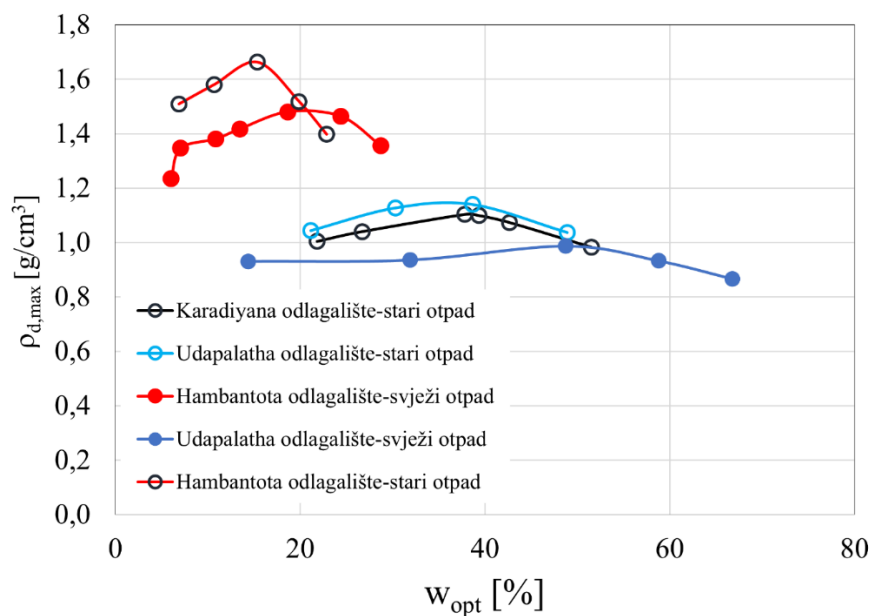
$$\frac{w_{opt}}{w_{opt md}} = -0,077 \ln(E) + 1,6 \quad (36)$$

gdje je w_{opt} optimalna vlažnost, a $w_{opt md}$ je optimalna vlažnost kod maksimalne energije (E₄).

Tablica 32. Maksimalna suha gustoća i optimalna vlažnost svježeg i starog neobrađenog otpada pri različitim energijama zbijanja (Endait i Patil, 2020)

Uzorak	E1		E2		E3		E4	
	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	w_{opt} [%]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	w_{opt} [%]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	w_{opt} [%]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	w_{opt} [%]
S1	0,82	63,50	0,84	58,79	0,88	53,77	0,90	51,23
S2	0,86	58,40	0,86	57,14	0,9	55,87	0,89	48,30
S3	0,87	41,91	0,90	39,04	0,95	36,35	0,96	34,26
S4	0,87	41,78	0,89	39,25	0,93	38,05	0,96	37,62
S5	0,88	43,42	0,89	38,67	0,97	37,45	0,99	36,76

Iqbal i sur., (2022) proveli su laboratorijska istraživanja na neobrađenom otpadu uzorkovanom sa tri različita odlagališta u Sri Lanki. Stariji uzorci s odlagališta Udapalatha i Hambantota pokazuju više vrijednosti maksimalne suhe gustoće i optimalne vlažnosti u odnosu na svježije uzorke s istih odlagališta. Uzorci s odlagališta Karadiyana, iako stari više od 20 godina, pokazuju relativno niske vrijednosti maksimalne suhe gustoće ($1,1 \text{ g/cm}^3$) i optimalne vlažnosti (39,3%). Autori niske vrijednosti ispitivanja na materijalu s odlagališta Karadiyana pripisuju velikom udjelu komponenata koje se teže zbijaju (npr., plastika, staklo i drvo). Rezultati ispitivanja standardnim Proctorovim pokusom prikazani su na Slici 54 i Tablici 33.



Slika 54. Krivulje zbijanja neobrađenog komunalnog čvrstog otpada (Iqbal i sur., 2022)

(Prijevod: Os x – w_{opt} (%) – optimalna vlažnost izražena kao postotak; Os y – $\rho_{d,max}$ (g/cm^3) – maksimalna suha gustoća (g/cm^3))

Tablica 33. Rezultati zbijanja standardnim Proctorovim pokusom (Iqbal i sur., 2022)

Karakteristike otpada	$\rho_{d,max} [\text{g/cm}^3]$	$w_{opt} [\%]$
Odlagalište Karadiyana		
Otpad stariji od 20 godina	1,10	39,3
Odlagalište Udapalatha		
Otpad mlađi od 3 godine	1,11	39,7
	1,07	33,7
	0,99	48,6

Otpad star 7-11 godina	1,10	39,0
	1,13	39,9
	1,15	36,2
Odlagalište Hambantota		
Otpad mlađi od 1 godine	1,44	20,5
Otpad star 7-11 godina (odlagališna ploha I)	1,76	13,4
	1,66	16,1
Otpad star 7-11 godina (odlagališna ploha II)	1,71	15,4
	1,71	17,0

Opsežnim pregledom dostupne literature, zaključeno je da ne postoji objavljena literatura koja bi se bavila odnosom između maksimalne suhe gustoće i optimalnog sadržaja vlage za bioosušeni otpadni materijal. Kao što je već spomenuto, s povećanjem gustoće materijala, koeficijent pora se smanjuje. Dobro funkcioniranje bioreaktorskog odlagališta podrazumijeva stalnu recirkulaciju procjedne vode, što znači da je za pouzdan dizajn bioreaktorskog odlagališta poznavanje odnosa između suhe gustoće i optimalne vlažnosti vrlo važno.

4.5 Materijal i metode za određivanje minimalne i maksimalne suhe gustoće otpada u suhom stanju te funkcionalnog odnosa između suhe gustoće i vlažnosti korišteni u ovoj disertaciji

Za utvrđivanje odnosa između suhe gustoće i vlažnosti, na A i B uzorcima otpada provedeni su različiti postupci ispitivanja. Ispitivanja maksimalne zbijenosti i odnosa između suhe gustoće i vlažnosti provedena su pomoću vibracijskog stola te pomoću standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa. Ispitivanja minimalne zbijenosti provedena su pomoću kalupa standardiziranih dimenzija koji se koristi na vibracijskom stolu za ispitivanje maksimalne zbijenosti. U sljedećim poglavljima, ovi postupci bit će detaljno opisani.

4.5.1 Vibracijski (vibro) stol

Funkcijski odnos između suhe gustoće i vlažnosti i maksimalna suha gustoća u suhom stanju

Iako je ASTM D 4253 standard (Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibration Table) namijenjen ispitivanju tla, u ovom radu postupak je prilagođen za ispitivanje BMO otpada. Izvorno ASTM D 4253 standard predviđa četiri različite metode za određivanje maksimalne suhe gustoće/zapreminske težine nekohezivnih, slobodno drenirajućih tala pomoću stola s vertikalnim vibracijama. Od četiri raspoložive metode predviđenih ASTM D 4253 standardom, u ovom radu korištena je metoda 1A (uzorak osušen u sušioniku i upotreba elektromagnetskog, vertikalno vibrirajućeg stola). Korištena vibro ploča s pripadajućim kalupom prikazana je na Slici 55.



Slika 55. Sustav za određivanje suhe gustoće

Prije početka ispitivanja, volumen kalupa je umjeren prema standardnom postupku ASTM D 4253 standarda korištenjem metode izravnog mjerenja i metode punjenja vodom. Kalibrirana srednja vrijednost volumena kalupa metodom punjenja vodom od četiri mjerenja iznosila je $2832,19 \text{ cm}^3$ (Tablica 34), dok je srednja vrijednost volumena određena metodom izravnog mjerenja $2832,87 \text{ cm}^3$ (Tablica 35).

Tablica 34. Rezultati mjerenja volumena kalupa metodom punjenja vodom

Mjerenje br.	Masa vode u kalupu	Temperatura vode (T) u kalupu	Gustoća vode kod temp. T*	Volumen kalupa
	g	°C	g/cm ³	cm ³
1	2824	22,60	0,99764	2830,68
2	2827	21,30	0,99793	2832,86
3	2828	19,60	0,99829	2832,84
4	2828	18,80	0,99845	2832,39

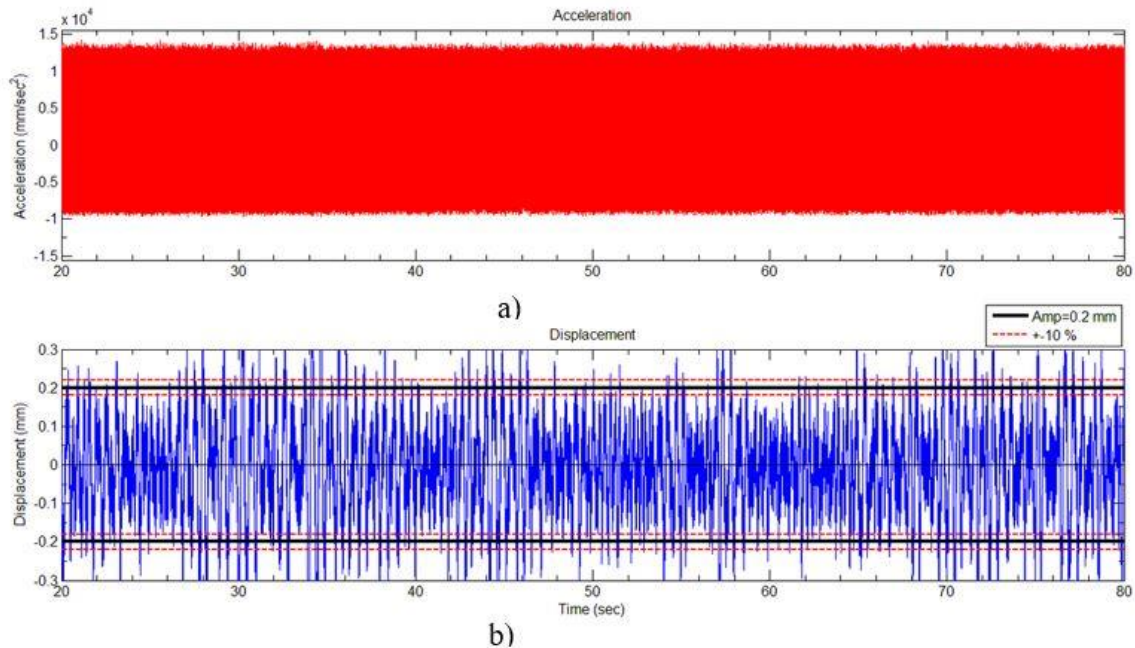
*Gustoća vode kod temperature T preuzeta iz ASTM D 854-02 standarda

Tablica 35. Rezultati mjerenja volumena kalupa metodom izravnog mjerenja

Mjerenje br.	Izmjerena visina	Srednja vrijednost visine	Izmjereni promjer	Srednja vrijednost promjera	Srednja vrijednost volumena kalupa
	cm	cm	cm	cm	cm ³
1	15,53	15,53	15,25	15,24	2832,87
2	15,52		15,25		
3	15,53		15,22		
4	15,52		15,25		

Maksimalna suha gustoća ispitivanog uzorka određuje se stavljanjem ili suhog (metoda 1 A) ili vlažnog uzorka (metoda 1 B) u kalup, primjenom utega kojim se nanosi naprezanje na površinu uzorka od 14 kPa, a zatim se kalup, uzorak i uteg vibriraju u okomitom smjeru. Vibracijski stol ima mogućnost podešavanja amplitude vertikalnih vibracija od 0-1 mm (Slika 55), pri čemu je maksimalna dvostruka amplituda 2 mm.

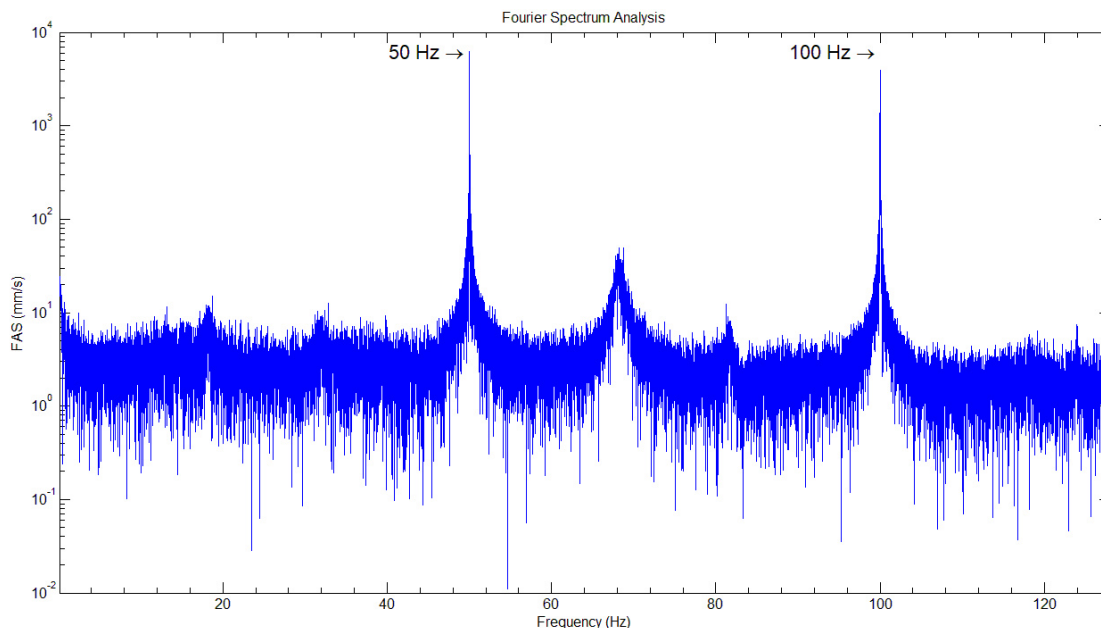
Prije ispitivanja uzoraka BMO otpada vibro pločom, provjereno je ako stvarna amplituda i frekvencija vibriranja odgovaraju vrijednostima zadanim na samom uređaju. Amplituda i frekvencija mjerene su uređajem za mjerenje ubrzanja i frekvencije Tromino 3G pri zadanoj amplitudi vibro stola od 0,2 mm. Rezultati mjerenja ubrzanja prikazani su na Slici 56 a). Na osi ordinata na Slici 56 a) prikazano je ubrzanje u mm/s², dok je na osi apscisa prikazano vrijeme u sekundama. Dvostrukom integracijom ubrzanja izračunata je amplituda (pomak) vibro stola (Slika 56 b). Na slici 56 b) na osi ordinata prikazan je pomak u mm.



Slika 56. Rezultati mjerenja ubrzanja vibro ploče Tromino 3G uređajem

Obradom rezultata mjerenja Tromino 3G uređajem prikazanim na Slici 56 utvrđeno je dobro podudaranje između zadane i srednje vrijednosti izmjerene amplitude iako je na Slici 56 b) vidljivo da amplituda značajno varira. Sva daljnja ispitivanja na vibro stolu provedena su pri zadanoj amplitudi od 0,2 mm, odnosno dvostrukoj amplitudi od otprilike 0,48 mm $\pm$ 0,08 mm (izmjereno) kako je propisano ASTM D 4253 standardom.

Maksimalno vrijeme u kojem vibro stol može davati vertikalne vibracije je ograničeno na 2,5 minute. Budući da je ASTM D 4253 standardom propisano trajanje svakog pokusa od 12 minuta pri dvostrukoj amplitudi od 0,48 mm $\pm$ 0,08 mm i frekvenciji od 50 Hz, a maksimalno vrijeme rada prilikom jednog uključivanja vibro ploče je 2,5 minute, uređaj je nekoliko puta uzastopce pokrenut kako bi ukupno vrijeme trajanja pokusa zadovoljavalo upute standarda. Budući da je na vibro stolu kod svakog ispitivanja pričvršćen kalup s uzorkom na kojem se nalazi uteg koji daje vertikalno opterećenje na uzorak od 14 kPa, prilikom svakog pokretanja uređaja dolazilo je do udara utega o uzorak i stijenke kalupa. Iz tog razloga je Tromino 3G uređaj prilikom mjerenja frekvencije vibro stola zabilježio dvije vršne vrijednosti frekvencije, 50 Hz i 100 Hz (Slika 57). Frekvencija od 50 Hz je dominantna, dok je viša frekvencija pripisana udaru utega o stijenke kalupa i o uzorak prilikom svakog pokretanja kao i udaru stola o betonski pod na kojem se stol nalazi.



Slika 57. Frekvencija vibriranja vibro stola korištenog u pokusima zbijanja MBO otpada (Prijevod: Os x – frequency (Hz) – frekvencija (Hz); Os y – FAS (mm/s) – Fourierova spektralna analiza (mm/s))

Ukupno je na vibro ploči ispitano 25 uzoraka bioosušenog otpada (materijal A). Od ukupnog broja uzoraka otpada materijala A, 7 uzoraka ispitano je u suhom stanju dok je preostalih 18 uzoraka ispitano kod različitih iznosa vlažnosti. Uzorci su nakon sušenja u sušioniku na 60°C kroz 24 sata pripremani na ciljanu vlažnost na način da se potrebna količina vode prelila preko suhog uzorka, nakon toga se priručnom lopaticom sve promiješalo kako bi se postigla jednolična smjesa, i sve zajedno ostavilo preko noći kako bi se vlaga ravnomjerno rasporedila po uzorku. Vlažni uzorci mogu se grupirati u tri skupine. U prvoj skupini uzorci su pripremljeni na ciljane vlažnosti od 20, 30, 40, 60, i 80%, a broj pripremljenih uzoraka za svaku od ciljanih vlažnosti bio je redom 2, 3, 2, 1 i 1 s čime je ujedno izvršena provjera ponovljivosti rezultata pri manjim iznosima vlažnosti. Provjera postignute vlažnosti vršila se nakon ispitivanja sušenjem u sušioniku u periodu od 24 sata na 60°C. U drugoj skupini je po jedan uzorak pripremljen na ciljane vlažnosti od 20, 40, 60, 80% i 100%. Provjera postignute vlažnosti provodila se nakon ispitivanja sušenjem u sušioniku u periodu od 48 sati na 60°C. U trećoj skupini pripremljena su po dva uzorka za svaku od ciljane vlažnosti od 40 i 80% kako bi se utvrdila ponovljivost rezultata ispitivanja i pri višim iznosima vlažnosti. Provjera postignute vlažnosti provodila se nakon ispitivanja sušenjem u sušioniku u periodu od 48 sati na 60°C.

Minimalna suha gustoća u suhom stanju

Dodatno je u kalupu standardnog volumena koji se koristio u ispitivanjima na vibro ploči određena i minimalna suha gustoća na osam uzoraka materijala A nasipavanjem uzorka suhog otpada u najrahljijem stanju.

Nakon određivanja volumena kalupa uz pomoć dvije opisane metode mjerenja (direktno mjerenje i metoda punjenja vodom), na seriji od osam uzoraka materijala A određena je i minimalna suha gustoća $\rho_{d,min}$ BMO otpada prema ASTM D 4254 standardu (metoda A). Minimalna suha gustoća uzorka prikazuje najrahljije stanje materijala bez kohezije koje se može postići u standardnim laboratorijskim uvjetima. Postupak ispitivanja sastoji se od umjeravanja volumena kalupa, mjerenja mase praznog kalupa, ugradnjom uzorka u kalup uz pomoć priručne lopatice u kružnom obliku idući od oboda prema sredini držeći lopaticu na visini od 13 mm od uzorka, osiguravajući pri tome jednake uvjete u svim slojevima uzorka. Nakon ugradnje uzorka, mjeri se masa punog kalupa te se minimalna suha gustoća $\rho_{d,min}$ uzorka računa prema Jednadžbi (31). Nakon mjerenja minimalne suhe gustoće, maksimalan koeficijent pora izračunat je Jednadžbom (32).

4.5.2 Proctorov pokus

U ispitivanjima standardnog Proctorovog pokusa, suhi uzorak se nakon miješanja s vodom kako bi se dobio određeni ciljani udio vlage zbija u cilindru volumena 2127,92 cm³ (Slika 58). Zbijanje uzorka izvedeno je u tri sloja sa slobodnim padom mase utega od 2,5 kg s visine od 305 mm u seriji od 25 udaraca po sloju prema ASTM D 698 standardu. Uzorci su nakon sušenja u sušioniku na 60°C kroz 24 sata pripremani na ciljanu vlažnost na način da se potrebna količina vode prelila preko suhog uzorka, nakon toga se priručnom lopaticom sve promiješalo kako bi se postigla jednolična smjesa, i sve zajedno ostavilo preko noći kako bi se vlaga ravnomjerno rasporedila po uzorku.

Standardnim Proctorovim pokusom ispitano je ukupno pet uzoraka materijala A. Ciljane vlažnosti materijala A bile su redom 20%, 40%, 60%, 80%, i 100%. Nakon provedenih ispitivanja, svaki od ispitanih uzoraka stavljen je u sušionik na 60 °C u trajanju od 48 sati kako bi se odredila postignuta vlažnost. Maksimalna suha gustoća nakon toga izračunata je Jednadžbom (33).



Slika 58. Sustav za ispitivanje standardnim Proctorovim pokusom i metanogena frakcija otpada

Modificirani Proctorov pokus slijedi isti postupak ugradnje uzoraka u kalup. Dva različita volumena kalupa korištena su za modificirani Proctorov pokus (2114 cm^3 i $2120,58 \text{ cm}^3$). Za ispitivanje Modificiranim Proctorovim pokusom ispitano je 10 uzoraka materijala B, a uzorci su pripremljeni na 20%, 40%, 60%, 80%, i 100% udjela vlage s time da je za svaku vlažnost pripremljeno po dva uzorka kako bi se ispitala ponovljivost rezultata. Razlike u tehničkim karakteristikama između standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa korištenog u ovom istraživanju sažete su u Tablici 36. Zbog postignute zbijenosti uzoraka u modificiranom Proctorovom pokusu, uzorci su se nakon ispitivanja iz kalupa vadili uz pomoć ručne hidrauličke preše (Slika 59).

Tablicom 36 prikazani su parametri ispitivanja za standardni i modificirani Proctorov pokus.

Tablica 36. Parametri standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa

	Standardni	Modificirani
Broj slojeva	3	5
Broj udaraca po sloju	25	56
Visina pada utega [mm]	305	450
Masa utega [kg]	2,5	4,5
Energija [kJ/m ³]	263,55*	2622,1**; 2630,3***

*Volumen kalupa 2127,92 cm³

**Volumen kalupa 2120,58 cm³

***Volumen kalupa 2114 cm³



Slika 59. Uzorak bioosušenog otpada prilikom vađenja iz kalupa, materijal B, uzorak s 80% vlage

Energija zbijanja u Proctorovim pokusima (standardni i modificirani) izračunava se Jednadžbom (37):

$$E = \frac{N \times h \times W}{V} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (37)$$

gdje je:

N = ukupan broj udaraca utegom (standardni Proktor: $3 \times 25 = 75$)

h = visina pada utega (udaljenost pada) [m]

W = težina utega (standardni Proktor: $2,5 \text{ kg} \times 9,80665 \text{ m/s}^2 = 24,5 \text{ N}$)

V = volumen kalupa [m^3] (HRN EN 13286-2: 2010/Ispr.1: 2013)

4.6 Rezultati

4.6.1 Vibro stol

Maksimalna i minimalna suha gustoća gustoća u suhom stanju

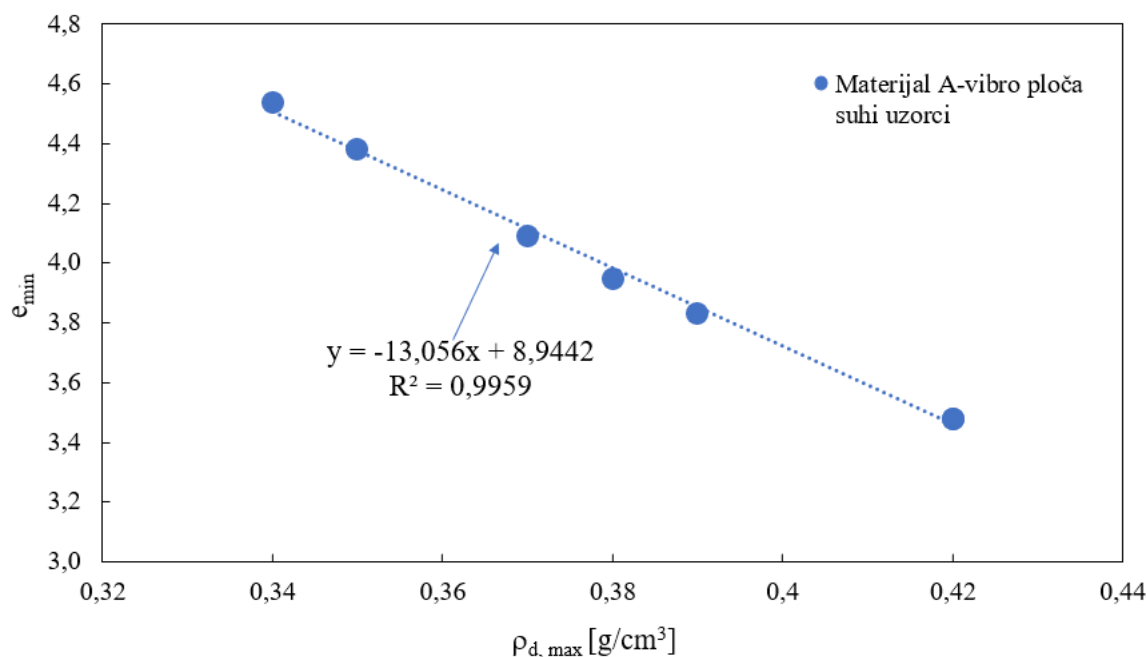
Za utvrđivanje maksimalne suhe gustoće otpada u suhom stanju ispitano je sedam uzoraka materijala A slijedeći ASTM D 4253 standard. Rezultati svih sedam suhih uzoraka prikazani su u Tablici 37 kao maksimalna suha gustoća s 0% udjela vlage u svim uzorcima. Neobrađeni rezultati mjerenja svakog od uzorka iz Tablice 37 dostupni su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>.

Tablica 37. Maksimalna suha gustoća metanogene frakcije materijala A s 0% udjela vlage

Uzorak br.	Masa uzorka	Volumen uzorka nakon zbijanja	Maksimalna suha gustoća	e_{min}
	g	cm^3	g/cm^3	-
1	617	1813,65	0,34	4,54
2	676	1756,72	0,38	3,95
3	577	1630,20	0,35	4,38
4	674	1809,54	0,37	4,09
5	718	1859,42	0,39	3,83
6	871	2054,07	0,42	3,48
7	836	1982,09	0,42	3,48
Aritmetička sredina			0,38	3,96
Stand. dev.			$\pm 0,03$	$\pm 0,41$

Tablica 37 također prikazuje i minimalni koeficijent pora svakog uzorka izračunat Jednadžbom (34) pri čemu je korištena srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica ρ_s materijala A ($1,88 \text{ g/cm}^3$).

Tablica 37 pokazuje da se maksimalna suha gustoća izmjerena na sedam suhих uzoraka kreće u rasponu od 0,34 g/cm³ do 0,42 g/cm³ sa srednjom vrijednošću od 0,38 g/cm³ i standardnom devijacijom od ±0,03 g/cm³. Navedeni parametri pokazuju obrnutu proporcionalnost, što znači da s povećanjem maksimalne suhe gustoće, minimalni koeficijent pora pada. Odnos između navedena dva parametra pokazuje jaku linearnu korelaciju (Slika 60), no ovdje treba uzeti u obzir relativno mali raspon koeficijenata pora uzoraka na kojima je ostvarena linearna povezanost sa suhom gustoćom, jer za veće raspone koeficijenta pora taj odnos postaje hiperboličan (vidi npr. Sliku 42 b) u poglavlju 3.6. 5 Korelacija suhe gustoće ρ_d , i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s).



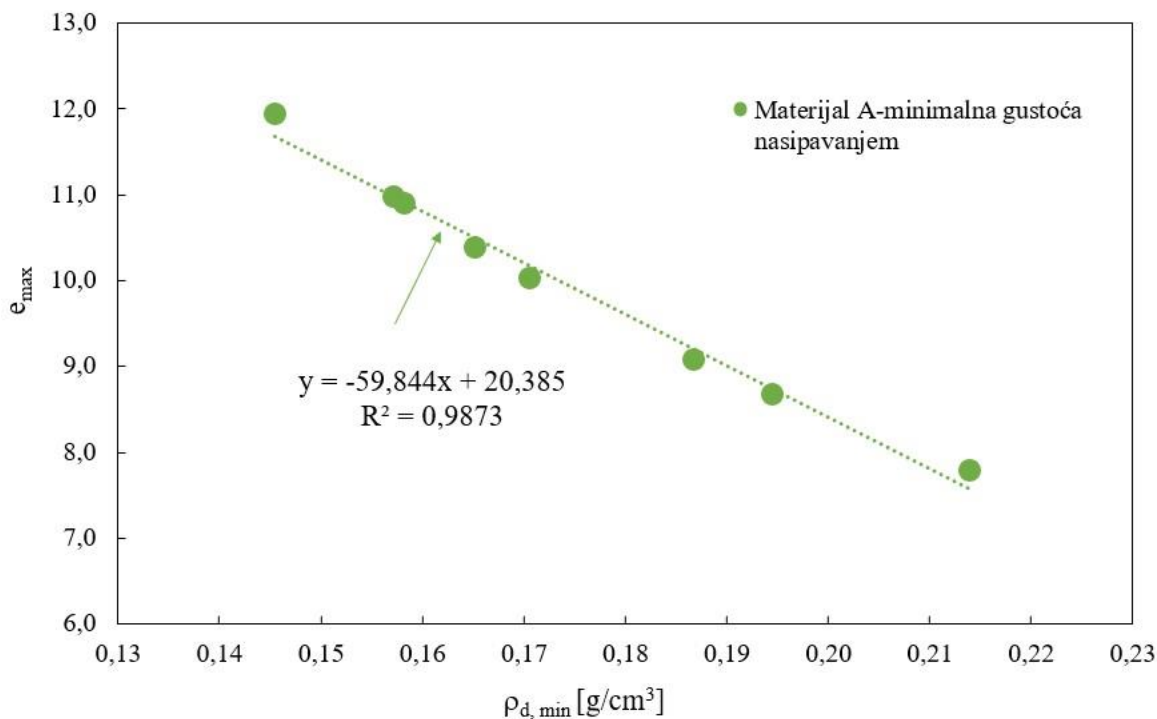
Slika 60. Linearna povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće (Tablica 37)

Određivanje minimalne suhe gustoće $\rho_{d, \min}$ na osam uzoraka materijala A, prema ASTM D 4254 standardu (metoda A) prikazano je u Tablici 38 dok su neobrađeni rezultati mjerenja dostupni na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>. Iz rezultata minimalne suhe gustoće, uz srednju vrijednost gustoće čvrstih čestica ρ_s materijala A (1,88 g/cm³) izračunat je pripadni maksimalni koeficijent pora Jednadžbom (32).

Tablica 38. Rezultati minimalne suhe gustoće $\rho_{d,min}$ i maksimalnog koeficijenta pora e_{max} materijala A

Uzorak br.	Masa uzorka	Volumen kalupa/uzorka	Minimalna suha gustoća	e_{max}
	g	cm ³	g/cm ³	-
1	412	2832,20	0,15	11,94
2	468		0,17	10,39
3	529		0,19	9,08
4	448		0,16	10,90
5	606		0,21	7,80
6	483		0,17	10,04
7	551		0,20	8,67
8	445		0,16	10,98
Aritmetička sredina			0,17	9,97
Stand. dev.			±0,02	±1,37

Minimalna suha gustoća materijala A iz Tablice 38 kreće se u rasponu od 0,15 g/cm³ do 0,21 g/cm³ sa srednjom vrijednosti od 0,17 g/cm³ i standardnom devijacijom od ±0,02 g/cm³. Pripadni maksimalan koeficijent pora materijala A kreće se u rasponu od 7,80 do 11,94 sa srednjom vrijednosti od 9,97 i standardnom devijacijom od ±1,37. No, ovdje u obzir treba uzeti veličinu uzoraka. Dok je maksimalan koeficijent pora od 9,97 (za minimalnu suhu gustoću $\rho_{d,min}$ 0,17 g/cm³) prikazan u ovom poglavlju izmjeren u kalupu volumena 2832,19 cm³, rezultati prikazani u poglavlju 3.6. 5 Korelacija suhe gustoće ρ_d , i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s u kojem su uzorci ispitani u kalupu volumena 220,68 cm³ ukazuju da je moguće postići koeficijent pora od 14,86, pri čemu je suha gustoća tih uzoraka bila 0,12 g/cm³. Očito je da su se u ćeliji manjeg volumena veće čestice oslanjale na stijenke ćelije čime je formiran skelet uzorka bitno rahliji od realnog ostvarivog kao što je to pokazano u slučaju upotrebe većeg kalupa. Za male raspone koeficijenta pora odnos e_{max} i minimalne suhe gustoće $\rho_{d,min}$ materijala A iz Tablice 38, kao i u slučaju odnosa e_{min} i maksimalne suhe gustoće, pokazuje jaku linearnu korelaciju i obrnutu proporcionalnost (Slika 61).



Slika 61. Linearna povezanost $e_{\max}$ i minimalne suhe gustoće iz Tablice 38

Funkcijski odnos između suhe gustoće i vlažnosti

Odnos između sadržaja vlage i suhe gustoće dobiven ispitivanjem na vibracijskom stolu za metanogenu frakciju materijala A prikazan je u Tablici 39. Neobrađeni rezultati mjerenja svakog od uzorka iz Tablice 39 dostupni su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>. Masa uzorka u Tablici 39 odnosi se na vlažnu masu ugrađenog uzorka u kalup, a različite mase pojedinih uzoraka posljedica su nehomogenosti materijala. Za materijal A, ispitivanja su podijeljena u tri različite skupine (I-III) na temelju pripremljenih različitih ciljanih vlažnosti. Budući da su uzorci nakon ispitivanja stavljeni na sušenje u sušionik kako bi se odredila postignuta vlažnost, u Tablici 39 naznačena je ciljana i stvarno postignuta vlažnost svakog uzorka. Razlika između ciljane i postignute vlažnosti posebno je izražena za skupinu I materijala A. Naime, uzorci skupine I sušeni su 24 sata, a uzorci skupina II i III 48 sati. Pokazalo se da uobičajeno vrijeme sušenja od 24 sata koje se primjenjuje u mehanici tla nije dostatno za sušenje uzoraka otpada te je potrebno duže vrijeme sušenja. U pravilu su uzorci koji su duže sušeni pokazivali točnije vrijednosti ciljane vlažnosti od onih koji su bili sušeni 24 sata. Stoga su u daljnjoj interpretaciji rezultata, rezultati skupine I tumačeni temeljem ciljane vlažnosti uzorka.

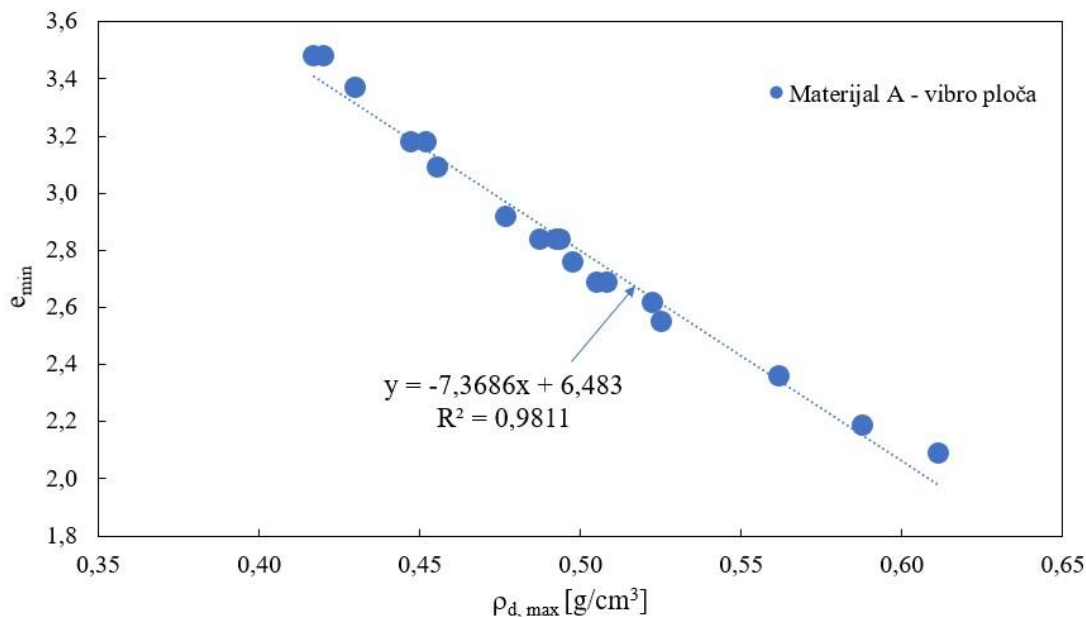
Tablica 39. Suha gustoća ρ_d i vlažnost uzoraka materijala A

	Masa uzorka	Volumen uzorka nakon zbijanja	Ciljana vlažnost uzorka prije zbijanja	Utvrđena vlažnost uzorka nakon zbijanja	Suha gustoća ρ_d	e_{min}
	g	cm ³	%	%	g/cm ³	-
	Materijal A					
Skupina I	823	1553,08	20,00	16,32	0,46	3,09
	848	1612,66	20,00	16,32	0,45	3,18
	788	1470,58	30,00	30,12	0,42	3,48
	803	1480,85	30,00	26,88	0,43	3,37
	751	1412,22	30,00	26,88	0,42	3,48
	814	1320,46	40,00	24,85	0,49	2,84
	916	1452,22	40,00	24,85	0,51	2,69
	1079	1467,21	60,00	47,81	0,50	2,76
	1266	1427,38	80,00	86,01	0,48	2,92
Skupina II	794	1490,93	20,00	19,10	0,45	3,18
	948	1382,22	40,00	40,65	0,49	2,84
	1318	1460,00	60,00	60,68	0,56	2,36
	1287	1375,40	80,00	84,10	0,51	2,69
	1357	1354,17	100,00	103,46	0,49	2,84
Skupina III	1072	1423,57	40,00	43,41	0,53	2,55
	1034	1357,66	40,00	45,74	0,52	2,62
	1478	1382,75	80,00	74,78	0,61	2,09
	1404	1355,44	80,00	76,26	0,59	2,19
Aritmetička sredina					0,50	2,84
Stand. dev.					±0,05	±0,41

Tablica 39 prikazuje i minimalni koeficijent pora svakog uzorka izračunat Jednadžbom (34) pri čemu je korištena srednja vrijednost gustoća čvrstih čestica ρ_s A od 1,88 g/cm³.

S povećanjem maksimalne suhe gustoće, minimalni koeficijent pora se smanjuje. Odnos između navedena dva parametra, kao i u prethodnom slučaju za sedam uzoraka materijala A ispitanih u suhom stanju, pokazuje jaku linearnu korelaciju (Slika 62), no ovdje ponovo u obzir treba uzeti relativno mali raspon koeficijenta pora nad kojim je ostvarena linearna povezanost sa suhom

gustoćom. Za veće raspone koeficijenta pora, taj odnos postaje hiperboličan (vidi npr. Sliku 42 b) u poglavlju 3.6. 5 Korelacija suhe gustoće ρ_d , i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s).



Slika 62. Linearna povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće iz Tablice 39

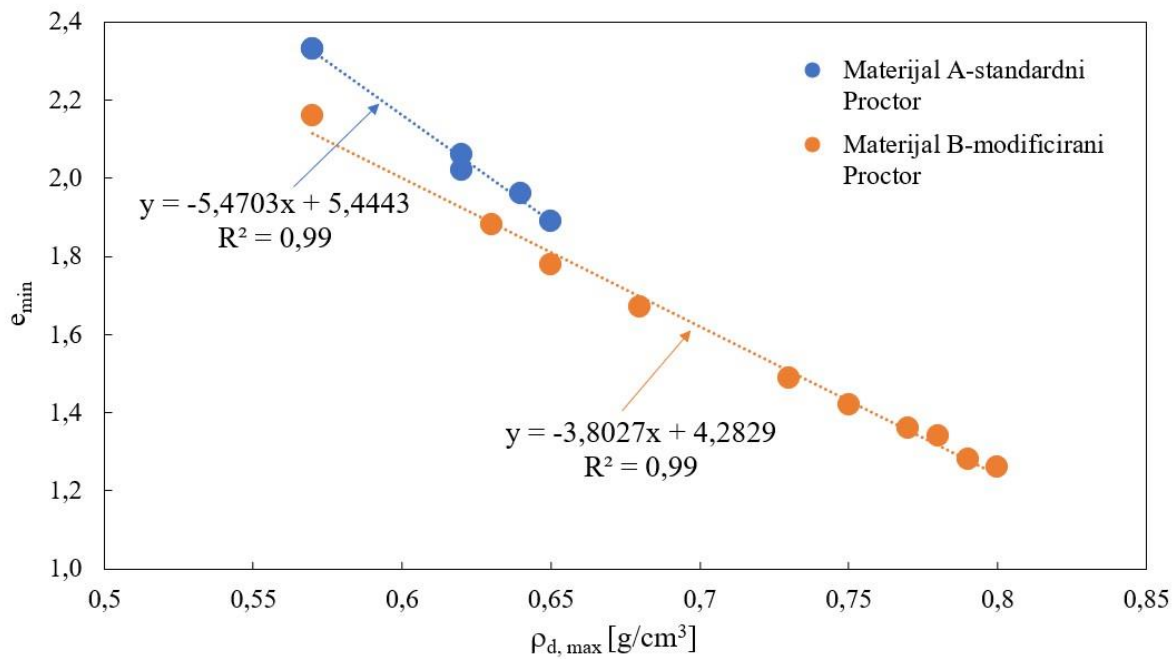
4.6.2 Proctorov pokus

Materijal A ispitan je standardnim Proctorovim pokusom, dok je materijal B ispitan modificiranim Proctorovim pokusom. Rezultati pokusa, odnosno postignute suhe gustoće uzoraka su prikazani u Tablici 40. Neobrađeni rezultati mjerenja svakog od uzorka iz Tablice 40 dostupni su na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>. Tablica 40 prikazuje i minimalni koeficijent pora svakog uzorka izračunat Jednadžbom (34) pri čemu je korištena srednja vrijednost gustoća čvrstih čestica ρ_s A od $1,88 \text{ g/cm}^3$ i srednja vrijednost gustoća čvrstih čestica ρ_s B od $1,82 \text{ g/cm}^3$.

Tablica 40. Maksimalna suha gustoća ρ_d i pripadajući koeficijenti pora e_{min} materijala A i B iz Proctorovog pokusa

Uzorak br.	Ciljana vlažnost uzorka	Postignuta vlažnost uzorka	Maksimalna suha gustoća	e_{min}
	%	%	g/cm ³	-
Materijal A - standardni Proctor				
1	20,00	19,07	0,57	2,33
2	40,00	41,49	0,62	2,02
3	60,00	61,6	0,64	1,96
4	80,00	81,7	0,65	1,89
5	100,00	99,63	0,59	2,19
Aritmetička sredina			0,61	2,08
Stand. dev.			±0,04	±0,18
Materijal B – modificirani Proctor				
1	20,00	21,06	0,75	1,42
2	20,00	21,22	0,73	1,49
3	40,00	45,02	0,78	1,34
4	40,00	43,36	0,79	1,28
5	60,00	61,31	0,80	1,26
6	60,00	61,35	0,77	1,36
7	80,00	82,25	0,68	1,67
8	80,00	86,43	0,65	1,78
9	100,00	96,37	0,63	1,88
10	100,00	107,53	0,57	2,16
Aritmetička sredina			0,71	1,56
Stand. dev.			±0,08	±0,30

Odnos između maksimalne suhe gustoće i minimalnog koeficijenta pora iz Tablice 40 prikazan je na Slici 63, no ovdje ponovo u obzir treba uzeti relativno mali raspon koeficijenta pora nad kojim je ostvarena linearna povezanost sa suhom gustoćom.

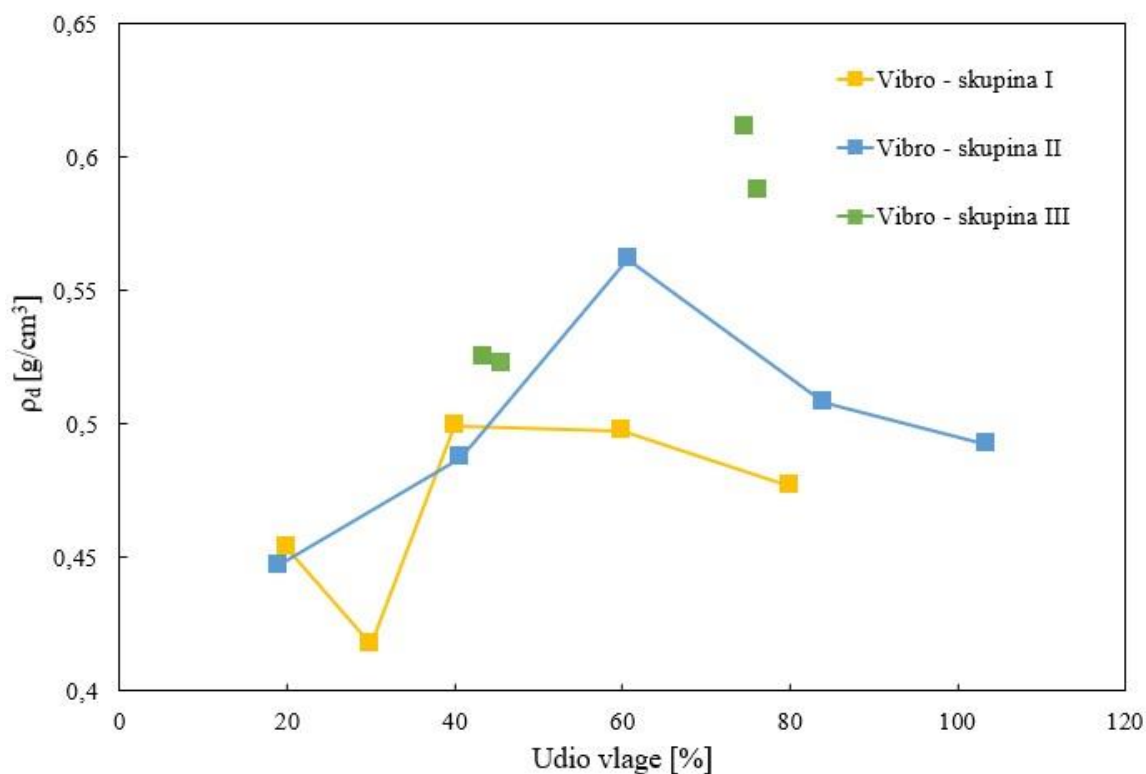


Slika 63. Linearna povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće iz
Tablice 40

4.7 Rasprava

4.7.1 Vibrirajući stol

Slika 64 prikazuje krivulje zbijanja za materijal A odnosno rezultate mjerenja skupina uzoraka I, II, i III (Tablica 39). Sa Slike 64 može se uočiti da se optimalni raspon vlage utvrđen vibro pločom kreće od 40 do 80% te da se u tom rasponu vlage može postići maksimalna suha gustoća viša od 0,50 pa do maksimalno 0,61 g/cm³. Također treba istaknuti da se uz zanemarivanje rezultata skupine I dobivenog pri vlažnosti od 30% također može dobiti krivulja koja oblikom podsjeća na tipičnu zvonoliku krivulju zbijanja. Nadalje, rezultati pokazuju da je ponovljivost pokusa pri vlažnostima od 20% i 40% bila zadovoljavajuća dok se s povećanjem vlažnosti preko 40% ponovljivost rezultata bitno smanjuje.



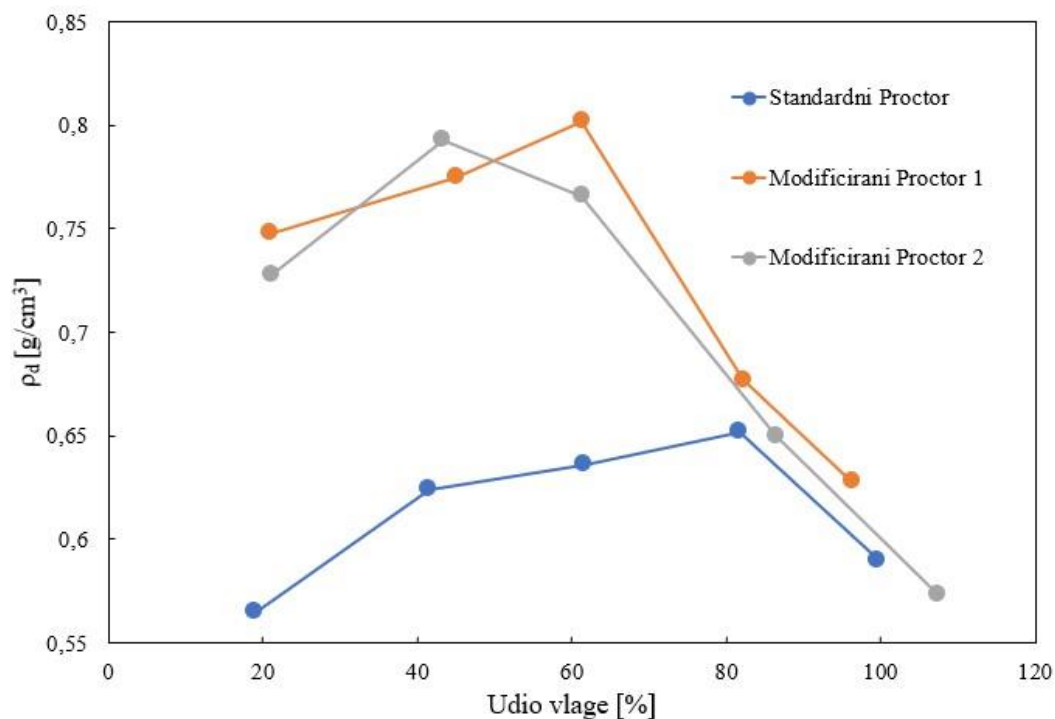
Slika 64. Odnos maksimalne suhe gustoće i optimalnog sadržaja vlage metanogene frakcije materijala A

Bitnija odstupanja rezultata iz skupine I i skupine III pri vlažnostima od 30% i 80% mogu se pripisati heterogenosti otpadnog materijala i možebitnim odstupanjima količine organske tvari u tim uzorcima, a u odnosu na utvrđene prosječne vrijednosti (poglavlje 2.6.4 Sastav otpada). Naime, ovisnost maksimalne suhe gustoće o udjelu organske tvari utvrdili su Pulat i Yukselen-Aksoy, (2013). U spomenutom radu, autori su utvrdili da se s većim sadržajem organske tvari smanjuje maksimalna suha gustoća. Iz ovih rezultata proizlazi da je potencijalno moguće da je uzorak skupine I pri 30% vlažnosti imao više organske tvari od prosjeka, a uzorak skupine III pri 80% vlažnosti imao manje organske tvari od prosjeka.

Najveća suha gustoća materijala A izmjerena je vibro stolom u skupini III te ona iznosi $0,61 \text{ g/cm}^3$ pri vlažnosti od 74,78%.

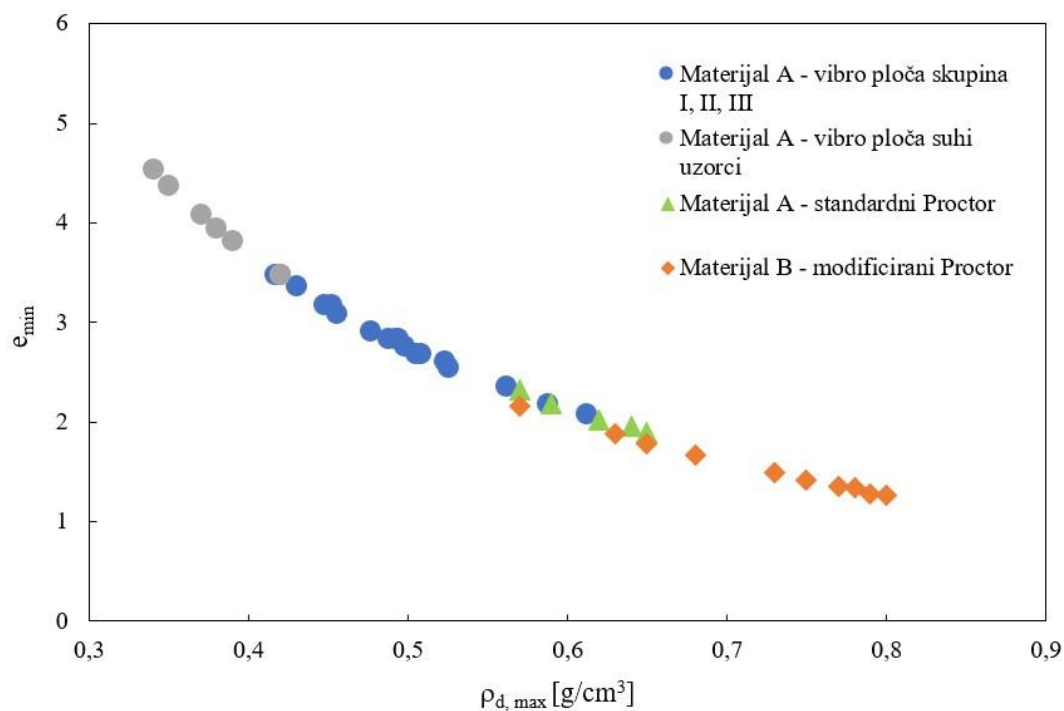
4.7.2 Proctorov pokus

Sa Slike 65 koja prikazuje rezultate zbijanja standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom za materijal A i B iz Tablice 40, može se zaključiti da pri sadržaju vlage većem od 80%, maksimalna suha gustoća ne ovisi o iznosu primijenjene energije zbijanja u Proctorovom pokusu. Općenito, s povećanjem energije zbijanja maksimalna suha gustoća se povećava uz istovremeno smanjenje optimalne vlage. Endait i Patil, (2020) su u svojim istraživanjima potvrdili ovaj fenomen na neobrađenom komunalnom otpadu. Rezultati ovog istraživanja potvrdili su da ovaj fenomen vrijedi i za BMO otpad budući da za krivulju standardnog Proctorovog pokusa, izmjerenu za materijal A, maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage su $0,65 \text{ g/cm}^3$ i 81,7% dok za materijal B ispitan modificiranim Proctorovim pokusom, maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage iznose $0,80 \text{ g/cm}^3$ i 61,31%. Slika 65 također otkriva da je ponovljivost rezultata Proctorovog pokusa, u usporedbi s ponovljivošću rezultata pokusa dobivenih vibro pločom, pouzdanija uz podjednaka odstupanja pri svim iznosima vlažnosti. Kao i kod rezultata izmjerenih na vibro ploči (Slika 64), za rezultate modificiranog Proctorovog pokusa na Slici 65 dolazi do nagle promjene gradijenta krivulje zbijenosti kod otprilike 60% vlažnosti pri čemu dolazi do naglog smanjenja maksimalne suhe gustoće. Ta promjena gradijenta krivulje je kod standardnog Proctorovog pokusa manje izražena i nalazi se kod otprilike 80% vlažnosti.



Slika 65. Krivulje zbijanja standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom metanogene frakcije materijala A i B

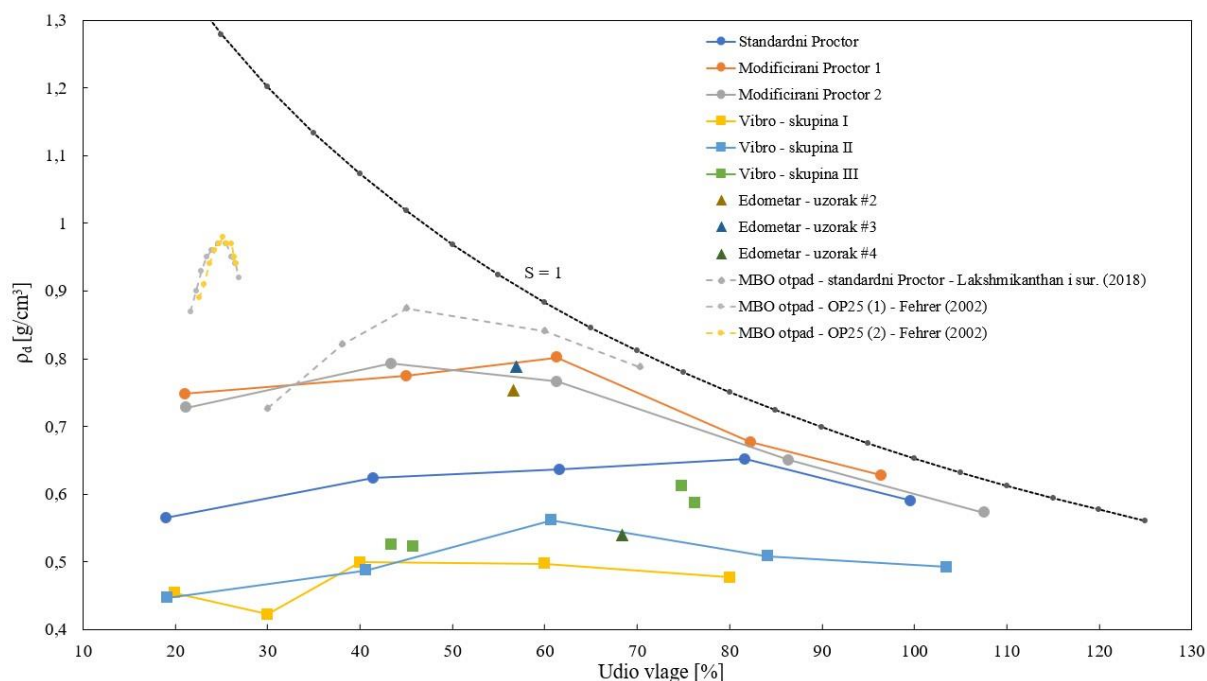
Slika 66 prikazuje odnos maksimalne suhe gustoće i minimalnog koeficijenta pora uzoraka materijala A i B ispitanih na vibro ploči i standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom. Kao što je prethodno spomenuto, promatranjem uskog skupa podataka, odnos koeficijenta pora i pripadne maksimalne suhe gustoće pokazuje jaku linearnu povezanost (Slike 60, 62, i 63) dok na širem rasponu vrijednosti, navedeni odnos pokazuje hiperbolično ponašanje (Slika 66).



Slika 66. “Linearna” povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće

4.7.3 Usporedba s rezultatima drugih istraživača

Slika 67 prikazuje usporedbu rezultata izmjerenih u ovom istraživanju vibro pločom te standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom s rezultatima drugih istraživača. Dodatno, na slici su prikazane i suhe gustoće otpada i pripadajuće vlažnosti tri uzorka BMO otpada ispitanih u sklopu ove disertacije u edometarskom pokusu, a koji su detaljno opisani u poglavlju 5.5 Materijal i metode. Također je prikazana i teoretska krivulja potpuno zasićenog uzorka ($S = 1$) materijala A (s gustoćom čvrstih čestica $\rho_s = 1,88 \text{ g/cm}^3$).



Slika 67. Proctorove krivulje izmjerene u ovom istraživanju u usporedbi s objavljenom literaturom

Sa Slike 67 vidljivo je da rezultati izmjereni standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom na bioosušenom otpadu materijala A i B pokazuju više vrijednosti maksimalne suhe gustoće od rezultata dobivenih ispitivanjem na vibracijskom stolu što se može pripisati većoj energiji zbijanja kod Proctorovih pokusa. Za vlažnost od 61% postignuta suha gustoća vibro pločom iznosi 0,56 g/cm³, standardni Proctorov pokus daje vrijednost suhe gustoće od 0,65 g/cm³ dok se modificiranim Proctorovim pokusom pri vlažnosti od 61% postiže suha gustoća oko 0,80 g/cm³. U odnosu na suhu gustoću vibro pločom, modificiranim Proctorovim pokusom postignut je gotovo 30% veći iznos suhe gustoće što pokazuje da primijenjena energija zbijanja ima bitnu ulogu u postizanju maksimalne suhe gustoće otpada.

Također je zanimljivo primijetiti da se suhe gustoće postignute na kraju edometarskih pokusa na vlažnim uzorcima otpada (uzorci #2 i #3) dobro poklapaju s vrijednostima suhe gustoće dobivene modificiranim Proctorovim pokusom.

Materijal B ispitan modificiranim Proctorovim pokusom u ovom radu pokazuje slične rezultate kao i biostabilizirani materijal ispitan standardnim Proctorovim pokusom u radu Lakshmikanthan i sur., (2018). Biostabilizirani materijal ispitan u radu Lakshmikanthan i sur., (2018) ima sličan udio organske tvari kao materijal B (55,26%) iz ovog rada, koji iznosi 54%.

Najvišu suhu gustoću na Slici 67 pokazali su uzorci OP25 (1) i OP25(2) no uz bitno uži raspon vlažnosti ispitanih uzoraka. Navedeni uzorci dolaze iz MBO postrojenja Oberpullendorf u Austriji u kojem je otpadni materijal obrađen aerobnim postupkom, tj. kompostiranjem. Frakcija uzoraka je manja od 25 mm (Fehrer, 2002).

Tiwari (2014) je objavio da maksimalna suha gustoća materijala koji se odlaže u bioreaktorsko odlagalište ne bi trebala biti veća od $0,57 \text{ g/cm}^3$ kako bi se omogućila recirkulacija dovoljne količine procjedne vode kroz tijelo odlagališta za proizvodnju bioplina. S druge strane, Petrović i sur., (2022) objavili su da se za ispitivani otpad vrijednost inicijalne vlažnosti potrebne za najbržu razgradnju otpada kreće oko 50% što je nešto manje od optimalne vlažnosti utvrđene modificiranim Proctorovim pokusom koja se kreće od 55% do 60%.

Usporedbom rezultata zbijanja izmjerenih u okviru ove doktorske disertacije modificiranim Proctorovim pokusom i edometarskim pokusom s pretpostavkama koje su objavili Tiwari (2014) i Petrović i sur. (2022) dolazi se do zaključka da će materijal A u kasnijim fazama rada bioreaktorskog odlagališta postići suhu gustoću veću od preporučenih $0,57 \text{ g/cm}^3$. Slijedom navedenog mogu se očekivati poteškoće u recirkulaciji filtrata i proizvodnji bioplina.

4.8 Zaključak

U ŽCGO Marišćina, bioosušeni otpadni materijal ispitivan u sklopu ovog rada, ugrađuje se u bioreaktorsko odlagalište (koje se nalazi u sklopu ŽCGO) u suhom stanju, a nakon zatvaranja počinje vlaženje i recirkulacija procjedne vode. Provedenim ispitivanjima potvrđeno je da se povećanjem sadržaja vlage do određene granice povećava i suha gustoća otpada. Posljedično, smanjuje se koeficijent pora, a recirkulacija procjedne vode kroz bioreaktorsko odlagalište bit će znatno otežana. Zbog toga je vrlo važno poznavati raspon gustoća koje se mogu postići kod određenog sadržaja vlage za ugrađeni otpadni materijal. Ispitivanja su provedena na vibro ploči i standardnom i modificiranom Proctorovom pokusu na materijalu uzorkovanom u prvoj polovici godine (materijal A) i na materijalu uzorkovanom u drugoj polovici godine (materijal B) čime je utvrđen odnos maksimalne suhe gustoće i optimalne vlažnosti za svaki materijal i vrstu ispitivanja.

Rezultati sedam uzoraka izmjerenih na suhom materijalu dali su srednju vrijednost maksimalne suhe gustoće $0,38 \text{ g/cm}^3$ uz standardnu devijaciju $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$. Srednja vrijednost minimalnog koeficijenta pora izračunata nakon mjerenja maksimalne suhe gustoće za sedam uzoraka materijala A iznosi 3,96 uz standardnu devijaciju od $\pm 0,41$. Na osam uzoraka materijala A određena je minimalna suha gustoća $\rho_{d,min}$ koja se kreće u rasponu od $0,15 \text{ g/cm}^3$ do $0,21 \text{ g/cm}^3$ sa srednjom vrijednosti $\rho_{d,min}$ od $0,17 \text{ g/cm}^3$ i standardnom devijacijom od $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$. Pripadni maksimalni koeficijent pora materijala A kreće se u rasponu od 7,80 do 11,94 sa srednjom vrijednosti od 9,97 i standardnom devijacijom od $\pm 1,37$. No, kod ovih rezultata u obzir treba uzeti dimenzije uzoraka. Maksimalan koeficijent pora od 9,97 (za minimalnu suhu gustoću $\rho_{d,min}$ $0,17 \text{ g/cm}^3$) prikazan u ovom poglavlju izmjeren je u kalupu volumena $2832,19 \text{ cm}^3$, dok su rezultati prikazani u poglavlju 3.6.5 Korelacija suhe gustoće ρ_d i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s , ispitani u kalupu volumena $220,68 \text{ cm}^3$ i ukazuju da je moguće postići koeficijent pora od čak 14,86, pri čemu je suha gustoća tih uzoraka bila $0,12 \text{ g/cm}^3$.

Najveća maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage dobiveni mjerenjima vibro pločom materijala A iznose $0,61 \text{ g/cm}^3$ i 74,78%. Standardnim Proctorovim pokusom provedenim na pet uzoraka materijala A dobivena je maksimalna suha gustoća od $0,65 \text{ g/cm}^3$ uz optimalan sadržaj vlage 81,7%. Za modificirani Proctorov pokus, maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage za materijal B su $0,80 \text{ g/cm}^3$ i 61%. Povećanjem energije zbijanja u Proctorovim pokusima

povećava se i maksimalna suha gustoća uz istovremeno smanjenje optimalne vlažnosti. Pokusi pokazuju da se mogu očekivati veće suhe gustoće od preporučenih (Tiwari, 2014) te u skladu s time i značajne poteškoće u recirkulaciji filtrata.

Nadalje, rezultati pokusa pokazuju da najrealnije vrijednosti suhe gustoće, koje se temeljem rezultata edometarskog pokusa mogu očekivati u tijelu odlagališta, daje modificirani Proctorov pokus.

4.9 Popis literature

ASTM D 698-00. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³)).

ASTM D 1557-02. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).

ASTM D 4253-00. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.

ASTM D 4254-00. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.

Bauer J., Münnich K. and Klaus F., (2006). Investigation of mechanical properties of MBT waste, Proceedings of the Fourth Asian-Pacific Landfill Symposium (APLAS), Shanghai, China.

Bidlingmaier, W. (1998). Die Behandlung und Beseitigung fester Abfaelle durch biologische Verfahren, Muellhandbuch, Artikel 5305.

Doedens H., von Felde D., Cuhls C., Ketelsen K., Broeker E., Fehre E., Giebel B., (2000). Wissenschaftliche Begleitung der drei großtechnischen Demonstrationsanlagen zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfaellen in Niedersachsen. Endbericht. Institut fuer Siedlungswasserwirtschaft u. Abfalltechnik der Universitaet Hannover, Hannover und Ingenieurbuero fuer Abfallwirtschaft und Entsorgung, Hannover.

Drnevich V. P., Evans A. C., i Prochaska A. B., (2007). A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils. Publication FHWA/IN/JTRP-2007/12. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2007. <https://doi.org/10.5703/1288284313357>.

Duellmann H., (2002). Untersuchungen zum Einbau von MBA-Abfaellen auf der Zentraldeponie Hannover. Laboruntersuchungen zum Verdichtungs-, Durchlaessigkeits-, Last-Setzungs- und Scherverhalten. Februar 2002. Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Hannover.

Endait M., Patil S., (2020). Laboratory investigation of compaction characteristics of fresh and degraded municipal solid waste. Waste Disposal & Sustainable Energy, Vol. 2, pp: 305–312.

Entenmann W. and Wendt P. (2007), 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.

Fehrer K., (2002). Geotechnisches Verhalten von mechanisch-biologisch behandelten Abfaellen. Diplomarbeit, Universitaet fuer Bodenkultur, Wien.

Hanson J. L., Yesiller N., Von Stockhausen S. A., Wilson W., Wong W. W., (2010). Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 136(8), pp: 1095-1102. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000324.

Heiss-Ziegler C. i Fehrer K., (2003). Geotechnical behavior of mechanically-biologically pretreated municipal solid waste (MSW), Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

HRN EN 13286-2:2010/Ispr.1:2013: Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine -- 2. dio: Metode ispitivanja za određivanje laboratorijske referentne gustoće i udjela vode -- Zbijanje prema Proctoru (EN 13286-2:2010/AC:2012))

Iqbal M. R., Piumali A. B. K. T., Priyankara N. H., Alagiyawanna A. M. N., Kurukulasuriya L. C., Kawamoto K., (2022). Characterization of Physicochemical and Mechanical Properties of Dumped Municipal Solid Waste in Sri Lanka as Affected by the Climate Zone and Dumping Age. Sustainability, Vol. 14(8), 4706. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084706>.

Kuehle-Weidemeier M. i Doedens H. (2003). Landfilling and properties of MBP waste, Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

Kuehle-Weidermeier (2007). Geomechanical properties of mechanically and biologically treated municipal solid waste. Review of literature in German language and own investigations. Langenhagen (Germany) 2007.

Lakshmikanthan P., Sughosh P., Sivakumar Babu G. L., (2018). Studies on Characterization of Mechanically Biologically Treated Waste from Bangalore City. Indian Geotechnical Journal, Vol. 48, pp 293-304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0296-4>.

- Mondelli G., Juarez B. M., Jacinto C., De Oliveira M. A., Gomes Coelho L. H., Biancardi C. B., De Castro Faria J. L., (2022). Geo-environmental and geotechnical characterization of municipal solid waste from the selective collection in São Paulo city, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp 19898–19912. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18281-w>.
- Petrović I., Szavits-Nossan V., Štuhec D., (2010). Laboratorijska ispitivanja mehaničko-biološki obrađenog otpada. *Građevinar*, Vol. 63(1), pp: 43-53.
- Petrovic I., Kaniski N., Hrnčić N., Hip I., (2022). Correlations between field capacity, porosity, solid particle density and dry density of a mechanically and biologically (biodried) treated reject waste stream. *Bioresource Technology Reports*. Vol. 17. ISSN 2589-014X, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100996>.
- Pimolthai P., (2010). Comparative study of physical and chemical characteristics of the mechanically and biologically treated waste from Luxembourg, Germany and Thailand, PhD Dissertation.
- Pulat H. F. i Yukselen Aksoy Y., (2013). Composition and degradation effects on the compaction characteristics of municipal solid wastes. *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*-Manassero et al. (Eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978 1 138 00060 5. DOI: 10.1201/b15004-40.
- Reddy C., S., Mohanty S., Shaik R., (2018). Physical, chemical and geotechnical characterization of fly ash, bottom ash and municipal solid waste from Telangana State in India. *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 9(23), <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0093-z>.
- Rose J. L., Izzo R. L. S., Mahler C. F., (2009). Effect of MSW compost-soil mixtures in compaction and permeability tests. In: *Proc. of the Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.
- Sudarshana C. K. F., (2011). Shear Strength Characteristics of Mechanically Biologically Treated (MBT) Waste, PhD dissertation, University of Southampton Faculty of Engineering and the Environment, School of Civil Engineering and the Environment.

Tiwari D., (2014). Estimation of optimum compaction level for bioreactor landfill operation. PhD dissertation. Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington. Published by ProQuest LLC (2015).

5) KOLAPSIBILNO PONAŠANJE BMO OTPADA

5.1 Sažetak poglavlja

U posebno dizajniranom edometru promjera 150 mm u laboratoriju za mehaniku otpada Geotehničkog fakulteta ispitana je stišljivost i kolapsibilno ponašanje metanogene frakcije koja je prošla postupak biološke i mehaničke obrade u Županijskom centru za gospodarenje otpadom, Mariščina. Ukupno je ispitano četiri uzorka (dalje u tekstu uzorci #1-4) u različitim uvjetima od čega su uzorci #1-3 opterećeni u sedam 24-satnih vertikalnih inkremenata (tzv. kratkotrajni pokusi), dok je uzorak #4 opterećen u pet vertikalnih inkremenata te potom podvrgnut dugotrajnom pokusu mehaničkog puzanja i biokompresije. Uzorak #1 ispitivan je u suhom stanju, uzorak #2 ispitivan je u vlažnom stanju, uzorak #3 ispitivan je početno u suhom stanju, a nakon nanošenja vertikalnog naprezanja od 74,2 kPa u uzorak je dodana otopina vode, propionske i octene kiseline čime je spriječena biorazgradnja te je dalje u inkrementima opterećivan do maksimalnog vertikalnog naprezanja od 119,5 kPa. Uzorak #4 ugrađen je u ćeliju edometra i ispitivan u identičnim uvjetima kao i uzorak #3 do maksimalnog naprezanja od 74,2 kPa koje je potom ostalo konstantno do okončanja pokusa (365 dana ukupno). Ukupna vertikalna deformacija uz maksimalno vertikalno naprezanje od 119,5 kPa za uzorak #1 iznosi 31,3%, za uzorak #2 52,32%, a za uzorak #3 prije vlaženja pri 74,2 kPa 28,73%, 24 h nakon vlaženja pri naprezanju od 74,2 kPa 49,54% a pri ukupnom vertikalnom naprezanju od 119,5 kPa 54,39%. Uzorak #4, 24 h nakon primjene maksimalnog vertikalnog naprezanja od 74,2 kPa, prije vlaženja dao je vertikalnu deformaciju od 21,38%, a na kraju pokusa pri 74,2 kPa (nakon 365 dana) ukupnu vertikalnu deformaciju od 44,66%. Dobiveni rezultati ukazuju da metanogena frakcija u vlažnom stanju daje puno više vrijednosti vertikalnih deformacija. Vlaženjem uzoraka #3 i #4 nakon vertikalnog naprezanja od 74,2 kPa pojavom većih slijeganja uz konstantno opterećenje potvrđeno je kolapsibilno ponašanje metanogene frakcije uzrokovano povećanom stišljivošću navlaženih čestica otpada.

Rezultati pokusa prikazani su kroz adekvatne module stišljivosti M_v , indeks primarne kompresije C_c , indeks sekundarne kompresije C_α i indeks biokompresije $C_{\alpha B}$ metanogene frakcije BMO otpada, kao i kroz njihove modificirane vrijednosti C'_c , C'_α i $C'_{\alpha B}$. Dobiveni pokazatelji kompresije materijala iz ŽCGO Mariščine kritički su evaluirani u odnosu na rezultate drugih autora.

Budući da su dobiveni indeksi inicijalne kompresije C_c uzoraka #1-4 u vlažnom stanju materijala mnogo viši od onih u suhom stanju može se očekivati veća stišljivost metanogene frakcije nakon vlaženja materijala u biorektorskom odlagalištu koji se u tijelo odlagališta ugrađuje u suhom stanju.

U dugotrajnom pokusu #4 uočene su četiri karakteristične faze slijeganja bioosušenog otpada: inicijalno slijeganje, slijeganje uzrokovano vlaženjem, mehaničko puzanje te puzanje uslijed biorazgradnje. Najveći udio u ukupnom slijeganju (ukupno slijeganje iznosi 28,09 mm) uzorka #4 ima slijeganje nakon prva četiri inkrementa prije vlaženja s 47,88% (slijeganje iznosi 13,45 mm), slijeganje 24 sata nakon vlaženja (slijeganje iznosi 9,53 mm) doprinosi s 33,93% ukupnim slijeganjima, slijeganje uslijed mehaničkog puzanja (slijeganje iznosi 3,22 mm) doprinosi s 11,46% dok slijeganje uslijed biorazgradnje (slijeganje iznosi 1,89 mm) doprinosi s 6,73%. Osim slijeganja, u uzorku #4 kontinuirano su mjereni temperatura i plinovi kroz 365 dana pokusa. Pokusom je utvrđeno da su slijeganja uslijed biorazgradnje uočena isključivo u anaerobnoj, metanogenoj fazi.

5.2 Uvod

Nakon biološke i mehaničke (dalje u tekstu BMO) komunalnog čvrstog otpada u postrojenju, određeni dio materijala iz procesa obrade mora se odložiti na odlagalište. Budući da BMO postrojenje u biološkom dijelu obrade komunalnog otpada koristi biosušenje, jedan od konačnih tokova otpada s visokim udjelom organske tvari naziva se metanogena frakcija. Nakon provedenog postupka biosušenja, metanogena frakcija ima udio vlažnosti (u odnosu na ukupnu masu) manji od 20% te se odlaže na biorektorsko odlagalište do popunjenja kapaciteta odlagališne plohe. Tako odložen materijal, nakon zatvaranja se vlaži kako bi se ubrzala mikrobiološka aktivnost koja potiče proizvodnju bioplina. Budući da u biorektorskom odlagalištu uslijed recirkulacije dolazi do povećanja razine procjedne vode, istovremeno se povećava zapreminska težina, a efektivna se naprezanja smanjuju. Ovi čimbenici, zajedno sa simultanim povećanjem stišljivosti čestica otpada uslijed vlaženja, uzrokovat će pojavu znatnih slijeganja tijela odlagališta. Budući da su slijeganja odloženog otpadnog materijala nakon vlaženja očekivana, poznavanje svojstava njegove stišljivosti u suhim uvjetima prilikom ugradnje materijala kao i u vlažnim uvjetima nakon početka proizvodnje bioplina od velikog je značaja za kvalitetno upravljanje biorektorskim odlagalištem.

U svrhu ispitivanja stišljivosti metanogene BMO frakcije otpada izrađen je edometar promjera ćelije 15 cm. Izrađeni edometar omogućuje ispitivanje stišljivosti materijala pod stalnim vertikalnim opterećenjem uzrokovanim gravitacijskom silom. Za potrebe ovog istraživanja u izrađenom edometru provedena su tri kratkotrajna i jedan dugotrajni edometarski pokus. Pokusima su simulirane različite faze rada bioreaktorskog odlagališta koje prihvaća BMO metanogenu frakciju otpada. To su: 1. faza rada bioreaktorskog odlagališta - odlaganje materijala u suhom stanju; 2. faza rada bioreaktorskog odlagališta - vlaženje predopterećnog materijala ugrađenog u suhom stanju; 3. faza rada bioreaktorskog odlagališta - postignuto je potpuno zasićenje odloženog otpada; 4. faza rada bioreaktorskog odlagališta - intenzivna proizvodnja bioplina praćena mehaničkim puzanjem i biorazgradnjom metanogene frakcije.

5.3 Teorijska podloga

Stišljivost je svojstvo nekog materijala da se uslijed dodatnog opterećenja smanjuje njegov volumen, odnosno dolazi do deformacije. Vrlo često se smanjenje volumena materijala događa zbog promjene volumena pora, dok se kod otpadnih materijala može dogoditi i zbog promjene volumena čvrstih čestica budući da otpad posjeduje čestice veće stišljivosti kao npr. otpadno drvo, kruta plastika, metal i slično i manje stišljivosti kao npr. papir, fleksibilna plastika, tekstil i slično.

Stišljivost se u laboratoriju najčešće ispituje u edometru. Edometar je uređaj razvijen za potrebe mehanike tla u kojem se u laboratoriju simuliraju uvjeti jednodimenzionalne kompresije sa spriječenim bočnim širenjem kakvi se događaju i na terenu. Tijekom pokusa u edometru, mijenja se vertikalno opterećenje na uzorku u 24 satnim inkrementima pri čemu se kontinuirano mjeri promjena visine uzorka, tj. njegovo slijeganje (vertikalna deformacija). Standardni edometarski pokus traje nekoliko dana te se u kontekstu ispitivanja stišljivosti otpada ovakav pokus može smatrati kratkotrajnim ispitivanjima.

Slijeganje zasićenog otpada uobičajeno se dijeli na tri glavna dijela, a to su: incijalno, primarno i sekundarno slijeganje (Powrie i sur., 2019). Dok se inicijalno slijeganje uglavnom odnosi na stišljivost čestica i smanjenje pornog prostora, primarno slijeganje uzrokovano je istiskivanjem vode ili fluida iz pora odnosno, procesom konsolidacije. Sekundarna slijeganja nastaju uslijed biorazgradnje organskog dijela materijala te reološkim puzanjem.

Iz rezultata edometarskog pokusa, za svako vertikalno opterećenje, može se izračunati pripadna relativna deformacija Jednadžbom (38).

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (38)$$

Gdje je ε relativna deformacija, ΔH pripadna promjena visine uzorka i H_0 početna visina uzorka.

Budući da su u mehanici tla čestice čvrste, nestišljive, deformacija se događa uslijed promjene volumena pora. Za otpad ne postoje standardizirani postupci ispitivanja u laboratoriju, a relacije koje se odnose na mehaniku tla koriste se u interpretaciji rezultata mjerenja otpada. Ukoliko se pretpostavi da u otpadu do promjene visine dolazi isključivo zbog smanjenja volumena pora ΔV , vrijedi Jednadžba (39).

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{(1+e_0)} \quad (39)$$

Gdje je V_0 početni volumen uzorka, e_0 početni koeficijent pora, a Δe promjena koeficijenta pora. Promjena koeficijenta pora Δe računa se Jednadžbom (40).

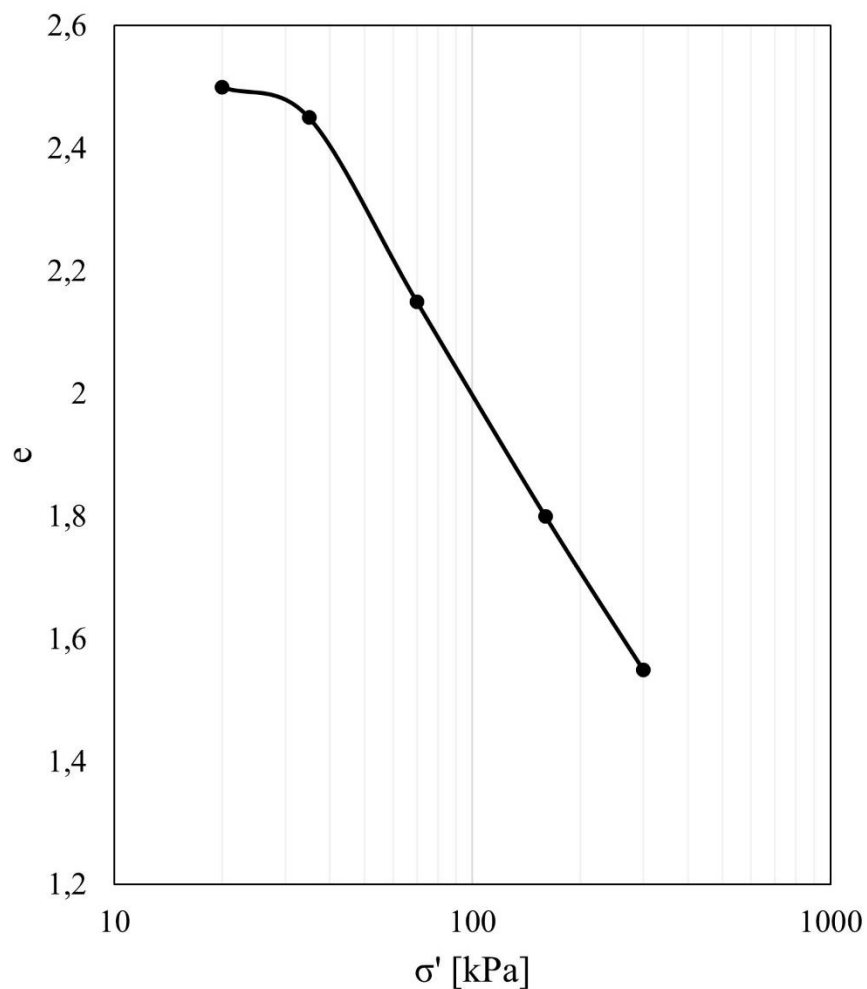
$$\Delta e = (1 + e_0) \times \varepsilon \quad (40)$$

Gdje je e_0 početni koeficijent pora.

Uvrštavanjem Jednadžbe (38) u Jednadžbu (40) i rješavanjem po ΔH dobiva se izraz za promjenu visine uzorka, odnosno slijeganje ($\Delta H = \Delta s$):

$$\Delta s = \frac{\Delta e}{(1+e_0)} \times H_0 \quad (41)$$

Rezultati edometarskog pokusa prikazuju se u polulogaritamskom mjerilu tzv. edometarskim dijagramom. Opća edometarska krivulja prikazana je na Slici 68. Na osi apscise nalazi se vertikalno efektivno naprezanje σ' u logaritamskom mjerilu, dok je na osi ordinate koeficijent pora e .



Slika 68. Tipična edometarska krivulja

Vertikalno naprezanje σ definirano je kao omjer sile P [N] i površine A [m²] na koju sila djeluje. Jednadžbom (42).

$$\sigma = \frac{P}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (42)$$

Efektivna naprezanja su razlika između ukupnog naprezanja σ i pornog tlaka u (Jednadžba 43). Navedena relacija vrijedi samo kod potpuno zasićenih uzoraka.

$$\sigma' = \sigma - u \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (43)$$

Za potrebe izračuna stupnja zasićenosti, korištena je Jednadžba (44):

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w \times \rho_s}{e} \quad (44)$$

gdje je V_w volumen vode u uzorku, V_v volumen pora, w je vlažnost uzorka, ρ_s specifična gustoća čvrstih čestica uzorka, e je koeficijent pora.

Gustoća materijala definirana je Jednadžbom (45)

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (45)$$

gdje je m masa uzorka u prirodnom stanju, a V ukupan volumen uzorka.

Suha gustoća, Jednadžba (46):

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (46)$$

gdje je m_s masa suhog uzorka, a V je ukupan volumen uzorka.

Parametri koji se uobičajeno koriste za procjenu količine inicijalnog i sekundarnog slijeganja unutar tijela odlagališta mogu biti definirani relativnom deformacijom ili pak koeficijentom pora. Mnogi autori češće koriste modificirane koeficijente kompresije koji su definirani relativnom deformacijom budući da se taj parametar direktno mjeri u laboratoriju. Parametri definirani preko relativne deformacije su modificirani indeks inicijalne kompresije C'_c definiran Jednadžbom (47), modificirani indeks sekundarne kompresije C'_α definiran Jednadžbom (48), modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s procesom razgradnje materijala $C'_{\alpha B}$ definiran Jednadžbom (49) te modificirani indeks rekompresije C'_r definiran Jednadžbom (50). Parametri definirani preko koeficijenta pora su indeks inicijalne kompresije C_c , definiran Jednadžbom (51), indeks sekundarne kompresije C_α definiran Jednadžbom (52), indeks sekundarne kompresije povezan s procesom razgradnje materijala $C_{\alpha B}$ definiran Jednadžbom (53) te indeks rekompresije C_r definiran Jednadžbom (54).

$$C'_c = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (47)$$

pri čemu je $\Delta \varepsilon$ pripadna promjena vertikalne deformacije, a $\Delta \log \sigma'_v$ je pripadni inkrement vertikalnog naprezanja.

$$C'_\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\log t/t_m} \quad (48)$$

pri čemu je $\Delta\varepsilon$ pripadna promjena vertikalne deformacije, t_m je pripadno vrijeme završetka inicijalnog slijeganja, a t je vrijeme.

$$C'_{\alpha B} = \frac{\Delta\varepsilon}{\log t/t_b} \quad (49)$$

gdje je $\Delta\varepsilon$ pripadna promjena vertikalne deformacije, t_b je referentno vrijeme za kompresiju izazvanu razgradnjom.

$$C'_r = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (50)$$

pri čemu je $\Delta\varepsilon$ pripadna promjena vertikalne deformacije u fazi rekompresije, a $\Delta \log \sigma'_v$ je pripadni inkrement vertikalnog naprezanja u fazi rekompresije.

$$C_c = \frac{|-\Delta e|}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (51)$$

pri čemu je Δe pripadna promjena koeficijenta pora, a $\Delta \log \sigma'_v$ je pripadni inkrement vertikalnog naprezanja.

$$C_\alpha = \frac{|-\Delta e|}{\log t/t_m} \quad (52)$$

pri čemu je Δe pripadna promjena koeficijenta pora, a t_m je pripadno vrijeme mehaničkog puzanja.

$$C_{\alpha B} = \frac{|-\Delta e|}{\log t/t_b} \quad (53)$$

gdje je Δe pripadna promjena koeficijenta pora, a t_b je referentno vrijeme za kompresiju izazvanu razgradnjom.

$$C_r = \frac{|-\Delta e|}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (54)$$

pri čemu je Δe pripadna promjena koeficijenta pora, a $\Delta \log \sigma'_v$ je pripadni inkrement vertikalnog naprezanja.

Veza između indeksa sekundarne kompresije $C_{\alpha B}$ i modificiranog indeksa sekundarne kompresije $C'_{\alpha B}$ povezanih s procesom razgradnje materijala prikazan je Jednadžbom (55).

$$C_{\alpha B} = C'_{\alpha B}(1 + e_0) \quad (55)$$

gdje je e_0 početni koeficijent pora.

Modul stišljivosti, M_v , za inkrement naprezanja između dva stanja opterećenja definiran je Jednadžbom (56):

$$M_v = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon} \quad (56)$$

gdje je $\Delta\sigma'_v$ inkrement vertikalnog efektivnog naprezanja [kPa], a $\Delta\varepsilon$ je pripadna promjena vertikalne deformacije nakon 24 h opterećenja na uzorku.

FORE (first order rate equation) – metoda:

FORE metoda koristi se za određivanje vremena kraja primarnog i početka sekundarnog slijeganja, a detaljno je opisana u radu Handy (2002), dok je njezina primjena na otpadu detaljnije predstavljena u radu Bareither i sur., (2012a). Prema Bareitheru i sur., (2012a) mehaničko puzanje može se prikazati u polulogaritamskom mjerilu modificiranim indeksom sekundarne kompresije C'_α . Prema tome, eksperimentalno izmjereni podaci aproksimirani s FORE jednadžbom koji se podudaraju s dijelom eksperimentalnih podataka predstavljenih pravcem u polulogaritamskom mjerilu odnose se na mehaničko puzanje. Slijedom navedenog, početak sekundarnog slijeganja, odnosno kraj primarnog slijeganja, nazvan end-of-time (EOT), grafički se utvrđuje na mjestu gdje započinje devijacija aproksimacijske FORE krivulje i pravca u polulogaritamskom mjerilu.

Proizvodnja bioplina:

U bioreaktorskim odlagalištima glavni cilj je proizvodnja bioplina iz odložene metanogene frakcije otpada, pa je poznavanje sastava i kvalitete plinova koji nastaju vrlo važno za pravilno upravljanje odlagalištem te za planiranje kapaciteta odlagališnog plina za proizvodnju energije. Odlagališni plin je prema definiciji plin koji nastaje u anaerobnim uvjetima, a najčešće dolazi kao smjesa plinova zajedno sa zrakom. Iz tog razloga, sastav odlagališnog plina je promjenjiv i ovisan o lokaciji i vremenu. Prema Rettenberger (2018) u radu Cossu i Stegmann (2019) postoji šest vrsta odlagališnih plinova koji ovise o načinu izvlačenja plina i njegovog miješanja sa zrakom (Tablica 41).

Tablica 41. Sastav odlagališnih plinova Cossu i Stegmann (2019) s obzirom na postupak (vrstu) ekstrakcije plina iz tijela odlagališta

Vrsta	(CH ₄) %	(CO ₂) %	(O ₂) %	(N ₂) %
1	56	43		
2	34	25	1	38
3	34	25	8	32
4	34	25	3	37
5	12	14	5	69
6	3	5	8	84

Tip 1: predstavlja sastav plinova u idealnim uvjetima u fazi IV, bez izvlačenja plinova iz odlagališta i ulaska zraka izvana, tipičan omjer metana i ugljikovog (IV) oksida 1,3-1,35.

Tip 2: predstavlja uvjete prekomjernog izvlačenja plinova iz odlagališta, koncentracije kisika i dušika su drugačije od onih u zraku, omjer metana i ugljikovog (IV) oksida je oko 1,3.

Tip 3: ulazak zraka kroz pukotine i prazne pore zbog prekomjernog izvlačenja plinova, koncentracije dušika i kisika su iste kao i u zraku, a omjer metana i ugljikovog (IV) oksida je oko 1,3.

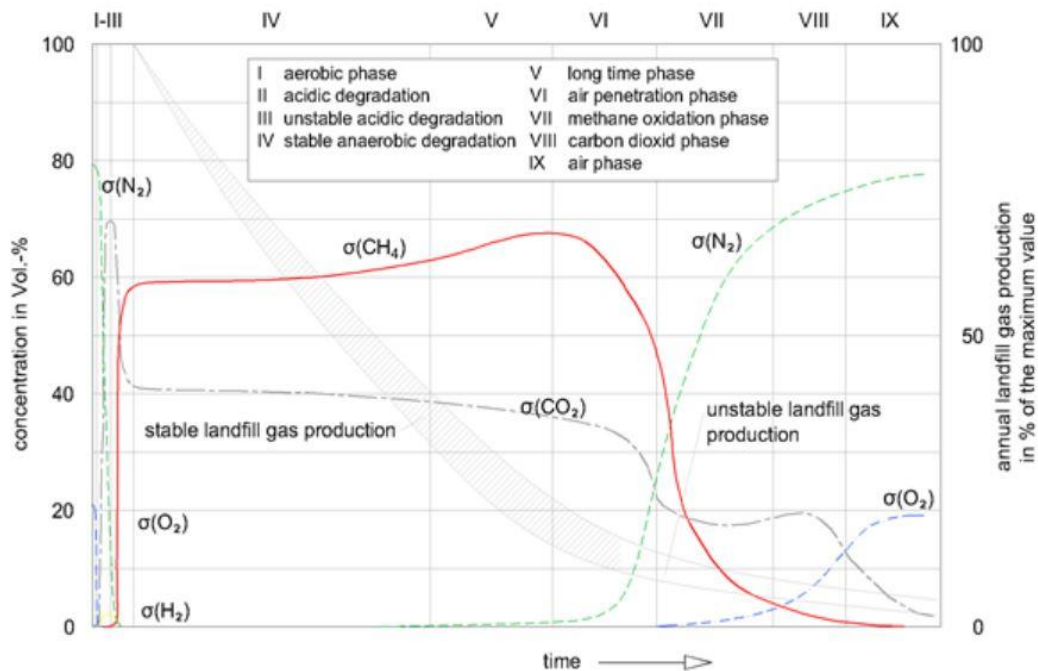
Tip 4: je mješavina Tipa 2 i 3.

Tip 5: uslijed prekomjernog izvlačenja plinova dolazi do velikog ulaska zraka, proizvodi se odlagališni plin manje kvalitete.

Tip 6: odlagališni plin iz odlagališta s aerobnim uvjetima, koncentracije dušika više u odnosu na koncentracije u zraku.

Koncentracije glavnih odlagališnih plinova kroz vrijeme za Tip 1 prikazane su na Slici 69. Razvoj odlagališnih plinova može se podijeliti u 9 dijelova ili faza koje se mogu vidjeti s gornje strane na Slici 69. U fazama I-III počinje razvoj plinova, u fazi IV nastaje stabilna proizvodnja plinova, pore odloženog otpada ispunjavaju se odlagališnim plinom, a na površini odlagališta se mogu zabilježiti emisije plinova. U fazi V, proizvodnja odlagališnog plina se smanjuje, ali uz još uvijek stabilnu proizvodnju. Smanjuje se udio lako razgradivih čestica otpada, a sastav plina se mijenja zbog promjene u sastavu otpada. U fazi VI, zbog smanjene proizvodnje odlagališnog plina, u tijelo odlagališta s površine u dublje dijelove ulazi zrak čime istovremeno ponovo nastaju aerobni uvjeti.

U fazi VII nastaje ugljikov (IV) oksid uslijed aerobnih uvjeta, a metan se troši uslijed mikrobioloških procesa. Omjer (CH_4):(CO_2) se smanjuje. U fazi VIII, tijelo odlagališta nalazi se u gotovo idealnim aerobnim uvjetima, a niske koncentracije ugljikovog (IV) oksida mogu se zabilježiti zbog manjih ostataka organskih tvari u otpadu. U fazi IX odlagalište je gotovo inertno, a sastav plinova će biti sličan kao i u tlu, zrak i manje koncentracije ugljikovog (IV) oksida.



Slika 69. Idealan sastav plinova u vremenu u tijelu odlagališta kada nema izvlačenja plinova (Tip 1) (preuzeto iz: Cossu i Stegmann, 2019) (Prijevod: Os x – time – vrijeme; Os y – concentration in Vol.-% – koncentracija u volumnim postocima)

Ovisno o izmjerenim koncentracijama pojedinih plinova, u odnosu na podatke prikazane u Tablici 41 upravitelji odlagališta mogu procijeniti u kojoj se fazi razgradnje trenutno nalazi odlagalište.

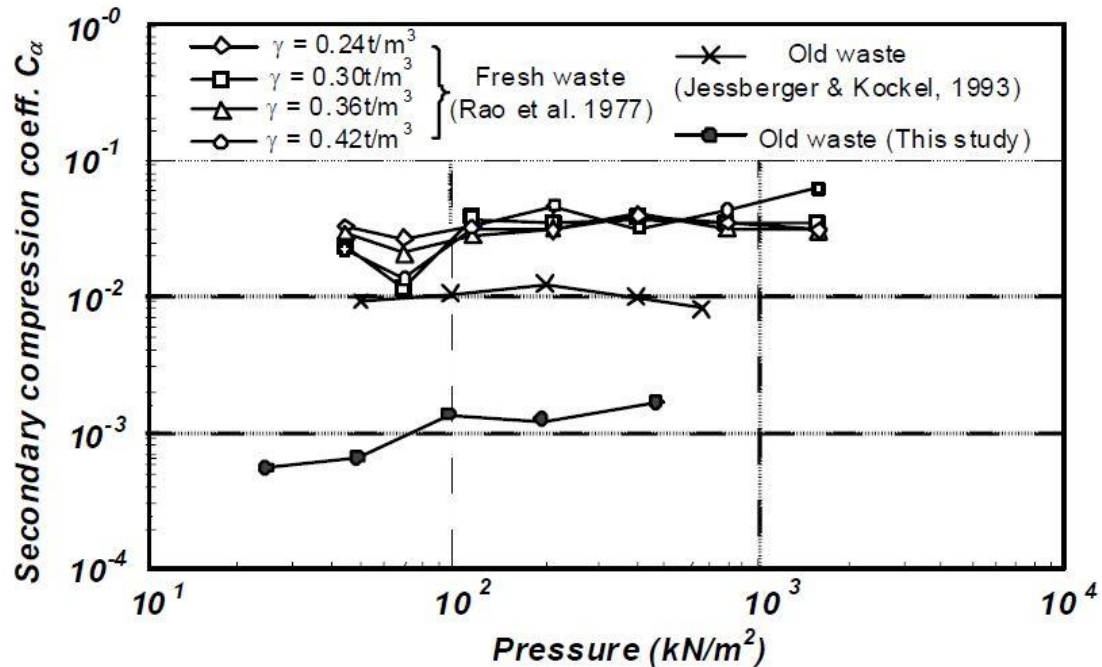
5.4 Pregled dosadašnjih istraživanja

5.4.1 Parametri stišljivosti neobrađenog otpada

Dok su mnogi autori istraživali kompresibilno ponašanje svježeg komunalnog čvrstog otpada (Jessberger i Kockel, 1993; Hossain, 2002; Münnich i sur., 2005; Chen i sur., 2009, 2010; Sivakumar Babu i sur., 2010; Stoltz i sur., 2010, Drut i sur., 2011; Bareither i sur., 2012a, 2012b, 2012c; Karimpour-Fard i Lemos Machado, 2012; Basha i sur., 2015; Reddy i sur., 2015; Zekkos i sur., 2016; Almohana i sur., 2017; Thakur i sur., 2019; Xu i sur., 2020; Jo i Jang, 2021; Xie i sur., 2022), zbog činjenice da proces MBO značajno mijenja mehanička svojstva komunalnog otpada, njihov se rezultat ne može izravno primijeniti na MBO otpadne materijale.

5.4.1.1 Modificirani indeks inicijalne kompresije C'_c , modificirani indeks sekundarne kompresije C'_α , modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s procesom razgradnje materijala $C'_{\alpha B}$, modificirani indeks rekompresije C'_r neobrađenog otpada

Hyun i sur., (2011) istraživali su utjecaj iznosa vertikalnog naprezanja i zapremine težine na modificirani koeficijent sekundarne kompresije neobrađenog otpada kojeg su autori označili s C_α iako se u ovom doktorskom radu ta oznaka koristi za indeks sekundarne kompresije. Ispitali su uzorkovani otpad s dvije lokacije odlagališta otpada Whamyung u Koreji s dvije različite dubine (2,5 i 3,5 m ispod površine), pri čemu je starost odloženog otpada procijenjena na više od 15 godina. Autori su zabilježili vrijednost modificiranog sekundarnog koeficijenta kompresije između 0,0003 i 0,0026, a izmjerene vrijednosti usporedili su i s ostalim istraživačima (Slika 70). Osim vlastitih istraživanja, Hyun i sur., (2011) prikazali su i rezultate svježeg neobrađenog otpada iz SAD-a (Rao i sur., 1977) te starog/odloženog otpada iz rada Jessberger i Kockel, (1993) koji su isto tako zaključili kako je modificirani koeficijent sekundarne kompresije prilično neosjetljiv na promjenu naprezanja.



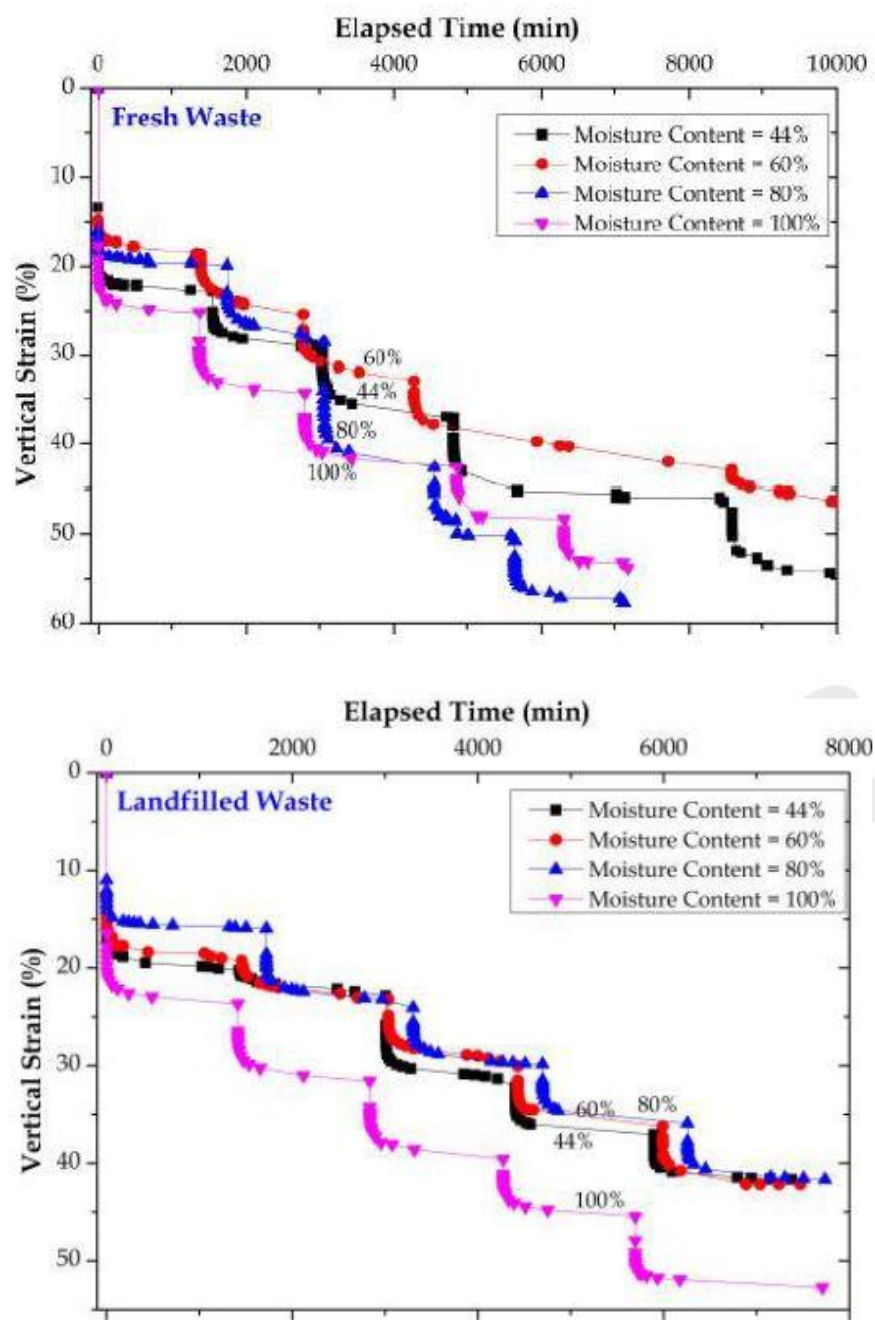
Slika 70. Utjecaj naprezanja, gustoće i stupnja razgradnje na modificirani koeficijent sekundarne kompresije C_α (Hyun i sur., 2011) (Prijevod: Os x – pressure (kN/m²) – naprezanje (kN/m²); Os y – secondary compression coeff. C_α – modificirani koeficijent sekundarne kompresije C_α)

Iz rezultata istraživanja može se zaključiti kako modificirani koeficijent sekundarne kompresije C_α nije značajno ovisan o zapreminskoj težini otpada kao i o iznosu vertikalnog naprezanja. Usporedbom s ostalim istraživačima utvrdili su da svježi otpad ima tri puta veći koeficijent sekundarne kompresije od otpadnog materijala odloženog tijekom duljeg razdoblja.

Karimpour-Fard i Machado, (2012) su predstavili rezultate ispitivanja stišljivosti u edometru velikog razmjera (548 x 497 mm) na uzorcima neobrađenog komunalnog čvrstog otpada s odlagališta otpada Metropolitan Center u Brazilu. Dobiveni modificirani indeksi primarne kompresije C'_c za uzorke 1-4 redom iznose 0,209, 0,361, 0,285 i 0,333 a mogu se vidjeti na Slici 73 u idućem poglavlju.

Pokus kratkotrajne i dugotrajne stišljivosti u edometru na svježem i starom/odloženom neobrađenom komunalnom otpadu iz SAD-a proveli su Basha i sur., (2015). Ispitali su utjecaj vlažnosti u uzorcima na parametre stišljivosti. Uzorci su pripremljeni na 44%, 60%, 80% i 100% vlažnosti te su ispitani pod inkrementima vertikalnog opterećenja od 48, 96, 192, 383 i 766 kPa.

Rezultati izmjerenih vertikalnih deformacija u vremenu za svježi (fresh waste) i stari/odloženi (landfilled waste) otpad prikazani su na Slici 71.



Slika 71. Odnos vertikalnih deformacija vs. vrijeme za svježi i stari neobrađeni komunalni otpad (Basha i sur., 2015) (Prijevod: Os x – elapsed time (min) – proteklo vrijeme u minutama; Os y – vertical strain (%) – vertikalno naprezanje (%))

Pregledom rezultata prikazanih na Slici 71 može se zaključiti da se povećanjem vlažnosti povećava i stišljivost materijala.

Pripadni rasponi vrijednosti modificiranih indeksa primarne i sekundarne kompresije za 4 uzorka prikazani su u Tablici 42.

Tablica 42. Raspon vrijednosti modificiranih primarnih i sekundarnih indeksa kompresije neobrađenog komunalnog otpada (Basha i sur., 2015)

Vrsta otpada	C'_c	C'_α
Svježi otpad	0,027-0,042	0,9
Razgrađeni otpad	0,027-0,038	0,09

Za potrebe usporedbe, Basha i sur., (2015) su u svom radu prikazali raspone vrijednosti modificiranih primarnih i sekundarnih indeksa kompresije različitih istraživača (Tablica 43).

Tablica 43. Vrijednosti modificiranih primarnih i sekundarnih indeksa kompresije neobrađenog komunalnog otpada različitih istraživača (Basha i sur., 2015)

Izvor	C'_c	C'_α
Sowers (1973)	0,10-0,41	0,02-0,07
Rao I sur. (1977)	0,16-0,235	0,012-0,046
Landva i sur. (1990)	0,2-0,5	0,0005-0,029
Burlingame (1985)	0,35	0,055
Oweis i Khera (1986)	0,08-0,217	-
	0,15-0,33	0,013-0,03
	0,25-0,3	0,07
Zaminskie i sur. (1994)	0,01-0,04	0,001-0,006
Boutwell i Fiore (1995)	0,09-0,19	0,006-0,012
Gabr i Valero (1995)	0,20-0,23	0,015-0,023
Stulgis i sur. (1995)	0,16	0,02
Wall i Zeiss (1995)	0,21-0,25	0,033-0,056
Landva i sur. (2000)	0,17-0,24	0,01-0,016
Machado i sur. (2002)	0,21	0,012-0,016
Marques i sur. (2003)	0,073-0,132	-
Hossain i sur. (2003)	0,16-0,37	0,015-0,03
Anderson i sur. (2004)	0,17-0,23	0,024-0,030
Vilar i Carlvalho (2004)	0,21	0,012-0,016
Durmusoglu i sur. (2006)	0,128-0,260	0,043-0,083

Sharma i De (2007)	-	0,01-0,07
	-	0,014
	-	0,03
	-	0,045
	-	0,014-0,06
	-	0,1-0,34
	-	0,1-0,34

Svježi i razgrađeni neobrađeni komunalni otpad s odlagališta otpada Orchard Hill u SAD-u ispitali su u laboratorijskom bioreaktoru Reddy i sur., (2015). Šest uzoraka ispitano je u anaerobnim uvjetima uz recirkulaciju procjedne vode u posebno dizajniranim bioreaktorskim ćelijama, pri čemu su uzorci S1-S6 bili u različitom stupnju razgradnje otpada kako bi ispitali utjecaj razgradnje na inženjerska svojstva otpadnog materijala. Stišljivost je ispitana u edometru promjera 63 mm i visine uzoraka 25 mm. Uzorci su ispitani u inkrementima od 96, 192, 383 i 766 kPa pri čemu je svaki trajao 24 h. Dugotrajni pokusi su provedeni u istim uvjetima, s jedinom razlikom što je posljednji inkrement bio 383 kPa i trajao je sve do kraja ispitivanja (15 dana). Zabilježene vertikalne deformacije uzoraka u kratkotrajnim ispitivanjima bila su redom 54, 52, 62, 53, 48 i 53% za uzorke S1-S6. Pripadni parametri stišljivosti izraženi su u obliku modificiranog primarnog i sekundarnog indeksa kompresije, C'_c i C'_α u ovisnosti o stupnju razgradnje (eng. degree of decomposition, oznaka u tekstu DOD). Pripadna jednadžba modificiranog primarnog indeksa kompresije C'_c izražena je Jednadžbom (57), uz R^2 vrijednost od 0,53, dok je pripadna jednadžba modificiranog sekundarnog indeksa kompresije C'_α u tom radu izražena Jednadžbom (58) pri čemu autori nisu objavili R^2 vrijednost.

$$C'_c = 0,2475 + 8,3 \times 10^{-4} \times \text{DOD} \quad (57)$$

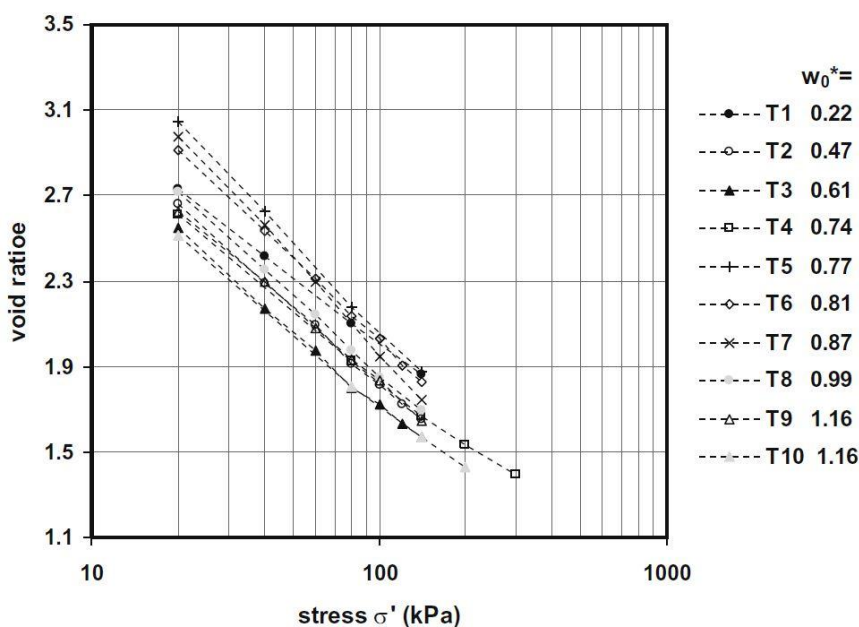
$$C'_\alpha = 0,01394 - 0,0000013 \times \text{DOD} \quad (58)$$

Powrie i sur., (2019) proučavali su mehaničko ponašanje i trajanje slijeganja odloženog neobrađenog komunalnog otpada u odlagalištima. Iz pokusa jednodimenzionalne kompresije na otpadu svježeg neobrađenog otpada iz Hangzhou, Kine, na uzorcima s različitim početnim koeficijentom pora zabilježeni su modificirani indeksi primarne kompresije C'_c što se može vidjeti

u idućem poglavlju na Slici 74. Modificirani indeks primarne kompresije na Slici 74 pokazuje slične vrijednosti pri različitim početnim koeficijentima pora. Za otpad sa značajnim udjelom organske tvari, modificirani indeks primarne kompresije C'_c prikupljen od spomenutih autora objavljen u literaturi od različitih istraživača kreće se između 0,2-0,47.

5.4.1.2 Indeks inicijalne kompresije C_c , indeks sekundarne kompresije C_{α} , indeks sekundarne kompresije povezan s procesom razgradnje materijala $C_{\alpha B}$, indeks rekompresije C_r neobrađenog otpada

Stoltz i sur., (2010) ispitali su svježi neobrađeni komunalni otpad s odlagališta otpada u Francuskoj. Razvili su specijalno dizajnirani edometar koji je ujedno funkcionirao i kao plinski piknometar. Usporedno s pokusima jednodimenzionalne kompresije mjerili su i poroznost, suhu gustoću i vlažnost uzoraka. Ukupno su ispitali 10 uzoraka (T1-T10) s inkrementima opterećenja od 20, 40, 80, 100 i 140 kPa od kojih je svaki trajao 24 h. Maksimalno trajanje pojedinog ispitivanja bilo je sedam dana, a rezultati su predstavljeni na Slici 72 u obliku tipične edometarske krivulje. Na Slici 72 w_0^* označava inicijalnu vlažnost izraženu gravimetrijski, no autori nisu objavili radi li se o vlažnosti iskazanoj na osnovi suhe ili vlažne mase.

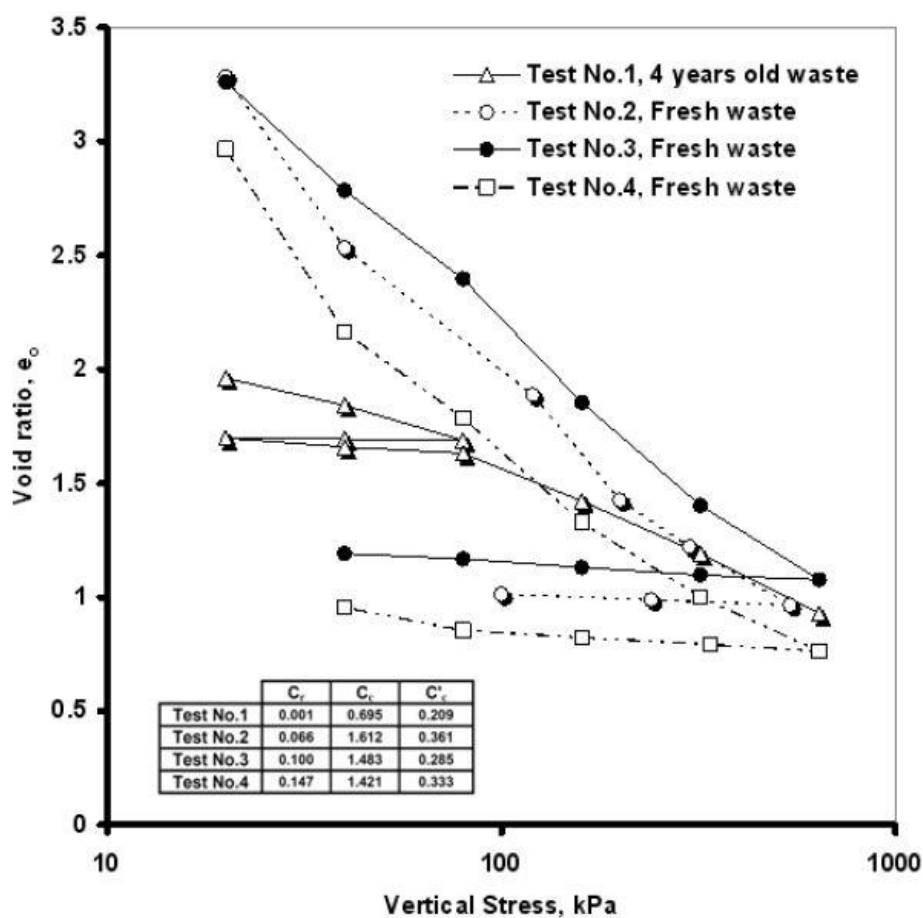


Slika 72. Stišljivost uzoraka neobrađenog komunalnog otpada (Stoltz i sur., 2010) (Prijevod:

Os x – stress σ' (kPa) – efektivno naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)

Indeksi kompresije C_c za uzorke T1-T10 kretali su se od najnižeg 1,03 za uzorak T1 do najvišeg za uzorak T7 od 1,48 sa srednjom vrijednosti od 1,22 i standardnom devijacijom od $\pm 0,14$.

Karimpour-Fard i Machado, (2012) su predstavili rezultate ispitivanja stišljivosti u edometru velikog razmjera (548 x 497 mm) na uzorcima neobrađenog komunalnog čvrstog otpada s odlagališta otpada Metropolitan Center u Brazilu. Dobivene edometarske krivulje prikazane su na Slici 73. Zajedno s odnosom koeficijenta pora i vertikalnim naprežanjem, na Slici 73 mogu se vidjeti i indeksi primarne kompresije C_c koji redom za uzorke 1-4 iznose 0,695, 1,612, 1,483 i 1,421 te indeksi rekompresije C_r koji za uzorke 1-4 redom iznose 0,001, 0,066, 0,100 i 0,147.

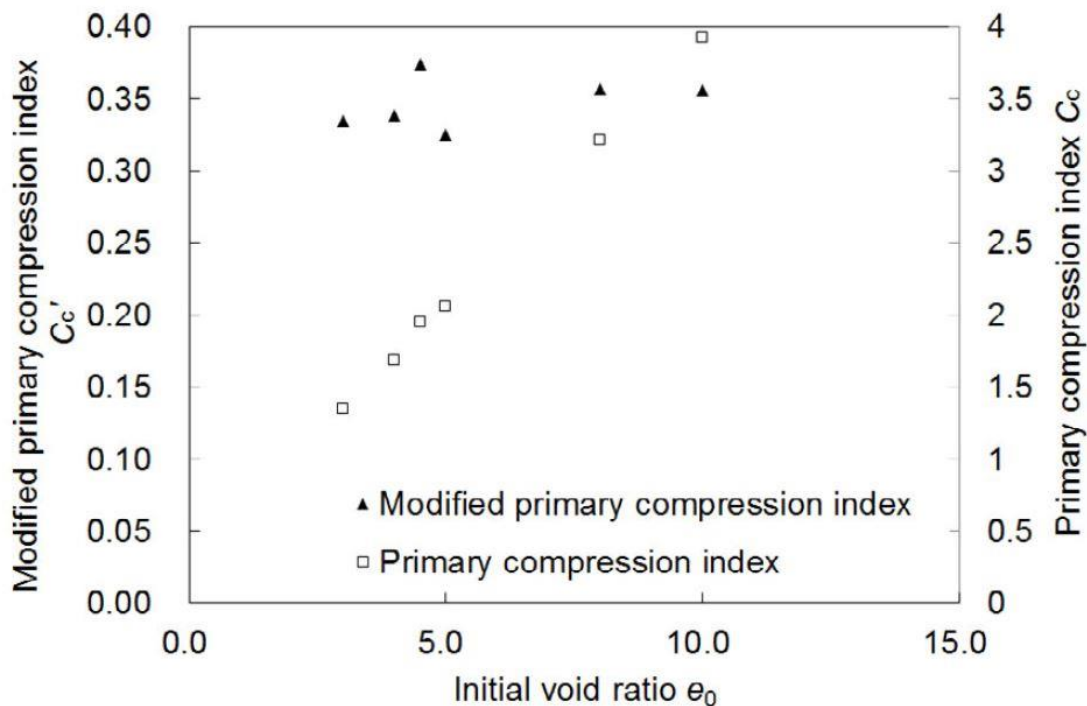


Slika 73. Krivulje stišljivosti različitih uzoraka neobrađenog komunalnog otpada (Karimpour-Fard i Machado, 2012) (Prijevod: Os x – vertical stress (kPa) – vertikalno naprežanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)

Zabilježeni indeksi sekundarne kompresije C_{α} koji nisu prikazani na Slici 73, u radu Karimpour-Fard i Machado (2012) za tri svježja uzorka iznose 0,0154, 0,0180, 0,0150, dok je za uzorak otpada starosti četiri godine indeks sekundarne kompresije 0,0126.

Zekkos i sur., (2016) su napravili opsežno eksperimentalno istraživanje na ukupno 143 uzoraka u pokusima jednodimenzionalne kompresije. Uzorci su uzorkovani s pet različitih odlagališta, od kojih se četiri nalaze u SAD-u, i jedno u Grčkoj. Autori su istraživali utjecaj strukture ugrađenog otpada, sastava otpada, zapreminske težine i vertikalnog naprezanja na parametre stišljivosti neobrađenog komunalnog čvrstog otpada. Rezultati su prikazani u obliku modula stišljivosti, indeksa inicijalne kompresije te indeksa sekundarne kompresije koji se odnosi na mehaničko puzanje, dok puzanje uslijed biorazgradnje u radu autora nije ispitivano. Iako je u ovom doktorskom radu indeks inicijalne kompresije označen s C_c , Zekkos i sur., (2016) su u svom radu utvrđeni indeks inicijalne kompresije označili s C_{cE} koji se kretao u rasponu od 0,01 do 0,26, dok se indeks sekundarne kompresije $C_{\alpha E}$ (indeks sekundarne kompresije u ovom doktorskom radu označen je s C_{α}) kretao u rasponu manjem od 0,001 do 0,014. Uzorci koji su imali velik udio sitnih čestica (<20 mm) sličnih tlu, kao i uzorci s visokom početnom gustoćom prilikom ugradnje pokazali su do 30% niže vrijednosti inicijalne vertikalne deformacije kao i niže C_{cE} (do 0,15). Uzorci otpada koji imaju veći udio sitnih čestica (<20 mm) i veću inicijalnu vrijednost gustoće kod ugradnje pokazuju veću vrijednost modula stišljivosti, odnosno krući su.

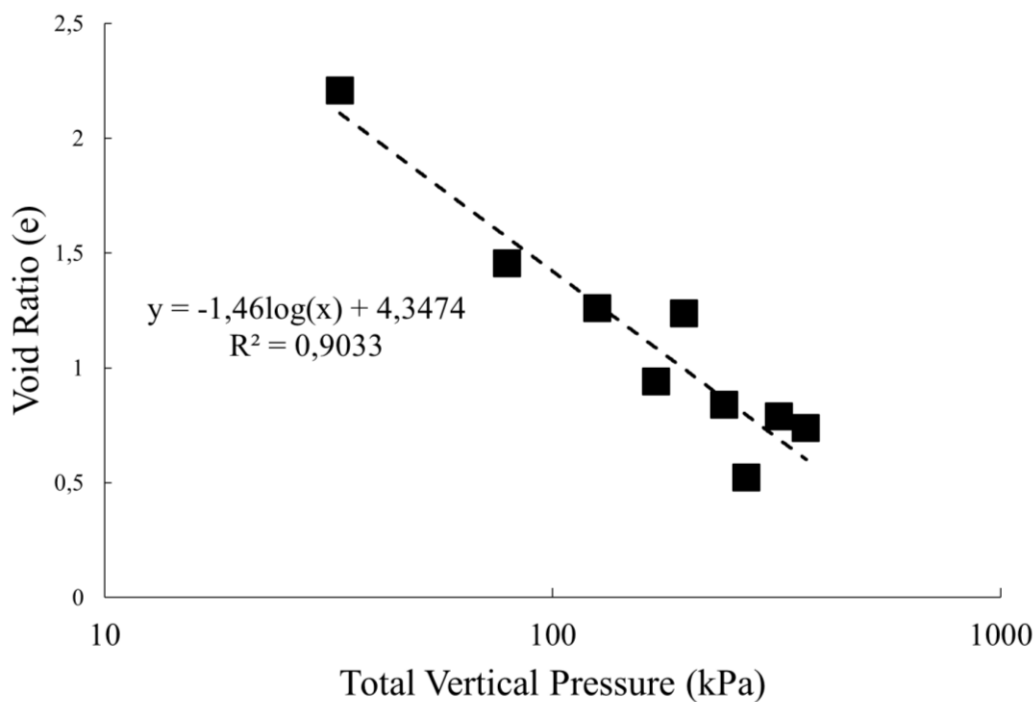
Powrie i sur., (2019) proučavali su mehaničko ponašanje i trajanje slijeganja odloženog neobrađenog komunalnog otpada u odlagalištima. Objavili su vrijednosti modula stišljivosti između 200 i 6000 kPa, pri čemu su niže vrijednosti modula stišljivosti pripisane manjoj gustoći materijala i povećanom udjelu organske tvari i vode. Iz pokusa jednodimenzionalne kompresije na otpadu svježeg neobrađenog otpada iz Hangzhou, Kine, na uzorcima s različitim početnim koeficijentom pora (oznaka na Slici 74 initial void ratio) zabilježeni su indeksi primarne kompresije C_c (oznaka na Slici 74 primary compression index).



Slika 74. Odnos između indeksa primarne kompresije /modificiranog indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta pora (Powrie i sur., 2019) (Prijevod: Os x – initial void ratio e_0 – početni koeficijent pora e_0 ; Os y – modified primary compression indeks C'_c – modificirani koeficijent primarne kompresije C'_c)

Sa Slike 74, vidljivo je da je indeks primarne kompresije ovisan o početnom koeficijentu pora.

Hartwell i sur., (2020) su neobrađeni komunalni otpad s odlagališta otpada u SAD-u uzorkovali uz pomoć bušotine dubine 28 metara u 9 segmenata. Zabilježili su indeks primarne kompresije C_c od 1,26 za cijelu visinu materijala iz bušotine (Slika 75). Srednja vrijednost modificiranog indeksa primarne kompresije iznosi 0,38 uz standardnu devijaciju od $\pm 0,051$ za 9 segmenata bušotine s otpadom.



Slika 75. Ovisnost koeficijenta pora o naprezanju iz bušotina (Hartwell i sur., 2020) (Prijevod: Os x – total vertical pressure (kPa) – ukupno vertikalno naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)

Sumarni prikaz rezultata indeksa inicijalne kompresije C_c različitih istraživača za neobrađeni otpad prikazan je u Tablici 44.

Tablica 44. Indeksi primarne kompresije različitih istraživača

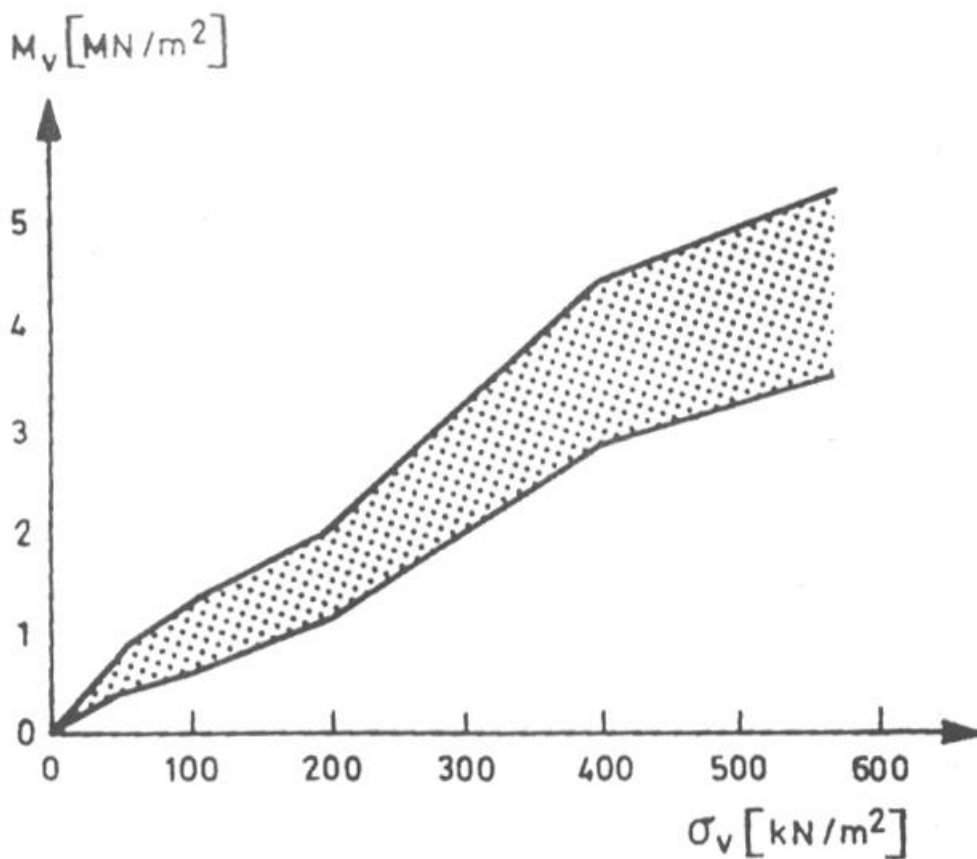
Izvor	e_0	C_c
Karimpour-Fard (2012)	1,96	0,695
	2,97	1,421
	3,28	1,612
	3,27	1,483
Chen i sur., (2009)	0,70	0,26
	3,76	1,36
Stoltz i sur., (2010)	2,83	1,03
	3,12	1,2
	2,98	1,17
	2,86	1,12
	3,17	1,4

	3,05	1,29
	3,05	1,48
	2,86	1,22
	3,03	1,16
	2,83	1,13
Sowers, (1973)	2,51	0,26
	3,51	0,49
	3,51	1,18
	4,00	0,61
	4,50	1,01
	4,50	1,48
	4,75	1,29
	4,75	0,92
	5,00	0,64
	5,00	0,92
	5,25	0,99
	5,27	1,60
	5,27	1,98
	5,00	2,49
	8,32	4,40
	8,32	2,99
	9,00	4,19
	10,02	4,75
	15,51	5,51
	13,00	3,01
Powrie i sur., (2019)	3,00	1,34
	3,97	1,68
	4,49	1,96
	4,99	2,06
	8,00	3,22
	9,98	3,94

Indeks inicijalne kompresije C_c neobrađenog otpada iz Tablice 44 kreće se u rasponu od 0,26 do 5,51 sa srednjom vrijednošću od 1,76 i standardnom devijacijom od $\pm 1,24$.

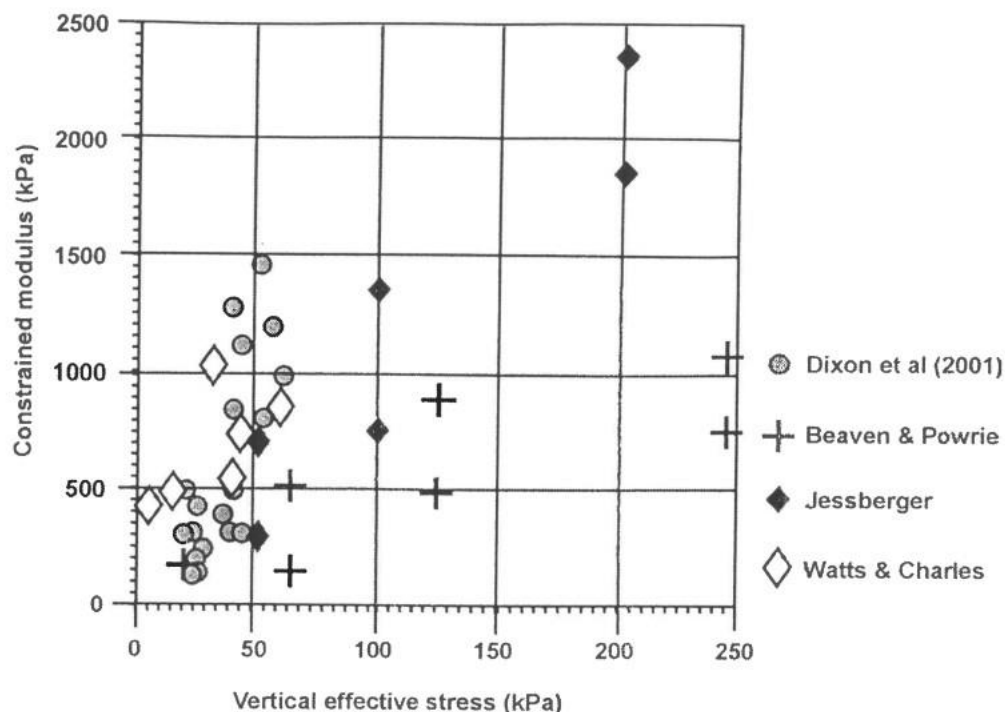
5.4.1.3 Modul stišljivosti M_v

Jessberger i Kockel (1993) su laboratorijskim ispitivanjima neobrađenog komunalnog otpada u edometru iz dobivenih edometarskih krivulja prikazali područje vrijednosti tangenčnih modula stišljivosti (Slika 76).



Slika 76. Područje vrijednosti modula stišljivosti komunalnog otpada (Jessberger i Kockel, 1993)
(Prijevod: Os x – σ_v (kN/m^2) –vertikalno naprezanje (kN/m^2); Os y – M_v (MN/m^2)– modul
stišljivosti (MN/m^2))

Jones i Dixon, (2003) su objavili tehničko izvješće u kojem su izradili pregled literature o mehaničkim parametrima neobrađenog otpada. Prikazali su odnos modula stišljivosti o primijenjenom vertikalnom naprezanju prema Dixon i sur., (2001) za neobrađeni komunalni otpad od različitih istraživača (Slika 77).



Slika 77. Modul stišljivosti u odnosu na primijenjeno naprezanje (Jones i Dixon, 2003)
 ((Prijevod: Os x – vertical effective stress (kPa) –vertikalno efektivno naprezanje (kPa); Os y –
 constrained modulus (kPa)– modul stišljivosti (kPa))

Modul stišljivosti sa Slike 77 kreće se u širokom rasponu od 100 kPa do 2400 kPa uz nešto užu raspon vertikalnog efektivnog naprezanja koje se kreće od 0 kPa do 200 kPa. Sa Slike 77 može se zaključiti da povećanjem vertikalnog efektivnog naprezanja raste i modul stišljivosti.

5.4.2 Parametri stišljivosti obrađenog otpada

S vremenom je znanstveni interes za kompresibilno ponašanje biostabiliziranog MBO otpada postao sve rašireniji. Mnogi istraživači su također bili uključeni u ispitivanje biostabiliziranog MBO otpada. Najranije radove uglavnom su objavili znanstvenici na engleskom, njemačkom i talijanskom jeziku, npr. Bidlingmaier i sur., (1999), Duellmann, (2002), Carrubba i Cossu, (2003), Heiss-Ziegler i Fehrer, (2003), Münnich i sur., (2005) te Bauer i sur., (2006). Sumarni prikaz ranih istraživanja mehaničkih parametara MBO otpada objavljenih na njemačkom jeziku može se naći u Kuehle-Weidemeier, (2007).

5.4.2.1. Modificirani indeks inicijalne kompresije C'_c , modificirani indeks sekundarne kompresije C'_α , modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s procesom razgradnje materijala $C'_{\alpha B}$, modificirani indeks rekompresije C'_r obrađenog otpada

Mehanička svojstva bioosušenog otpada iz postrojenja za BMO otpada objavili su Zhang i sur., (2020). Autori su proučavali stišljivost BMO otpada. U biološkom dijelu obrade, komunalni otpad iz Kine obrađen je sušenjem u trajanju od 9 dana. Provedena su kratkotrajna i dugotrajna ispitivanja stišljivosti na dva uzorka, od koji je M1 uzorkovan u zimskom periodu, a M2 u ljetnom. Iznos primijenjenog vertikalnog naprezanja u inkrementima na uzorak u kratkotrajnim ispitivanjima bio je redom: 25, 50, 100, 200, 400 i 600 kPa od kojih je svaki inkrement trajao 48 h. U dugotrajnim pokusima vertikalno naprezanje na uzorku iznosilo je 100 kPa i bilo je konstantno svih 300 dana ispitivanja. Suha gustoća ugrađenih uzoraka prije inkrementalnog opterećenja u kratkotrajnim i dugotrajnim pokusima kretala se između 0,33 i 0,40 g/cm³, a to su vrijednosti koje odgovaraju stanju suhe gustoće na odlagalištu Tianziling u Hangzhou u Kini.

Vrijeme trajanja inicijalnog slijeganja u kratkotrajnim pokusima uzoraka M1 i M2 kretalo se između 15,17 i 36,67 sati.

Rezultati dugotrajnih pokusa prikazani su u Tablici 45.

Tablica 45. Rezultati dugotrajnog pokusa stišljivosti uzoraka M1 i M2 (Zhang i sur., 2020)

Stupanj naprezanja	Parametri uzorka	M1	M2
Inicijalno slijeganje	Deformacija	0,096	0,184
Mehaničko puzanje	Trajanje (dani)	118	62
	Deformacija	0,043	0,018
	C'_{ac}	0,018	0,012
Puzanje uslijed biorazgradnje	Trajanje (dani)	182	152
	Deformacija	0,080	0,084
	C'_{ab}	0,174	0,143
Završno mehaničko puzanje	Trajanje (dani)	-	86
	Deformacija	-	0,004
	C'_{ac}	-	0,010
	w_{of} (%)	18,22 $\pm$ 2,11	20,65 $\pm$ 2,45

w_{of} – udio organske tvari na kraju pokusa

Objavljeni modificirani indeksi inicijalne kompresije C'_c kretali su se između 0,233-0,247. Modificirani indeks sekundarne kompresije C'_{ac} uzrokovan mehaničkim puzanjem kretao se između 0,010-0,018, što je vrlo blizu rezultata svježeg i starog neobrađenog komunalnog otpada, dok su vrijednosti indeksa sekundarne kompresije izazvane biorazgradnjom (C'_{ab}) u rasponu od 0,143-0,174. Indeks kompresije eksponencijalno se povećavao porastom temperature od 5 do 42 °C i u dijelu mehaničkog puzanja i u dijelu puzanja uzrokovanog biorazgradnjom. Zabilježeni indeks kompresije sastojao se od pretežno plastičnih deformacija te zanemarive količine elastičnih deformacija. Autori su objavili i pregled dostupne literature u obliku modificiranih indeksa inicijalne kompresije C'_c MBO otpada različitih istraživača. Indeksi obrađenog otpada kreću se u rasponu od 0,11-0,31 sa srednjom vrijednosti 0,18.

5.4.2.2. *Indeks inicijalne kompresije C_c , indeks sekundarne kompresije C_α , indeks sekundarne kompresije povezan s procesom razgradnje materijala $C_{\alpha B}$, indeks rekompresije C_r obrađenog otpada*

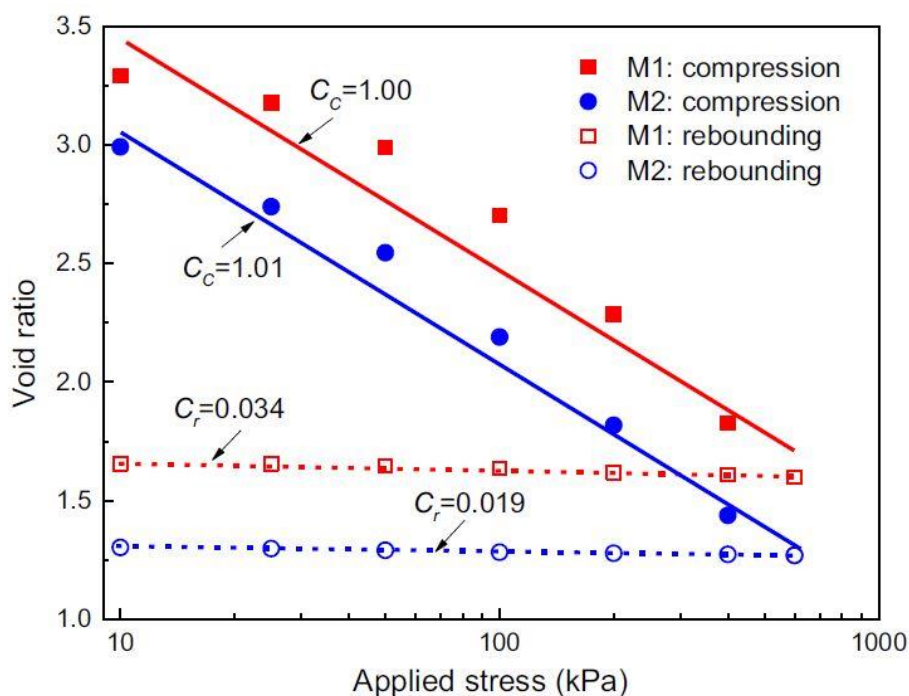
Rezultati indeksa inicijalne kompresije C_c , indeksa sekundarne kompresije C_α , indeksa sekundarne kompresije povezanog s procesom razgradnje materijala $C_{\alpha B}$ te indeksa rekompresije C_r , su vrlo rijetki u literaturi budući da je određivanje ili procjena koeficijenta pora u laboratoriju vrlo teška te se iz tog razloga autori odlučuju na prikaz modificiranih indeksa što objašnjava mali broj objavljenih radova.

Petrović i sur., (2010) su ispitivali MBO otpad koji je uzorkovan s odlagališta MBO otpada u Austriji. Autori su objavili vrijednosti indeksa inicijalne kompresije i indeksa rekompresije za dva uzorka otpada maksimalne veličine čestica od 4,7 mm, dobivenih iz krivulja odnosa koeficijenta pora i vertikalnog naprezanja. Indeks stišljivosti prvog uzorka bio je 0,4, dok je indeks rekompresije isto uzorka bio 0,032. Indeks stišljivosti drugog uzorka bio je 0,3 dok je indeks rekompresije bio 0,031.

Lakshmikanthan i sur., (2018) proveli su ispitivanja na uzorcima MBO komunalnog čvrstog otpada iz Bangalore u Indiji u trajanju od 370 dana. Korišten je anaerobni bioreaktor u kojem su simulirani uvjeti ponašanja otpada u bioreaktorskom odlagalištu. U laboratorijski bioreaktor su ugradili kompostirani otpad iz odlagališta otpada u visini od 0,9 m, s udjelom organske tvari od 54% i veličinom čestica manjom od 20 mm. Mjerili su slijeganje s dva mjerila pomaka i količinu nastalog odlagališnog plina. Kvalitetu i sastav plina mjerili su prijenosnim kromatografom. Kroz bioreaktor su recirkulirali procjednu vodu 3-4 puta unutar svakog mjeseca. Autori su sakupili ukupno 416 L odlagališnog plina pri čemu se udio metana kretao između 32 i 45%. Zabilježeno slijeganje na dva mjesta u reaktoru kretalo se između 20 i 26%, a indeks inicijalne kompresije C_c iznosi 0,23.

Zhang i sur., (2020) su proučavali stišljivost BMO otpada. U biološkom dijelu obrade, komunalni otpad iz Kine obrađen je sušenjem u trajanju od 9 dana. Provedena su kratkotrajna i dugotrajna ispitivanja stišljivosti na dva uzorka, od kojih je M1 uzorkovan u zimskom periodu, a M2 u ljetnom. Iznos primijenjenog vertikalnog naprezanja u inkrementima na uzorak u kratkotrajnim

ispitivanjima bio je redom: 25, 50, 100, 200, 400 i 600 kPa od kojih je svaki inkrement trajao 48 h. U dugotrajnim pokusima vertikalno naprezanje na uzorku iznosilo je 100 kPa i bilo je konstantno svih 300 dana ispitivanja. Suha gustoća ugrađenih uzoraka prije inkrementalnog opterećenja u kratkotrajnim i dugotrajnim pokusima kretala se između 0,33 i 0,40 g/cm³, a to su vrijednosti koje odgovaraju stanju suhe gustoće na odlagalištu Tianziling u Hangzhou u Kini. Iz rezultata kratkotrajnog ispitivanja zabilježene su vrijednosti indeksa inicijalne kompresije C_c koji za uzorak M1 iznosi 1, a za uzorak M2 1,01 (Slika 78).



Slika 78. Odnos koeficijenta pora i primijenjenog naprezanja (Zhang i sur., 2020) (Prijevod: Os x – applied stress (kPa) – naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)

Vrijeme trajanja inicijalnog slijeganja u kratkotrajnim pokusima uzoraka M1 i M2 kretalo se između 15,17 i 36,67 sati. Na Slici 78 prikazan je i indeks rekompresije C_r koji za uzorak M1 iznosi 0,034, i za uzorak M2 0,019.

5.4.2.3. Modul stišljivosti M_v

Petrović i sur., (2014) proučavali su stišljivost biostabiliziranog otpada uzorkovanog s odlagališta MBO otpada u Austriji u edometru s promjerom uzorka od 500 mm. Pod tlakom od 400 kPa uočena je vertikalna deformacija od 20 do 30 %. Objavljeni moduli stišljivosti za pet ispitivanih uzoraka u radu prikazani su u Tablici 46.

Tablica 46. Moduli stišljivosti M_v iz krivulja stišljivosti uzoraka MBO otpada (Petrović i sur., 2014)

Naprezanje	4,7-50 [kPa]	50-100 [kPa]	100-200 [kPa]	200-365 [kPa]
Uzorak A	566	1190	1515	3666
Uzorak B	657	1316	1639	2860
Uzorak C	686	1613	1961	3722
Uzorak D	610	1426	2041	3173
Uzorak E	694	1429	2041	3056

Moduli stišljivosti iz Tablice 46, dobiveni na biostabiliziranom otpadu u radu autora, uspoređeni su s modulom stišljivosti svježeg otpadnog materijala koji su objavili Jessberger i Kockel, (1993).

Dodatno su Petrović i sur., (2014) u svom radu predstavili kratak pregled objavljenih modula stišljivosti obrađenog otpada od strane različitih istraživača (Tablica 47) koje su usporedili s modulima stišljivosti dobivenima u svojem istraživanju (Tablica 46). Zaključili su kako se rezultati dobiveni u vlastitim istraživanjima kod naprezanja od 0-200 kPa dobro uklapaju u rezultate ostalih istraživača iz Tablice 47.

Tablica 47. Moduli stišljivosti MBO obrađenog otpada različitih istraživača

Naprezanje/ Izvor	0-50 [kPa]	25-50 [kPa]	50-100 [kPa]	100-200 [kPa]	200-400 [kPa]	400-600 [kPa]	280-420 [kPa]	Veličina frakcije [mm]
Duellmann (2002)	-	730	1480	2460	4920	-	-	0-30
	-	840	1990	1870	3290	-	-	0-20

Kuehle-Weidemeier i sur., (2003)	-	800	1000	1800		-	-	0-20
	-	1070	1590	1680	2880	-	-	0-40
	-	500	1100	1600	2800	-	-	0-40
	-	940	1490	2440	3030	-	-	0-60
	-	600	1300	2000	2800	-	-	0-60
Bidlingmaier i sur., (1999)	355	-	1670	1947	2904	4514	-	<60
	239	-	905	1570	2973	4977	-	<100
Ziehmann (1999)	-	-	-	-	-	-	5100	-
	-	-	-	-	-	-	7900	<60

Duellmann (2002) je istraživao MBO otpad s dvije probne plohe iz Lahe, Hanover (Njemačka) odlagališta otpada pri čemu je veličina frakcije korištena u ispitivanju bila manja od 30 mm.

Kuehle-Weidemeier i sur., (2003) prilikom ispitivanja MBO otpada iz odlagališta otpada u Schaumburgu (Njemačka) zaključili su da se modul stišljivosti povećava s povećanjem veličine čestica. Bidlingmaier i sur., (1999) su istraživali MBO otpad s frakcijom manjom od 60 mm iz postrojenja za MBO otpada Meisenheim i s frakcijom manjom od 100 mm iz postrojenja za MBO otpada Lueneburg. Prilikom istraživanja, autori spomenutog rada su primijetili da pri nižim naprezanjima, sitniji materijal iz Meisenheima pokazuje veću stišljivost, dok je materijal iz Lueneburga stišljiviji kod viših iznosa naprezanja (400-600 kPa). Ziehmann (1999) je u svom radu ispitivao MBO otpad prije i nakon prosijavanja na situ otvora 60 mm pri čemu je zaključio da MBO otpada značajno povećava modul stišljivosti.

Zhang i sur., (2020) su proučavali mehanička svojstva (stišljivost) bioosušenog otpada iz postrojenja za BMO otpada. U biološkom dijelu obrade, komunalni otpad iz Kine obrađen je sušenjem u trajanju od 9 dana. Provedena su kratkotrajna i dugotrajna ispitivanja stišljivosti na dva uzorka, od koji je M1 uzorkovan u zimskom periodu, a M2 u ljetnom. Iznos primijenjenog vertikalnog naprezanja u inkrementima na uzorak u kratkotrajnim ispitivanjima bio je redom: 25, 50, 100, 200, 400 i 600 kPa od kojih je svaki inkrement trajao 48 h.

Iz mjerenih vertikalnih deformacija i pripadnih inkremenata opterećenja na uzorak izračunati su moduli stišljivosti prikazani u Tablici 48.

Tablica 48. Moduli stišljivosti kratkotrajnog pokusa uzoraka M1 i M2 (Zhang i sur., 2020)

Inkrement naprezanja/Uzorak	10-25 [kPa]	25-50 [kPa]	50-100 [kPa]	100-200 [kPa]	200-400 [kPa]	400-600 [kPa]
M1	553	572	748	1028	1877	3778
M2	309	506	553	1057	2068	4676

Za razliku od biostabiliziranog otpada, podaci o stišljivosti metanogene frakcije bioosušenog otpada su rijetki. Dok su mnogi autori optimizirali proces biosušenja (Navae-Ardeh i sur., 2011; Tambone i sur., 2011; Yang i sur., 2014; Dominczyk i sur., 2014; Yang i sur., 2017; Slezak i sur., 2019; Ham i sur., 2019, 2020), mehaničko ponašanje metanogene frakcije bioosušenog otpadnog materijala istraženo je u vrlo malom razmjeru.

Budući da objavljeni rezultati stišljivosti, utvrđeni na drugim vrstama otpada (neobrađeni, biostabilizirani), nisu direktno primjenljivi na bioosušeni otpad, slijedi da bez poznavanja kolapsibilnih svojstava i parametara stišljivosti metanogene frakcije otpada projektiranje bioreaktorskog odlagališta nije moguće.

5.5 Materijal i metode

U svrhu istraživanja kolapsibilnog ponašanja metanogene frakcije bioosušenog BMO otpada, korišten je nestandardni edometar promjera ćelije 15 cm sa sustavom nanošenja opterećenja koji odgovara potrebama ispitivanja puzanja materijala.

Ispitivani uzorci otpada u kratkotrajnim pokusima stišljivosti uzorkovani su u prvom dijelu godine (dalje u tekstu materijal/uzorak A), dok je dugotrajni edometarski pokus napravljen s otpadom uzorkovanim u drugoj polovici godine (dalje u tekstu materijal/uzorak B) iz Županijskog centra za gospodarenje otpadom (dalje u tekstu: ŽCGO Mariščina). Prije ispitivanja u edometru, uzorci otpada su stavljeni na sušenje u sušionik na 60°C kroz 24 sata. Nakon toga, svaki od uzoraka je vagan i ugrađen u ćeliju edometra.

Provedeno je više pokusa stišljivosti pri različitim vlažnostima uzoraka. Maksimalni iznos opterećenja prilagođen je naprezanju koje se očekuje u donjem sloju bioreaktorskog odlagališta u ŽCGO Marišćina. Inkrementi opterećenja za sve ispitane uzorke bili su jednaki.

Prvi uzorak opterećivan je u potpuno suhom stanju pri čemu se zabilježena slijeganja odnose samo na mehanički uzrokovana slijeganja.

U drugom uzorku koji je opterećivan u potpuno zasićenom stanju, biorazgradnja je spriječena dodavanjem octene i propionske kiseline. Na taj način su i u vlažnom stanju materijala zabilježena slijeganja čisto mehaničke prirode.

Treći uzorak ugrađen je u ćeliju edometra u inicijalno suhom stanju, no nakon nekoliko početnih inkremenata vertikalnog opterećenja, uzorku se dodala otopina deaerirane, destilirane vode i kiseline pri čemu se pratilo kolapsibilno ponašanje materijala.

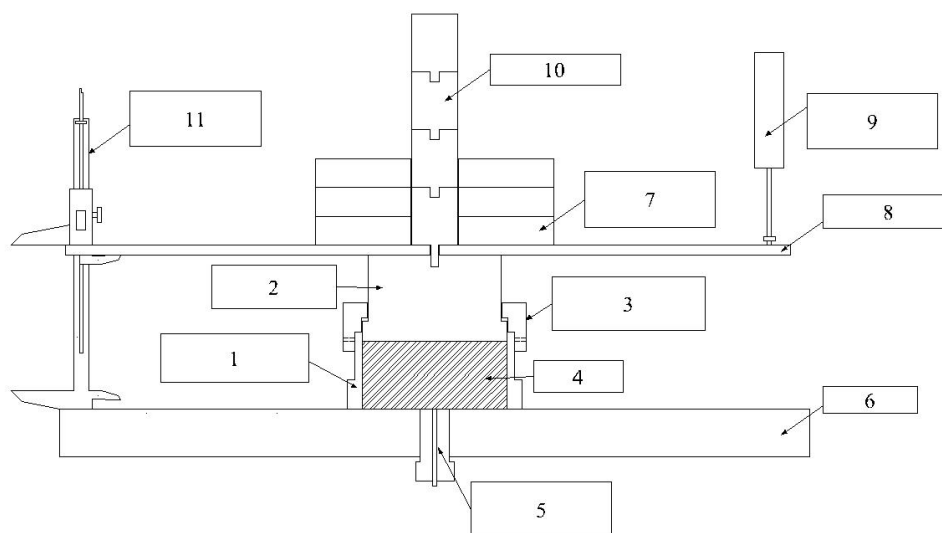
Uvjeti ugradnje i vlaženja četvrtog uzorka jednaki su kao i kod trećeg uzorka s time da je kod vlaženja, uzorak zasićen deaeriranom, destiliranom vodom bez dodavanja kiselina. U takvom stanju, uzorak se držao pod konstantnim vertikalnim opterećenjem do kraja ispitivanja koja su od ugradnje uzorka u ćeliju edometra trajala 365 dana. Sastav nastalih odlagališnih plinova u četvrtom uzorku praćen je mjerenjem koncentracija nastalih količina plinova (metan-CH₄, ugljikov (IV) oksid-CO₂, kisik-O₂ i dušik-N) instrumentom Geotech GA5000. Temperatura uzorka praćena je PT-100 sondom.

Sastavni dijelovi korištenog edometra prikazani su na Slici 79. Uređaj se sastoji od sljedećih dijelova:

1. Ćelija edometra
2. Gornja ploča
3. Vodicica gornje ploče
4. Uzorak
5. Kanal za dreniranje
6. Postolje
7. Metalne ploče za vertikalno opterećenje uzoraka (20 kg $\pm$ 0,3 kg)
8. Kruta ploča
9. Linearno mjerilo pomaka (LVDT)

10. Metalna šipka u četiri dijela

11. Linearno mjerilo pomaka (pomična mjerka)



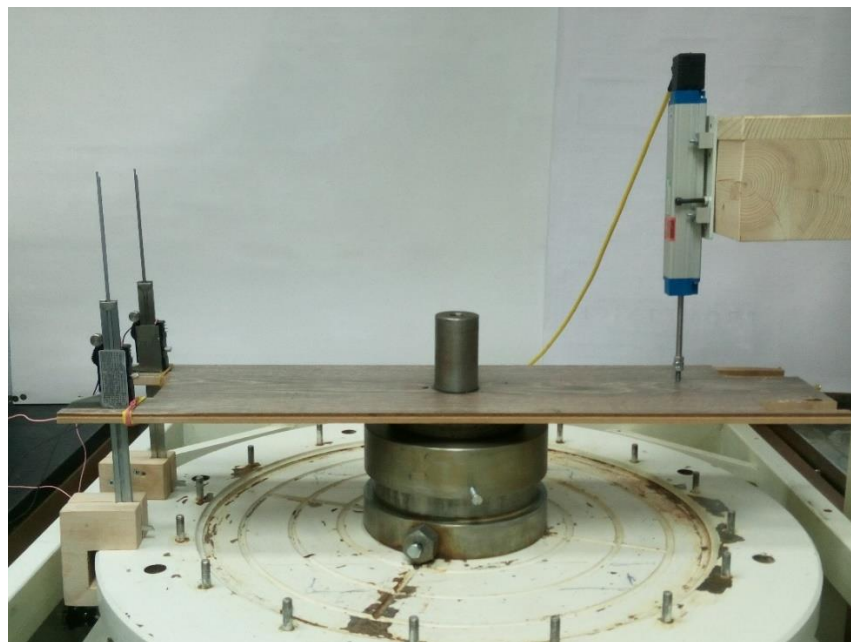
Slika 79. Prikaz poprečnog presjeka edometarskog uređaja

Cilindrična ćelija edometra izrađena je od čelika. Promjer ćelije je 150 mm, dok je maksimalna visina uzoraka koji se može ugraditi u ćeliju edometra 80 mm. Kako bi se spriječilo zakretanje gornje ploče i njeno zapinjanje o bočnu stjenku ćelije, postavljena je vodilica gornje ploče koja osigurava ravnomjernu distribuciju naprezanja s gornje ploče na uzorak. Prilikom ugradnje uzoraka u ćeliju, bočna površina je posuta praškom talka kako bi se smanjilo trenje između ćelije edometra i gornje ploče tijekom pokusa.

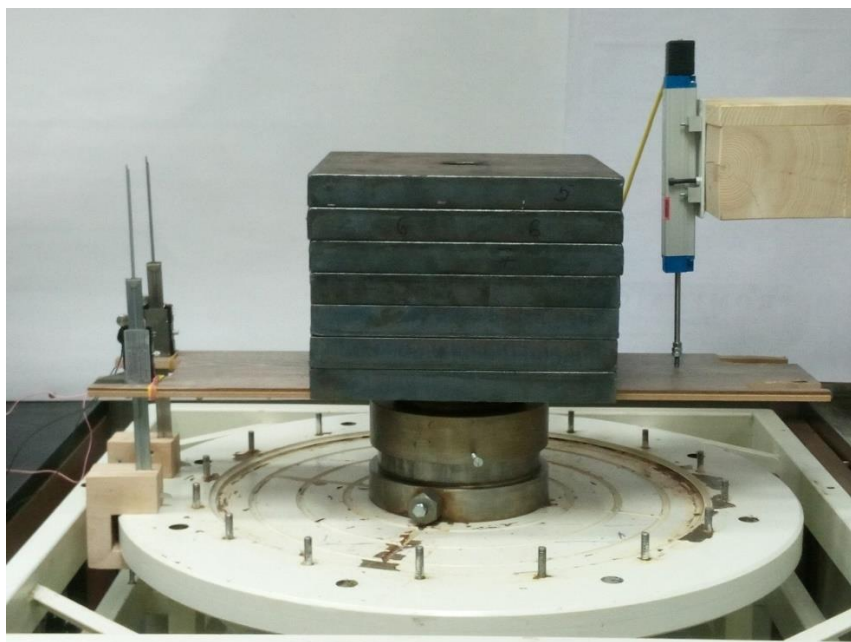
Za vertikalno opterećenje na uzorak korištene su kvadratne metalne ploče debljine 30 mm s duljinom stranica od 295 mm i provrtom u središtu promjera 50 mm. Metalne ploče se na uzorak postavljaju uz pomoć dizalice i Arhimedove koloture. Kako bi metalne ploče bile centrirane u odnosu na vertikalnu os simetrije uzorka, na vrhu gornje ploče pričvršćena je metalna šipka koja se sastoji od četiri segmenata koji su postupno pričvršćeni nakon svakog inkrementa opterećenja. Ukupna duljina metalne šipke je 275 mm, a svojom masom četverodijelna šipka stvara dodatno opterećenje na uzorak od 2 kPa. Svaka od ploča daje vertikalno naprezanje na uzorak od 11,21 kPa, dok vertikalno naprezanje uzrokovano gornjom pločom iznosi 5,39 kPa.

Slika 80 prikazuje edometarski sklop zajedno s mjernim sustavom koji je postavljen u laboratoriju. Edometarska ćelija postavljena je na platformi velikog edometra promjera 500 mm (Petrović i sur.,

2014). Za vlaženje uzoraka koristi se vertikalni otvor u središtu platforme. Ovaj otvor ujedno se koristi i kao drenažni kanal kroz kojeg se višak vode koja izlazi iz uzorka (procjedna voda) tijekom pokusa stišljivosti sakuplja na dnu postolja u posudi.



a)



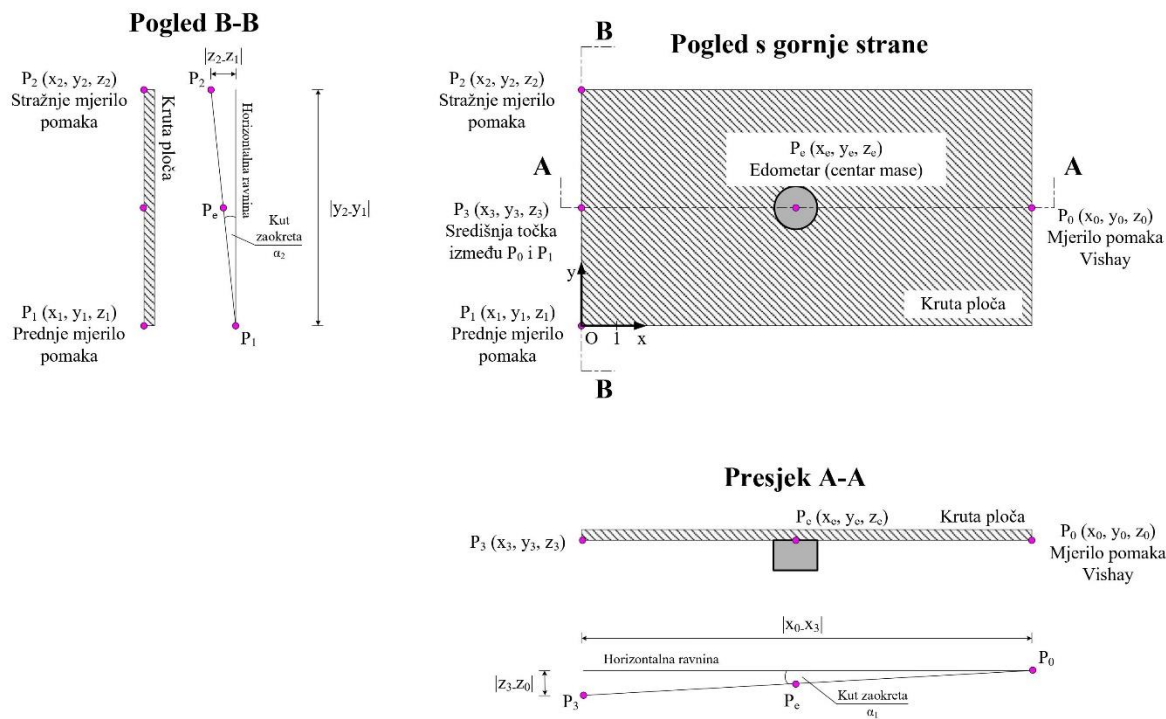
b)

Slika 80. Edometarski uređaj postavljen na veliku platformu: a) edometarska ćelija bez opterećenja; b) edometarska ćelija s opterećenjima (metalnim pločama)

Zbog dodatnog praćenja diferencijalnog slijeganja, linearna mjerila pomaka su postavljena u tri točke u obliku trokuta na krutu ploču kao što je prikazano na Slici 80 čime se osiguralo kontinuirano mjerenje eventualne pojave diferencijalnih slijeganja, odnosno zakretanje gornje ploče.

Vishay 115 L linearno mjerilo pomaka rezolucije 0,1 mm postavljeno je s desne strane krute ploče i spojeno na računalo putem nezavisnog snimača podataka. Kod ovog mjerila pomaci su kontinuirano zapisivani na računalo svakih deset sekundi. Mjerilo je umjereno putem ovlaštenog laboratorija za umjeravanje, a certifikat umjeravanja prikazan je u Prilogu B ovog rada. Rezultati svih mjerenja na Vishay 115 L mjerilu su korigirani u odnosu na umjerni certifikat ovlaštenog laboratorija. Budući da je Vishay 115 L mjerilo pomaka umjereno, podaci slijeganja svih uzoraka s tog mjerila smatrani su kao referentni. Dva mjerila pomaka rezolucije 0,01 mm postavljena su na lijevoj strani krute ploče. Mjerila su povezana putem Arduino Uno mikrokontrolera s računalom i pomaci su kontinuirano bilježeni svake sekunde. Nakon završetka svakog pokusa, iz rezultata mjerenja izračunata je srednja vrijednost svakih 10 sekundi zbog usporedbe s umjerenim mjerilom pomaka Vishay 115 L. Iz zapisa slijeganja na sva tri mjerila pomaka izračunat je kut zaokreta između desnog i lijevog mjerila pomaka na slijedeći način (Slika 81):

- Postavljanjem ishodišta koordinatnog sustava x, y, z u lijevi donji kut krute ploče određene su udaljenosti od ishodišta koordinatnog sustava do točaka mjerenja svih mjerila pomaka
- Izračunata je jednadžba ravnine $A_x + B_y + C_z + D = 0$ koja prolazi točkama P_0, P_1 i P_2
- Koeficijenti A, B i C su određeni iz vektora normale na ravninu vektorskim produktom vektora $\overrightarrow{P_0P_1}$ i $\overrightarrow{P_0P_2}$, dok je D određen iz jednadžbe ravnine u točki P_0
- Uz pomoć jednadžbe ravnine izračunata je udaljenost koordinate točke z_3 ,
- Izračunat je kut α_1 između točaka P_0 i P_3 uz pomoć mjerenih podataka slijeganja Vishay mjerila i prednjeg mjerila pomaka s lijeve strane edometra,
- Izračunat je kut α_2 između točaka P_1 i P_2 uz pomoć mjerenih podataka slijeganja prednjeg i stražnjeg mjerila pomaka s lijeve strane edometra,
- Izračunata je koordinata točke z_e uz pomoć jednadžbe ravnine i ona predstavlja stvarno slijeganje edometra u centru mase.



Slika 81. Prikaz točaka mjerenja mjerilima pomaka te odgovarajućih kuteva nagiba diferencijalnih slijeganja

Srednja vrijednost razlike između mjerenih slijeganja Vishay 115 L mjerila pomaka u točki P_0 s desne strane sustava i vrijednosti slijeganja u centru mase uzorka u točki P_e u vertikalnom smjeru je 0,18 mm.

Tri uzorka ispitana u kratkotrajnim pokusima ugrađeni su pod istim početnim uvjetima u ćeliju edometra kao što je prikazano na Slici 82. Masa suhog otpada u sva tri uzorka bila je 422,4 g. Svaki uzorak ugrađen je u tri sloja jednake mase te je prema potrebi zbijan priručnim utegom mase 2000 g (Slika 82). Srednja vrijednost promjera edometarske ćelije određena metodom direktnog mjerenja pomičnim mjerilom iznosi 150,012 mm. U odnosu na visinu uzoraka od 63 mm za sva tri uzorka, suha gustoća ρ_d ugrađenih uzoraka iznosila je 0,38 g/cm³. Slična vrijednost gustoće koja se postiže prilikom ugradnje materijala u bioreaktorsko odlagalište Marišćina potvrdio je i tadašnji voditelj postrojenja. Uz gustoću čvrstih čestica materijala A od 1,89 g/cm³ (mjereno metodom plinskog piknometra prije pokusa), početni koeficijent pora ugrađenih uzoraka iznosio je $e_0=3,98$. Za potrebe dreniranja uzoraka, na dno ćelije prije ugradnje svakog uzorka postavljen je geotekstil, čime je osigurana i ravnomjerna raspodjela vode prilikom vlaženja uzorka s donje strane ćelije

edometra. Nakon što je uzorak ugrađen u ćeliju edometra, na vrh uzorka je postavljena geomembrana s ciljem postizanja jednostruko dreniranog uzorka.

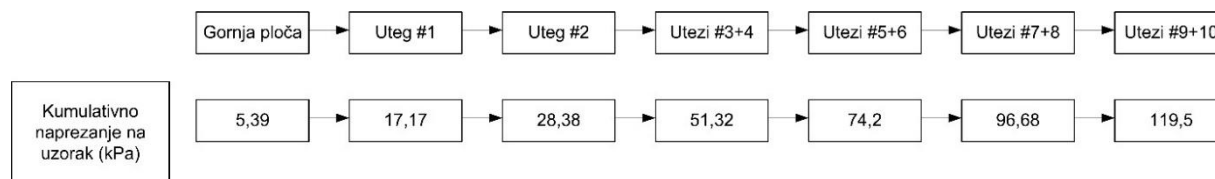


Slika 82. Suhi uzorak ugrađen u ćeliju edometra i uteg koji se koristio za ugradnju uzorka u tri sloja

Prvi uzorak (dalje u tekstu uzorak #1) ispitan je u potpuno suhom stanju tijekom čitavog pokusa. Drugi uzorak (dalje u tekstu uzorak #2) nakon ugradnje u suhom stanju prema prethodno opisanim uvjetima navlažen je otopinom deaerirane vode i octene i propionske kiseline. Ukupni volumen od $535,974 \text{ cm}^3$ tekućine dodan je u ćeliju uzorka pomoću preciznog regulatora tlaka i volumena, dovoljno sporo da se spriječi bilo kakvo narušavanje početne visine ugrađenog uzorka. Otopina je u sustav dodana s donje strane kroz kanal za dreniranje. Koncentracija svake od kiselina bila je 10 g/L deaerirane i destilirane vode. Dodatkom kiselina spriječen je proces biorazgradnje (Siddiqui i sur., 2012) tijekom kratkotrajnih pokusa. Nakon vlaženja, gustoća ρ ugrađenog uzorka #2 iznosila je $0,859 \text{ g/cm}^3$.

Treći uzorak (dalje u tekstu uzorak #3) ugrađen je u istim uvjetima kao i uzorak #1 i opterećivan do vertikalnog naprezanja od $74,2 \text{ kPa}$. Nakon toga je uz konstantno vertikalno naprezanje od $74,2 \text{ kPa}$ u ćeliju edometra utisnuto $511,786 \text{ cm}^3$ otopine na isti način kao što je opisano za uzorak #2 i

ostavljen pod istim opterećenjem slijedeća 24 sata. Nakon toga, uzorak #3 opterećivan je u inkrementima prema predviđenom planu opterećivanja za sva tri uzorka (Slika 83).



Slika 83. Redoslijed opterećivanja pojedinog uzorka otpada u edometru

Svi uzorci su opterećivani istim redoslijedom te u istom vremenskom intervalu.

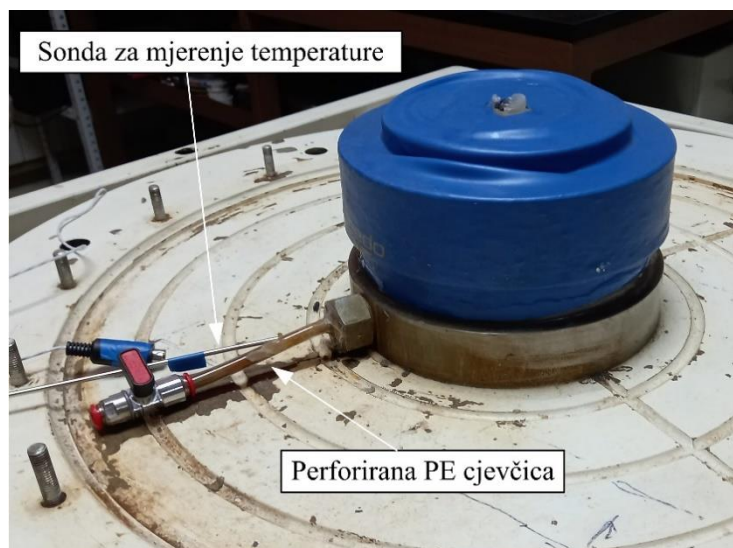
Nakon ugradnje pojedinog uzorka (#1-3) i nanošenja inicijalnog vertikalnog naprezanja od 5,39 kPa postavljanjem gornje ploče izmjereno je početno/inicijalno slijeganje pomičnom mjerkom i nakon toga je odmah na uzorak nanoseno dodatno vertikalno naprezanje od 11,78 kPa. Uzorci su opterećeni redoslijedom kako je navedeno na Slici 83, a svaki od inkremenata opterećenja, osim inicijalnog, trajao je 24 h. Ukupno vertikalno naprezanje nakon zadnjeg inkrementa na uzorku iznosilo je 119,5 kPa.

Četvrti uzorak (dalje u tekstu uzorak #4) ugrađen je u ćeliju edometra u suhom stanju. Prije toga, na dno ćelije je kao i kod prethodnih uzoraka postavljen geotekstil koji u ovom pokusu ima dvojaku ulogu. Kao drenažni sloj, ali i kao sloj dobre horizontalne propusnosti čime je osigurana ravnomjerna raspodjela vode prilikom vlaženja uzorka s donje strane ćelije edometra. U ćeliju edometra ugrađeno je 415,8 g suhog otpada u visini od 62,9 mm. U ćeliju edometra s bočne strane je dodana PT-100 termo-sonda za kontinuirano mjerenje temperature u uzorku te plastična perforirana cjevčica za ekstrakciju nastalih plinova. Oko cjevčice bio je pričvršćen geotekstil s ciljem sprječavanja ulaska sitnih čestica otpada i začepljivanja cjevčice. Dimenzije plastične perforirane cjevčice zajedno s geotekstilom su 10 mm promjera i 215 mm duljine. Volumen ćelije u koji se ugradio uzorak #4 iznosi 1094,25 cm³ što daje suhu gustoću ugrađenog uzorka od 0,38 g/cm³. Uz gustoću čvrstih čestica materijala B od 1,82 g/cm³ (mjereno metodom plinskog piknometra prije pokusa), početni koeficijent pora ugrađenog uzorka #4 iznosio je $e_0=3,79$. Edometar pripremljen za ugradnju uzorka prikazan je na Slici 84, dok je cijeli sustav prikazan na Slici 85.

Plinovi su kontinuirano mjereni kroz perforiranu cjevčicu koja se nalazi unutar uzorka uređajem za mjerenje plinova GA5000. Na cjevčicu je pričvršćen i ventil kojim se nakon mjerenja plinova cijeli sustav zatvara kako ne bi došlo do nekontroliranog istjecanja plina iz uzorka. Redoslijed opterećivanja nakon postavljanja gornje ploče i gumene membrane je isti kao i kod uzorka #3 do inkrementa naprezanja od 74,2 kPa. Gumena membrana (na Slici 84 b) plave boje) ima ulogu dodatnog sprječavanja istjecanja plina iz uzorka. Nakon što je taj inkrement odstajao 24 h, u uzorak je dodano 200 000 mm³ deaerirane/destilirane vode s donje strane edometra te je uz isto vertikalno opterećenje od 74,2 kPa uzorak konsolidiran do kraja ispitivanja. U uzorak nisu dodane kiseline tako da biorazgradnja u ovom ispitivanju nije bila spriječena. Tijekom tog perioda, temperatura u uzorku i u okolnom laboratoriju mjerena je svakodnevno dok su plinovi mjereni jednom tjedno.



a)



b)

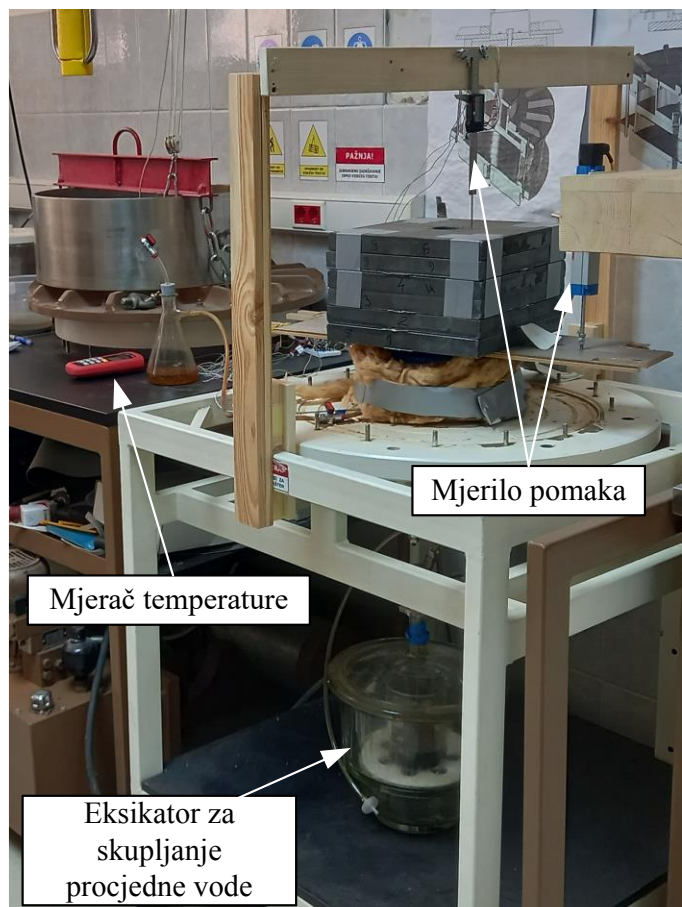
Slika 84. Edometarska ćelija: a) s geotekstilom na dnu, sondom za mjerenje temperature i perforiranom cjevčicom; b) s uzorkom, gumenom membranom, sondom za mjerenje temperature i perforiranom PE cjevčicom za mjerenje plinova i dodavanje vode

Kako bi se ćelija uzorka izolirala od okoline, oko ćelije edometra stavljen je mineralna vuna. U uzorak je povremeno dodavana određena količina destilirane/deaerirane vode s ciljem pospješivanja razgradnje ugrađenog uzorka. Tablica 49 prikazuje učestalost i količine dodane destilirane i deaerirane vode u uzorak s donje strane.

Tablica 49. Datum i količina dodane vode u dugotrajan edometarski pokus

Datum dodavanja vode	Volumen vode [mm ³]
22.01.2021.	200 000
01.03.2021.	100 000
26.03.2021.	100 000
09.04.2021.	100 000
28.04.2021.	100 000
17.05.2021.	100 000
07.06.2021.	100 000
09.07.2021.	100 000
03.09.2021.	50 000
Ukupno	950 000

Konsolidacija uzorka tijekom pokusa odvijala se jednostrano kroz kanal za dreniranje. Na dno otvora kanala za dreniranje postavljena je cjevčica spojena s hermetički zatvorenim eksikatorom u kojem se nalazila baždarena posuda za prikupljanje procjedne vode iz sustava tijekom procesa konsolidacije. Nakon 365 dana ispitivanja, uzorku je određena vlažnost sušenjem u sušioniku, izmjeren je pH procjedne vode te je izmjerena gustoća čvrstih čestica na tri uzorka plinskim piknometrom postupkom kako je opisano u poglavlju 3.5.1.3.



Slika 85. Edometarski sustav za dugotrajno ispitivanje uzorka #4

Rezultati ispitivanja provedeni u opisanom edometru prikazani su u obliku:

- Modificiranog primarnog i sekundarnog indeksa kompresije C'_c , C'_α , $C'_{\alpha B}$
- Primarnog i sekundarnog indeksa kompresije C_c , C_α , $C_{\alpha B}$
- Modula stižljivosti M_v

5.6 Rezultati

Inicijalno slijeganje uzrokovano masom gornje ploče u ispitivanjima uzoraka #1-4 uglavnom se odnosi na istiskivanje plina iz pora i/ili na stišljivost manje čvrstih čestica (Siddiqui i sur., 2013). Primarno slijeganje kod potpuno zasićenih uzoraka uzrokovano je istiskivanjem vode iz pora odnosno, procesom konsolidacije. Sekundarna slijeganja nastaju uslijed biorazgradnje organskog dijela materijala te reološkim puzanjem.

Za četiri ispitana uzorka inicijalno slijeganje i pripadne inicijalne vertikalne deformacije ε uzrokovane masom gornje ploče prikazani su Tablicom 50.

Tablica 50. Inicijalno slijeganje uzoraka #1, #2, #3 i #4

Uzorak	Slijeganje [mm]	Vertikalna deformacija ε [%]
#1	5,31	8,4
#2	10,85	17,2
#3	6,76	10,6
#4	4,04	6,4

Iz Tablice 50 može se vidjeti da je značajna količina inicijalnog slijeganja nastala postavljanjem gornje ploče na uzorke s time da je inicijalno slijeganje vlažnog uzorka #2 bilo gotovo dvostruko veće od inicijalnog slijeganja suhog uzorka #1. Prosječno inicijalno slijeganje svih ispitivanih uzoraka u suhom stanju iznosi 5,37 mm. Razlike u iznosima inicijalnih slijeganja uzoraka #1, #3 i #4 u suhom stanju može se pripisati nehomogenosti uzoraka koja se očitava u neravnomjernoj raspodjeli komponenata otpada kao i u razlikama u veličini i stišljivosti pojedinih čestica unutar samih uzoraka. Kako bi se smanjio utjecaj nehomogene raspodjele veličine čestica i komponenata otpada preporuča se korištenje veće edometarske ćelije ili pak uzoraka s fino usitnjenim česticama.

Sekundarna slijeganja uzrokovana masom gornje ploče nisu promatrana budući da su uzorci opterećeni prvim inkrementom gotovo odmah nakon stavljanja gornje ploče.

Vrijednosti početne i završne visine pojedinih uzoraka, koeficijenti pora e , suhe gustoće ρ_d i ostali fizikalni parametri na početku i nakon završetka pojedinog pokusa prikazani su u Tablici 51.

Tablica 51. Fizikalni parametri ispitivanih uzoraka na početku i na kraju edometarskog pokusa

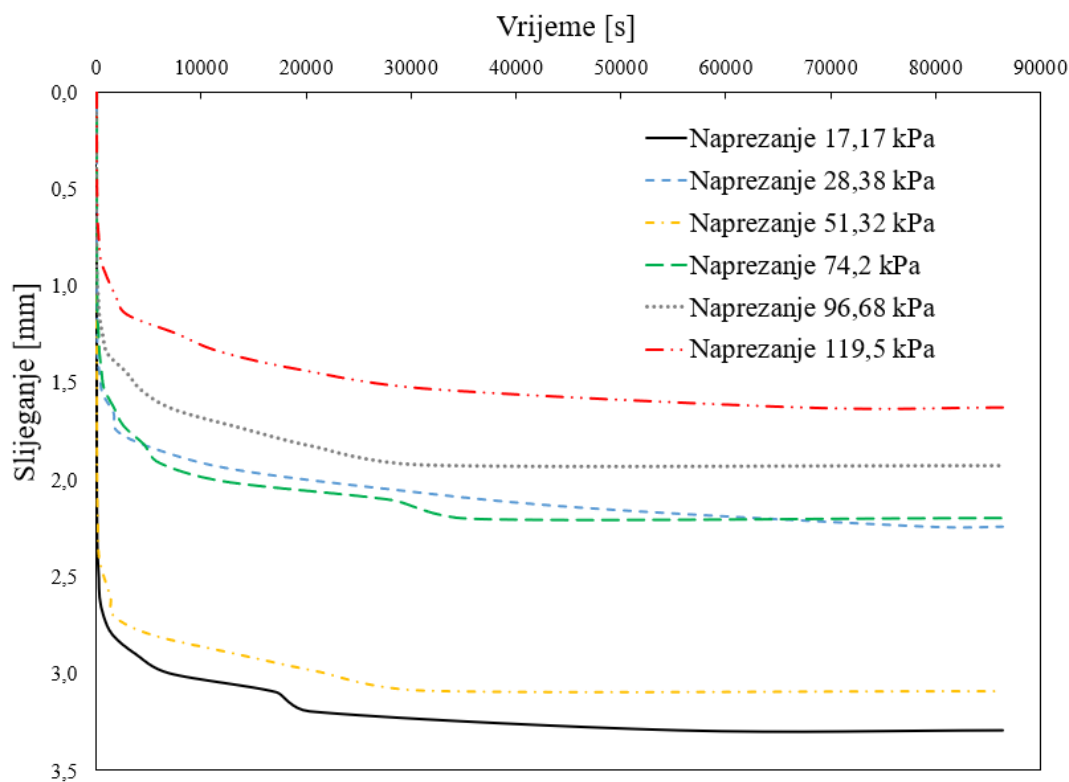
Parametar	Oznaka	Uzorak #1		Uzorak #2		Uzorak #3		Uzorak #4	
		Početak pokusa	Kraj pokusa	Početak pokusa	Kraj pokusa	Početak pokusa	Kraj pokusa	Početak pokusa	Kraj pokusa
Visina	H [mm]	62,9	43,21	63,15	30,11	63,6	29,01	62,9	34,81
Ukupna relativna deformacija	ε [%]	-	31,30	-	52,32	-	54,39	-	44,66
Vlažnost	w^* [%]	0	0	127	56,6	0	56,9	0	68,4***
Gustoća	ρ [g/cm ³]	0,38	0,55	0,86	1,25	0,38	1,31	0,38	0,91***
Suha gustoća	ρ_d [g/cm ³]	0,38	0,55	0,38	0,80	0,38	0,83	0,38	0,65**- 0,54***
Gustoća čestica	ρ_s [g/cm ³]	1,894	1,91	1,894	1,77	1,894	1,77	1,820	2,054
Koeficijent pora	e [-]	3,98	2,42	3,98	1,38	3,98	1,27	3,79	1,79**- 2,80***
Stupanj zasićenosti	S [%]	0	0	60,32	77,68	0	84,86	0	50,17***

*vlažnost određena u odnosu na suhu masu; **prije anaerobne razgradnje; ***nakon anaerobne razgradnje

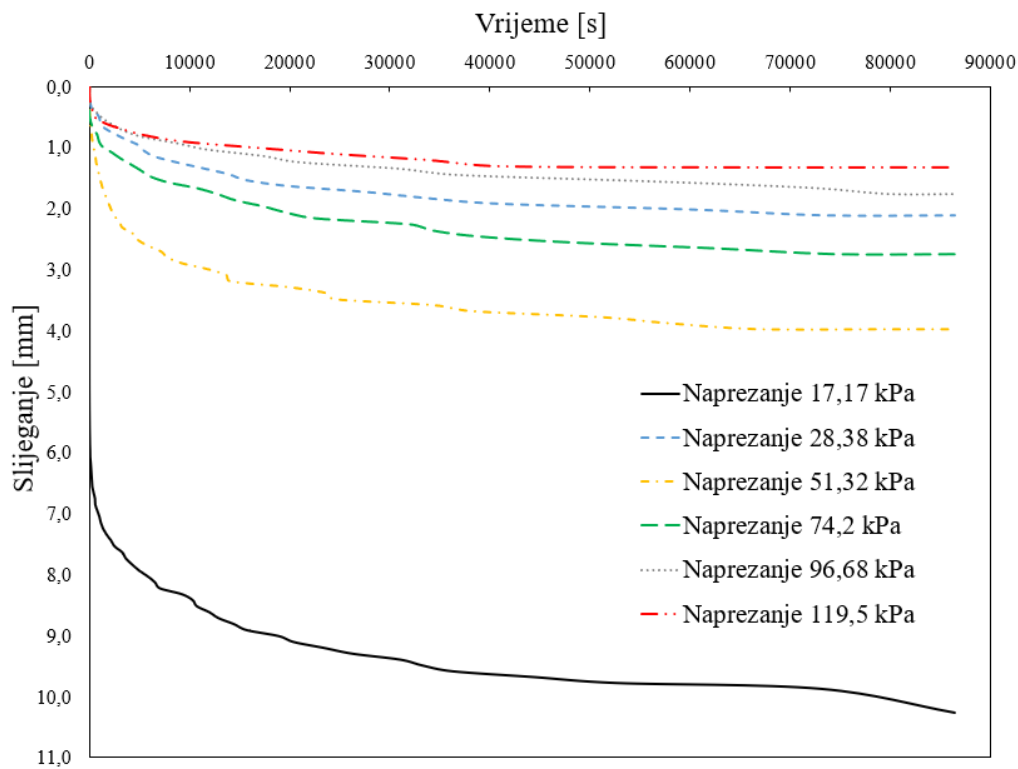
Usporedbom podataka s početka i kraja pokusa može se vidjeti da je koeficijent pora na kraju ispitivanja za vlažne uzorke #2 i #3 značajno niži od koeficijenta pora suhog uzorka #1. S druge strane, gustoće ρ vlažnih uzoraka puno su više na kraju ispitivanja u odnosu na gustoću ρ suhog uzorka #1. Kod uzorka #4 kod kojeg je razgradnja otpada bila dozvoljena, u fazi anaerobne razgradnje, slijeganje od 1,89 mm u toj fazi, kao i gubitak mase od 83,8 g dovelo je do značajnog smanjenja suhe gustoće materijala, s time da dominantniji učinak na konačnu vrijednost suhe gustoće ima gubitak mase uzorka naspram smanjenja volumena uzorka. Razgradnjom organskih čestica unutar uzorka, gustoća čvrstih čestica uzorka #4 se povećala na 2,054 g/cm³ pa je posljedično i vrijednost koeficijenta pora veća. Rezultati usporedbe suhe gustoće ρ_d suhog uzorka #1 na početku i na kraju ispitivanja pod maksimalnim vertikalnim naprežanjem od 119,5 kPa ukazuju na zadovoljavajuće rezultate u usporedbi s rezultatima koje je u svom radu objavio Tiwari (2014) koji govori kako maksimalna suha gustoća materijala koji se odlaže u bioreaktorsko odlagalište ne bi trebala biti veća od 0,57 g/cm³ kako bi se omogućila recirkulacija dovoljne količine procjedne vode kroz tijelo odlagališta za proizvodnju bioplina. Uzorak #3 s druge strane koji je ispitan u inicijalno suhom stanju ($\rho_d = 0,38$ g/cm³), nakon vlaženja i maksimalnog vertikalnog naprežanja od 119,5 kPa pokazuje puno višu vrijednost suhe gustoće na kraju ispitivanja ($\rho_d = 0,83$ g/cm³) što ukazuje na moguće probleme pri recirkulaciji procjedne vode i

posljedično proizvodnju bioplina što bi trebalo detaljnije istražiti dodatnim ispitivanjima. Uzorak #4 koji je ispitan na isti način kao i uzorak #3 no pri nižem ukupnom vertikalnom naprezanju od 74,2 kPa, na kraju pokusa, nakon anaerobne razgradnje pokazuje zadovoljavajuće vrijednosti postignute suhe gustoće ρ_d . Preporuka je za daljnja istraživanja ispitati odnos suhe gustoće ispitivanog BMO materijala, njegove vlažnosti i njihov utjecaj na proizvodnju bioplina.

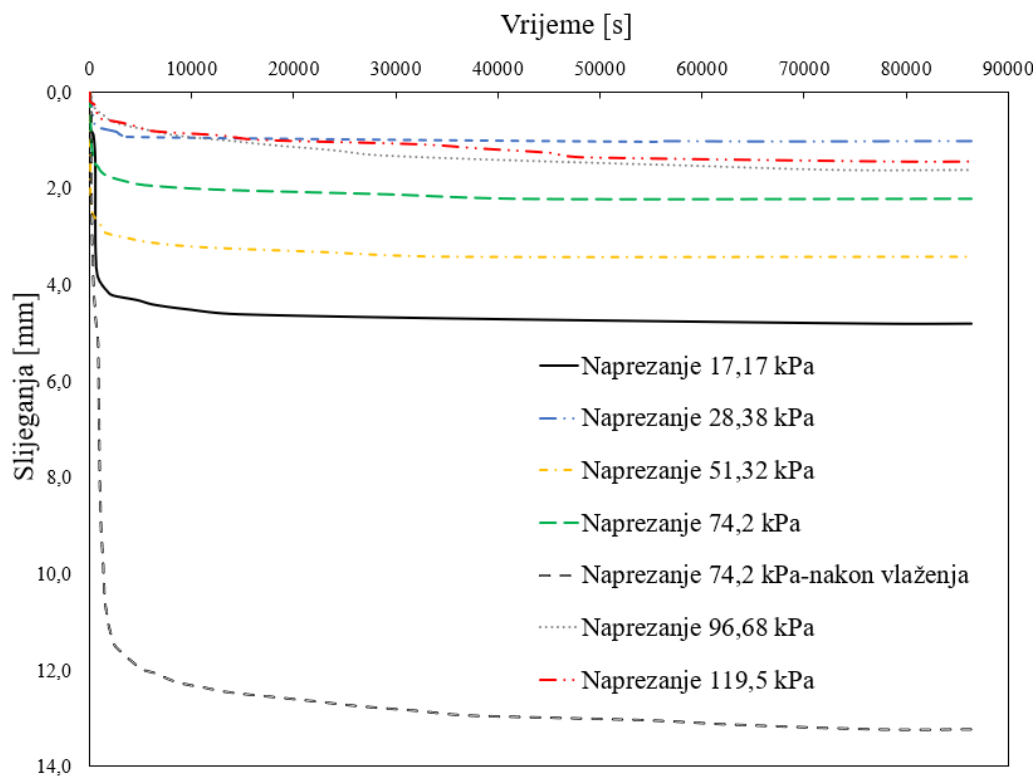
Vremenski tok slijeganja za pojedini inkrement naprezanja za uzorke #1-4 prikazan je na Slici 86, 87, 88 i 89. Dugotrajno slijeganje uzorka #4 prikazano je na Slici 90. Na Slikama 86-89 koje prikazuju vremenski tok slijeganja pojedinog uzorka, inicijalna slijeganja uzrokovana masom gornje ploče nisu prikazana.



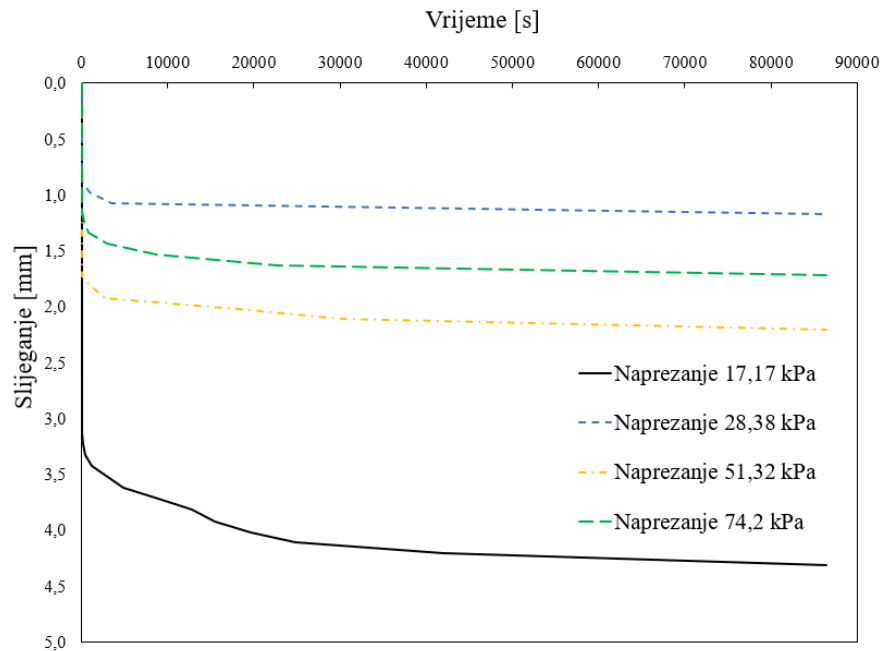
Slika 86. Vremenski tok slijeganja uzorka #1 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja



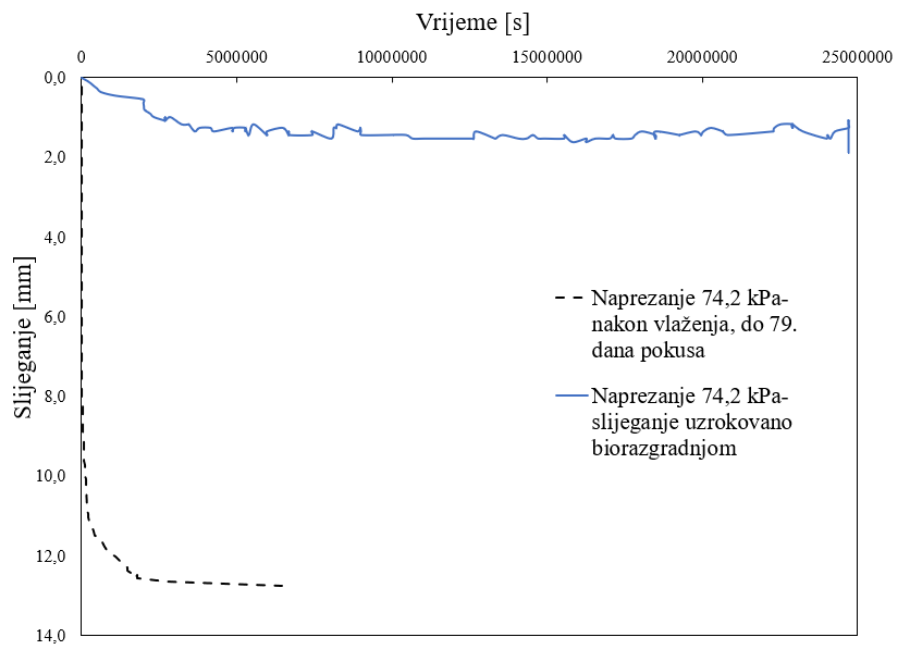
Slika 87. Vremenski tok slijezanja uzorka #2 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja



Slika 88. Vremenski tok slijezanja uzorka #3 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja



Slika 89. Vremenski tok slijeganja uzorka #4 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja prije vlaženja

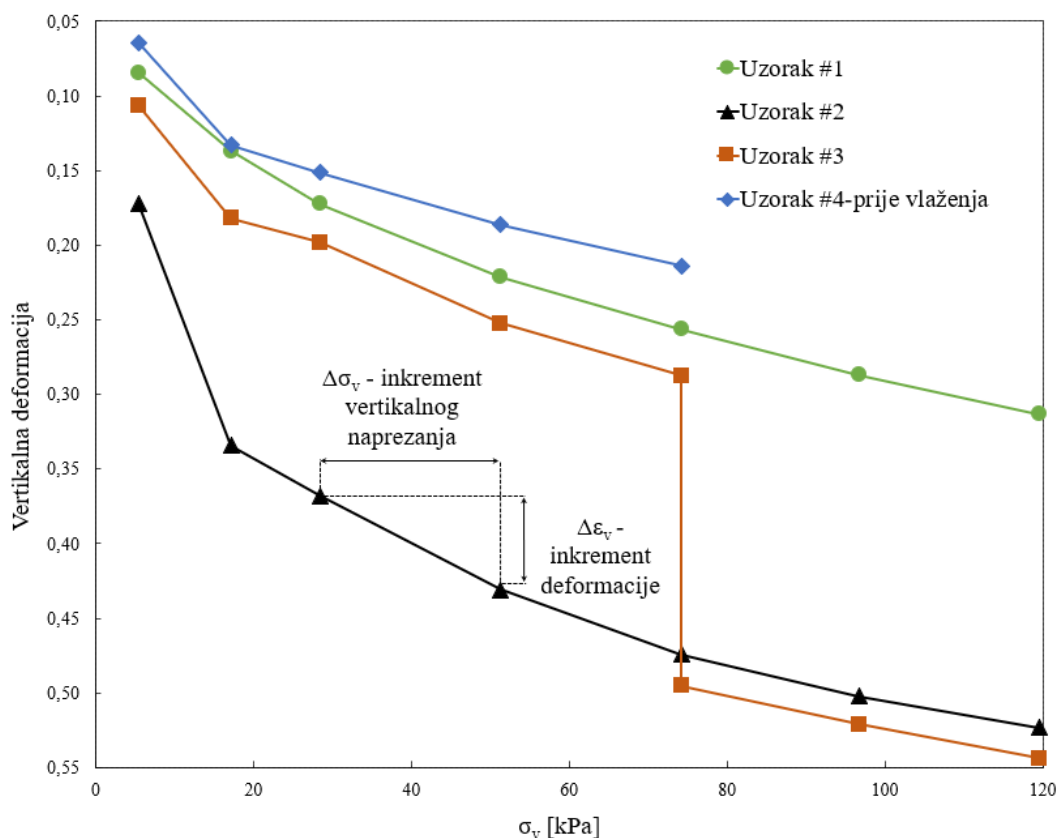


Slika 90. Vremenski tok slijeganja uzorka #4 pri konstantnom opterećenju od 74 kPa nakon vlaženja

Sa Slike 86 može se jasno primijetiti da odmah nakon primjene dodatnog inkrementa naprezanja dolazi do brzog razvoja slijeganja te nagle tranzicije iz inicijalnog u sekundarno slijeganje. Slično uzorku #1, i uzorak #2 na Slici 87 pokazuje brzi razvoj slijeganja odmah nakon primjene dodatnog inkrementa naprezanja. Međutim, prijelaz iz inicijalnog slijeganja u puzanje na uzorku #2 nije rapidno već se odvija postupno.

5.6.1 Modificirani indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C'_c , C'_α , $C'_{\alpha B}$

Iz rezultata slijeganja pojedinog uzorka te pripadne početne visine uzoraka, Jednadžbom (38) izračunate su vertikalne deformacije za svaki inkrement u ovisnosti o primijenjenom naprezanju. Slika 91 prikazuje vertikalne deformacije i naprezanje za sva četiri uzorka.



Slika 91. Odnos vertikalne deformacije i naprezanja uzoraka #1, #2, #3 i #4

Sa Slike 91 može se vidjeti da je uzorak #1 pod maksimalnim vertikalnim naprezanjem od 119,5 kPa pokazao vertikalnu deformaciju od 31,30% dok za početno vlažni uzorak #2, dobivena

vertikalna deformacija iznosi 52,32%. Ukupna vertikalna deformacija uzorka #3 iznosi 54,39% dok za uzorak #4 ona iznosi 44,66%. Iz tih rezultata može se zaključiti kako vlažnost znatno utječe na svojstva krutosti ispitivanog materijala, pri čemu materijal u vlažnom stanju pokazuje veće vertikalne deformacije.

Iz odnosa vertikalnih deformacija i primijenjenih napreznja za svaki inkrement uzoraka #1-4 izračunati su pripadni modificirani indeksi inicijalne kompresije C'_c u skladu s Jednadžbom (47).

Modificirani indeks inicijalne kompresije C'_c predstavlja nagib vertikalne deformacije prema logaritamskoj krivulji napreznja (za vertikalne deformacije na kraju svakog inkrementa napreznja). Izračunate vrijednosti modificiranog indeksa inicijalne kompresije prikazane su u Tablici 52.

Tablica 52. Modificirani indeksi inicijalne kompresije za ispitane uzorke

Uzorak	C'_c	Raspon napreznja [kPa]
#1	0,17	5,29-119,5
#2	0,26	5,29-119,5
#3 – suhi dio	0,16	5,29-74,2
#3 – vlažni dio	0,23	74,2-119,5
#4 – suhi dio	0,13	5,29-74,2

Kako bi se odredili koeficijenti sekundarne kompresije pojedinog uzorka, potrebno je odrediti kraj vremena inicijalnog slijeganja i početak sekundarnog slijeganja. Kao što je ranije spomenuto, slijeganje komunalnog čvrstog otpada sastoji se od inicijalnog slijeganja ovisnog o napreznju i slijeganja ovisnog o vremenu koje se očituje kroz mehaničko puzanje, slijeganje uslijed biorazgradnje i konačno mehaničko puzanje (Bareither, 2013). Budući da se za korišteni bioosušeni otpadni materijal korišten u ovom radu ne može odrediti jasan prijelaz s inicijalnog na sekundarno slijeganje, definirano je fiktivno vrijeme EOT (eng. end of time) u kojem slijeganje prelazi s inicijalnog na mehaničko puzanje koristeći FORE metodu. Odabrana FORE metoda primijenjena je na krivulje vertikalne deformacije u vremenu na svaki inkrement uzoraka #1-4. Za četvrti inkrement napreznja u pokusu dugotrajne stišljivosti uzorka #4, FORE metoda primijenjena je na krivulji od trenutka vlaženja do početka biorazgradnje.

U nastavku je kao primjer prikazano određivanje fiktivnog EOT vremena za eksperimentalne podatke drugog inkrementa opterećenja (naprezanje od 28,38 kPa) vlažnog uzorka #2 (Slika 92). FORE Jednadžba (59) prikazana je u nastavku:

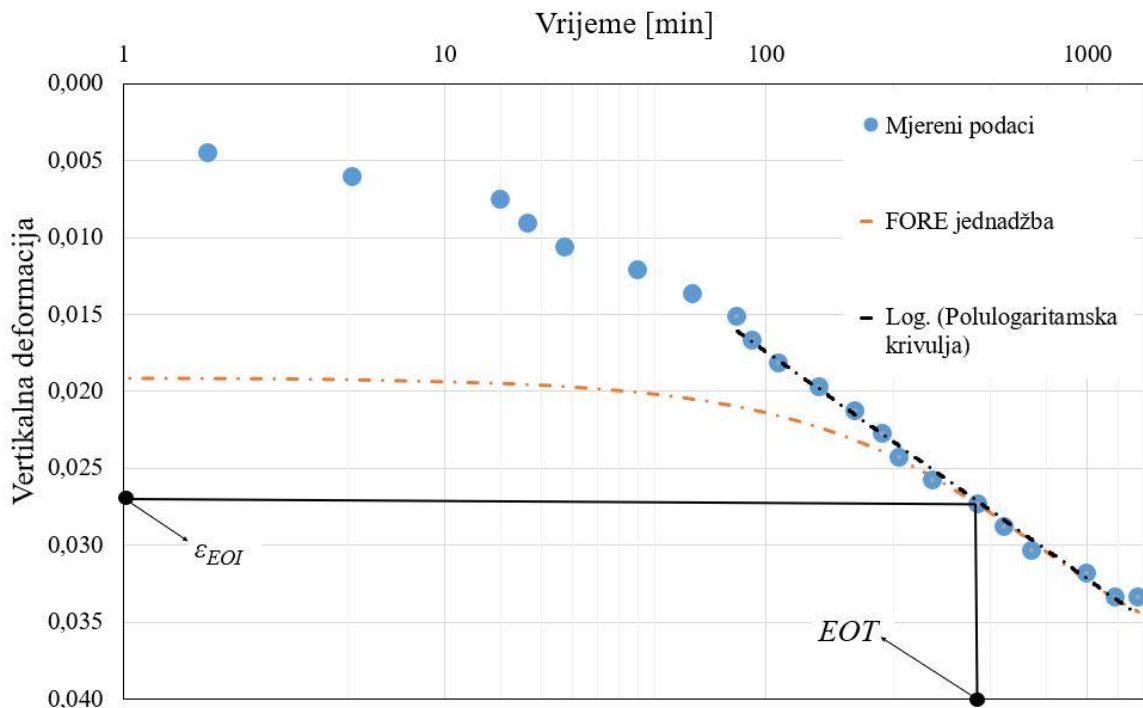
$$\varepsilon_v = 10^{(-0,0006 \times t - 1,7544)} + 0,036724 \quad (59)$$

a polulogaritamska Jednadžba (60) (Dalje u tekstu: PLJ), za dio eksperimentalnih podataka predstavljenih ravnom isprekidanom crnom linijom glasi:

$$\varepsilon_v = 0,0064 \times \ln(t) - 0,0121 \quad (60)$$

U Jednadžbama (59 i 60) vrijeme je izraženo u minutama. Prema predloženom postupku slijedi, $EOT = 460 \text{ min}$ (7,67 h), za pripadnu deformaciju $\varepsilon_{EOI} = 0,0273$.

EOT vrijeme, osim na krivulji vertikalnih deformacija, može se odrediti i temeljem koeficijenta pora. No, u ovom doktorskom radu, odabrana je vertikalna deformacija za određivanje EOT vremena.



Slika 92. Određivanje EOT vrijednosti iz krivulje mjerene vertikalne deformacije u vremenu za drugi inkrement uzorka #2

Za četiri ispitana uzorka i inkremente opterećenja od 17,17 kPa do 119,5 kPa, vrijednosti EOT dobivene FORE metodom sažete su u Tablici 53, zajedno s pripadnim vertikalnim deformacijama

i koeficijentima pora u EOT vremenu. Detaljni rezultati mjerenih podataka s pripadnim FORE
jednadžbama za svaki inkrement naprezanja za uzorke #1-4 dostupni su na
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:817727>.

Tablica 53. Vrijeme kraja inicijalnog slijeganja, EOT, odgovarajuća deformacija, ε_{EOT} , i koeficijent pora, e_{EOT} , za inkremente opterećenja (L2-L7) uzoraka #1, #2, #3 i #4

	Uzorak #1			Uzorak #2			Uzorak #3			Uzorak #4		
Naprezanje [kPa]	EOT [h]	e_{EOT} [1]	ε_{EOT} [1]	EOT [h]	e_{EOT} [1]	ε_{EOT} [1]	EOT [h]	e_{EOT} [1]	ε_{EOT} [1]	EOT [h]	e_{EOT} [1]	ε_{EOT} [1]
17,17	1,00	3,364	0,0465	1,33	2,451	0,1268	1,67	3,142	0,0698	2,00	3,198	0,0599
28,38	1,50	3,187	0,0294	7,67	2,201	0,027	3,17	3,040	0,0153	2,17	3,078	0,0172
51,32	1,33	2,936	0,044	1,83	1,924	0,0428	1,00	2,791	0,0476	2,00	2,918	0,0316
74,2	1,67	2,760	0,03	3,33	1,684	0,0284	1,33	2,611	0,0300	1,50	2,787	0,0237
74,2 – nakon vlaženja	-	-		-	-		-	-		180*	1,852*	0,1856
96,68	0,8	2,614	0,0237	2,67	1,535	0,0156	1,00	1,464	0,0113	-	-	
119,5	4	2,473	0,02194	3,00	1,407	0,0147	4,5	1,331	0,0159	-	-	

*Inkrement dugotrajnog pokusa (mehaničko puzanje nakon vlaženja uzorka)

Kraj vremena inicijalnog slijeganja za uzorke #1-3 kreće se u velikom rasponu između 0,8 i 7,66 sati dok je za uzorak #4 koji je prošao ispitivanje dugotrajne konsolidacije dobiveni raspon vremena nešto manji, a kreće se između 1,5 i 2,17 sati za prva četiri inkrementa naprezanja, prije vlaženja, dok je vrijeme kraja inicijalnog slijeganja i početak sekundarnog za dio krivulje koji se odnosi na mehaničko puzanje nakon vlaženja uzorka #4 180 sati. Pretpostavlja se da je veliki raspon vremena najvjerojatnije uzrokovan malom veličinom uzorka. Za usporedbu, prema istraživanju koje su proveli Bareither i sur. (2012a) na neobrađenom komunalnom čvrstom otpadu utvrđene EOT vrijednosti bile su u rasponu od 3 do 4 sata. Rezultati iz Tablice 53 ne pokazuju korelaciju između dobivenih EOT vrijednosti uzoraka koji su ispitani u potpuno istim uvjetima. Navedena odstupanja između EOT vrijednosti između pojedinih inkremenata i uzoraka najvjerojatnije su posljedica heterogenosti ispitivanog bioosušnog BMO otpadnog materijala.

Modificirani indeks sekundarne kompresije C'_α izračunat je na temelju EOT vremena i pripadnih vertikalnih deformacija prikazanih u Tablici 53 za svaki inkrement naprezanja gdje je FORE metoda za određivanje EOT vremena bila primjenjiva. Modificirani indeks sekundarne kompresije C'_α određen je u skladu s Jednadžbom (48) i prikazan u Tablici 54.

U Tablici 54, modificirani indeks sekundarne kompresije uzorka #4 za naprezanje od 74,2 kPa nakon vlaženja određen je za vrijeme od početka sekundarnog slijeganja određenog FORE metodom (11,5 dana od početka pokusa) do 79. dana pokusa od kojeg su počela slijeganja uslijed biorazgradnje metanogene frakcije proučavanog otpada.

Nakon 79. dana pokusa, zabilježena je povećana koncentracija metana u sustavu i početak anaerobne biorazgradnje ispitivanog BMO otpadnog materijala. Budući da je koeficijent pora na kraju pokusa uzorka #4 veći nego početni koeficijent pora, za izračun indeksa sekundarne kompresije u ovom radu korišten je tzv. modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s razgradnjom materijala (Jednadžba 49). Modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s razgradnjom materijala za uzorak #4 iznosi 0,044.

Tablica 54. Modificirani indeksi sekundarne kompresije za ispitane uzorke otpada

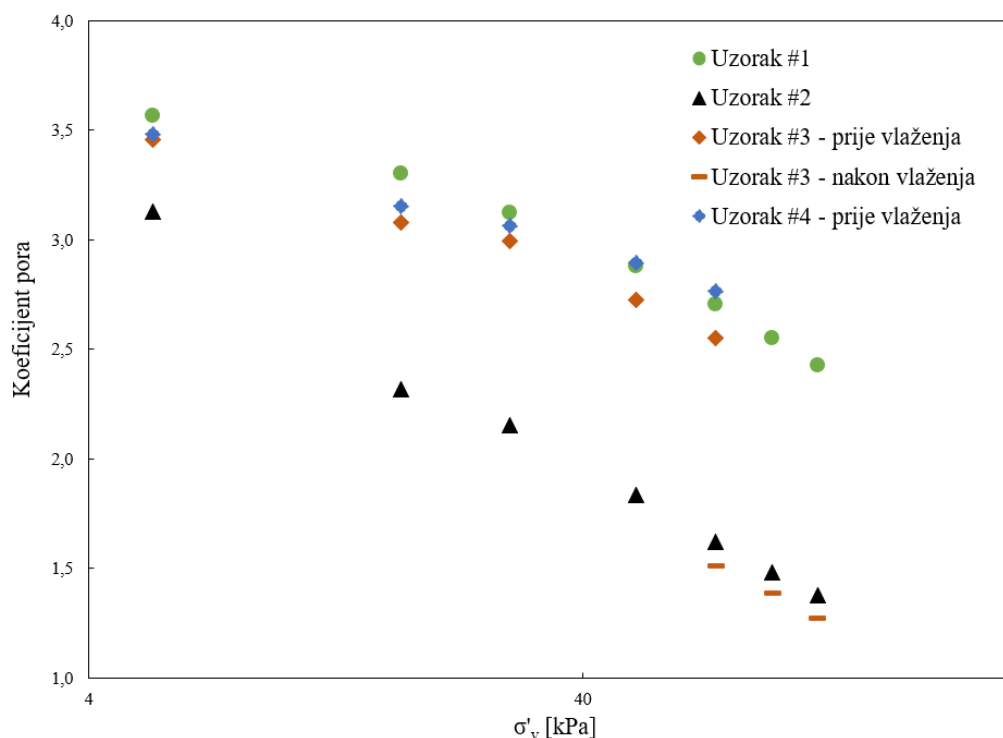
Uzorak	#1	#2	#3	#4
Naprezanje [kPa]	C'_α	C'_α	C'_α	C'_α
17,17	0,0042	0,0236	0,0052	0,0080
28,38	0,0052	0,0123	0,0011	0,0013

51,32	0,0041	0,0195	0,0046	0,0033
74,2	0,0043	0,0174	0,0040	0,0030
74,2 – nakon vlaženja	-	-	-	0,0171*
96,68	0,0047	0,0130	0,0104	-
119,5	0,0051	0,0100	0,0095	-

* Modificirani indeks sekundarne kompresije uslijed mehaničkog puzanja

5.6.2 Indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C_c , C_{α} , $C_{\alpha B}$

Povećanjem inkremenata naprežanja, koeficijent pora se smanjuje. Navedeni odnos prikazan je na Slici 93 u edometarskom dijagramu. Iz krivulja prikazanih na Slici 93 izračunati su pripadni indeksi inicijalne kompresije C_c u skladu s Jednadžbom (51).



Slika 93. Edometarska krivulja ispitivanih uzoraka otpada

Indeks inicijalne kompresije C_c predstavlja nagib koeficijenta pora prema logaritamskoj krivulji naprežanja (za koeficijente pora na kraju svakog inkrementa naprežanja). Izračunate vrijednosti indeksa inicijalne kompresije prikazane su u Tablici 55.

Tablica 55. Indeksi inicijalne kompresije za ispitane uzorke

Uzorak	C_c	Raspon naprezanja [kPa]
#1	0,85	5,29-119,5
#2	1,27	5,29-119,5
#3 – suhi dio	0,77	5,29-74,2
#3 – vlažni dio	1,16	74,2-119,5
#4 – suhi dio	0,61	5,29-74,2

Indeks sekundarne kompresije C_α izračunat je na temelju EOT vremena i pripadnih koeficijenata pora prikazanih u Tablici 53 za svaki inkrement naprezanja gdje je FORE metoda za određivanje EOT vremena bila primjenjiva. Indeks sekundarne kompresije C_α određen je u skladu s Jednadžbom (52) i prikazan u Tablici 56.

Tablica 56. Indeksi sekundarne kompresije za ispitane uzorke otpada

Uzorak	#1	#2	#3	#4
Naprezanje [kPa]	C_α	C_α	C_α	C_α
17,17	0,0185	0,0815	0,0213	0,0335
28,38	0,0218	0,0393	0,0044	0,0054
51,32	0,0161	0,0569	0,0173	0,0129
74,2	0,0162	0,0468	0,0146	0,0114
74,2 – nakon vlaženja	-	-	-	0,0488*
96,68	0,0171	0,0331	0,0257	-
119,5	0,0178	0,0241	0,0222	-

* Indeks sekundarne kompresije uslijed mehaničkog puzanja

U Tablici 56, indeks sekundarne kompresije uzorka #4 za naprezanje od 74,2 kPa nakon vlaženja određen je za vrijeme od početka sekundarnog slijeganja određenog FORE metodom (11,5 dana od početka pokusa) do 79. dana pokusa od kojeg su počela slijeganja uslijed biorazgradnje metanogene frakcije proučavanog otpada.

Nakon 79. dana pokusa, zabilježena je povećana koncentracija metana u sustavu i početak anaerobne biorazgradnje ispitivanog BMO otpadnog materijala. Budući da je koeficijent pora na kraju pokusa uzorka #4 veći nego početni koeficijent pora, izračun indeksa sekundarne kompresije povezanog s razgradnjom materijala $C_{\alpha B}$ prema Jednadžbi (53) rezultira s nerealnom vrijednošću (0,122). Iz tog razloga, za izračun indeksa sekundarne kompresije u ovom radu korišten je tzv. modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s razgradnjom materijala.

5.6.3 Modul stišljivosti M_v

Iz krivulja na Slici 91, Jednadžbom (56) izračunati su moduli stišljivosti M_v za pojedini inkrement naprezanja. Rezultati su prikazani u Tablici 57.

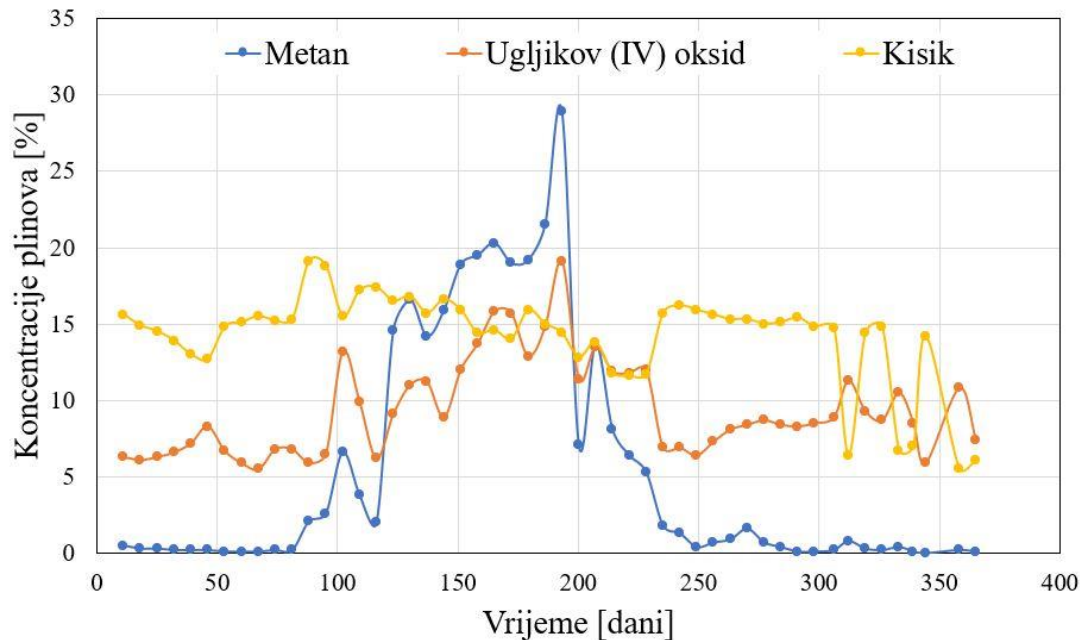
Tablica 57. Moduli stišljivosti M_{oed} uzorka #1, #2, #3 i #4

Raspon naprezanja [kPa]	0-5,39	5,39-17,17	17,17-28,38	28,38-51,32	51,32-74,2	74,2-96,68	96,68-119,5
	Modul stišljivosti [kPa]						
Uzorak #1	63,85*	225,22*	314,78*	466,97*	654,16*	732,64*	880,27*
Uzorak #2	31,37**	72,43**	335,50**	363,99**	527,33**	802,04**	1091,04**
Uzorak #3	50,71*	155,44*	692,19*	425,36*	652,54*	877,13**	1001,64**
Uzorak #4	83,92*	171,92*	602,66*	652,91*	836,72*	-	-

*suho stanje materijala; **vlažno stanje materijala

5.6.4 Odlagališni plinovi

Koncentracije izmjerenih plinova u uzorku #4 tijekom dugotrajne konsolidacije prikazane su na Slici 94. Koncentracije plinova mjerene su svakih 7 dana tijekom čitavog trajanja pokusa.

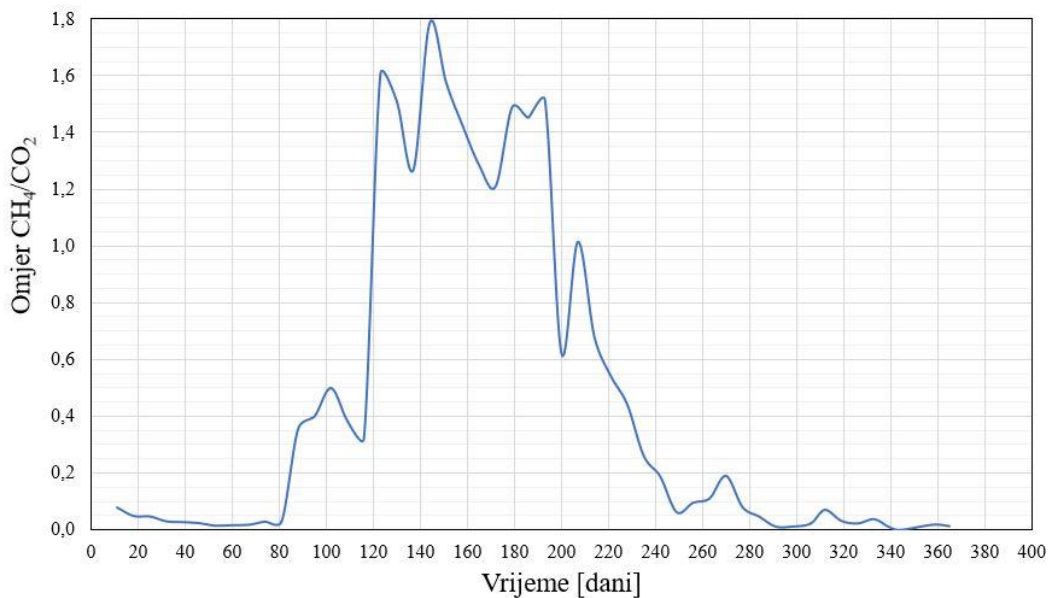


Slika 94. Razvoj plinova u vremenu tijekom dugotrajnog edometarskog pokusa

Prema krivulji koncentracije metana na Slici 94, početak faze biorazgradnje uzorka metanogene frakcije otpada pretpostavljen je kao 79. dan pokusa, a povećane koncentracije metana zabilježene

su sve do 284. dana pokusa. Maksimalna vrijednost koncentracije metana od 28,9 % izmjerena je na 193. dan ispitivanja. Također se može primijetiti da je koncentracija ugljikovog (IV) oksida bila viša od koncentracije metana veći dio pokusa. Iako su njihove koncentracije različite, može se vidjeti velika sličnost između krivulje koncentracije metana i ugljičnog dioksida. Krivulja koncentracije kisika pokazuje trend smanjenja prema kraju ispitivanja. U usporedbi s koncentracijom plinova u radu Zordan i sur., (2013) koji su sastav plinova mjerili na isti način, uređajem za mjerenje plinova GA2000 te su dobili maksimalne koncentracije metana od 48% i ugljikovog (IV) oksida od 70%, u ispitivanjima sastava plinova uzorka #4 zabilježene su niže koncentracije plinova. Više koncentracije plinova u radu Zordan i sur., (2013) mogu se opravdati većom masom suhog uzorka budući da u radu spomenutih autora suha masa ugrađenog uzorka iznosi 8400 g, dok je suha masa uzorka #4 415,8 g. Osim toga, u uzorku Test 2 autora Zordan i sur., (2013) svježa procjedna voda je dodavana na tjednoj bazi direktno s aktivnog odlagališta otpada Chatuzange u Francuskoj koja je bogata mikrobiološkim aktivnostima koje ubrzavaju razgradnju otpada i proizvodnju bioplina.

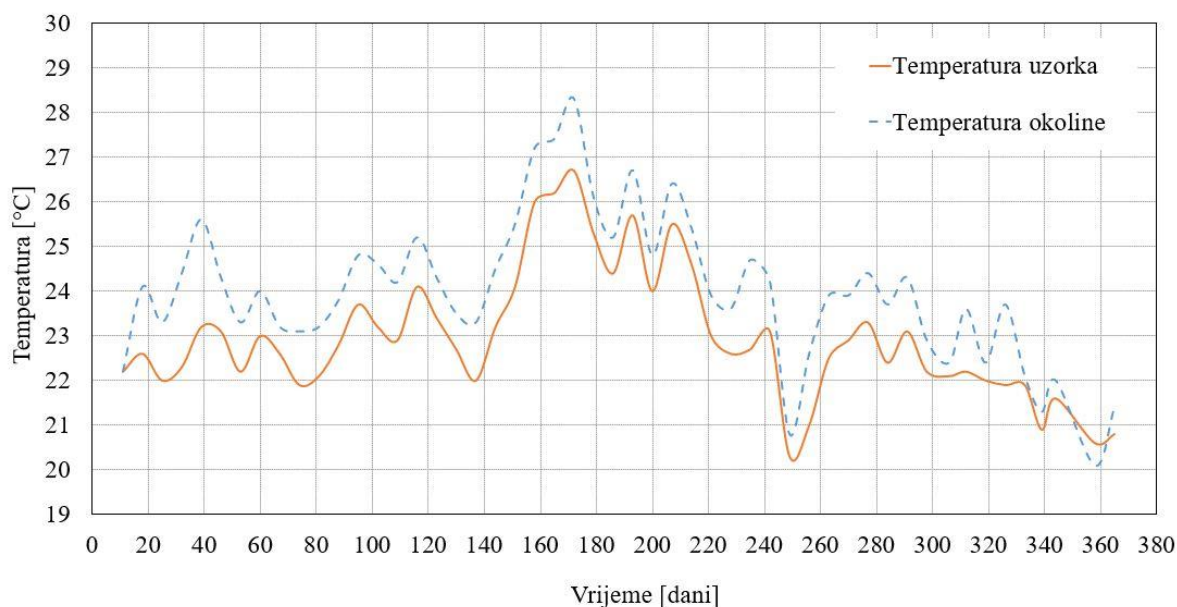
U odnosu na omjer $\sigma(\text{CH}_4)$: $\sigma(\text{CO}_2)$ u vremenu na Slici 95 može se pretpostaviti da prevladava tip 3 sastava odlagališnog plina koji ukazuje na ulazak zraka kroz pukotine i prazne pore zbog prekomjernog izvlačenja plinova, koncentracije dušika i kisika su iste kao i u zraku, a omjer metana i ugljikovog (IV) oksida kreće se od 0,00 do 1,79 sa srednjom vrijednosti u periodu najveće proizvodnje metana između otprilike 120. i 200. dana oko 1,3. Budući da su koncentracije plinova mjerene na tjednoj bazi, a u uzorak je povremeno dodavana i voda uslijed čega su zabilježene i više koncentracije kisika, nisu postignuti idealni uvjeti za proizvodnju odlagališnog plina visoke kvalitete.



Slika 95. Omjer izmjerenih koncentracija metana i ugljikovog (IV) oksida u pokusu dugotrajne konsolidacije uzorka #4

Ovisnost temperature uzorka #4 s proteklim vremenom prikazana je na Slici 96. Uz to, kontinuirano je mjerena i zapisivana temperatura u laboratoriju u kojem se odvijao pokus dugotrajne konsolidacije. Temperatura je bilježena najmanje jednom tjedno tijekom čitavog vremena trajanja pokusa. Sa Slike 96 može se primijetiti isti trend promjene temperatura u uzorku i laboratoriju u vremenu, s time da je temperatura u laboratoriju u prosjeku viša od temperature u uzorku 1 °C što se može pripisati hlađenju uzorka uslijed kontakta s čeličnom podlogom stola. Najviša zabilježena temperatura u uzorku bila je 26,7 °C (zabilježeno 9. srpnja 2021., 172. dan ispitivanja) dok je najniža zabilježena temperatura iznosila 20,3 °C (zabilježeno 24. rujna 2021., 249. dan ispitivanja). U odnosu na temperaturu uzorka može se zaključiti da do razgradnje organskog dijela otpada nije došlo u najoptimalnijim uvjetima s obzirom da je za optimalnu razgradnju potrebna temperatura od otprilike 40 °C. Međutim, između 100. i 200. dana pokusa još uvijek postoji dobra korelacija između porasta temperature i stvaranja metana što se može vidjeti na Slikama 94 i 96. Budući da ćelija edometra nije bila u potpunosti izolirana, većina topline uzorka izgubljena je kroz ćeliju edometra. Za daljnja ispitivanja preporuča se dodatna toplinska zaštita ćelije edometra ili razvoj sustava cirkulacije tople vode oko ćelije u svrhu razvijanja viših temperatura u uzorku i bolje kontrole uvjeta. Nadalje, u svrhu točnog određivanja količine plinova nastalih razgradnjom organskog dijela otpada preporuča se razviti poseban sustav za sakupljanje plinova i direktno

mjerenje volumena nastalih plinova. Isto tako, zbog provjere ponovljivosti rezultata preporuča se provođenje više dugotrajnih konsolidacijskih pokusa.



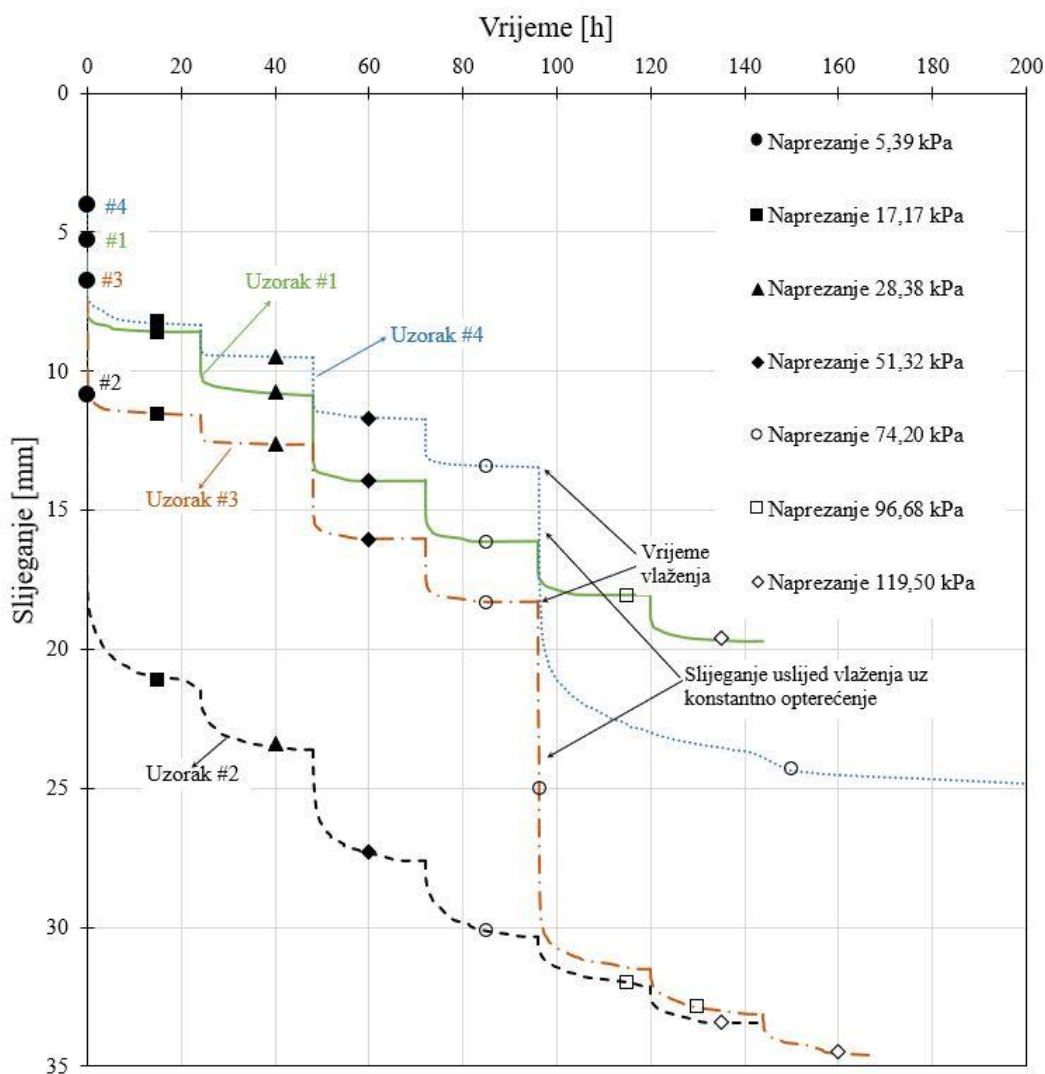
Slika 96. Temperatura uzorka i okoline u dugotrajnom edometarskom pokusu

5.7 Rasprava

Slika 97 prikazuje vremenski tijek slijeganja za sve ispitane uzorke u ovom radu pri čemu je za uzorak #4 zbog bolje vidljivosti ostalih rezultata, krivulja prikazana za prvih 200 h pokusa, dok je cjelokupni vremenski tijek slijeganja prikazan na Slici 98. Inicijalno slijeganje nakon stavljanja gornje ploče na uzorak ima veliki udio u ukupnom slijeganju svih uzoraka, pri čemu je najviša vrijednost inicijalnog slijeganja od 17,18% zabilježena kod vlažnog uzorka #2 dok je kod suhih uzoraka ta vrijednost zastupljena s manjim udjelom. Kod uzorka #1 inicijalnom slijeganju pripada 8,44% ukupnih slijeganja, kod uzorka #3, 10,63% dok je kod uzorka #4 taj udio 6,42% od ukupnih slijeganja. Ukupna količina slijeganja od oko 50% za uzorke #2-4 može se dobro usporediti s ukupnim slijeganjima koja su zabilježena za kompostirani komunalni otpad u radu Velkushanova (2011) pri čemu je autor takvu količinu slijeganja pripisao inicijalno niskoj suhoj gustoći prilikom ugradnje od $0,41 \text{ g/cm}^3$ koja je slična postignutoj početnoj suhoj gustoći u ovom radu kod svih uzoraka.

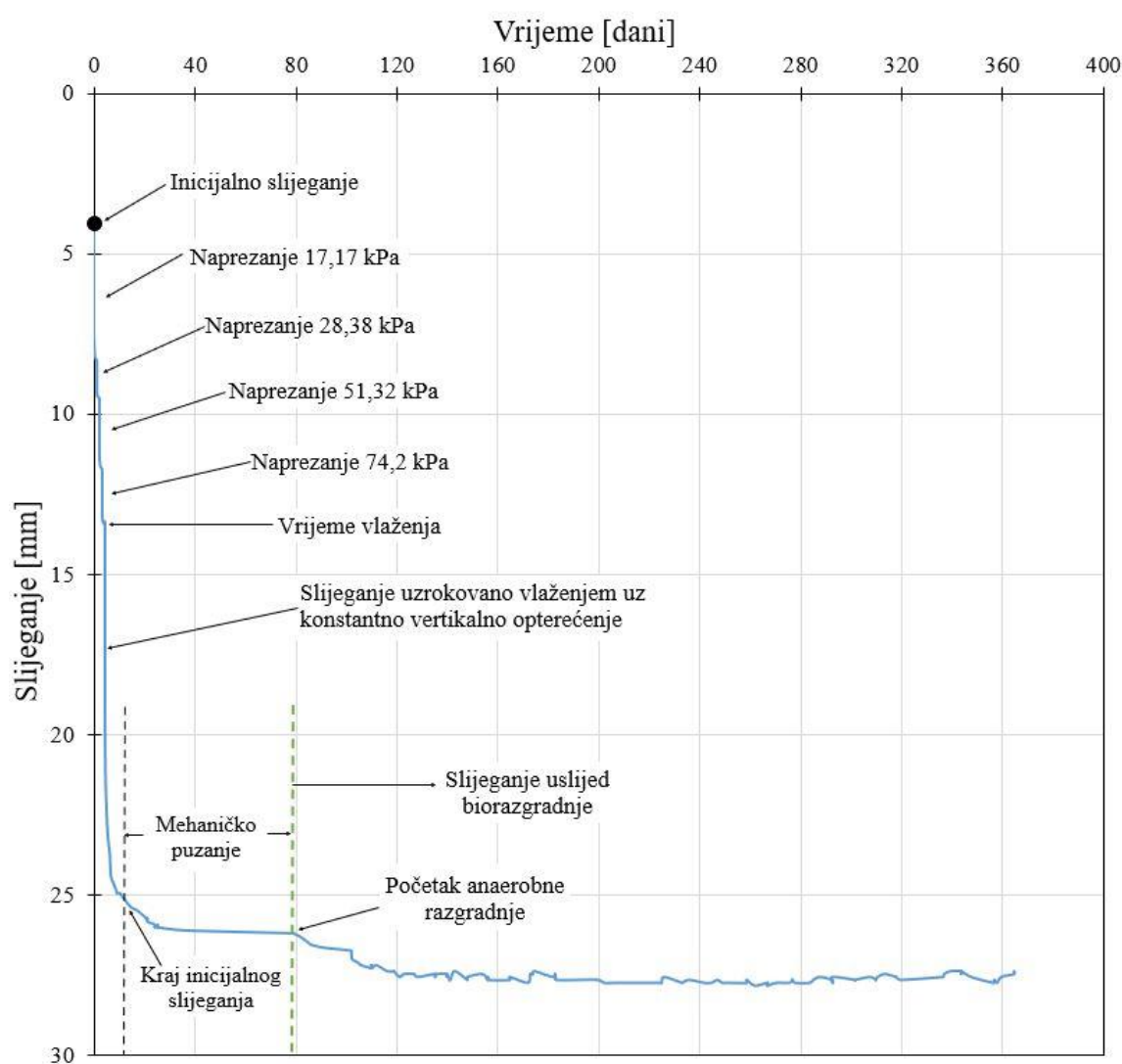
Uspoređujući uzorak #2 i #3 nakon točke vlaženja na Slici 97 može se vidjeti da uzorak #3 nakon dodavanja vode pokazuje gotovo jednaku količinu slijeganja kao i inicijalno vlažan uzorak #2.

Slično ponašanje zabilježeno je i kod uzorka #4 nakon točke vlaženja. Navedena dodatna slijeganja suhog materijala nakon vlaženja potvrđuju kolapsibilno ponašanje proučavane metanogene frakcije bioosušenog otpada iz ŽCGO Marišćina. Sličan utjecaj zabilježen je i u radu Bashe i sur., (2015) i Chen i sur., (2010). Kolapsibilnost je svojstvo materijala da se uz konstantno opterećenje, uz povećanje sadržaja vlage, njegov volumen naglo smanjuje. Manja odstupanja u izmjenjenim slijeganjima između uzoraka #1, #3 i #4 u suhom stanju i uzoraka #2, #3 i #4 u vlažnom stanju mogu se pripisati nehomogenosti ispitivanog materijala.



Slika 97. Vremenski tijek slijeganja ispitanih uzoraka #1-4

Ukupna slijeganja uzorka #4 prikazana na Slici 98 mogu se podijeliti u četiri različite faze: inicijalno slijeganje, slijeganje uzrokovano vlaženjem, mehaničko puzanje i puzanje uzrokovano biorazgradnjom. Primjenom ranije opisane FORE metode za određivanje vremena kraja inicijalnog i početka sekundarnog slijeganja za dio krivulje nakon vlaženja kraj inicijalnog slijeganja određen je kao 16560 minuta odnosno 11,5 dana od početka pokusa. Nakon 79. dana ispitivanja došlo je do naglog smanjenja visine uzorka što upućuje na kraj mehaničkog puzanja i početak puzanja uslijed biorazgradnje. Dodatno je taj trenutak uspoređen s krivuljom plinova na Slici 94 gdje se jasno vidi početak povišenih koncentracija metana u uzorku oko 79. dana ispitivanja što upućuje na početak anaerobne razgradnje.



Slika 98. Vremenski tijek slijeganja uzorka #4 uključujući mehaničko puzanje i slijeganje uslijed biorazgradnje

Od ukupnog slijeganja uzorka #4 u kojem je biorazgradnja bila dozvoljena (ukupno slijeganje iznosi 28,09 mm), najveći udio od 47,88% pripada slijeganju prva četiri inkrementa prije vlaženja uzorka (slijeganje iznosi 13,45 mm), slijeganje 24 sata nakon vlaženja (slijeganje iznosi 9,53 mm) doprinosi s 33,93% ukupnim slijeganjima, slijeganje uslijed mehaničkog puzanja (slijeganje iznosi 3,22 mm) doprinosi s 11,46% dok slijeganje uslijed biorazgradnje (slijeganje iznosi 1,89 mm) doprinosi s 6,73%. Iz toga slijedi da veći utjecaj na količinu slijeganja ima mehaničko puzanje u odnosu na slijeganje uzrokovano biorazgradnjom, što su u svom istraživanju za MBO otpad iz Njemačke i Velike Britanije potvrdili i Siddiqui i sur., (2012).

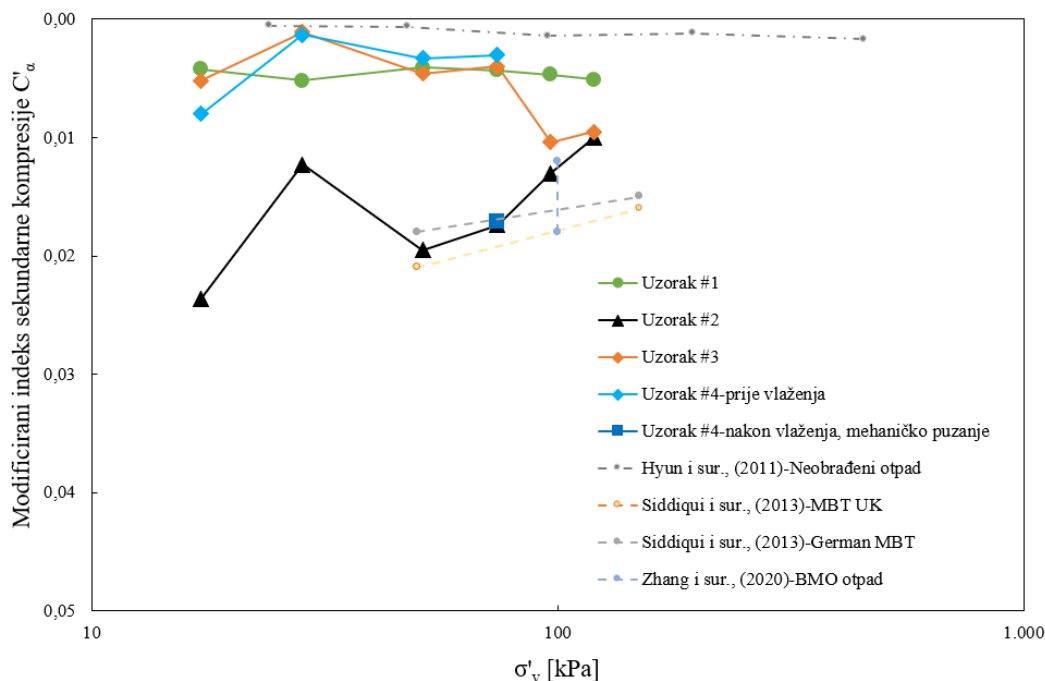
5.7.1 Modificirani indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C'_c , C'_α , $C'_{\alpha B}$

Usporedba modificiranih indeksa sekundarne kompresije C'_α dobivenih u ovom radu s podacima objavljenim od različitih autora prikazana je na Slici 99. Hyun i sur., (2011) objavili su rezultate za neobrađeni otpad star otprilike 10 godina, a maksimalna veličina čestica otpada tog materijala bila je 4,8 mm. Uzorci u tom radu prilikom ispitivanja bili su u vlažnom stanju. Siddiqui i sur., (2013) su ispitivali dva različita materijala koji si u ovom radu opisani u poglavlju 2.4.2 (Utvrdjeni udjeli organske tvari i udjeli vlage na uzorcima BMO/MBO otpada) koje je u svom radu koristila i Velkushanova (2011). Radi se o MBO otpadu iz Engleske (na Slici 99 označen s MBT UK) i o MBO otpadu iz Njemačke (na Slici 99 označen s German MBT), a tijekom ispitivanja, uzorci su bili potpuno potopljeni i podvrgnuti procesu recirkulacije procjedne vode. Dva modificirana indeksa sekundarne kompresije C'_α u radu Zhang i sur., (2020) za uzorak M1 i M2 dobiveni su u sličnim uvjetima ispitivanja kao i otpad u ovom doktorskom radu, a iznose za uzorak M1 0,018, i za M2 0,012 (Slika 99). Za BMO otpad koji je prošao postupak biosušenja, kod vertikalnog naprezanja od 100 kPa objavili su i modificirani koeficijent sekundarne kompresije povezan s biorazgradnjom (koji nisu prikazani na Slici 99) koji za uzorak M1 iznosi 0,174, a za uzorak M2 0,143. Modificirani indeks sekundarne kompresije povezan s razgradnjom materijala za uzorak #4 u ovom radu nije prikazan na Slici 99, a iznosi 0,044 (izračunato Jednadžbom (49)).

Modificirani indeksi sekundarne kompresije uzoraka #1-3 te uzorka #4 prije vlaženja ne pokazuju značajne promjene vrijednosti uslijed promjene naprezanja i početnog koeficijenta pora i dobro se uklapaju u rezultate koje su za bioosušeni komunalni otpad dobili Zhang i sur., (2020) u svom istraživanju. Na Slici 99 može se primijetiti da vrijednosti modificiranog indeksa sekundarne

kompresije inicijalno vlažnog uzorka #2 padaju s povećanjem vertikalnog naprezanja. Sličan trend prate i vlažni uzorci otpada iz Engleske i Njemačke u radu Siddiqui i sur., (2013).

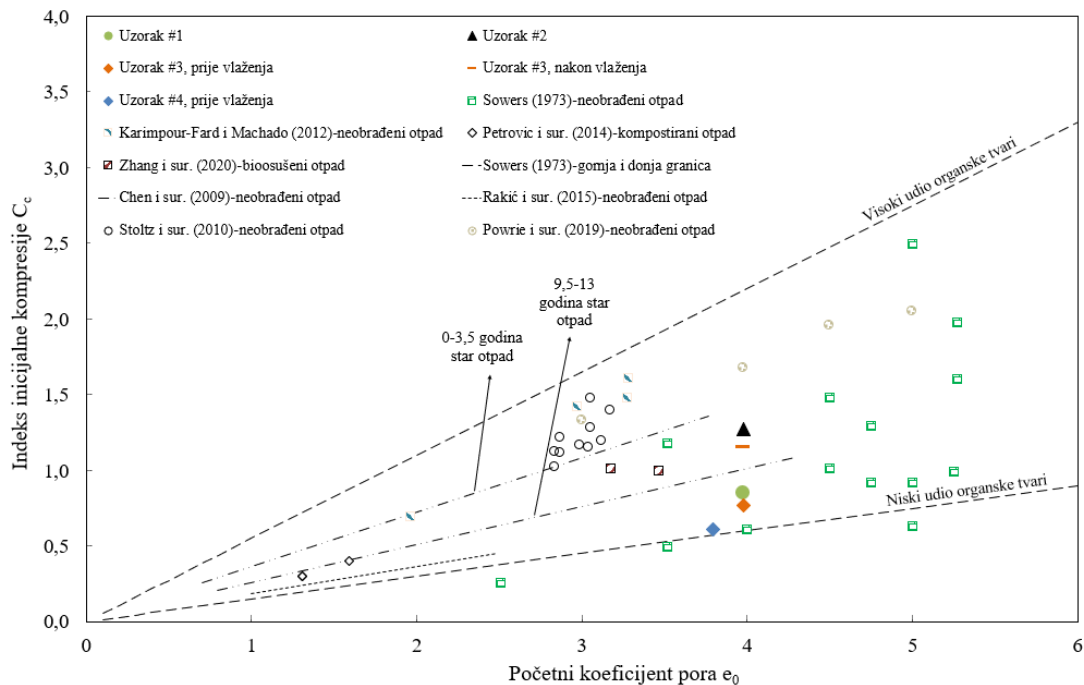
U poglavlju 5.4 Pregled dosadašnjih istraživanja prikazani su za neobrađeni otpad rezultati modificiranih indeksa sekundarne kompresije iz rada Basha i sur., (2015) u kojem se nalazi i veći broj prikupljenih podataka istog indeksa različitih autora. Iako u tom radu nisu prikazana i pripadna vertikalna naprezanja, pregled objavljenih rezultata modificiranih indeksa sekundarne kompresije u tom radu otkriva kako je za neobrađeni otpad različite starosti srednja vrijednost modificiranog indeksa sekundarne kompresije 0,067 uz standardnu devijaciju $\pm 0,15$. Srednja vrijednost navedenih rezultata puno je viša od vrijednosti modificiranih indeksa sekundarne kompresije dobivenih u ovom radu.



Slika 99. Modificirani indeksi sekundarne kompresije

5.7.2 Indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C_c , C_α , $C_{\alpha B}$

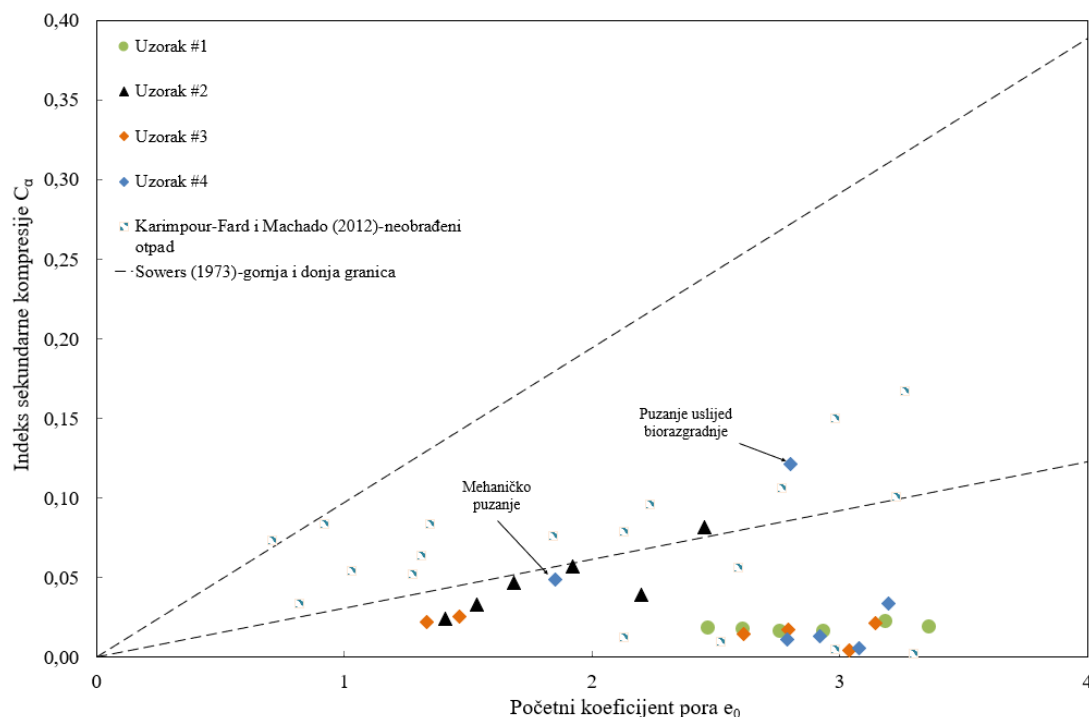
Usporedbom rezultata indeksa inicijalne kompresije C_c na Slici 100 vidljivo je da su dobiveni indeksi inicijalne kompresije C_c uzoraka #1-4 unutar granica predstavljenih u radu Sowers (1973). Dok se indeks inicijalne kompresije uzorka #2 i uzorka #3 nakon vlaženja nalaze u sredini raspona granica, suhi uzorak #1, uzorak #3 i #4 prije vlaženja dali su vrijednosti bliže donjoj granici koja predstavlja neobrađeni otpad s niskim udjelom organske tvari. Dobiveni rezultati indeksa inicijalne kompresije C_c u ovom radu dobro se uklapaju s indeksima inicijalne kompresije ostalih istraživača. Iako se većina rezultata ostalih istraživača na Slici 100 odnosi na neobrađeni otpad, indeksi inicijalne kompresije C_c od 1 i 1,01 u radu Zhang i sur., (2020) dobiveni su za BMO komunalni otpad.



Slika 100. Usporedba indeksa inicijalne kompresije C_c neobrađenog i BMO/MBO otpada

Slika 101 prikazuje usporedbu dobivenih indeksa sekundarne kompresije uzoraka #1-4 s rasponom sekundarnih indeksa kompresije neobrađenog otpadnog materijala. Sowers (1973) je objavio gornju i donju granicu vrijednosti sekundarnog indeksa kompresije neobrađenog otpadnog materijala u odnosu na organski sadržaj i početni koeficijent pora. Većina dobivenih rezultata indeksa sekundarne kompresije BMO (bioosušenog) otpadnog materijala iz ovog rada nalazi se

ispod donje granice. Iznimka su prvi inkrement uzorka #2 pod vertikalnim naprežanjem od 17,17 kPa i dio krivulje uzorka #4 koji se odnosi na biorazgradnju. Visoka vrijednost indeksa sekundarne kompresije uzorka #2 može se pripisati velikoj promjeni koeficijenta pora, dok se kod uzorka #4, visoka vrijednost indeksa sekundarne kompresije koji se odnosi na biorazgradnju $C_{\alpha,B}$ (0,122) može pripisati promjeni gustoće čvrstih čestica ρ_s zbog razgradnje organskog dijela otpada čime se koeficijent pora povećao za 56,42%.

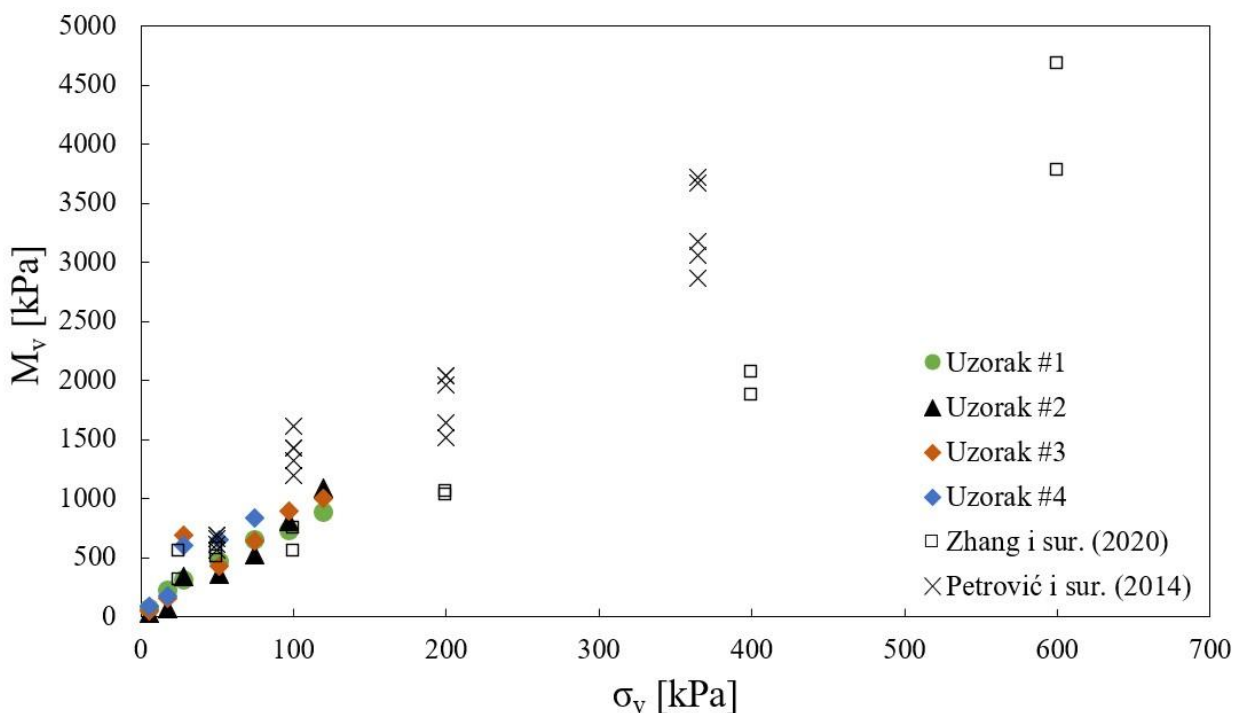


Slika 101. Indeksi sekundarne kompresije C_{α} i $C_{\alpha,B}$ ispitivanih uzoraka #1-4

Iako u radu Basha i sur., (2015) nisu poznati inicijalni koeficijenti pora, pregledom objavljenih rezultata (poglavlje 5.4 Pregled dosadašnjih istraživanja) modificiranih koeficijenata inicijalne i sekundarne kompresije spomenutih autora kao i vrlo opširan pregled rezultata drugih istraživača u tom radu otkriva kako je za neobrađeni otpad različite starosti srednja vrijednost modificiranog koeficijenta inicijalne kompresije 0,19 uz standardnu devijaciju $\pm 0,11$. Vrijednosti inicijalnih koeficijenata kompresije u ovom radu dale su više vrijednosti od srednjih vrijednosti spomenutih autora.

5.7.3 Modul stišljivosti M_v

Moduli stišljivosti uzoraka #1-4 dobro se uklapaju u raspon vrijednosti drugih istraživača kao što se vidi na Slici 102. Iako u ovom radu maksimalno naprezanje na uzorke #1-4 nije prelazilo 119,5 kPa, trend rasta modula stišljivosti s naprezanjem upućuje da bi se slični rezultati mogli dobiti i kod viših naprezanja te bi se mogli usporediti s rezultatima modula stišljivosti dobivenih u radu Zhang i sur. (2020) kod naprezanja u rasponu od 200-600 kPa što bi trebalo potvrditi budućim istraživanjima.



Slika 102. Moduli stišljivosti dobiveni u ovom istraživanju te ostalih istraživača

5.8 Zaključak

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja stišljivosti i kolapsibilnog ponašanja metanogene frakcije bioosušenog komunalnog otpada koji je prošao BMO otpada u ŽCGO Marišćina. Posebno razvijenim edometrom promjera 150 mm ispitano je puzanje materijala uz konstantno vertikalno opterećenje. Uzorci #1-3 ispitani su u sedam inkremenata naprezanja koji su redom: 5,39, 17,17, 28,38, 51,32, 74,2, 96,68 i 119,5 kPa dok je uzorak #4 ispitao u pet inkremenata naprezanja od 5,39 kPa do maksimalnog inkrementa naprezanja od 74,2 kPa.

Ukupno je ispitano četiri uzorka otpada u različitim uvjetima koji su navedeni u nastavku:

1. Uzorak #1 ugrađen je u ćeliju edometra u suhom stanju,
2. Uzorak #2 ugrađen je u ćeliju edometra u vlažnom stanju,
3. Uzorak #3 je u ćeliju edometra ugrađen u inicijalno suhom stanju, a nakon inkrementa opterećenja od 74,2 kPa uzorak je navlažen i opterećivan redosljedom inkremenata kao i uzorci #1 i #2 do maksimalnog naprezanja od 119,5 kPa,
4. Uzorak #4 ugrađen je i navlažen u istim uvjetima kao i uzorak #3 uz maksimalno vertikalno naprezanje od 74,2 kPa do kraja pokusa koji je trajao 365 dana.

Uzorcima #2 i #3 uz vodu, dodane su i otopine octene i propionske kiseline kako bi se spriječila razgradnja organskog dijela materijala. U dugotrajnoj konsolidaciji uzorka #4 biorazgradnja je bila dozvoljena.

Uz maksimalno vertikalno naprezanje od 119,5 kPa uzorak #1 dao je vertikalnu deformaciju od 31,3%, uzorak #2 52,32% dok je uzorak #3 dao ukupnu vertikalnu deformaciju od 54,39% u odnosu na početne visine uzoraka. Uzorak #4, uz maksimalno vertikalno naprezanje od 74,2 kPa dao je ukupnu vertikalnu deformaciju od 44,66% u odnosu na početnu visinu nakon 365 dana pokusa. Iz navedenog se može zaključiti kako vlažno stanje metanogene frakcije proučavane u okviru ovog rada daje puno više vrijednosti vertikalnih deformacija u odnosu na suho stanje materijala.

Inicijalno slijeganje uzrokovano masom gornje ploče najzastupljenije je kod vlažnog uzorka #2 sa 17,2% ukupnog slijeganja, dok je ta vrijednost kod suhog stanja materijala uzoraka #1, #3 i #4 manje zastupljena.

Nakon inkrementa naprezanja od 74,2 kPa i trenutka vlaženja uzoraka #3 i #4 zabilježena su povećana slijeganja uz konstantno vertikalno naprezanje čime je potvrđeno kolapsibilno ponašanje metanogene frakcije koja se ugrađuje u bioreaktorsko odlagalište u ŽCGO Marišćina. Iz tog razloga, posebnu pozornost potrebno je posvetiti vremenu zatvaranja bioreaktorskog odlagališta završnim pokrovnim sustavom i početku vlaženja i recirkulacije odloženog materijala zbog mogućih većih slijeganja otpada.

Na uzorku #4 u pokusu dugotrajne konsolidacije, slijeganja su podijeljena u četiri dijela, inicijalno, slijeganje uzrokovano vlaženjem, mehaničko puzanje te puzanje uzrokovano biorazgradnjom. Najveći udio u ukupnom slijeganju (ukupno slijeganje iznosi 28,09 mm) uzorka #4 ima slijeganje nakon prva četiri inkrementa prije vlaženja s 47,88% (slijeganje iznosi 13,45 mm), slijeganje 24 sata nakon vlaženja (slijeganje iznosi 9,53 mm) doprinosi s 33,93% ukupnim slijeganjima, slijeganje uslijed mehaničkog puzanja (slijeganje iznosi 3,22 mm) doprinosi s 11,46% dok slijeganje uslijed biorazgradnje (slijeganje iznosi 1,89 mm) doprinosi s 6,73%. U dijelu slijeganja uzrokovanom biorazgradnjom, suha masa otpada smanjila se za 83,8 g dok je puzanje uzrokovano biorazgradnjom donijelo promjenu u visini uzorka od 1,89 mm što čini 6,73% ukupnih slijeganja.

Dobiveni modificirani indeksi primarne i sekundarne kompresije C'_c , C'_α i $C'_{\alpha B}$, moduli stišljivosti M_v , indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C_c , C_α i $C_{\alpha B}$ metanogene frakcije BMO materijala iz ŽCGO Marišćine mogu se dobro usporediti s rezultatima drugih istraživača.

Modificirani indeksi inicijalne kompresije C'_c uzoraka #2 i #3 u vlažnom stanju materijala su redom: 0,26 i 0,23. Budući da su indeksi inicijalne kompresije uzorka #1, #3 i #4 u suhom stanju redom: 0,17, 0,16 i 0,13, može se zaključiti da će vlažno stanje metanogene frakcije pokazivati veću stišljivost. Isti trend prate i indeksi inicijalne kompresije C_c uzoraka #2 i #3 u vlažnom stanju materijala koji redom iznose: 1,27 i 1,16. Budući da su indeksi inicijalne kompresije uzorka #1, #3 i #4 u suhom stanju redom: 0,85, 0,77 i 0,61, može se zaključiti isto.

Osim slijeganja, u pokusu dugotrajne konsolidacije uzorka #4 kontinuirano su mjereni temperatura i plinovi. Koncentracije plinova mjerene su svakih 7 dana, a početak biorazgradnje metanogene frakcije u uzorku zabilježen je kao 79. dan pokusa kada su zabilježene veće koncentracije metana. Povećane koncentracije metana zabilježene su sve do 284. dana pokusa. Maksimalna koncentracija metana od 28,9% izmjerena je na 193. dan ispitivanja. Najviša zabilježena temperatura u uzorku

bila je 26,7 °C, dok je najniža izmjerena temperatura bila 20,3 °C što upućuje da do razgradnje uzorka nije došlo u optimalnim uvjetima. Usporedbom podataka mjerenja plinova i temperature primijećena je određena korelacija između zabilježenog porasta koncentracija plinova i temperature u uzorku između 100. i 200. dana ispitivanja.

5.9 Popis literature

Almohana A., Richards D. J., Stringfellow A. M., (2017). The geotechnical properties of high organic content waste. Sardinia 2017, 16th International waste management and landfill symposium, S. Margherita di Pula (CA), Italy, 2-6 october 2017.

Anderson E. O., Balanko L. A., Lem J. M. and Davis D. H., (2004). Field monitoring of the compressibility of municipal solid waste and soft alluvium. 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Paper No. 8.08, New York, NY, April 13-17.

Bareither C. A., Benson C. H., and Edil T. B., (2012a). Compression behavior of municipal solid waste: Immediate compression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 138(9), pp: 1047–1062.

Bareither C. A., Benson C. H., and Edil T. B., (2012b). Effects of Waste Composition and Decomposition on the Shear Strength of Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 138(10), pp: 1161–1174. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000702.

Bareither C. A., Benson C. H., and Edil T. B., (2012c): Compression of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfills: Mechanical Creep and Biocompression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 139(7). doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000835.

Bareither, C.A., Benson, C.H., Edil, T.B., 2013. Compression of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfills: Mechanical Creep and Biocompression, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2013.139:1007-1021.

Basha B. M., Parakalla N., Reddy K. R., (2015). Experimental and statistical evaluation of compressibility of fresh and landfilled municipal solid waste under elevated moisture contents. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 10(1), DOI: 10.1179/1939787915Y.0000000018.

Bauer Jan, Münnich Kai and Fricke Klaus (2006), Investigation of mechanical properties of MBT waste, Proceedings of the Fourth Asian-Pacific Landfill Symposium (APLAS), Shangai, China.

Beaven i Powrie (1995). Hydrogeological and geotechnical properties of refuse using a large scale compression cell. Proc. Sardinia '95, 5th. Int. Landfill Symposium, Calgary, Italy. Centro Ingegneria Sanitaria Ambientale (CISA), Calgary, Italy.

Bidlingmaier W., Scheelhaase T., Maile A., (1999). Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll 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.

Boutwell G. P., and Fiore N. A., (1995). Settlement of clay cover on saturated garbage. Geoenvironment 2000, (eds. Y. B. Acar and D. Daniels), pp: 964–979, New York, American Society of Civil Engineers.

Burlingame M. J., (1985). Construction of a highway on a sanitary landfill and its long-term performance. Transportation Research Record, 1031, pp: 34–40.

Carrubba P., Cossu R., (2003). 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.

Chen R. H., Chen K. S., Liu C. N., (2010). Study of the mechanical compression behavior of municipal solid waste by temperature-controlled compression tests. Environmental Earth Sciences. Vol. 61, pp: 1677-1690.

Chen Y. M., Zhan T. L. T., Wei H. Y., Ke H., (2009). Aging and compressibility of municipal solid wastes. Waste Management. Vol. 29, pp: 86-95. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.02.024-

Cossu i Stegmann, (2019). Solid Waste Landfilling: concepts, processes, technologies, Elsevier, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02435-0>.

Dixon N., Ngambi S. C., Connell A. K., (2001). Internal report, Loughborough University.

Dominczyk A., Krzystek L., Ledakowicz S., (2014). Biodrying of Organic Municipal Wastes and Residues from the Pulp and Paper Industry. Drying Technology: An International Journal. Vol. 32(11), pp: 1297-1303. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2014.901349>.

Drut N., Gourc J. P., Staub M., Stoltz G., Mansour A., (2011). Large-scale oedometers (ciclades) for monitoring the long-term hydromechanical behaviour of MSW. Fourth International Workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfills” Santander, Spain; 27 - 28 April.

Duellmann H., (2002). Untersuchungen zum Einbau von MBA-Abfaellen auf der Zentraldeponie Hannover, Laboruntersuchungen zum Verdichtungs-, Durchlaessigkeits-, Last-Setzungs- und Scherverhalten. Februar 2002. Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Hannover.

Durmusoglu E., Sanchez I. and Corapcioglu M., (2006). Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples. *Environmental Geology*. Vol. 50, pp: 773–786.

Gabr M. A., and Valero S. N., (1995). Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, pp: 241–251.

Ham G. Y., Matsuto T., Tojo Y., Matsuo T., (2019). Material and moisture balance in a full-scale bio-drying MBT system for solid recovered fuel production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Vol. 22, pp: 167-175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00925-2>.

Ham G. Y., Lee D. H., Matsuto T., Tojo Y., Park J. R., (2020). Simultaneous effects of airflow and temperature increase on water removal in bio-drying. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Vol. 22, pp: 1056-1066. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01000-x>.

Handy R. L., (2002). First-Order Rate Equations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 128, pp: 416-425.

Hartwell J., Mousavi M. S., Eun J., Bartelt-Hunt S., (2020). Evaluation of Depth-Dependent Properties of Municipal Solid Waste Using a Large Diameter-Borehole Sampling Method. *Journal of the Air & Waste Management Association*, DOI: 10.1080/10962247.2020.1848942. pp: 433-446.

Heiss-Ziegler C., Fehrer K., (2003). Geotechnical behaviour of mechanically-biologically pretreated municipal solid waste (MSW). In: *Proc. of the Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.

Hossain S., (2002). Mechanics of Compressibility and Strength of Solid Waste in Bioreactor Landfills. PhD dissertation, Faculty of North Carolina State University at Raleigh.

Hossain M. S., Gabr M. A. and Barlaz M. A., (2003). Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, Vol. 129, pp: 1151–1158.

Hyun I. P., Borinara P., Hong K. D., (2011). Geotechnical considerations for end-use of old municipal solid waste landfills. *International Journal of Environmental Research*. Vol. 5(3), pp: 573–584.

Jessberger H. L. i Kockel R. (1993). Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials, *Proceedings of Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, pp: 1383-1392.

Jessberger H. L., (1994). Geotechnical Aspects of landfills design and construction. Part 2: Material parameters and test methods. *Proc. Of institution of Civil Engineers (ICE). Geotechnical Engineering Journal*, Vol. 107, pp: 105-113.

Jo Y.S. i Jang Y.S., (2021). Comparison of waste settlement characteristics for two landfills disposed in long sequential periods. *Waste Management*, Vol. 131, pp 433-442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.003>.

Jones D. R. V., i Dixon N., (2003). Stability of Landfill Lining Systems: Report No. 1, Literature Review. R&D Technical Report P1-385/TR1. Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, BRISTOL, BS32 4UD.

Karimpour-Fard M., Machado S. L., (2012). Deformation Characteristics of MSW Materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 17, pp: 2009-2023.

Kuehle-Weidemeier M., (2007). Geomechanical properties of mechanically and biologically treated municipal solid waste. Review of literature in German language and own investigations. Langenhagen, Germany.

Kuehle-Weidemeier M. i Doedens H., (2003). “Landfilling and Properties of MBP Waste,” *Proceedings Sardinia 03, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

Lakshmikanthan P., Sughosh P., Sivakumar Babu G. L., (2018). Studies on Characterization of Mechanically Biologically Treated Waste from Bangalore City. *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 48, pp 293-304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0296-4>.

Landva A. O. and Clark J. I., (1990). Geotechnics of waste fill. *Geotechnics of Waste Fills*. ASTM STP 1070, (eds. A. O. Landva and G. D. Knowles), Philadelphia, PA, American Society for Testing and Materials, pp: 86–103.

Landva A. O., Valsangkar A. J. and Pelkey S. G., (2000). Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 37, pp: 1157–1165.

Machado S. L., Carvalho M. F. and Vilar O. M., (2002). Constitutive model for municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. Vol. 128, pp: 940–951.

Marques A. C. M., Filz G. M. and Vilar O. M., (2003). Composite compressibility model for municipal solid waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. Vol. 129, pp: 372–378.

Münnich K., Bauer J., Bahr T., Fricke K., (2005), Landfilling of pre-treated waste - consequences for the construction and operation of landfills, CONFERENCE “THE FUTURE OF RESIDUAL WASTE MANAGEMENT IN EUROPE” 2005.

Navaee-Ardeh S., Bertrand F., Stuart P. R., (2011). Development and Experimental Evaluation of a 1D Distributed Model of Transport Phenomena in a Continuous Biodrying Process for Pulp and Paper Mixed Sludge. *Drying Technology: An International Journal*. Vol. 29(2), pp: 135-152, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2010.482723>.

Oweis I. S. and Khera R., (1986). Criteria for geotechnical construction on sanitary landfills. *Symposium on Environmental Geotechnical Engineering*. Allentown, PA, pp: 215–222.

Petrovic I., Stuhec D., Kovacic D., (2014). Large oedometer for measuring stiffness of MBT waste. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 37, pp: 296–310.

Powrie W., Xu X. B., Richards D., Zhan L. T., Chen Y. M., (2019). Mechanisms of settlement in municipal solid waste landfills. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. Vol. 20(12), pp: 927-947.

Rao S. K., Moulton L. K., Seals R. K. (1977). Settlement of refuse landfills. *Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, pp: 574–599.

Reddy K. R., Hettiarachchi H., Giri R. K., Gangathulasi J., (2015). Effects of Degradation on Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste from Orchard Hills Landfill, USA. *International Journal of Geosynthetics and Geound Engineering*. Vol. 1(24). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0026-2>.

Rettenberger G., (2018). Personal data set and documentation.

Sharma H. D., and De A., (2007). Municipal solid waste landfill settlement: post closure perspectives. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. Vol. 133(6), pp: 619–629.

Siddiqui A. A., Richards D. J., Powrie W., (2012). Investigations into the landfill behaviour of pretreated wastes. *Waste Management*, Vol. 32, pp: 1420-1426. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.016>.

Siddiqui A. A., Powrie W., and Richards D. J., (2013). Settlement Characteristics of Mechanically Biologically Treated Wastes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 139(10). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000918.

Sivakumar Babu G. L., Reddy K. R., Chouksey S. K., (2010). Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression. *Waste Management*, Vol. 30, pp: 11-22.

Slezak R., Krzystek L., Ledakowicz S., (2019). Biological drying of municipal solid waste from landfill. *Drying Technology*. Vol. 38(1-2), pp: 189-199, DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1611599>.

Sowers G. F., (1973). Settlement of Waste Disposal Fills. *Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 2, pp: 207–210.

Stoltz G., Gourc J. P., Oxarango L., (2010). Characterisation of the physico-mechanical parameters of MSW. *Waste Management*, Vol. 30, pp 1439-1449. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.03.016.

Stulgis R. P., Soydemir C., and Telgener R. J., (1995). Predicting landfill settlement. *Geoenvironment 2000*, (eds. Y. B. Acar and D. Daniels), pp: 980–994, New York, American Society of Civil Engineers.

Tambone F., Scaglia B., Scotti S., Adani F., (2011). Effects of biodrying process on municipal solid waste properties. *Bioresource Technology*. Vol. 102, pp: 7443-7450, DOI: 10.1016/j.biortech.2011.05.010.

Thakur D., Gupta A. K., Ganguly R., (2019). Geotechnical Properties of Fresh and Degraded MSW In the Foothill of Shivalik Range Una, Himachal Pradesh. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. Vol. 8(2), pp: 363-374. ISSN: 2277-3878, DOI: 10.35940/ijrte.B1479.078219.

Tiwari D., (2014). Estimation of optimum compaction level for bioreactor landfill operation. PhD dissertation. Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington. Published by ProQuest LLC (2015).

Velkushanova K., (2011). Characterization of wastes towards sustainable landfilling by some physical and mechanical properties with an emphasis on solid particles compressibility. PhD dissertation, University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment.

Vilar O. M. and Carvalho M. F., (2004). Mechanical properties of municipal solid waste. *Journal Testing and Evaluation*. Vol. 32(6), pp: 438–449.

Wall D. K., and Zeiss C., (1995). Municipal landfill biodegradation and settlement. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121(3), pp: 214–224.

Watts K. S. i Charles J. A., (1990). Settlement of recently placed domestic refuse landfills. *Proc. Institute of Civil Engineering*, part 1, Vol. 88, pp: 971-993.

Xie Y., Xue J., Gnanendran C. T., Xie K., (2022). Geotechnical properties of fresh municipal solid wastes with different compositions under leachate exposure. *Waste Management*, Vol. 149, pp: 207-217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.020>.

Xu H., Wang J.N., Zhan L.T., Zhang Z.Y., Xu X.B., Chen Y.M., Yao K., (2020). Characterization of compression behaviors of high food waste content (HFWC) MSW and no food waste content

(NFWC) MSW in China. Waste Management, Vol. 103, pp: 305-313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.036>

Yang B., Zhang L., Jahng D., (2014). Importance of Initial Moisture Content and Bulking Agent for Biodrying Sewage Sludge. Drying Technology: An International Journal. Vol. 32(2), pp: 135-144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2013.795586>.

Yang B., Hao Z., Jahng D., (2017). Advances in biodrying technologies for converting organic wastes into solid fuel. Drying Technology. Vol. 35(16), pp: 1950-1969, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2017.1322100>.

Zaminskie E. M., Kabir M. G., Haddad A., (1994). Settlement evaluation for cap closure performance, in Vertical and horizontal deformations of foundations and embankments. Settlement 94, (eds. A. T. Yeung and G. Y. Felio), ASCE, Vol. 1, pp: 462–475.

Zekkos D., Fei X., Grizi A., Athanasopoulos G. A., (2016). Response of Municipal Solid Waste to Mechanical Compression. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 143(3).

Zhang Z., Fang Y., Wang Y., Xu H., (2020). Compression behaviors of mechanically biologically treated wastes of Tianziling landfill in Hangzhou, China. Environmental Science and Pollution Research, Vol. 27, pp 43970–43986. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10253-w>.

Ziehmann G., (1999). Veraenderung des mechanischen Verhaltens durch die mechanische und biologische Vorbehandlung, Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfaellen, Veroeffentlichungen des Zentrums fur Abfallforschung der Technischen Universitaet Braunschweig, Heft 14.

Zordan J., Gourc J. P., Oxarango I., Conte M., Carrubba P., (2013). Biomechanical behaviour of MSW: settlements-biodegradation relationship study through experiment and modeling. Proceedings of Sardinia 2013, 14th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, 30 September - 4 October, Cagliari, Sardinia, Italy.

6) ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivanja su provedena na metanogenoj frakciji uzorkovanoj s postrojenja za mehaničko biološku obradu otpada u Marišćini. Ispitivanja su napravljena na uzorcima otpada uzorkovanim u prvoj polovici (materijal A) i drugoj polovici (materijal B) godine.

Laboratorijska ispitivanja podijeljena su u četiri dijela:

1. Ispitivanje osnovnih geotehničkih parametara uzorkovanog otpada
2. Određivanje gustoće čvrstih čestica otpada
3. Zbijanje otpada
4. Kolapsibilno ponašanje BMO otpada

Rezultatima ispitivanja osnovnih geotehničkih parametara dobiven je osnovni uvid i napravljena je preliminarna procjena karakteristika ispitivanog materijala. Granulometrijske krivulje otpada pokazuju da je preko 90% materijala metanogene frakcije manje od 25 mm. Ispitivani otpad klasificiran je kao dobro graduirani, krupnozrnati materijal, iako će svojstva stišljivosti i nosivosti ovakvog otpadnog materijala biti znatno drugačija od npr. šljunkovitog tla. Količina organske tvari od preko 50% sugerira na dobar potencijal za proizvodnju bioplina u sklopu bioreaktorskog odlagališta u Marišćini. Sastav otpada koji je određen ručnim sortiranjem metanogene frakcije nakon sušenja u sušioniku može se usporediti sa sastavom BMO/MBO otpada iz drugih zemalja, a generalno se može zaključiti kako BMO/MBO otpada proizvodi najveći udio sitne frakcije koja se golim okom ne može identificirati prema određenim komponentama. Osim prema sastavu, otpad je razvrstan i prema obliku čestica na 0D, 1D, 2D i 3D obliku zrna. Najveći udio nakon 0D oblika čestica (sitne frakcije) pripada 2D obliku čestica za materijal A i B. 2D čestice mogu djelovati kao ojačanje u odlagalištu otpada ali isto tako mogu pozitivno ili negativno djelovati, odnosno zaustavljati ili preusmjeravati tok fluida kroz otpad.

Budući da su čestice metanogene frakcije koje se odlažu u bioreaktorsko odlagalište otpada nepravilnog oblika, za potrebe određivanja gustoće čvrstih čestica ρ_s razvijen je postupak mjerenja s opremom koja je dostupna u standardnim geomehaničkim laboratorijima kako bi se oponašalo mjerenje plinskim piknometrom. Gustoća čvrstih čestica važan je parametar koji služi za određivanje osnovnih relacija za predviđanje slijeganja unutar tijela odlagališta. Korelacijom

izmjerene gustoće čvrstih čestica otpada materijala A i B s ostalim parametrima izvedeno je nekoliko zaključaka.

Budući da razgradnja i slijeganje BMO otpada, uzrokuju snažna odstupanja parametara ρ_s i poroznosti n tijekom vremena, odgovarajuće vrijednosti suhe gustoće ρ_d također će pokazati značajna odstupanja.

Za procjenu odgovarajuće suhe gustoće ρ_d odloženog BMO otpadnog materijala, ukoliko je poznata trenutna poroznost (n) predložena je linearna korelacija između ρ_d i n parametara.

Osim s poroznosti n , predložen je i funkcionalni odnos $\rho_d = f(e)$ s kojim se koeficijent pora e može procijeniti bez poznavanja odgovarajuće gustoće čvrstih čestica ρ_s .

Osim plinskog piknometra, za određivanje gustoće čvrstih čestica BMO otpadnog materijala korištena je i metoda velikog vodenog piknometra prema BS 1377: Part 2: 1990. standardu. Ispitani su uzorci BMO otpada sa svim sastavnim komponentama kao i najzastupljenije pojedinačne komponente (plastika, staklo, papir/karton te neidentificirano <2 mm i >2 mm). Dodatno je 10 uzoraka materijala B ispitano prvo u plinskom piknometru, a nakon toga su isti uzorci ispitani metodom VVP. Dobiveni rezultati pokazuju da metoda mjerenja VVP daje konstantno niže vrijednosti u odnosu na metodu plinskog piknometra. Za materijal A, srednja vrijednost gustoće čvrstih čestica ρ_s određena metodom plinskog piknometra na 23 uzorka iznosi 1,88 g/cm³, a za 70 uzoraka materijala B, ta vrijednost iznosi 1,82 g/cm³. Metoda VVP materijala A za 12 uzoraka dala je srednju vrijednost gustoće čvrstih čestica ρ_s od 1,54 g/cm³, dok je za 10 uzoraka materijala B ta vrijednost 1,62 g/cm³.

Usporedba izmjerenih rezultata s literaturom pokazuje da iako se vrijednosti donjih i gornjih kvartila materijala A i B za obje metode mjerenja u ovom radu dobro uklapaju u vrijednosti donjih i gornjih kvartila gustoća čvrstih čestica obrađenog otpada objavljene od različitih autora, donji i gornji kvartili dobiveni metodom VVP bliže su donjim kvartilima, dok su kvartili dobiveni metodom plinskog piknometra bliži gornjim kvartilima obrađenog otpada različitih autora.

U usporedbi s metodom VVP koja je dala konstantno niže rezultate u usporedbi s plinskim piknometrom, postupak mjerenja metodom plinskog piknometra s dostupnom opremom standardnog geotehničkog laboratorija pokazao se dovoljno točnim, lako dostupnim i brzim rješenjem za određivanje gustoće čvrstih čestica MBO otpada.

Provedenim ispitivanjima zbijanja na vibro ploči te u standardnom i modificiranom Proctorovom pokusu može se zaključiti sljedeće:

- Zbijanjem suhih uzoraka vibro pločom dobivena je srednja vrijednost maksimalne suhe gustoće ρ_d od 0,38 g/cm³ uz pripadni minimalni koeficijent pora od 3,96.
- Odgovarajuća maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage dobiveni mjerenjima vibro pločom materijala A je 0,61 g/cm³ i 74,78%.
- Za materijal B i ispitivanja vibro pločom, zbog položenosti krivulje nije bilo moguće točno odrediti maksimalnu suhu gustoću i optimalnu vlažnost.
- Na osam uzoraka materijala A određena je minimalna suha gustoća $\rho_{d,min}$ koja se kreće u rasponu od 0,15 g/cm³ do 0,21 g/cm³ sa srednjom vrijednosti $\rho_{d,min}$ od 0,17 g/cm³ i standardnom devijacijom od $\pm 0,02$ g/cm³. Pripadni maksimalan koeficijent pora materijala A kreće se u rasponu od 7,80 do 11,94 sa srednjom vrijednosti od 9,97 i standardnom devijacijom od $\pm 1,37$. No, kod ovih rezultata u obzir treba uzeti veličinu uzoraka. Maksimalan koeficijent pora od 9,97 (za minimalnu suhu gustoću $\rho_{d,min}$ 0,17 g/cm³) prikazan u ovom poglavlju izmjeren je u kalupu volumena 2832,19 cm³, dok rezultati prikazani u poglavlju 3.6.5 Korelacija suhe gustoće ρ_d i koeficijenta pora e uzimajući u obzir i gustoću čvrstih čestica ρ_s , uzorci su ispitani u kalupu volumena 220,68 cm³ i ukazuju da je moguće postići koeficijent pora od čak 14,86, pri čemu je suha gustoća tih uzoraka bila 0,12 g/cm³.
- U standardnom Proctorovom pokusu za materijal A, maksimalna suha gustoća za optimalan sadržaj vlage od 81,7% iznosi 0,65 g/cm³.
- Modificiranim Proctorovim pokusom za materijal B maksimalna suha gustoća i optimalni sadržaj vlage su 0,80 g/cm³ i 61%.
- Iz ispitivanja u Proctorovom pokusu, u odnosu na poznate energije zbijanja može se zaključiti da se povećanjem energije zbijanja povećava i maksimalna suha gustoća uz istovremeno smanjenje optimalne vlažnosti. Generalno, prilikom ugradnje materijala u bioreaktorsko odlagalište potrebno je posebnu pažnju obratiti na način ugradnje i zbijenost materijala, budući da bi prevelika suha gustoća ugrađenog materijala mogla dovesti do nepravilnog rada odlagališta (Tiwari, 2014).

Stišljivost i kolapsibilno ponašanje otpada provjereno je u specijalno dizajniranom edometru promjera 150 mm. Ukupno je ispitano četiri uzorka otpada u različitim uvjetima. U suhom stanju, u vlažnom stanju, u početnom suhom stanju do određenog naprezanja nakon čega je dodana voda i kiseline kako bi se spriječila biorazgradnja, i na jednom uzorku provedena je dugotrajna konsolidacija u trajanju od 365 dana u početnom suhom stanju do određenog naprezanja nakon čega je dodana voda uz dozvoljenu biorazgradnju otpada.

Maksimalne vertikalne deformacije koje se mogu očekivati uz vertikalno naprezanje od 119,5 kPa su za suho stanje materijala 31,3% (uzorak #1), a za vlažna stanja materijala (uzorci #2-4) redom: 52,32%, 54,39% i 44,66%.

Uzorcima #3 i #4 nakon inkrementa naprezanja od 74,2 kPa dodana je voda uz konstantno vertikalno opterećenje. Pri tome su zabilježene povišene vrijednosti slijeganja čime je potvrđeno kolapsibilno ponašanje ispitnog bioosušenog otpadnog materijala.

U pokusu dugotrajne konsolidacije na uzorku #4, slijeganja su podijeljena u četiri dijela, inicijalno slijeganje, slijeganje uzrokovano vlaženjem, mehaničko puzanje te puzanje uslijed biorazgradnje. Najveći udio u ukupnom slijeganju (ukupno slijeganje iznosi 28,09 mm) uzorka #4 ima slijeganje nakon prva četiri inkrementa prije vlaženja s 47,88% (slijeganje iznosi 13,45 mm), slijeganje 24 sata nakon vlaženja (slijeganje iznosi 9,53 mm) doprinosi s 33,93% ukupnim slijeganjima, slijeganje uslijed mehaničkog puzanja (slijeganje iznosi 3,22 mm) doprinosi s 11,46% dok slijeganje uslijed biorazgradnje (slijeganje iznosi 1,89 mm) doprinosi s 6,73%. U dijelu slijeganja uzrokovanom biorazgradnjom, suha masa otpada smanjila se za 83,8 g dok je puzanje uzrokovano biorazgradnjom donijelo promjenu u visini uzorka od 1,89 mm što čini 6,73% ukupnih slijeganja. Osim slijeganja, u uzorku #4 kontinuirano su mjerene koncentracije odlagališnih plinova i temperatura uzorka. Početak biorazgradnje zabilježen je kao 79. dan pokusa kada su zabilježene povećane koncentracije metana. Maksimalna koncentracija metana izmjerena je na 193. dan ispitivanja i ona iznosi 28,9%, dok je kraj anaerobne razgradnje zabilježen kao 284. dan pokusa kada su mjerene koncentracije metana postale zanemarive. Najviša zabilježena temperatura u uzorku bila je 26,7 °C.

Dobiveni modificirani indeksi primarne i sekundarne kompresije C'_c , C'_α i $C'_{\alpha B}$, moduli stišljivosti M_v , indeksi inicijalne i sekundarne kompresije C_c , C_α i $C_{\alpha B}$ metanogene frakcije BMO materijala iz ŽCGO Marišćine mogu se dobro usporediti s rezultatima drugih istraživača.

Modificirani indeksi inicijalne kompresije C'_c uzoraka #2 i #3 u vlažnom stanju materijala su redom: 0,26 i 0,23. Budući da su indeksi inicijalne kompresije uzorka #1, #3 i #4 u suhom stanju redom: 0,17, 0,16 i 0,13, može se zaključiti da će vlažno stanje metanogene frakcije pokazivati veću stišljivost. Isti trend prate i indeksi inicijalne kompresije C_c uzoraka #2 i #3 u vlažnom stanju materijala koji redom iznose: 1,27 i 1,16. Budući da su indeksi inicijalne kompresije uzorka #1, #3 i #4 u suhom stanju redom: 0,85, 0,77 i 0,61, može se zaključiti isto.

7) Preporuke za daljnja istraživanja

Za gustoću čvrstih čestica ρ_s :

- Povećati broj ispitivanja gustoće čvrstih čestica plinskim piknometrom uzoraka iz prve polovice godine (materijal A).
- Povećati broj usporednih ispitivanja uzoraka prvo u plinskom piknometru a zatim u velikom vodenom piknometru.
- Razviti sustav mjerenja plinskim piknometrom sa standardnom laboratorijskom opremom na uzorcima većeg razmjera.
- Odrediti gustoću čvrstih čestica plinskim i velikim vodenim piknometrom svih komponenata u proučavanom BMO otpadu zasebno i povećati broj ispitanih uzoraka pojedine komponente zbog provjere ponovljivosti rezultata.

Za zbijanje otpada:

- Ispitati veći broj uzoraka BMO otpada vibro pločom, standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom.
- Odrediti maksimalnu suhu gustoću i optimalnu vlažnost uzoraka metanogene frakcije s točno određenim udjelom pojedine komponente otpada.
- Odrediti maksimalnu suhu gustoću i optimalnu vlažnost uzoraka metanogene frakcije s različitim veličinama čestica otpada u uzorku, trenutne čestice od 25 mm usitniti na manje čestice i ispitati utjecaj veličine zrna na parametre zbijenosti.

Za kolapsibilno ponašanje BMO otpada u edometru:

- Povećati broj istraživanja na području stišljivosti BMO otpada.
- Definirati standard za ispitivanje stišljivosti otpada.
- Razviti procedure ugradnje, zbijanja i pripreme uzoraka za ispitivanje kako bi se povećala ponovljivost rezultata pokusa.
- Ispitati metanogenu frakciju BMO otpada u edometru većeg razmjera zbog usporedbe utjecaja veličine uzorka na rezultate ispitivanja.
- Ispitati metanogenu frakciju BMO otpada s različitim udjelima 0D, 1D, 2D i 3D oblika čestica.

- Provesti još minimalno jedan dugotrajan pokus stišljivosti zbog usporedbe rezultata i provjere ponovljivosti ispitivanja.
- Provesti jedan dugotrajan pokus stišljivosti uz spriječenu biorazgradnju dodavanjem otopina octene i propionske kiseline.
- Nadograditi edometarski sustav sa sakupljanjem volumena plinova nastalih u pokusu dugotrajne konsolidacije.
- Nadograditi sustav izolacije ili kontrole temperaturnih uvjeta u edometru zbog postizanja idealnijih uvjeta biorazgradnje otpada.

ZAHVALA

Hrvatskoj zakladi za znanost koja je financirala Uspostavni istraživački projekt UIP-05-2017-5157 pod nazivom: „Ispitivanje i modeliranje mehaničkog ponašanja bioosušenog otpada kao preduvjet energetske uporabe“ u sklopu koje je izrađena ova doktorska disertacija.

8) PRILOZI

Prilog A – Tehnička deklaracija pijeska granulacije 0-1 mm

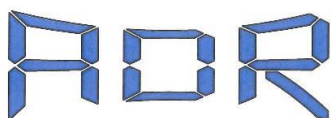
TEHNIČKA UPUTA PROIZVODA
AGREGAT ZA MORT
Frakcija 0/1 mm S ŠTEFANAC

JEDINSTVO d.d. / proizvodni Pogon JEROVEC
 Namijenjen je za izradu morta za primjenu u zgradama, cestama i inženjerskim građevinama.
 Kvarc
 Sivo-žute boje, sušeni.

Granulometrijski sastav, gustoća i upijanje vode		
Frakcija agregata d/D, mm	0/1	Čistoća
Tipični granulometrijski sastav:		Sadržaj sitnih čestica Razred 1
prolaz kroz sito 2,0 mm	100	Modul finoće CP
prolaz kroz sito 1,0 mm	100	Sastav/sadržaj
prolaz kroz sito 0,5 mm	97,0	Kloridi, % 0,00
prolaz kroz sito 0,25 mm	47,0	Sulfati topivi u kiselini AS 0,2
prolaz kroz sito 0,125 mm	8,0	Ukupni sumpor, % 0,000
prolaz kroz sito 0,063 mm	2,2	Sadržaj humusa nema
Gustoća zrna, Mg/m ³	$\rho_s = 2,63$ $\rho_{fd} = 2,59$ $\rho_{ssd} = 2,60$	Alkalno silikatna reaktivnost neštetan agregat
Upijanje vode, %	0,6	Opasne tvari
		Otpuštanje opasnih tvari prirodni kvarcni pijesak nema otpuštanja opasnih tvari

Sušeni agregat se isporučuje u rastresitom stanju ili vrećama od 25 kg i big bag vrećama.
 Skladištiti u suhim i zatvorenim prostorima i spriječiti stvaranje prašine.
 Neograničen.
 Za vrijeme transporta spriječiti prašenje materijala i zaštititi agregat od vlage. Kvarcni pijesak 0/1mm S nije uvršten među opasne tvari za prijevoz po cesti ili željeznici.
 Nisu potrebna posebna zaštitna sredstva za siguran rad. Izbjegavati stvaranje prašine u zraku.
 U skladu s Uredbom o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada ostatke razvrstati prema ključnom broju 01 04 09. Ambalaža se može reciklirati.
 Nadzorničke kontrole proizvodnje, sustav ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava: 2+. Prijavljeno tijelo: br. 2477, Institut IGH d.d., Javka Rakušići, Zagreb. Certifikat o sukladnosti kontrole tvorničke proizvodnje br. 2477-CPR-2254. Agregat je pod stalnim nadzorom tvorničke kontrole kvalitete Jedinstvo d.d., Pogon Jerovec. Izjava o svojstvima br. 0001/15.
 Hrvatska
 JEDINSTVO d.d. Krapina
 Pogon JEROVEC, Jerovec 194240 Ivanec
 Tel: 042 781 837 Fax: 042 781 829

Prilog B – Potvrda o umjeravanju mjerila pomaka Vishay 115 L



test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij
Metrology laboratory



Laboratorij za umjeravanje mjerila duljine, mjerila sile, vibracijskih stolova s mjernim sustavom i neautomatskih vaga

Laboratory for calibration of length gauges, force measuring instruments, vibration tables with measuring system and non automatic weighing instruments

ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

POTVRDA O UMJERAVANJU

Calibration certificate

Broj:
Number **05012019-001L**

Stranica 1 od 6
Page from

Umjerna oznaka
Calibration label



Naručitelj umjeravanja:
Customer

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Geotehnički fakultet u Varaždinu
Hallerova aleja 7
HR-42000 Varaždin

Ponuda/Narudžbenica/Ugovor broj i datum:

Narudžbenica broj 17/2018 od 7. prosinca 2018.

Predmet umjeravanja:
Measurement object

Linearni pretvornik pomaka (LVDT)

Proizvođač:

VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC. (Sjedinjene Američke Države)

Tip / model:

115 L / -

Serijski broj / Godina proizvodnje:

W06017C / -

Nazivno mjerno područje:

± 65 mm

Ukupni broj stranica

- 6 -

Mjesto i datum umjeravanja:

Zagreb, 5. siječnja 2019.

Place and date of calibration

Ova potvrda o umjeravanju dokumentira sljedivost prema nacionalnim standardima za mjerne jedinice u skladu s Međunarodnim sustavom mjernih jedinica (SI). Naručitelj skrbi o ponovnom umjeravanju mjerila.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The user is obliged to have the object recalibrated.

Mjerenje obavio:
Measured by

Datum izdavanja:
Date of issue



Voditelj Mjeriteljskog laboratorija:
Head of the Metrology Laboratory

Siniša Mirković, dipl. ing. stroj.

8. siječnja 2019.

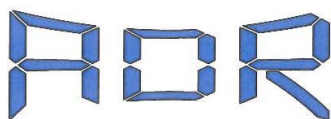
Siniša Mirković, dipl. ing. stroj.

ADR test sistemi d.o.o.
Mjeriteljski laboratorij
Ulica Milovana Kovačevića 3
HR – 10010 Zagreb
Hrvatska

Tel.: +385 (0)1 / 2303-578
Fax.: +385 (0)1 / 2303-581
Mob.: +385 (0)98 / 871-544
E-mail: mjeriteljski-laboratorij@adr-ts.hr
WEB: www.adr-ts.hr

OBUPML-VDE/DGQ 2618 dio 14.1
Obrazac: OBPOS10-01/01
Pismohrana: registrator ML-UMJ-L-01/19
Archives: filing folder

Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Djelomično obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija tvrtke ADR test sistemi d.o.o., uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o., together with the quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.



test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij
Metrology laboratory



ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

Broj:
Number **05012019-001L**

Umjerna oznaka
Calibration label

Stranica **2** od **6**
Page from



Opis mjerila:

Instrument description

Linearni pretvornik pomaka LVDT u kompletu s računalnim programom za detekciju i očitavanje pomaka (prikupljanje podataka).

Laboratorijska / inventarska oznaka:

Laboratory / inventory label

– / –

Mjerno područje / Mjerni sustav / Rezolucija:
Measuring range / Measuring system / Resolution

±50 mm / digitalni pokaznik pomaka, računalni program / 0,1 mm

Stanje mjerila:

State of measuring instrument

Općim pregledom mjerila nisu uočeni nedostaci.

Datum prijema mjerila u laboratorij:

Date of receiving measuring instrument into laboratory

5. siječnja 2019.

Postupak umjeravanja:

Calibration procedure

Umjeravanje je provedeno u skladu s internom tehničkom uputom za umjeravanje UPML-VDI/VDE/DGQ 2618 dio 14.1, izdanje 3 od 24.03.2017.

Linearni pretvornik pomaka (LVDT) postavljen je u položaj očitavanja električke nule. Mjerna jezgra (ticalo) je postavljeno u središnji položaj nazivnog mjernog područja te su u toj točki očitavanja oba mjerna instrumenta poništena (resetirana) na vrijednost nule (mm).

Simetričnim izvlačenjem (rastući mjerni niz) i uvlačenjem (padajući mjerni niz) mjerne jezgre u odnosu na električnu nulu zabilježeni su podaci u 20 mjernih točaka tako da je ravnomjerno obuhvaćeno cijelo mjerno područje linearnog pretvornika pomaka (LVDT). U tablicu su upisane izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u) (A_i) i nazivne vrijednosti na referentnom univerzalnom kalibratoru (N_i).

Umjeravanje je provedeno s nazivnim (nominalnim) vrijednostima pomaka N_i namještenim na referentnom univerzalnom kalibratoru s inkrementalnim optoelektroničkim mjernim sustavom.

Dodatno je napravljena i ponovljivost (f_w) koja se određuje iz pet ponovljenih mjerenja u mjernoj točki u neposrednoj blizini električke nule (srednji položaj mjerne jezgre).

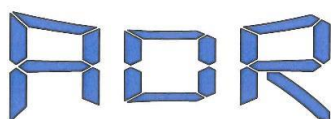
Uvjeti okoliša:

Environment conditions

Temperatura: $T_{max} = 20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{min} = 19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$



Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Djelomično obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija tvrtke ADR test sistemi d.o.o., uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o., together with the quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.



test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij
Metrology laboratory



ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

Broj:
Number **05012019-001L**

Stranica 3 od 6
Page from

Umjerna oznaka
Calibration label



Mjerni uređaji i sljedivost:

Measuring devices and traceability

Mjerilo Calibration device	Tip Type	Serijski broj Serial number	Potvrda o umjeravanju broj Calibration certificate	Datum umjeravanja Calibration date
Referentno mjerno pojačalo pomaka HEIDENHAIN Reference measuring displacement amplifier	ND 280	54 324 660 A	Referentno mjerno pojačalo pomaka i referentni univerzalni kalibrator s inkrementalnim optoelektroničkim mjernim sustavom predstavljaju mjerni lanac kojim se provodi umjeravanje.	
Referentni univerzalni kalibrator (0 – 100 mm) s inkrementalnim optoelektroničkim mjernim sustavom MF Mess & Feinwerktechnik Reference universal calibrator (0 – 100 mm) with incremental optoelectronic measuring system	KMF 100	16817	15133 D-K-15009-01-00 Kögel Werkstoff- und Materialprüfsysteme GmbH Njemačka	2018-03-05
Temperaturni USB / LAN datalogger G. Lufft Mess- und Regeltechnik Temperature USB / LAN datalogger	OPUS 20 THIP PoE	181.0417.0802.033	LMK05171414 LMK (LK-002) – Laboratorij za metrologiju in kakovost Slovenija	2017-05-31

Mjerna nesigurnost (U)

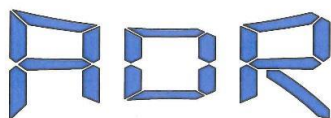
Measurement uncertainty

Izražena proširena mjerna nesigurnost daje se kao sastavljena standardna mjerna nesigurnost pomnožena s faktorom pokrivanja $k=2$, koji u normalnoj razdiobi odgovara razini povjerenja od približno 95 %. Standardna mjerna nesigurnost određena je u skladu s EA-4/02, GUM – Izražavanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju i VDI/VDE/DGQ 2618:2003 dio 1.2.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the combined standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The standard measurement uncertainty has been determined in accordance with EA-4/02, GUM – Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement in Calibration and VDI/VDE/DGQ 2618:2003 dio 1.2.



Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Djelomično obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija tvrtke ADR test sistemi d.o.o. uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o., together with the quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.



test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij
Metrology laboratory



ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

Broj:
Number **05012019-001L**

Stranica 4 od 6
Page from

Umjerna oznaka
Calibration label



Simboli, mjerne jedinice i definicije:

Symbols, units and definitions

r	mm	Rezolucija pokaznika linearnog pretvornika pomaka (LVDT-a) <i>Resolution of the linear measuring device (LVDT)</i>
N	mm	Nazivne vrijednosti na referentnom mjernom etalonu <i>Nominal values on the reference inspection device</i>
A_l	mm	Izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-a) kada se ticalo izvlači <i>Measured values on the linear measuring device (LVDT) when the probe draws out</i>
A_u	mm	Izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-a) kada se ticalo uvlači <i>Measured values on the linear measuring device (LVDT) when the probe retracts</i>
y_l	mm	Odstupanje izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u) od vrijednosti na referentnom mjernom etalonu kada se ticalo izvlači <i>Deviation of the measured value on the linear measuring device (LVDT) from the value on the reference inspection device when the probe draws out</i>
y_u	mm	Odstupanje izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u) od vrijednosti na referentnom mjernom etalonu kada se ticalo uvlači <i>Deviation of the measured value on the linear measuring device (LVDT) from the value on the reference inspection device when the probe retracts</i>
f_w	mm	Ponovljivost <i>Repeatability</i>
f_u	mm	Histereza <i>Hysteresis</i>
$ N_{MAX} , N_{MIN} $	mm	Najveća i najmanja izmjerena vrijednost linearnog pretvornika pomaka (LVDT-a) od pet provedenih mjerenja referentnim mjernim etalomom u jednoj mjernoj točki blizu nule kad se ticalo uvlači <i>Maximum and minimum measured values on the linear measuring device (LVDT) from five values measured on the reference inspection device at one point near zero when the probe retracts</i>

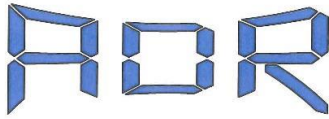
Jednadžbe:

Equations

$$y_u = A_u - N, \text{ mm}; y_l = A_l - N, \text{ mm}; f_u = |MAX(y_u - y_l)|, \text{ mm}; f_w = |N_{MAX}| - |N_{MIN}|, \text{ mm}$$

Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Djelomično obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija tvrtke ADR test sistemi d.o.o. uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o. together with the quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.





test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij
Metrology laboratory



ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

Broj:
Number **05012019-001L**

Umjerna oznaka
Calibration label

Stranica 5 od 6
Page from



Rezultati umjeravanja
Calibration results

Mjerno područje: ± 50 mm
Measuring range

Rezolucija: $r = 0,1$ mm
Resolution

Tablica 1. Aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti, odstupanje izmjerenih vrijednosti i proširena mjerna nesigurnost

Arithmetic mean of measured values, deviation of the measured value and expanded uncertainty of measurement

Vrijednosti koje odgovaraju etalonskoj vrijednosti	Aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u)		Odstupanje izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u) od vrijednosti na referentnom mjernom etalonu kad se ticalo izvlači	Odstupanje izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u) od vrijednosti na referentnom mjernom etalonu kad se ticalo uvlači	Proširena mjerna nesigurnost
	Ticalo ↓ A_l mm	Ticalo ↑ A_u mm			
N mm			y_l mm	y_u mm	U μm
-50,00	-48,80	-48,80	1,20	1,20	59
-45,00	-43,85	-43,85	1,15	1,15	153
-40,00	-39,00	-39,00	1,00	1,00	58
-35,00	-34,10	-34,10	0,90	0,90	58
-30,00	-29,20	-29,20	0,80	0,80	58
-25,00	-24,35	-24,30	0,65	0,70	116
-20,00	-19,50	-19,50	0,50	0,50	58
-15,00	-14,60	-14,60	0,40	0,40	58
-10,00	-9,70	-9,70	0,30	0,30	58
-5,00	-4,90	-4,80	0,10	0,20	58
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	58
5,00	4,80	4,80	-0,20	-0,20	58
10,00	9,70	9,70	-0,30	-0,30	58
15,00	14,50	14,50	-0,50	-0,50	58
20,00	19,30	19,30	-0,70	-0,70	58
25,00	24,10	24,10	-0,90	-0,90	58
30,00	28,70	28,70	-1,30	-1,30	58
35,00	33,40	33,40	-1,60	-1,60	58
40,00	37,80	37,80	-2,20	-2,20	58
45,00	42,30	42,30	-2,70	-2,70	59
50,00	46,60	46,65	-3,40	-3,35	116

Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Djelomično obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija, tvrtke ADR test sistemi d.o.o., uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o. together with quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.





test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij
Metrology laboratory



ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

Broj:
Number 05012019-001L

Stranica 6 od 6
Page from

Umjerna oznaka
Calibration label

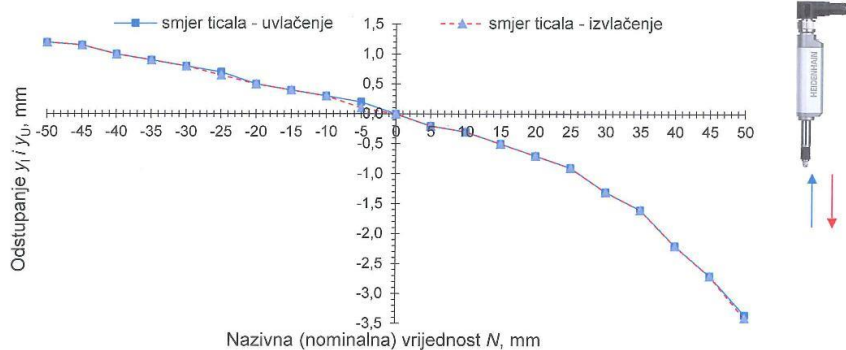


Tablica 2. Izmjerene vrijednosti za ponovljivost
Measured values for repeatability

Vrijednost koja odgovara etalonskoj vrijednosti	Izmjerene vrijednosti na linearnom pretvorniku pomaka (LVDT-u)				
	Niz 1 (ticalo ↓) A_1 mm	Niz 2 (ticalo ↓) A_2 mm	Niz 3 (ticalo ↓) A_3 mm	Niz 4 (ticalo ↓) A_4 mm	Niz 5 (ticalo ↓) A_5 mm
1,00 mm	0,9	0,9	1,0	0,8	0,9

Tablica 3. Izračun ponovljivosti i histereze
Calculation of repeatability and hysteresis

f_w , mm	0,20
f_u , mm	0,10



Slika 1.: Grafički prikaz odstupanja na cijelom mjernom području
Picture 1.: Graphic deviations in the entire measuring range

KRAJ POTVRDE O UMJERAVANJU
End of the Calibration certificate



Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Djelomično obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija tvrtke ADR test sistemi d.o.o. uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o. together with the quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.

9) ŽIVOTOPIS I POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Životopis

Nikola Kaniški, rođen 3. rujna, 1989. godine u Varaždinu, preddiplomski studij Inženjerstva okoliša započeo je akademske godine 2012./2013. Tri godine preddiplomskog studija završio je 2015. godine kao najbolji u svojoj generaciji s prosječnom ocjenom 4,8. U prvoj godini preddiplomskog studija dobitnik je stipendije izvrsnosti. Akademske godine 2013./2014. godine dobitnik je Dekanove nagrade za rad: “Obrada otpadnih voda opterećenih organskim bojilima i pigmentima iz tonera pisača” pod mentorstvom doc. Dinka Vujevića. U zimskom semestru 2014./2015. godine sudjelovao je u ERASMUS+ programu razmjene studenata u sklopu čega je boravio na Montanističkom Sveučilištu Leoben u Austriji četiri mjeseca. Tijekom boravka u Leobenu uspješno je položio sedam ispita na njemačkom jeziku te skupio 19 ECTS bodova. Diplomski studij, smjer upravljanje okolišem upisao je akademske godine 2015./2016. koji je završio 2017. godine s najboljim prosjekom na godini s prosječnom ocjenom 4,9. Kao asistent na Uspostavnom istraživačkom projektu Hrvatske zaklade za znanost čiji voditelj je izv.prof.dr.sc. Igor Petrović zaposlen je na Geotehničkom fakultetu od 1. listopada 2018. godine. Od 02.10.2023. godine radi u konzultantskoj tvrtki ESG Insight d.o.o. kao mlađi konzultant.

Popis objavljenih radova

Petrović, I., Kaniški, N., (2017). Numerical Modeling of the Biodrying Process of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Grčka, Atena, 2017. str. 1-4 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni).

Kaniški, N., Petrović, I., (2017). Mogućnost recikliranja metalnog otpada iz ambalažnog otpada. Zbornik 18. posvetovanj z mednarodno udeležbo “Gospodarjenje z odpadki - GzO’17 Urbano rudarjenje” / Kortnik J. (ur.). Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 2017. str. 38-42 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni).

Kaniški, N., Grčić, I., Vujević, D., (2015). Mogućnost rješavanja problematike otpadnog tonerskog praha u vodenim sustavima. Inženjerstvo okoliša, Vol. 2; str. 67-72, (znanstveni).

Stanko, D., Strelec, S., Gazdek, M., Filipović, A., Kaniški, N., (2015). Procjena odziva tla mjerenjem mikroseizmičkog nemira u gradu Varaždinu. Inženjerstvo okoliša, Vol. 2(1); str. 45-54 (domaća recenzija, pregledni rad)

Hrnčić, N., Kaniški, N., Petrović, I., (2020). Geotechnical properties and bearing capacity of MBT waste. Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Construction Engineering and Education, Geotechnical and Geo-Environmental Engineering and Education / Shiau, Jim; Vimonsatit, Vanissorn (ur.). Brisbane, str. 76-81 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni).

Kaniški, N., Hrnčić, N., Petrović, I., (2020). Applicability of the large pycnometer method for determination of specific gravity of mechanically and biologically treated waste. Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Construction Engineering and Education, Geotechnical and Geo-environmental Engineering and Education, Shiau, Jim; Vimonsatit, Vanissorn (ur.). Brisbane, str. 64-68 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni).

Kaniški, N., Petrović, I., Hrnčić, N., Bosilj, D., (2021). Influence of wetting procedure on the compressibility of the bioreactor landfill. International E-Conference on Waste Management and Recycling, December 02-03, 2021.

Hrnčić, N., Petrović, I., Kaniški, N., Bosilj, D., (2021). Stability analysis of a bioreactor landfill. International E-Conference on Waste Management and Recycling, December 02-03, 2021.

Bosilj, D., Petrović, I., Hrnčić, N., Kaniški, N., (2021). Application of sensors based on the Arduino system in the process of bio-drying of municipal solid waste. International E-Conference on Waste Management and Recycling, December 02-03, 2021.

Kaniški, N., Hrnčić, N., Petrović, I., (2021). Settlement characteristics of saturated mechanical biological treated waste from Croatia. Waste-to-Resources. 9th International Symposium MBT, MRF & Recycling. Online conference 18-20 may, http://www.waste-to-resources.eu/2021_en.html.

Hrnčić, N., Kaniški, N., Petrović, I., (2021). Maximum and minimum void ratio characteristics of MBT waste. Waste-to-Resources. 9th International Symposium MBT, MRF & Recycling. Online conference 18-20 may, http://www.waste-to-resources.eu/2021_en.html.

Kaniški, N., Hrnčić, N., Petrović, I., (2021). Posebnosti ispitivanja bioosušenoga otpada u troosnom uređaju. Zbornik sažetaka 1. Znanstvene doktorske konferencije Geotehničkog fakulteta "istraživanja u inženjerstvu okoliša". Loborec, J.; Zavrtnik, S. (urednici). Varaždin: Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021. str. 30-31 (predavanje, sažetak, znanstveni)

Kaniški, N., Gavez, B., Hrnčić, N., Petrović, I., (2021). Basic geotechnical parameters of biodried waste from winter and summer period. Sardinia 2021, hybrid event. 18th International Symposium on waste management and Sustainable landfilling. 11-15 october 2021, Cagliari, Italy, <https://www.sardiniasymposium.it/>.

Kurta, L., Kaniški, N., Hrnčić, N., Petrović, I., Kavur, B., Serdarević, E., Savi, R., (2021). Shear strength of biodried municipal solid waste. Sardinia 2021, hybrid event. 18th International Symposium on waste management and Sustainable landfilling. 11-15 october 2021, Cagliari, Italy, <https://www.sardiniasymposium.it/>.

Petrović, I., Kaniški, N., Hrnčić, N., Hip, I., (2022). Correlations between field capacity, porosity, solid particle density and dry density of a mechanically and biologically (biodried) treated reject waste stream. Bioresource Technology Reports, Vol. 17, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100996>.

Petrović, I., Kaniški, N., Hrnčić, N., Bosilj, D., (2022). Variability in the Solid Particle Density and Its Influence on the Corresponding Void Ratio and Dry Density: A Case Study Conducted on the MBT Reject Waste Stream from the MBT Plant in Mariscina, Croatia. Applied Sciences. Vol. 12(12), 6136. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12126136>.

Petrović, I., Kaniški, N., Hrnčić, N., Bosilj, D., (2022). Short- and long-term settlement properties of MBT waste. 9th International Conference on Sustainable Solid Waste Management At: Corfu, Greece.

Bosilj, D.; Petrović, I.; Hrnčić, N.; Kaniški, N., (2022). Sastav i osnovni geotehnički parametri bioosušenog komunalnog čvrstog otpada. XVI. Međunarodni simpozij gospodarenje otpadom Zagreb 2022. Zagreb, Hrvatska 12. - 14. 12. 2022., str. 73-74.

Kaniški, N., Hrnčić, N., Petrović, I., Bauer, E., (2023). Creep and Collapse Behaviour of Mechanically and Biologically Pre-treated Solid Waste in Oedometer Tests. Waste and Biomass Valorization. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02089-5>.

10) POPIS TABLICA

Tablica broj	Naziv tablice	Stranica broj
	Ključni brojevi otpada na ulazu i izlazu iz prethodne prerade prije	8
1	biološke obrade u postrojenju (Hidroplan d.o.o., 2014.)	
2	Udio vlage MBO otpada (Bortoluzzi, 2014)	30
3	Udio organske tvari i vlage BMO otpada (Zhang i sur., 2020)	30
4	Sastav MBO otpada iz postrojenja New Earth Solutions, u Dorsetu, Engleskoj, frakcija 0-10 mm (Bortoluzzi, 2014))	32
5	Sastav kompostiranog komunalnog otpada (Lakshmikanthan i sur., 2018)	33
6	Sastav MBO otpada iz Tianziling odlagališta u Hangzhou u Kini (Zhang i sur., 2020)	33
7	Dominantan oblik čestica MBO materijala iz Engleske (Velkushanova, 2011)	35
8	Dominantan oblik čestica MBO materijala iz Njemačke (Velkushanova, 2011)	35
9	Maseni udio organske tvari određen žarenjem u peći za uzorak A	46
10	Maseni udio organske tvari određen žarenjem u peći za uzorak B	46
11	Masene vrijednosti i postotni udjeli pojedinačno izdvojenih komponenti za metanogenu frakciju proučavanog materijala – uzorak A	48
12	Masene vrijednosti i postotni udjeli pojedinačno izdvojenih komponenti za metanogenu frakciju proučavanog materijala – uzorak B	49
13	Srednje vrijednosti masenih udjela komponenata metanogene frakcije bioosušenog otpada - uzorci A i B	50
14	Rezultati razvrstavanja dva uzorka (A1 i A2) materijala A prema obliku čestica	54
15	Rezultati razvrstavanja dva uzorka (B1 i B2) materijala B prema obliku čestica	55
16	Postotni udio uzorka A razvrstan prema obliku čestica (1D, 2D, 3D)	56
17	Postotni udio uzorka B razvrstan prema obliku čestica (1D, 2D, 3D)	56
18	Udio pojedinog oblika čestica u odnosu na ukupno odvojenu masu uzoraka A1 i A2	57
19	Udio pojedinog oblika čestica u odnosu na ukupno odvojenu masu uzoraka B1 i B2	58
20	Gustoće čvrstih čestica, ρ_s , BMO/MBO otpada objavljene u literaturi	72
21	Gustoće čvrstih čestica, ρ_s , neobrađenog komunalnog otpada objavljene u literature	74
22	Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica pijeska kupljenog u lokalnoj trgovini u plinskom piknometru	87
23	Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica pijeska granulacije 0-4 mm u plinskom piknometru	88
24	Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica pijeska granulacije 0-1 mm velikim vodenim piknometrom	91
25	Rezultati ispitivanja gustoće čvrstih čestica VVP	92
26	Rezultati ispitivanja gustoće čvrstih čestica plinskim piknometrom	93

27	Rezultati mjerenja gustoće čvrstih čestica materijala B metodom VVP i plinskim piknometrom	98
28	Gustoće čvrstih čestica, ρ_s , pojedinačnih komponenti otpada, prikupljene iz literature	102
29	Odnos poroznosti i suhe gustoće materijala A i B	104
30	Izmjerene (e , ρ_d , ρ_s) vrijednosti bioosušenog materijala B	109
31	Maksimalna suha gustoća ρ_d i optimalna vlažnost w_{opt} prikupljene iz literature	128
32	Maksimalna suha gustoća i optimalna vlažnost svježeg i starog neobrađenog otpada pri različitim energijama zbijanja (Endait i Patil, 2020)	138
33	Rezultati zbijanja standardnim Proctorovim pokusom (Iqbal i sur., 2022)	139
34	Rezultati mjerenja volumena kalupa metodom punjenja vodom	142
35	Rezultati mjerenja volumena kalupa metodom izravnog mjerenja	142
36	Parametri standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa	147
37	Maksimalna suha gustoća metanogene frakcije materijala A s 0% udjela vlage	148
38	Rezultati minimalne suhe gustoće $\rho_{d,min}$ i maksimalnog koeficijenta pora e_{max} materijala A	150
39	Suha gustoća ρ_d i vlažnost uzoraka materijala A	152
40	Maksimalna suha gustoća i pripadajući koeficijenti pora e_{min} materijala A i B iz Proctorovog pokusa	154
41	Sastav odlagališnih plinova Cossu i Stegmann (2019) s obzirom na postupak ekstrakcije plina iz tijela odlagališta	176
42	Raspon vrijednosti modificiranih primarnih i sekundarnih indeksa kompresije neobrađenog komunalnog otpada (Basha i sur., 2015)	181
43	Vrijednosti modificiranih primarnih i sekundarnih indeksa kompresije neobrađenog komunalnog otpada različitih istraživača (Basha i sur., 2015)	181
44	Indeksi primarne kompresije različitih istraživača	187
45	Rezultati dugotrajnog pokusa stišljivosti uzoraka M1 i M2 (Zhang i sur., 2020)	192
46	Moduli stišljivosti M_v iz krivulja stišljivosti uzoraka MBO otpada (Petrović i sur., 2014)	195
47	Moduli stišljivosti MBO obrađenog otpada različitih istraživača	195
48	Moduli stišljivosti kratkotrajnog pokusa uzoraka M1 i M2 (Zhang i sur., 2020)	197
49	Datum i količina dodane vode u dugotrajan edometarski pokus	206
50	Inicijalno slijeganje uzoraka #1, #2, #3 i #4	208
51	Fizikalni parametri ispitivanih uzoraka na početku i na kraju edometarskog pokusa	209
52	Modificirani indeksi inicijalne kompresije za ispitane uzorke	215
53	Vrijeme kraja inicijalnog slijeganja, EOT, odgovarajuća deformacija, ε_{EOI} , i koeficijent pora, e_{EOT} , za inkremente opterećenja (L2-L7) uzoraka #1, #2, #3 i #4	218
54	Modificirani indeksi sekundarne kompresije za ispitane uzorke otpada	219
55	Indeksi inicijalne kompresije za ispitane uzorke	221

56	Indeksi sekundarne kompresije za ispitane uzorke otpada	221
57	Moduli stišljivosti M_{oed} uzorka #1, #2, #3 i #4	222

11) POPIS SLIKA

Slika broj	Naziv slike	Stranica broj
1	Dijagram toka miješanog komunalnog otpada u ŽCGO Mariščina (Prilagođeno i preuzeto iz: Ekoplus, 2010)	7
2	Premještanje bioosušenog otpada procesnim kranom iz betonske komore (Preuzeto iz: Hidroplan d.o.o., 2014.)	9
3	Anaerobno bioreaktorsko odlagalište (Prilagođeno iz Repa, 2003)	12
4	Aerobno bioreaktorsko odlagalište (Prilagođeno iz Repa, 2003)	13
5	Plan eksperimentalnog dijela istraživanja u laboratoriju	15
6	Uzorkovanje metanogene frakcije u zimskom periodu 2019. godine	16
7	Uzorkovanje metanogene frakcije u ljetnom periodu 2020. godine	17
8	Skladištenje i transport uzoraka u Laboratorij za inženjerstvo okoliša	17
9	Granulometrijska krivulja kompostiranog otpada iz MBO odlagališta u Austriji (Petrović, 2010)	23
10	Granulometrijske krivulje MBO otpada iz Engleske i Njemačke za frakciju <5 mm (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – percentage passing (%) – udio prolaza kroz sito)	24
11	Granulometrijske krivulje MBO otpada iz Engleske i Njemačke za frakciju >5 mm, suho (dry) i vlažno (wet) prosijavanje (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – percentage passing (%) – udio prolaza kroz sito)	25
12	Granulometrijska krivulja kompostiranog otpada iz Njemačke (Borgato i sur., 2014) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – sieving passages (%) – udio prolaza kroz sito)	26
13	Granulometrijska analiza MBO uzoraka s odlagališta Mavallipura, Bangalore (Lakshmikanthan i sur., 2018) (Prijevod: Os x – sieve size (mm) – veličina sita u mm; Os y – percent passing – udio prolaza kroz sito)	27
14	Granulometrijska analiza BMO uzoraka (Zhang i sur., 2020) (Prijevod: Os x – particle size (mm) – veličina čestica u mm; Os y – percent finer (%) – udio prolaza kroz sito)	28
15	Udio vlage MBO otpada iz Engleske (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – Analysed waste samples – analizirani uzorci otpada; Os y – water content (%) – udio vlage)	29
16	Volumni i maseni sastav MBO otpada iz Engleske (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – Stiff plastic, flexible plastic, glass, unidentified, paper, metals, rubber, stones, textiles, wood, bones, ceramics – kruta plastika, fleksibilna plastika, staklo, neidentificirano, papir, metal, guma, kamen, tekstil, drvo, kosti, keramika; Os y – percent of total dry mass (%) – udio ukupne suhe mase)	31
17	Volumni i maseni sastav MBO otpada iz Njemačke (Velkushanova, 2011) (Prijevod: Os x – Stiff plastic, flexible plastic, glass, unidentified, paper, metals, rubber, stones, textiles, wood, bones, ceramics – kruta plastika, fleksibilna plastika, staklo, neidentificirano, papir, metal, guma,	31

	kamen, tekstil, drvo, kosti, keramika; Os y – percent of total dry mass (%) –udio ukupne suhe mase)	
18	Uređaj za vibriranje i set sita korišteni za određivanje granulometrijske krivulje ispitivanog materijala	37
19	Mjerenje temperature u središtu peći za žarenje temperaturnom sondom	38
20	Mjerena temperatura u peći za žarenje OMEGA sondom	39
21	a) Laboratorijska vaga; b) Reprezentativni uzorak od 50 g u keramičkim posudicama	40
22 a i b	Pripremljeni uzorci metanogene frakcije za određivanje vlažnosti: a) u posudama; b) u sušioniku	41
23	Metanogena frakcija nakon sušenja	42
24 a i b	a) Metoda četvrtanja; b) Odbacivanje dvije nasuprotne četvrtine	43
25	Granulometrijske krivulje uzoraka bioosušenog otpada	44
26	Granulometrijske krivulje vlastitih ispitivanja i ostalih istraživača	45
27	Usporedba rezultata aritmetičkih sredina masenih postotaka uzoraka A i B i ostalih istraživača	51
28	Komponente otpada uzorka A1 razvrstane prema obliku čestica na 1D, 2D i 3D	53
29	Neidentificirana komponenta uzorka A1 prosijana na situ otvora 2 mm a) frakcija <2 mm; b) frakcija >2mm (0D)	54
30	Sastav otpada prema obliku čestica uzoraka A i B i rezultati iz Velkushanova (2011)	59
31	Odnos specifične gustoće i udjela organske tvari neobrađenog otpada (Rakić i sur., 2021) (Prijevod: Os x - content of organic materijal OS (%) - udio organske tvari materijala izražena kao postotak; Os y – specific gravity (G_s) - specifična gustoća (G_s))	71
32	Shema plinskog piknometra konstantnog volumena	80
33	Sustav plinskog piknometra (regulator tlaka/volumena, toksična ćelija i softver za očitavanje tlaka i volumena); klip regulatora tlaka/volumena zajedno sa spojnom cijevi određuje volumen V_1 ; toksična ćelija određuje volumen V_2	83
34	Shematski prikaz mjerenja modificiranim plinskim piknometrom konstantnog volumena	85
35	Utezi mase (redom s lijeva na desno) 100, 500 i 1000 g	86
36	Odnos volumena izmjerenih Arhimedovim principom i plinskim piknometrom te pogreška mjerenja	86
37	a) Veliki vodeni piknometar volumena 1 dm ³ i konusni poklopac s aluminijskom mrežicom; b) Uzorak metanogene frakcije u velikom piknometru i eksikatoru s vakuum pumpom	90
38	Statistički pokazatelji gustoće čvrstih čestica izmjereni metodama VVP i plinskog piknometra na materijalu A i B	96
39	Korelacija vrijednosti gustoće čvrstih čestica izmjerenih plinskim piknometrom i metodom VVP	99
40	Gustoća čvrstih čestica, ρ_s , stakla, plastike, papira/kartona i neidentificiranih komponenti izmjerenih objema metodama	101
41	Korelacija poroznosti n i suhe gustoće ρ_d (Petrović i sur., 2022b)	107

42 a i b	a) Linearni odnos koeficijenta pora i gustoće čvrstih čestica uz konstantne suhe gustoće; b) Hiperbolični odnos koeficijenta pora i suhe gustoće uz konstantne gustoće čvrstih čestica (Petrović i sur., 2022a)	111
43	Odnos koeficijenta pora e i suhe gustoće ρ_d izračunat Jednadžbom (30) (Petrović i sur., 2022a)	114
44	Proctorove krivulje MBO otpada prikupljene od različitih autora (Kuehle-Weidemeier, 2007) (Prijevod: Os x – water content (%WM) – udio vlage izražen kao postotak na ukupnu masu; Os y – ρ_d (g/cm ³) – suha gustoća (g/cm ³))	129
45	Krivulje zbijanja za četiri vrste materijala (Rose i sur., 2009) (Prijevod: Os x – moisture content (% dw) – udio vlage izražen kao postotak na suhu masu; Os y – dry density (g/cm ³) – suha gustoća (g/cm ³))	131
46	Rezultati zbijanja u standardnom Proctorovom pokusu neobrađenog otpada (Pimolthai, 2010) (Prijevod: Os x – water content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (t/m ³) – suha gustoća (t/m ³))	132
47	Krivulja zbijanja frakcije 0-10 mm (Sudarshana, 2011) (Prijevod: Os x – moisture content (dry mass) – udio vlage izražen preko suhe mase; Os y – proctor density (g/cm ³) – suha gustoća (g/cm ³))	133
48	Krivulja zbijanja frakcije 0-20 mm (Sudarshana, 2011) (Prijevod: Os x – moisture content (dry mass) – udio vlage izražen preko suhe mase; Os y – proctor density (g/cm ³) – suha gustoća (g/cm ³))	133
49	Krivulja zbijanja standardnim Proctorovim pokusom (Tiwari, 2014) (Prijevod: Os x – moisture content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (kg/m ³) – suha gustoća (kg/m ³))	134
50	Odnos vlažnosti i suhe gustoće iz standardnog Proctorovog pokusa (Lakshmikanthan i sur., 2018) (Prijevod: Os x – moisture content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (kN/m ³) – zapreminska težina (kN/m ³))	135
51	Krivulja zbijanja neobrađenog otpada s odlagališta Borabanda (Reddy i sur., 2018) (Prijevod: Os x – water content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry density (g/cm ³) – suha gustoća (g/cm ³))	135
52	Krivulje zbijanja kod različitih energija zbijanja E1-E4: a) svježi otpad; b) otpad star 2 mjeseca; c) otpad star 5 godina; d) otpad star 10 godina; e) otpad star 15 godina (Endait i Patil, 2020) (Prijevod: Os x – moisture content (%) – udio vlage izražen kao postotak; Os y – dry unit weight (kN/m ³) – suha zapreminska težina (kN/m ³))	137
53	Odnos energije zbijanja (apscisa) i optimalne vlažnosti (ordinata) (Endait i Patil, 2020) (Prijevod: Os x – compaction energy (kJ/m ³) – energija zbijanja (kJ/m ³); Os y – $\frac{w_{opt}}{w_{opt md}} \frac{optimalna\ vlažnost}{optimalna\ vlažnost\ kod\ maksimalne\ gustoće}$)	138
54	Krivulje zbijanja neobrađenog komunalnog čvrstog otpada (Iqbal i sur., 2022) (Prijevod: Os x – w_{opt} (%) – optimalna vlažnost izražena kao postotak; Os y – $\rho_{d,max}$ (g/cm ³) – maksimalna suha gustoća (g/cm ³))	139
55	Sustav za određivanje suhe gustoće	141
56	Rezultati mjerenja ubrzanja vibro ploče Tromino 3G uređajem	143
57	Frekvencija vibriranja vibro stola korištenog u pokusima zbijanja MBO otpada (Prijevod: Os x – frequency (Hz) – frekvencija (Hz); Os y – FAS (mm/s) – Fourierova spektralna analiza (mm/s))	144

58	Sustav za ispitivanje standardnim Proctorovim pokusom i metanogena frakcija otpada	146
59	Uzorak bioosušenog otpada prilikom vađenja iz kalupa, materijal B, uzorak s 80% vlage	147
60	Linearna povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće (Tablica 37)	149
61	Linearna povezanost e_{max} i minimalne suhe gustoće iz Tablice 38	151
62	Linearna povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće iz Tablice 39	153
63	Linearna povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće iz Tablice 40	155
64	Odnos maksimalne suhe gustoće i optimalnog sadržaja vlage metanogene frakcije materijala A	156
65	Krivulje zbijanja standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom metanogene frakcije materijala A i B	158
66	“Linearna” povezanost minimalnog koeficijenta pora i maksimalne suhe gustoće	159
67	Proctorove krivulje izmjerene u ovom istraživanju u usporedbi s objavljenom literaturom	160
68	Tipična edometarska krivulja	172
69	Idealan sastav plinova u vremenu u tijelu odlagališta kada nema izvlačenja plinova (Tip 1) (preuzeto iz: Cossu i Stegmann, 2019) (Prijevod: Os x – time – vrijeme; Os y – concentration in Vol.-% – koncentracija u volumnim postocima)	177
70	Utjecaj naprezanja, gustoće i stupnja razgradnje na modificirani koeficijent sekundarne kompresije C_α (Hyun i sur., 2011) (Prijevod: Os x – pressure (kN/m ²) – naprezanje (kN/m ²); Os y – secondary compression coeff. C_α – modificirani koeficijent sekundarne kompresije C_α)	179
71	Odnos vertikalnih deformacija vs. vrijeme za svježi i stari neobrađeni komunalni otpad (Basha i sur., 2015) (Prijevod: Os x – elapsed time (min) – proteklo vrijeme u minutama; Os y – vertical strain (%) – vertikalno naprezanje (%))	180
72	Stišljivost uzoraka neobrađenog komunalnog otpada (Stoltz i sur., 2010) (Prijevod: Os x – stress σ' (kPa) – efektivno naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)	183
73	Krivulje stišljivosti različitih uzoraka neobrađenog komunalnog otpada (Karimpour-Fard i Machado, 2012) (Prijevod: Os x – vertical stress (kPa) – vertikalno naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)	184
74	Odnos između indeksa primarne kompresije /modificiranog indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta pora (Powrie i sur., 2019) (Prijevod: Os x – initial void ratio e_0 – početni koeficijent pora e_0 ; Os y – modified primary compression indeks C'_c – modificirani koeficijent primarne kompresije C'_c)	186
75	Ovisnost koeficijenta pora o naprezanju iz bušotina (Hartwell i sur., 2020) (Prijevod: Os x – total vertical pressure (kPa) – ukupno vertikalno naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)	187

76	Područje vrijednosti modula stišljivosti komunalnog otpada (Jessberger i Kockel, 1993) (Prijevod: Os x – σ_v (kN/m ²) –vertikalno naprezanje (kN/m ²); Os y – M_v (MN/m ²)– modul stišljivosti (MN/m ²))	189
77	Modul stišljivosti u odnosu na primijenjeno naprezanje (Jones i Dixon, 2003) ((Prijevod: Os x – vertical effective stress (kPa) –vertikalno efektivno naprezanje (kPa); Os y – constrained modulus (kPa)– modul stišljivosti (kPa))	190
78	Odnos koeficijenta pora i primijenjenog naprezanja (Zhang i sur., 2020) (Prijevod: Os x – applied stress (kPa) – naprezanje (kPa); Os y – void ratio – koeficijent pora)	194
79	Prikaz poprečnog presjeka edometarskog uređaja	199
80	Edometarski uređaj postavljen na veliku platformu: a) edometarska ćelija bez opterećenja; b) edometarska ćelija s opterećenjima (metalnim pločama)	200
81	Prikaz točaka mjerenja mjerilima pomaka te odgovarajućih kuteva nagiba diferencijalnih slijeganja	202
82	Suhi uzorak ugrađen u ćeliju edometra i uteg koji se koristio za ugradnju uzoraka u tri sloja	203
83	Redoslijed opterećivanja pojedinog uzorka otpada u edometru	204
84	Edometarska ćelija: a) s geotekstilom na dnu, sondom za mjerenje temperature i perforiranom cjevčicom; b) s uzorkom, gumenom membranom, sondom za mjerenje temperature i perforiranom PE cjevčicom za mjerenje plinova i dodavanje vode	206
85	Edometarski sustav za dugotrajno ispitivanje uzorka #4	207
86	Vremenski tok slijeganja uzorka #1 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja	211
87	Vremenski tok slijeganja uzorka #2 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja	212
88	Vremenski tok slijeganja uzorka #3 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja	212
89	Vremenski tok slijeganja uzorka #4 za svaki pojedinačni inkrement opterećenja prije vlaženja	213
90	Vremenski tok slijeganja uzorka #4 pri konstantnom opterećenju od 74 kPa nakon vlaženja	213
91	Odnos vertikalne deformacije i naprezanja uzoraka #1, #2, #3 i #4	214
92	Određivanje EOT vrijednosti iz krivulje mjerene vertikalne deformacije u vremenu za drugi inkrement uzorka #2	216
93	Edometarska krivulja ispitivanih uzoraka otpada	220
94	Razvoj plinova u vremenu tijekom dugotrajnog edometarskog pokusa	222
95	Omjer izmjerenih koncentracija metana i ugljikovog (IV) oksida u pokusu dugotrajne konsolidacije uzorka #4	224
96	Temperatura uzorka i okoline u dugotrajnom edometarskom pokusu	225
97	Vremenski tijek slijeganja ispitanih uzoraka #1-4	226
98	Vremenski tijek slijeganja uzorka #4 uključujući mehaničko puzanje i slijeganje uslijed biorazgradnje	227
99	Modificirani indeksi sekundarne kompresije	229
100	Usporedba indeksa inicijalne kompresije C_c neobrađenog i BMO/MBO otpada	230

101	Indeksi sekundarne kompresije C_α i $C_{\alpha,B}$ ispitivanih uzoraka #1-4	231
102	Moduli stišljivosti dobiveni u ovom istraživanju te ostalih istraživača	232