

# Utjecaj amplitude na određivanje maksimalne suhe gustoće MBO otpada vibro pločom

---

Šestanj Perić, Manuela

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:130:963808>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MANUELA ŠESTANJ PERIĆ

UTJECAJ AMPLITUDE NA ODREĐIVANJE MAKSIMALNE SUHE GUSTOĆE  
MBO OTPADA VIBRO PLOČOM

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za \_\_\_\_\_ u \_\_\_\_\_ sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, \_\_\_\_\_

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Igor Petronić

### Članovi povjerenstva

- 1) Izv. prof. dr. sc. Igor Petronić
- 2) Izv. prof. dr. sc. Boris Kourur
- 3) Dr. sc. Vitimir Preur, v. pred.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MANUELA ŠESTANJ PERIĆ

UTJECAJ AMPLITUDE NA ODREĐIVANJE MAKSIMALNE SUHE GUSTOĆE  
MBO OTPADA VIBRO PLOČOM

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

MANUELA ŠESTANJ PERIĆ, univ.bacc.ing.amb.

*Šestanj Perić Manuela*

MENTOR:

Izv.prof.dr.sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: MANUELA ŠESTANJ PERIĆ  
Matični broj: 247 - 2018./2019.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

UTJECAJ AMPLITUDE NA ODREĐIVANJE MAKSIMALNE  
SUHE GUSTOĆE MBO OTPADA VIBRO PLOČOM


Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Gospodarenje otpadom u RH  
3. Mehaničko-biološka obrada otpada  
4. Određivanje suhe gustoće otpada vibro pločom  
5. Postupak mjerenja i rezultati  
6. Zaključak  
7. Zahvala  
8. Popis literature

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 18.03.2020.


Rok predaje: 07.09.2020.

Mentor:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

UTJECAJ AMPLITUDE NA ODREĐIVANJE MAKSIMALNE SUHE GUSTOĆE MBO  
OTPADA VIBRO PLOČOM

---

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **izv.prof.dr.sc Igora Petrovića**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 31.08.2020

Manuela Šestanj Perić

---

(Ime i prezime)

*Šestanj Perić Manuela*

(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

**Utjecaj amplitude na određivanje maksimalne suhe gustoće MBO otpada vibro pločom**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 25.08.2020.

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović  
(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

U radu je opisan način određivanja maksimalne suhe gustoće MBO otpada uz pomoć vibro ploče. U uvodnom dijelu rada opisano je gospodarenje otpadnom u RH, te su opisana svojstva i sastav komunalnog otpada. U drugom dijelu rada opisana je mehaničko-biološka obrada otpada uz najveći osvrt na biološku obradu otpada. Treći dio rada govori o izgledu i principu rada vibro ploče, pomoću koje se određuje zbijenost materijala. Na temelju zbijenosti materijala moguće je odrediti suhu gustoću materijala. U završnom dijelu rada opisan je postupak određivanja maksimalne suhe gustoće vibro pločom. U istom poglavlju opisan je ispitani materijal te su prikazani rezultati dobiveni ispitivanjem. Preliminarni rezultati pokazali su da je odnos između povećanja amplitude i porasta maksimalne suhe gustoće nelinearan. Također je utvrđeno da povećanjem amplitude dolazi do porasta maksimalne suhe gustoće materijala. U predmetnom ispitivanju utvrđen je porast maksimalne suhe gustoće za 13,5% uz povećanje amplitude s 0,25 na 0,68 mm.

Ključne riječi: MBO otpad, biološka obrada, vibro ploča, suha gustoća.



## ABSTRACT

The paper describes a method for determining the maximum dry density of MBT waste using a vibro plate. The introductory part of the paper describes waste management in the Republic of Croatia, as well as the properties and composition of municipal waste. The second part of the paper describes mechanical-biological treatment of waste with the greatest emphasis on biological treatment of waste. The third part of the paper talks about the appearance and an operation principle of a vibro plate, which is used to determine the compaction of a material, based on which it is possible to determine the dry density of a material. The final part of the paper describes the procedure for determining the maximum dry density with a vibrating plate. In the same chapter, the tested material is described and the test results are presented. Preliminary results showed that the relationship between an increase in the amplitude and an increase in the maximum dry density is nonlinear. It was also concluded that an amplitude increase lead to an increase in the maximum dry density of the material. The study showed an increase in the maximum dry density by 13.5% with an increase in amplitude from 0.25 to 0.68 mm.

**KEY WORDS:** MBT waste, biological treatment, vibro plate, dry density.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. GOSPODARENJE OTPADOM U RH .....	3
2.1 Sastav komunalnog otpada.....	4
2.2 Svojstva komunalnog otpada .....	6
2.2.1 Masa otpada.....	6
2.2.2 Volumen otpada.....	7
2.2.3 Zbijena i nasipna gustoća otpada.....	8
3. MEHANIČKO-BIOLOŠKA OBRADA OTPADA .....	10
3.1 Mehanička obrada otpada .....	11
3.2 Biološka obrada otpada .....	12
3.2.1 Biosušenje.....	12
3.3 Postrojenje za MBO otpad – Marišćina .....	15
4. ODREĐIVANJE SUHE GUSTOĆE OTPADA VIBRO PLOČOM .....	18
4.1 Vibro ploča.....	18
5. POSTUPAK MJERENJA I REZULTATI .....	22
6. ZAKLJUČAK.....	28
7. ZAHVALA .....	29
8. POPIS LITERATURE .....	30
POPIS SLIKA.....	32
POPIS TABLICA .....	33
POPIS KRATICA.....	34

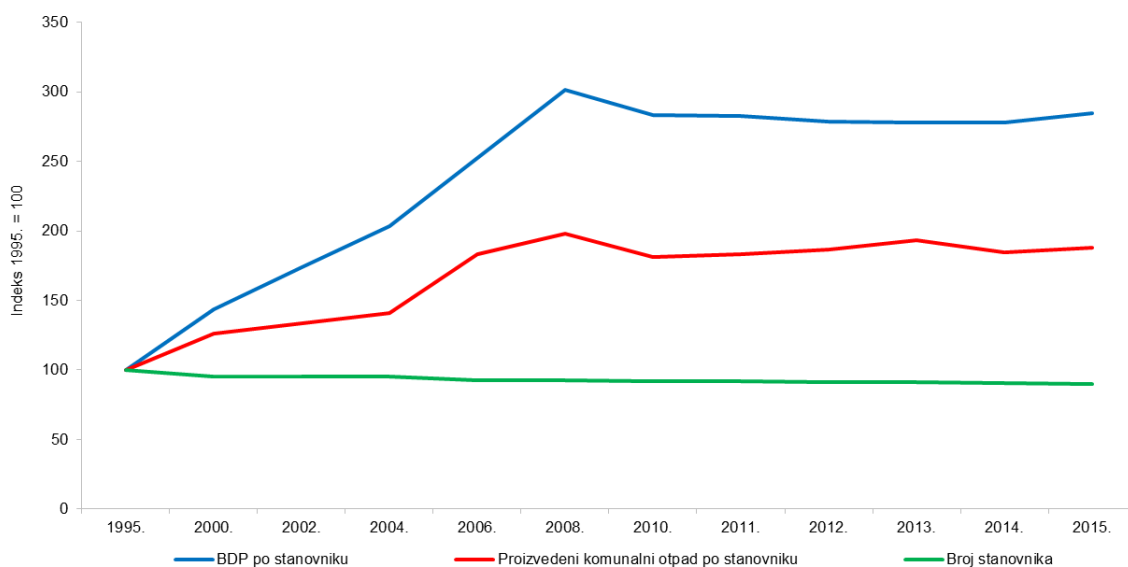
## 1. UVOD

Otpad je svaka tvar ili predmet koju korisnik odbaci, mora ili namjerava odbaciti. Zbog velikog broja stanovnika dolazi i do sve veće proizvodnje komunalnog otpada. Sve veća količina komunalnog otpada utječe na njegovo adekvatno i prihvatljivo zbrinjavanje.

Prema Strategiji gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj, najveći udio otpada gotovo 31% nastaje u kućanstvima, sektor graditeljstva i uslužnih djelatnosti proizvodi oko 17% otpada, sektor prerađivačke industrije oko 12%, a ostale gospodarske djelatnosti proizvode oko 12% otpada. [1]

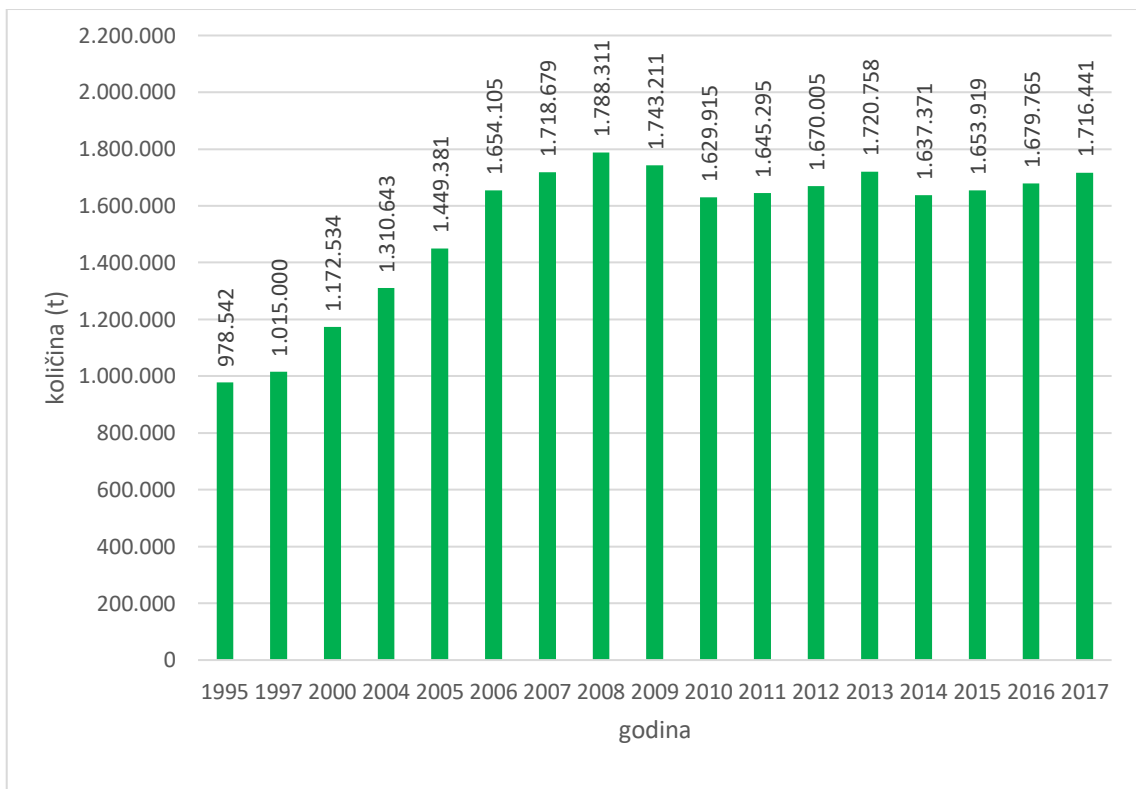
U RH, prema podacima iz 2014. godine, zbrinuto je oko 3,4 milijuna tona otpada (proizvedenog i komunalnog) od čega je 3,1 milijun nastao u RH, dok je preostalih 315.000 tona uvezeno iz drugih zemalja. [1]

Prema Zakonu o održivom gospodarenju otpadom, komunalni otpad se definira kao otpad koji je nastao u kućanstvu i otpad koji je po prirodi i sastavu sličan otpadu iz kućanstva, a ne uključuje proizvodni otpad i otpad iz poljoprivrede i šumarstva. [1] Komunalni otpad se u RH svake godine povećava uz porast BDP-a po glavi stanovnika. Takav odnos vidljiv je na Slici 1 koja prikazuje intenzitet stvaranja otpada u razdoblju od 1995. do 2015. godine. [1]



Slika 1. Odnos BDP-a i broja stanovnika na količinu komunalnog otpada [1]

Iduća slika, Slika 2, prikazuje godišnju proizvodnju komunalnog otpada u razdoblju od 1995. do 2017. godine. Proizvedena količina otpada 2015 godine iznosila je 1,716,441 tona.



Slika 2. Godišnja proizvodnja komunalnog otpada za razdoblje od 1995. do 2017. godine [2]

Zbog sve već proizvodnje otpada nužno je pronaći adekvatan način za obradu i zbrinjavanje komunalnog otpada. Jedan on načina obrade komunalnog otpada je mehaničko-biološka obrada otpada, koja se temelji na mehaničkim i biološkim načinima obrade. Ovom obradom otpada smanjuje se volumen otpada, kao i količina otpada zbog pretvorbe komunalnog otpada u sitnu i osušenu frakciju. Takav otpad zbog svog zrnatog sastava čestica može se promatrati kao nekoherentno tlo. [3] Zbog mehaničkih svojstava sličnih nekoherentnom tlu, MBO otpadu mogu se promatrati parametri zbijenosti, stišljivosti, suhe gustoće i slično.

U ovom radu opisana je metoda određivanja maksimalne suhe gustoće uz pomoć vibro ploče. Vibro ploča je uređaj koji uz pomoć vibracija utječe na zbijenost materijala. Nakon ispitivanja MBO otpada vibro pločom može se utvrditi iznos maksimalne suhe gustoće otpada. Na osnovu dobivenih rezultata moguće je planirati raspoloživi volumen odlagališta kao i propisati postupak ugradnje otpada u tijelo odlagališta.

## 2. GOSPODARENJE OTPADOM U RH

Gospodarenje otpadom uključuje sakupljanje, prijevoz, uporabu i zbrinjavanje otpada kao i nadzor nad tim postupcima te naknadno održavanje lokacije zbrinjavanja, a ujedno i obuhvaća radnje koje poduzimaju posrednici ili trgovci. [4] Za uspješno gospodarenje otpadom potrebno je poštovati načela zaštite okoliša koja su propisana zakonom, a kojima se uređuje zaštita okoliša. Načela koja se provode u tu svrhu su: [5]

- načelo onečišćivač plaća – proizvođač, to jest posjednik otpada dužan je sam snositi troškove gospodarenja otpadom te je odgovoran za provedbu svih sanacijskih mjera koje je njegov otpad prouzročio ili bi mogao prouzročiti.
- načelo blizine – obrada otpada mora se vršiti na najbližem mogućem mjestu od mjesta nastanka otpada.
- načelo samodostatnosti – gospodarenje otpadom može se obavljati na samodostatan način uz omogućavanje propisanih ciljeva na razini države, te je ujedno potrebno uzeti u obzir i zemljopisne okolnosti ili potrebu za posebnim građevinama za posebne vrste otpada.
- načelo sljedivosti – potrebno je utvrditi porijeklo otpada s obzirom na proizvod, ambalažu i proizvođača otpada i postupke njegove obrade.

Kako bi gospodarenje otpadom bilo što učinkovitije potrebno je sve aktivnosti, odluke i mjere usmjeriti na: [5]

1. sprečavanje nastanka otpada, njegovo zbrinjavanje te njegov štetan utjecaj na okoliš i ljude.
2. nadzor nad obavljanjem djelatnosti sa otpadom kao što su sakupljanje, prijevoz, uporaba, zbrinjavanje te druge djelatnosti.
3. nadzor odlagališta koja su zatvorena.

Gospodarenje otpadom nužno je provoditi na način da se ne dovodi u opasnost zdravlje ljudi kao i negativan utjecaj po okoliš. Također gospodarenje otpadom se provodi kako bi se izbjeglo slijedeće: [5]

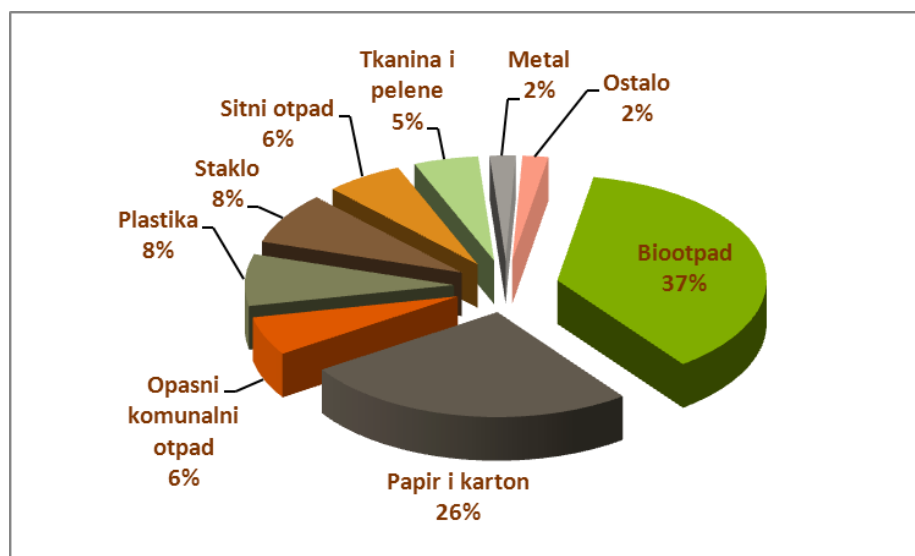
- rizik onečišćenja: more, voda, tlo i zrak.
- pojava buke.
- pojava neugodnih mirisa.
- ugrožavanje flore i faune.

- negativan utjecaj na kulturno-povijesne, estetske i prirodne vrijednosti.
- nastajanje eksplozija ili požara.

## 2.1 Sastav komunalnog otpada

Poznavanje sastava otpada ima važnu ulogu za učinkovito gospodarenje otpadom. Na temelju sastava otpada odabire se prigodna tehnologija obrade i zbrinjavanja otpada. Tako sastav komunalnog otpada ovisi o različitim čimbenicima kao što su tip naselja, ekonomski razvoj društva, dostignuta razina komunalne infrastrukture i slično. [6] Složeni sastav komunalnog otpada i mnogobrojnost proizvođača otpada predstavljaju gospodarenje otpadom složenim postupkom. Otpad nastao u domaćinstvu, može se iskoristiti ponovno oko 80%, dok preostalih 20% čini prašina odnosno sitni otpad, te tvari koje se također mogu ponovno iskoristiti kao što su: drvo, tekstil, guma i slično.

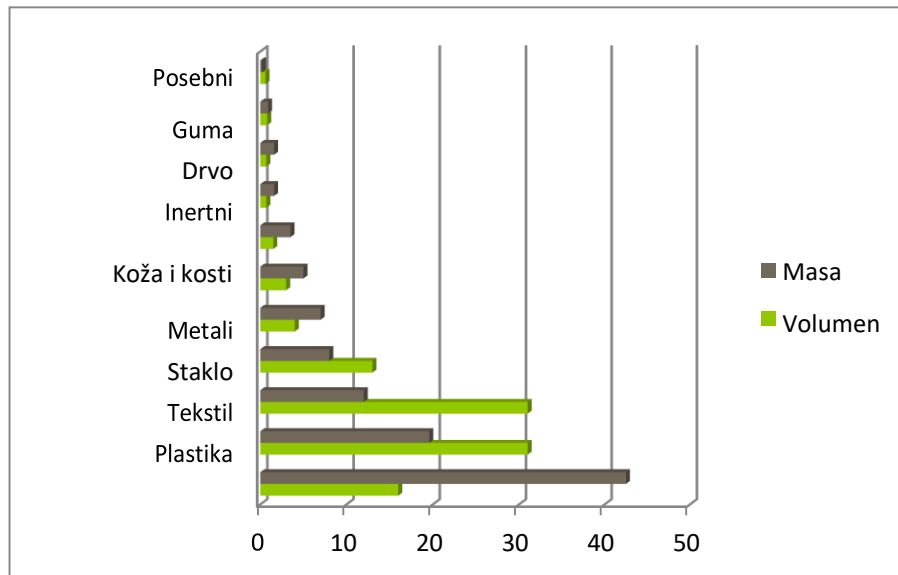
Na Slici 3 dan je prikaz miješanog komunalnog otpada prema njegovom sastavu. Najveći dio komunalnog otpada zauzima biootpad (~ 37%), zatim papir i karton (~26%), opasni komunalni otpad (~6%), plastika (~8%), staklo (~8%), sitni otpad (~6%), tkanina i pelene (~5%), metal (~2%) i ostali otpad (~2%).



Slika 3. Sastav i udjeli miješanog komunalnog otpada [6]

Na slijedećoj slici, Slika 4, prikazan je sastav prosječnog volumnog i masenog udjela izdvojenog iz sakupljenih komponenti komunalnog otpada. Na slici je vidljivo da postoje razlike u masenom i volumnom udjelu pojedinih komponenta. Tako je na primjer maseni

udio kod biootpada, stakla i metala veći od njihovog volumnog udjela. Kod plastike, kartona i papira je pak volumni udio veći od masenog udjela. Ovakve razlike predstavljaju problem kod zbrinjavanja komunalnog otpada. Stoga ovisno o komponenti koja prevladava u miješanom komunalnom otpadu, uvelike ovisi gustoća miješanog komunalnog otpada.[6]



Slika 4. Volumno-maseni odnos komponenata komunalnog otpada [6]

Komunalni otpad sastoji se od organskog, anorganskog i opasnog komunalnog otpada. U organski sastav komunalnog otpada ubrajaju se: biootpad, papir i karton, plastika, tekstil, guma i koža, te glomazni otpad. U anorganski dio komunalnog otpada ubrajaju se staklo i metal. Opasni otpad je svaki otpad koji u većoj ili manjoj mjeri sadrži otrovne, zapaljive i eksplozivne tvari, teške metale, stare lijekove. Takav otpad nastaje u farmaceutskoj industriji, metalnoj industriji, prehrambenoj industriji i slično. Njega je potrebno izdvojiti iz komunalnog otpada te adekvatno zbrinuti.

Najveću udio u komunalnom otpadu zauzima biootpad, odnosno podliježe aerobnoj ili anaerobnoj razgradnji. U takav otpad ubraja se vrtni i kuhinjski otpad, papir i karton nastao u kućanstvima. On u kućanskom otpadu zauzima oko 30 – 40% ukupnog kućanskog otpada. Njegovo zbrinjavanje temelji se na postizanju cilja prema kojem maksimalna odložena količina biorazgradivog otpada ne bi smjela premašiti 378.088 t, do kraja 2016. godine. [6]

## 2.2 Svojstva komunalnog otpada

Komunalni otpad po svom sastavu je heterogen, male gustoće (100-200 kg/m<sup>3</sup>), vlažnosti od 20 - 40 % sa ogrjevnom vrijednosti 4 do 12 MJ/kg. Ogrjevna moć najčešće iznosi 7,5 do 8,5 MJ/kg, ovaj iznos ekvivalentan je 0,25 kg nafte, 1 kg lignita ili 0,5 kWh električne energije (Tablica 1). [6]

Tablica 1. Svojstva otpada u zemljama različitog stupnja razvoja

Svojstva	Razvijene zemlje	Zemlje u razvoju
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	100-200	200-500
Vlažnost [težinski %]	20-40	40-80
Ogrjevna vrijednost [MJ/kg]	8-12	3-10
Veličina komada [% > od 50 mm]	10-85	5-35

### 2.2.1 Masa otpada

Masa otpada određuje se vaganjem punog i praznog transportnog vozila koje transportira otpad. Godišnji transportirani otpad moguće je odrediti uz pomoć slijedeće jednadžbe: [6]

$$q_o = \sum_{i=1}^{j=52} n_i * z_i * m_i \text{ [kg/god]}$$

gdje je:

$q_o$  – količina otpada u godini, [kg/god],

$n_i$  – broj vozila i-tog tipa u j-tom tjednu [1]

$z_i$  – broj vožnji i-tog vozila u j-tom tjednu [1]

$m_i$  – masa otpada u i-tom vozilu j-tom tjednu [1]

Volumen, gustoća i količina otpada vezani su slijedećom jednadžbom: [6]

$$q_o = V_o * \rho_o \text{ [kg, t]}$$



gdje je:

$q_o$  – količina otpada [kg]

$V_o$  – volumen otpada [ $m^3$ /god]

$\rho_o$  – gustoća otpada [(kg/ $m^3$ )/god]

Uz pomoć jednadžbe moguće je odrediti i specifičnu proizvodnju otpada (kg/stan/god).

Jednadžba glasi: [6]

$$q_{sp} = \frac{q_o}{n_{st}} \left[ \left( \frac{kg}{god} \right) / stan \right]$$

gdje je:

$q_{sp}$  – specifična godišnja proizvodnja otpada po glavi stanovnika [(kg/god)/stan]

$q_o$  – količina otpada u godini [kg/god]

$n_{st}$  – broj stanovnika koji ima pravo sakupljanja otpada [stan]

### 2.2.2 Volumen otpada

Volumen otpada nema stalnu vrijednost zbog različite zbijenosti otpada, a to dovodi i do promijene njegove specifične težine. Volumen otpada moguće je odrediti jednadžbom: [6]

$$V_o = \sum_{i=1}^{j=52} n_i * z_i * V_i \text{ [m}^3\text{/god]}$$

gdje je:

$V_o$  – volumen otpada [ $m^3$ /god]

$n_i$  – broj vozila i-tog tipa u j-tom tjednu [1]

$z_i$  – broj vožnji i-tog vozila u j-tom tjednu [1]

$V_i$  – zapremnina otpada u i-tom vozilu u j-tom tjednu [ $m^3$ ]

### 2.2.3 Zbijena i nasipna gustoća otpada

Zbijena gustoća otpada  $\rho_z$  ( $t/m^3$ ) je masa otpada u jedinici volumena nakon određenog zbijanja. Do zbijanja otpada dolazi uslijed pojave dinamičkih sila zbijanja koje popunjavaju šupljine u otpadu. Tablica 2 prikazuje odnos gustoće zbijanog i nezbijanog (nasipanog) otpada. Omjer vrijednosti prikazan je kao  $\rho_2/\rho_1$ , odnosno prikazan je omjer smanjenja volumena određene vrste otpada u komunalnom otpadu.

Tablica 2. Prikaz odnosa gustoće zbijenog prema nezbičenom otpadu [6]

KOMPONENTA OTPADA	Odnos gustoće zbijenog prema nezbičenom otpadu	
	Normalno zbijen	Dobro zbijen
Hrana	2,9	3,0
Papir i karton	4,5	6,2
Plastika	6,7	10
Tekstil	5,6	6,7
Guma i koža	3,3	3,3
Otpad iz vrtova	4,0	5,0
Drvo	3,3	3,3
Staklo	1,7	2,5
Metali	4,3	5,3
Pepeo, cigla, prašina	1,2	1,3

U prosjeku zbijeni volumen otpada iznosi 1/3 volumena nezbičenog otpada koji je dan prema izrazu: [6]

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

gdje je:

$\rho_1$  – gustoća nezbičenog otpada [ $t/m^3$ ]

$V_1$  – volumen nezbičenog otpada [ $m^3$ ]

$\rho_2$  – gustoća zbijenog otpada [ $t/m^3$ ]

$V_2$  – volumen zbijenog otpada [ $m^3$ ]

Nasipna gustoća otpada  $\rho_n$  ( $t/m^3$ ) je masa otpada u jedinici volumena posude za sakupljanje. Moguće ju je odrediti statističkim procjenama. Sakupljanje otpada od 10 do 30 l/stanovniku na tjedan i sa povećanim sadržajem internog otpada, gustoća se može izračunati i prema slijedećoj jednadžbi: [6]

$$\rho_n = 0,316 - 0,105 * \frac{V_o}{n_{st}} [t/m^3]$$

Prilikom istresanja posude za sakupljanje otpada u prihvatni bunker vozila, dolazi do zbijenosti otpada koji predstavlja koeficijent zbijenosti otpada, a on se određuje prema:

[6]

$$\varepsilon = \frac{a}{\rho_n} * 100 \approx 2 - 4$$

gdje je:

$\varepsilon$  – koeficijent zbijenosti otpada [1]

$\rho_n$  – nasipana gustoća otpada [ $t/m^3$ ]

$a$  – koeficijent iskorištenja zapremnine vozila

Nadalje koeficijent iskorištenosti zapremnine računa se kao:

$$a = \frac{m_i}{V_i * 100}$$

a gdje je:

$m_i$  – masa vozila [t]

$V_i$  – zapremnina vozila [ $m^3$ ]

### 3. MEHANIČKO-BIOLOŠKA OBRADA OTPADA

Mehaničko-biološku obradu otpada predstavlja niz mehaničkih i bioloških postupaka koji prema Direktivi o otpadu Europske unije imaju za svrhu smanjiti količinu otpada koji se odlaze na odlagališta. [7] U MBO postrojenjima otpad prolazi kroz različite procese, ali obrada je uglavnom podijeljena na dvije faze, a to su mehanička i biološka obrada. [8] Mehanička obrada je automatizirana, na način da se u njoj mehaničkim razvrstavanjem uklanjaju reciklirajući elementi iz miješanog toka otpada. Ovom obradom se otpad fizički obrađuje raznim procesima, kao što su drobljenje, mljevenje te ostali slični fizikalni postupci obrade. Tijekom bioloških procesa, otpad se biorazgrađuje sušenjem ili sličnim procesima. Komunalni kruti otpad ulazna je komponenta za MBO proces, dok su izlazne komponente GIO (kruto gorivo iz otpada), kompost i materijal koji je pogodan za recikliranje. MBO obrada ima nekoliko ciljeva djelovanja, a to su: [7]

- predobrada otpada koji odlazi na odlagalište, to jest smanjenje količine otpada na odlagalištu.
- preusmjeravanje biorazgradivog čvrstog otpada iz nerazgradivog komunalnog otpada putem mehaničkog razvrstavanja koji osigurava recikliranje ili povrat energije proizvodnjom goriva nastalog iz otpada (GIO).
- smanjenje suhe mase biorazgradivog čvrstog otpada prije odlaganja na odlagalište.
- stabilizacija materijala za kompost koji se koristi kao sredstvo za poboljšanje tla, uz uzimanje u obzir kontaminirajuće tvari koja mogu imati nepovoljna djelovanja,
- razvoj energije proizvodnjom bioplina i/ili proizvodnjom visoko kaloričnog goriva, odnosno razvoj GIO-a za upotrebu u postrojenjima za kombinirani ciklus.

Također jedan od ciljeva MBO postrojenja je i smanjenje organske frakcije u ukupnoj količini otpada koja se može postići: [7]

- odvajanjem organske frakcije na mjestu proizvodnje i izrada komposta.
- spaljivanjem komunalnog otpada radi proizvodnje toplinske i električne energije.
- tretiranje komunalnog krutog otpada u MBO procesu iz kojeg nastaje stabilizirani kompost koji se može odlagati na odlagališta.

### 3.1 Mehanička obrada otpada

Mehaničkom obradom otpada ne mijenja se kemijski sastav otpada, već se izdvajaju pojedine komponente ili frakcije iz ulaznog toka, odnosno mijenja se stanje usitnjenosti otpada. [5] Cilj ove obrade je učinkovita separacija komponentata otpada kako bi se postigla što veća kvaliteta frakcije za daljnju obradu. [5] Unutar procesa dolazi do separacije materijala kao što su staklo, papir, plastika i metal.

Kroz mehaničku obradu otpada, učinkovito se koristi niz fizikalnih svojstava komponentata otpada kao što su: oblik i svojstva vanjske površine, mogućnost usitnjavanja, mogućnost kotrljanja, magnetičnost, električna provodljivost, boja, gustoća, mogućnost refleksije. [5] Danas su uređaji za mehaničku obradu otpada u potpunosti automatizirani. U Tablici 3 prikazani su uređaji za mehaničku obradu otpada, odnosno tehnike separacije otpada, ciljani materijali i problemi takvih uređaja.

Tablica 3. Tehnika separacije za ciljani materijal [5]

<b>Tehnika separacije</b>	<b>Rastavno svojstvo</b>	<b>Ciljani materijali</b>	<b>Ključni problemi</b>
Rotacijska sita	Veličina	Veliki-papir, plastika Mali-biootpad	Zračno držanje i čišćenje
Ručna separacija	Vizualno ispitivanje	Plastika, onečišćivači, preveliki otpad	Uloga etike, zdravlje i sigurnost
Magnetska separacija	Magnetska svojstva	Željezni metali	Dokazane tehnike
Eddy Current	El. provodljivost	Obojeni metali	Dokazane tehnike
Mokra separacija	Gustoća	Pluta-plastika, organski Tone-kamenje, staklo	Proizvodi vlažan otpad
Zračna klasifikacija	Težina	Lagano-plastika, papir Teško-kamenje, staklo	Pročišćivanje zraka
Balistička separacija	Gustoća i elastičnost	Lagano-plastika, papir Teško-kamenje, staklo	Stopa propusnosti
Optička separacija	difrakcija	Posebni plastični polimeri	Stopa propusnosti

Mehanička obrada otpada za glavni cilj ima:

- pripremu otpada za postupak biološke obrade,
- ukloniti sve neprikladne komponente iz ulaznog netretiranog otpada,
- odvojiti materijal koji je moguće ponovno uporabiti, kao što su staklo, papir, plastika i metal,
- rafinirati izlazne produkte.

### 3.2 Biološka obrada otpada

Biološka obrada otpada provodi se u aerobnim i anaerobnim uvjetima. U anaerobnim uvjetima koriste se mikroorganizmi koji otpad razgrađuju na sastavnice te se kao nusprodukt nastaje bioplina i sredstva za poboljšanje tla. Bioplina proizvedena na ovaj način pogodan je za proizvodnju električne i toplinske energije. Vrste aerobnih postupaka u biološkom procesu, klasificiraju se kao kompostiranje, biostabilizacija i biosušenje. Aerobna obrada javlja se u procesu kompostiranja, prilikom djelovanja mikroorganizama koji ne proizvode gorivo, već stvaraju ugljični dioksid i kompost. Biosušenjem aerobni mikroorganizmi proizvode toplinu i suše otpad. Tako proizveden otpad pogodan je za daljnju obradu. Toplina stvorena u biokemijskim reaktoru tokom aerobne biorazgradnje iz otpada uklanja vlagu i biorazgradivi dio otpada. Kompostiranje ima za svrhu stvaranje konačnog stabilnog proizvoda, odnosno proizvodnju komposta koji se može odlagati bez posljedica po okoliš ili se ujedno može koristiti i kao gnojivo za poboljšanje tla. [8]

#### 3.2.1 Biosušenje

Biosušenje jedan je od procesa biološke, aerobne obrade otpada. Glavni ciljevi biosušenja otpada su: [9]

- stabilizacija i higijenizaciju organske materije.
- uklanjanje vode.
- povećanje količine ogrjevne vrijednosti otpada.

Biosušenje ima ujedno i primarni cilj, a to je uklanjanje vode iz otpada u što kraćem vremenu generiranjem biotoplinske energije. Generiranje biotoplinske energije znači

uklanjanje vlage iz materija uz pomoć ventilacijskog sustava, toplinom proizvedenom tijekom procesa. Razlozi zbog kojih je otpad nužno sušiti su: [9]

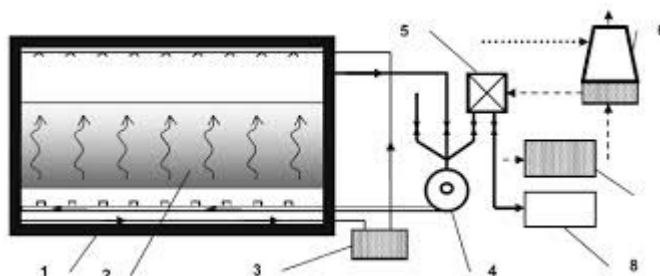
- smanjenje vlage u materijalu.
- razgradnja bioloških komponenti za korištenje dobivene energije.
- suhi otpad je biološki stabilan zbog minimalnog sadržaja reaktivnih organskih tvari.
- ogrjevna vrijednosti vlažnog otpada je puno manja od suhog otpada.
- samo suhi otpad može biti učinkovito odvojen u različite frakcije otpadnog materijala, što znači da je takav otpad čišći i proizvodi višu kvalitetu goriva iz otpada.

Glavni produkt koji nastaje biosušenjem u MBO postrojenju je proizvodnja krutog goriva iz otpada (GIO). Ova vrsta goriva nastaje zbog uklanjanja viška vlage iz ulazne količine otpada te ujedno poboljšava mehaničku obradu i poboljšava njegov potencijal za daljnju termičku obradu. Proizvodnjom krutog goriva iz otpada, otvara se mogućnost za ugradnju biogenog udjela ulazne količine otpada (ugljik(IV)oksida) kao alternativnog izvora energije u gorivu. [10] Kao krajnji produkt dobiva se kruto gorivo iz otpada s niskom emisijom CO<sub>2</sub>, koje ujedno utječe i na ublažavanje negativnih utjecaja na klimatske promjene.

Kako bi proces biosušenja bio što uspješniji potreban je pravilno dimenzioniran reaktor, pravilna priprema ulaznog materijala te njegova kontrola i praćenje radnog procesa. Reaktor za biosušenje koji se nalazi unutar MBO postrojenja prima usitnjeli nesortirani komunalni kruti otpad, koji kao izlazni produkt proizvodi biosušeni produkt koji se podvrgava daljnjoj mehaničkoj obradi. Takvi reaktori najčešće koriste kombinaciju inženjerskih, fizikalnih i biokemijskih procesa. U dizajn reaktora ubraja se i spremnik koji je spojen sa sustavom za aeraciju. Najčešće se izvode spremnici zatvorenog tipa (Slika 5). Dijelovi takvog spremnika su: [10]

1. zatvoreni spremnik.
2. aeracija za otpad odgovarajućeg poroziteta.
3. sustav za cirkuliranje i prikupljanje otpadnih voda.
4. ventilacijski sustav s djelomičnom recirkulacijom zraka (miješanje okolnog zraka s klimatiziranim zrakom).
5. izmjenjivač topline.

6. toranj za hlađenje.
7. voda, odnosno kondenzirana para.
8. obrada plinova nastala biosušenjem kroz biofilter.



Slika 5. Shematski prikaz zatvorenog spremnika za biosušenje temeljeno na Herhof-om sustavu [10]

Općenito, tehnologija za sušenje smanjuje količinu vlage u otpadu primjenom topline, omogućujući da voda prijeđe u plinovitu fazu i nastanak osušenog proizvoda željenih karakteristika. Prilikom biosušenja, glavni mehanizam sušenja je konvektivna evaporacija, gdje se koristi toplina nastala iz aerobne biodegradacije komponenata otpada koja se prenosi strujom zraka. [10] Udio vlage moguće je smanjiti kroz dva koraka:

1. molekule vode evaporiraju s površine otpada u okolni zrak.
2. evaporirana voda se prenosi kroz otpad strujom zraka te se zajedno sa ispušnim plinovima uklanja.

Određena količina slobodne vode ne prati struju zraka te se ona sakuplja u obliku procjedne vode na dnu reaktora za biosušenje. Prilikom sušenja temperatura zraka se može kretati u rasponu od 40-70 °C, ali većinu vremena u kojem traje proces, temperatura se održava na 45°C. [11]

Najvažniji parametar u procesu biosušenja je udio vlage u otpadu. Udio vlage se iskazuje kao omjer mase vode u otpadu i mase vlažnog otpada. Udio vlage u otpadu može se smanjiti i do 25%, odnosno ako udio vlage u nekom otpadu iznosi 35-55% on može biti smanjen na svega 10-20%. [11]

### **Kompostiranje**

Kompostiranje je proces u kojem dolazi do biološke stabilizacije i raspadanja organske tvari u termofilnim uvjetima, koji nastaju kao rezultat biološke aktivnosti. Termofilni



uvjeti su uvjeti u kojima se anaerobna fermentacija odvija pod temperaturom od 45-70°C. Ulazna masa se nakon kompostiranja može smanjiti za 40-60%. Ovom metodom se najčešće reciklira biološki razgradiv otpad kao što je otpad iz vrta, kuhinje, industrije i slično. Cilj kompostiranja je dobivanje konačnog i stabilnog proizvoda bez patogenih mikroorganizama. Takav kompost može se koristiti kao organska zamjena za poboljšanje svojstava tla, ali pri tome treba obratiti pažnju da takav kompost ne sadrži nepoželjne ili potencijalno opasne tvari.

Proces kompostiranja podrazumijeva kontrolirane uvjete koji se postižu kontroliranjem temperature, vlažnosti materijala, mehaničkim miješanjem, aeracijom i slično. [12] Ukoliko se proces ne kontrolira i ako koncentracija kisika u kompostnoj masi padne ispod 10%, može doći do stvaranja anaerobnih uvjeta i pojave neugodnih mirisa. Odvijanjem procesa kompostiranja, kompostna masa se mijenja. Mijenjaju se fizikalna i kemijska svojstva, odnosno dolazi do promjene boje, mirisa, strukture, smanjuje se udio organske tvari, povećava se stabilnost i slično.

Kompostiranje je prihvatljiva metoda zbrinjavanja biorazgradivog otpada. Prednosti kompostiranja su smanjenje volumena i rasterećenje odlagališta, smanjenje troškova odlaganja, smanjenje negativnih utjecaja na okolinu stabilizacijom otpada, smanjenje stakleničkih plinova (rad u kontroliranim uvjetima), smanjenje onečišćenja zraka, voda i tla. Uz prednosti, kompostiranje ima i nekoliko negativnih utjecaja. U negativne utjecaje ubrajaju se moguća emisija amonijaka ( $\text{NH}_3$ ), ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), dušikovog oksida ( $\text{NO}_2$ ), pojava neugodnih mirisa te niska kvaliteta krutog goriva iz otpada. [10]

### 3.3 Postrojenje za MBO otpad – Mariščina

Postrojenje za obradu otpada, Županijski centar za gospodarenje otpadom Mariščina projektiran je na godišnji kapacitet prihvata i obrade otpada mase 100 000 t čvrstog komunalnog otpada. Otpad koji stiže u postrojenje kamionima smečarima, istovaruje se u betonski prihvatni bunker koji je natkriven. Transport otpada unutar postrojenja za mehaničko biološku obradu dalje se izvodi prihvatnim, mosnim i procesnim kranovima. Prvi stupanj mehaničke obrade, otpad prolazi kroz predusitnjivač gdje se usitnjava do 200 mm (kapacitet 52 t/h, snaga 400 kW). Tako usitnjeni otpad pohranjuje se u privremeni

bunker koji se nalazi ispod usitnjivača. Prihvatni i privremeni bunker opremljeni su perforiranim podom i sustavom za prikupljanje i odvodnju procjednih voda. Cijeli sustav unutar postrojenja opremljen je i ventilatorima koji odvođe neugodne mirise do pročišćivača zraka (filtrima). [9]

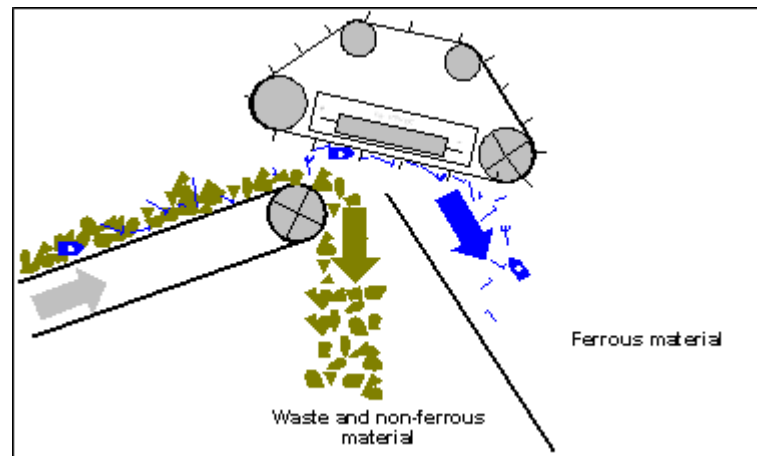
Sljedeći korak koji otpad prolazi je biosušenje, koje se izvodi s ciljem stabilizacije i higijenzacije organskog materijala u otpadu, s ciljem uklanjanja vode iz otpada te povećanja kalorične vrijednosti otpada. U tu svrhu izgrađeno je 12 komora ( $17,5\text{ m} \cdot 5\text{ m} \cdot 5,5\text{ m}$ ; dužina×širina×visina) za biosušenje u kojima se uz pomoć prisilne aeracije otpada te topline koja se oslobađa prilikom sušenja otpada uklanja vlaga iz materijala pomoću ventilacijskog sustava komore (Slika 6). Glavni cilj biosušenja je smanjenje sadržaja vode u materijalu (s 50 % na 20 %), razgradnja bioloških komponenti, stabilizacija otpada, povećanje kalorične vrijednosti materijala, veći stupanj i lakše odvajanje pojedinih korisnih frakcija iz otpada (metali, plastika i sl.). Prilikom biosušenja koje traje 7 dana, postižu se temperature od 50-60 °C. Svaka komora djeluje zasebno što osigurava hermetički poklopac unutar okvira koji je zatvoren tijekom biološkog stupnja obrade otpada.



Slika 6. Utovar komore za biosušenje procesnim kranom [9]

Nakon biološkog stupnja obrade otpada, osušeni i stabilizirani materijal se putem transportera odvodi do mehaničke obrade otpada u kojem se proizvodi gorivo iz otpada. Prvi stupanj mehaničke obrade nakon biosušenja izvodi se na situ u kojem se dovedeni

otpad razdvaja na veće komade >20 mm i sitnije komade <20 mm. U ovom dijelu se sitni materijal koji se uglavnom sastoji od inertnog i organskog materijala odvaja i koristi za proizvodnju bioplina na „bioreaktorskom“ odlagalištu u sklopu ŽCGO Mariščina. Krupnija frakcija, >20 mm dalje se odvodi transporterom do magnetskog separatora gdje se izdvajaju magnetični materijali iz otpada (Slika 7). Ostatak materijala dalje se odvodi transporterom do vrtložnog, strujnog separatora.



Slika 7. Odvajanje magnetičnih metala od otpada [9]

Na ovom separatoru se iz ostatka materijala izdvajaju neželjeni metali pomoću izmjeničnog magnetskog polja. Nakon ovog procesa izdvajanja, ostatak materijala prolazi kroz zračni separator NiHOT u kojem se lagani materijal (plastika, papir i sl.) odvaja od teških materijala (kamenje, inertni materijal i sl.). Nakon toga, lagana frakcija se odvodi dalje do optičkih separatora (Near Infra Red - NIR separatori,) na kojima se iz materijala izdvaja PVC (polovinil klorid) te se izdvaja materijal ovisno o njegovoj vlazi za proizvodnju goriva iz otpada (GIO) (suha plastika, papir itd.) dok se teška frakcija putem transportera odvodi do kontejnera. Tako obrađeni i usitnjeni materijal prolazi kroz naknadne usitnjivače koji proizvode izlaznu frakciju goriva iz otpada dimenzija 25 · 25 mm (visokokvalitetno GIO) ili 100 · 100 mm (niska/srednja kvaliteta).

## 4. ODREĐIVANJE SUHE GUSTOĆE OTPADA VIBRO PLOČOM

### 4.1 Vibro ploča

Vibro ploča je uređaj koji se koristi za utvrđivanje maksimalne suhe gustoće materijala dinamičkim postupkom zbijanja pomoću vibracija u vertikalnom smjeru (Slika 8).



Slika 8. Vibro ploča

Detaljan postupak ispitivanja opisan je u ASTM D 4253 standardu. Spomenuti standard navodi da bi funkcijska veza između proteklog vremena i dvostruke amplitude vibro ploče (od vrha- do vrha) trebala biti sinusoidalnog oblika. Za dvostruku amplitudu od oko 0,33 mm standard propisuje frekvenciju titranja vibro ploče od 60 Hz, dok za dvostruku amplitudu od 0,5 mm propisana frekvencija titranja je 50 Hz. Suricat i Tromino uređajima za mjerenje akceleracije (Slika 9) utvrđeno je da vibro ploča korištena u ovom radu titra na frekvenciji od 50 Hz. Budući da regulacija frekvencije titranja na korištenom uređaju nije moguća, kao referentna vrijednost dvostruke amplitude uzeta je vrijednost od 0,5 mm pri frekvenciji titranja od 50 Hz. [13]



Slika 9. Utvrđivanje frekvencije titranja vibro ploče

Vibro ploča na sebi sadrži vremenski prekidač te regulator amplitude koja se može regulirati u iznosu od 0,1 do maksimalno 1 mm.

Sam uređaj mora biti postavljen na tvrdoj podlozi (na primjer betonska podloga), te dobro pričvršćen za podlogu, kako ne bi dolazilo do njezinog pomaka uslijed rada i kako se ne bi višak vibracija prenosio na okolna područja.

Da bi se odredila zbijenost materijala, odnosno maksimalna suha gustoća, potrebno je na vibro ploču postaviti kalup za ispitivanje zbijanja vibro pločom. Dimenzije kalupa propisane su spomenutim standardom, a sam kalup sastoji se od četiri dijela. Slika 10 prikazuje kalup za zbijanje. Donji dio kalupa se puni materijalom, zatim se na njega stavlja gornji dio kalupa (cilindar) koji pridržava uteg koji dolazi na kraju. Između materijala i utega, nalazi se pločica koja omogućuje da se težina utega ravnomjerno rasporedi po ispitanom materijalu. Donji dio potrebno je vijcima pričvrstiti za vibro ploču, da se onemogući pomak kalupa tijekom ispitivanja.



Slika 10. Kalup za određivanje zbijenosti vibro pločom

Prije početka rada kalup je potrebno kalibrirati, odnosno potrebno je odrediti volumen kalupa. Kalibracija ili umjeravanje kalupa provode se na dva načina (1.) metoda izravnog mjerenja (Slika 11 i 12) i (2.) metoda punjenja vodom. Izmjereni volumen kalup ne bi smio premašiti standardom propisanu nominalnu vrijednost volumena kalupa za više od 0,5%. [13] Preporučljivo je za određivanje volumena kalupa korištenje obje metode.



Slika 11. Određivanje visine cilindra iznad kalupa



Slika 12. Određivanje visine cilindra iznad kalupa

Metodom izravnog mjerenja, volumen kalupa izračunava se iz srednje vrijednosti minimalno triju mjerenja unutar promjera kalupa i visine kalupa. Mjerenja je potrebno rasporediti ravnomjerno duž kalupa. Prilikom mjerenja volumena vodom, kalup se u potpunosti puni vodom. Kalup ispunjen vodom, stavlja se na vagu i određuje se njegova masa. Tijekom kalibriranja prati se i temperatura vode. Na temelju temperature vode, odredi se volumen vode po gramu. Iz prikupljenih podataka odredi se volumen kalupa.

Na temelju navedenih metoda dobiven je volumen kalupa koji iznosi  $2832,2 \text{ cm}^3$ , što dovodi do odstupanja od 0,1% od propisane vrijednosti volumena koja iznosi  $2830 \text{ cm}^3$ . Prema standardu dozvoljeno odstupanje 0,5%, stoga odstupanje od 0,1% više je nego prihvatljivo.

## 5. POSTUPAK MJERENJA I REZULTATI

### 5.1 Postupak mjerenja

Ispitivanje određivanja maksimalne suhe gustoće provedeno je 25. i 30. lipnja 2020. godine. Uzorak MBO otpada, sitne frakcije (promjer zrna < 25 mm), uzet je dana 10.05.2019 godine u 10 h, sa ŽCGO Marišćina (Slika 13).



Slika 13. Uzorak ŽCGO Marišćina

Nakon uzorkovanja, uzorak je dopremljen u vrećama u Laboratorij za inženjerstvo okoliša Geotehničkog fakulteta. Uzeti uzorak je rastresen na stol, dobro promiješan, te je metodom četvrtanja odabran reprezentativni uzorak potreban za ovo ispitivanje. Uzimanje reprezentativnog uzorka prikazano je na Slici 14.



Slika 14. Odabir reprezentativnog uzorka, metodom četvrtanja



Postupak određivanja maksimalne suhe gustoće sastoji se od nekoliko koraka. Prije početka mjerenja provedena je kalibracija volumena kalupa, kao što je već opisano u prethodnom poglavlju. Nakon provedene kalibracije izmjerena je masa praznog kalupa (Slika 15).



Slika 15. Masa praznog kalupa

Uzorak je 24 sata prije ispitivanja osušen u peći na 60°C. Prazan kalup ispunjen je uzorkom do vrha. Punjenje kalupa (Slika 16) vrši se nasipavanjem uzorka u kalup malom lopaticom, kružnim pokretima bez zbijanja, kako bi se što bolje ispunio kalup.



Slika 16. Punjenje kalupa uzorkom

Kalup ispunjen uzorkom ponovno se važe, kako bi se odredila masa kalupa i uzorka (Slika 17).



Slika 17. Vaganje kalupa sa uzorkom

Kalup ispunjen uzorkom, montira se na vibro ploču te se po montaži pokreće vibracija. Vibriranje jednog uzorka trajalo je standardom propisanih 12 minuta, a ispitivani su uzorci pri tri različite amplitude. Za potrebe ovog ispitivanja korištene su duple amplitude od 0,25 mm, 0,5 mm i 0,68 mm.

Provjera postignutih amplituda izvršena je Suricat i Tromino uređajima na način da je tijekom vibriranja bilježena akceleracija u  $mg$  te je na osnovu zabilježenih podataka uz pomoć online kalkulatora [14] dvostrukom integracijom izračunat pomak.

Nakon vibriranja, pomičnom mjerkom mjeri se udaljenost od vrha gornje vodilice do vrha utega kako bi se utvrdio iznos slijeganja ispitivanog uzorka. Kako bi se dobila visina uzorka nakon vibriranja potrebno je visinu kalupa oduzeti od izmjerene vrijednosti slijeganja uzorka. Iz ovih podataka određen je volumen uzorka nakon ispitivanja. Kalup sa uzorkom je izvagan ponovno nakon vibriranja. Masa uzorka prije i nakon mjerenja ostala je nepromijenjena, dok se volumen uzorka mijenjao ovisno o promijeni visine slijeganja materijala nakon mjerenja.

Provedbom ovih koraka uslijedio je izračun maksimalne suhe gustoće prema jednadžbi:

$$\rho_{d,max} = \frac{M_s}{V}$$

gdje je:

$\rho_{d,max}$  – maksimalna suha gustoća uzorka [ $g/cm^3$ ]

$M_s$  – masa nasipanog uzorka [g]

$V$  – volumen zbijenog uzorka [ $cm^3$ ]

## 5.2 Rezultati

Rezultati dobiveni tijekom ispitivanja prikazani su uz pomoć Tablice 4.

Tokom ispitivanja, zapisivani su slijedeći podaci:

- masa kalupa.
- masa kalupa i uzorka prije vibracije.
- masa kalupa i uzorka nakon vibracije.
- visina od vrha vodilice do utega, nakon vibriranja.
- srednja vrijednost visine nakon vibriranja.
- visina vodilice (kalibrirano).
- visina utega i ploče (kalibrirano).
- promjer kalupa  $D$  (kalibrirano).

- akceleracija.

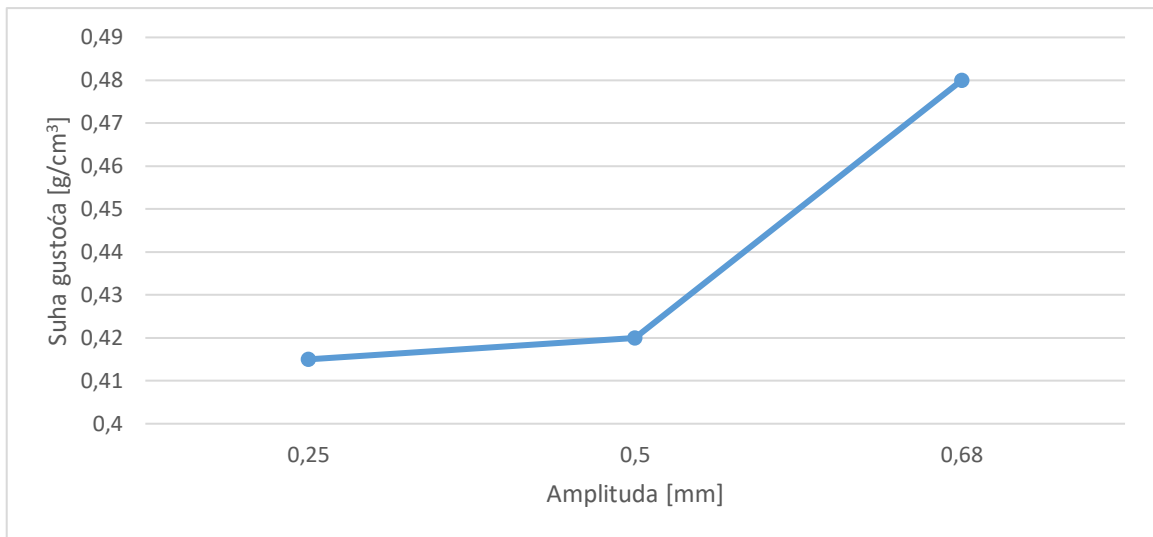
Iz ovih podataka nadalje izračunati su:

- slijeganje.
- visina uzorka nakon vibracije.
- volumen uzorka nakon vibracije.
- maksimalna suha gustoća.
- srednja vrijednost akceleracije.
- amplituda.

Tablica 4. Prikaz dobivenih rezultata

Broj mjerjenja	Dupla amplituda [mm]	Max. suha gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]
1.	0,50	0,42
2.	0,25	0,40
3.	0,25	0,43
4.	0,68	0,50
5.	0,68	0,45
6.	0,68	0,49

Slika 18 prikazuje grafikon odnosa amplitude i suhe gustoće. Na osi apcisa prikazana je amplituda, dok je na osi ordinati prikazana srednja vrijednost suhe gustoće za svaku od triju amplituda. Iz grafikona je vidljivo da je najmanja srednja vrijednost suhe gustoće koja iznosi približno 0,415 g/cm<sup>3</sup> postignuta kod najmanje amplitude od 0,25 mm. Najveća vrijednost suhe gustoće koja iznosi 0,48 g/cm<sup>3</sup>, postignuta je pod djelovanjem najveće amplitude od 0,68 mm. Uslijed djelovanja amplitude od 0,5 mm, suha gustoća približno iznosi 0,42 g/cm<sup>3</sup>. Prema tome vidljivo je da povećanje amplitude s 0,25 na 0,68 mm uzrokovalo povećanje maksimalne suhe gustoće za 13,5%.



Slika 18. Odnos amplitude zbijanja i maksimalne suhe gustoće

## 6. ZAKLJUČAK

Maksimalna suha gustoća važan je parametar za potrebe projektiranja novog ili sanaciju postojećeg odlagališta. Temeljem ovog podatka vrši se procjena kapaciteta odlagališta te se definiraju uvjeti ugradnje otpada u tijelo odlagališta.

Kako su u ovom radu prikazani preliminarni rezultati, za pouzdanije rezultate bilo bi potrebno povećati broj ispitivanja s više različitih amplituda zbijanja. Također bi program ispitivanja trebalo proširiti na ispitivanje utjecaja različitih frekvencija na postignutu zbijenost materijala.

Provedenim ispitivanjem dobiveni su rezultati za amplitude od 0,25 mm, 0,5 i 0,68 mm. Srednja vrijednost za ispitivanje suhe gustoće materijala pod utjecajem amplitude od 0,25 mm iznosila je  $0,415 \text{ g/cm}^3$ , dok za materijal pod utjecajem amplitude od 0,68 mm srednja vrijednost mjerenja suhe gustoće iznosila je  $0,48 \text{ g/cm}^3$ . Iz ovog se može zaključiti da se gustoća sa povećanjem amplitude od 0,25 do 0,68 mm, povećala za 13,5 %. Također se moglo uočiti da povećanje amplitude a 0,25 na 0,5 mm nije imalo toliko značajan utjecaj na porast gustoće kao u slučaju povećanja amplitude na 0,68 mm te da je odnos između amplitude i maksimalne suhe gustoće nelinearan.

## 7. ZAHVALA

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP- 2017-05-5157.

Veliku zahvalu, prije svega, upućujem svom mentoru izv.prof.dr.sc Igoru Petroviću koji mi je svojim korisnim savjetima, pruženom pomoći te velikim razumijevanjem i strpljenjem pomogao da ovaj diplomski rad zadovolji formu i suštinu.

Također veliku zahvalu upućujem asistentu Nikoli Hrnčiću mag.ing.geoing., mag.ing.aedif. i asistentu Nikoli Kaniškom mag.ing.amb., na velikoj pomoći prilikom izvođenja pokusa u Laboratoriju za inženjerstvo okoliša Geotehničkog fakulteta.

Također, zahvaljujem svim svojim prijateljicama i prijateljima koji su uvijek bili uz mene i bodrili me nakon svakog mog neuspjeha te uz koje je studiranje prošlo lako i uz puno sretnih trenutaka.

I na kraju, najveće hvala želim izreći svojim roditeljima i braći, koji su mi bili najveća potpora kroz moj put studiranja, koji su uvijek bili tu za mene u dobrim i lošim trenucima, koji su ujedno najviše vjerovali u moj uspjeh i bez kojih sve ovo što sam do sad postigla ne bi bilo moguće.

Veliko HVALA svima!

## 8. POPIS LITERATURE

1. Odluka o donošenju Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017.-2022. godine, Narodne novine 03/2017. Dostupno: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017\\_01\\_3\\_120.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_01_3_120.html) , Korišteno: 29.07.2020
2. Izvješće o komunalnom otpadu za 2017. godinu, Hrvatska agencija za okoliš i prirodu. Dostupno: [http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021\\_otpad/Izvjescia/komunalni/OTP\\_Izvje%C5%A1%C4%87e%20o%20komunalnom%20otpadu\\_2017.pdf](http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjescia/komunalni/OTP_Izvje%C5%A1%C4%87e%20o%20komunalnom%20otpadu_2017.pdf), Korišteno: 29.07.2020
3. Laboratorijska ispitivanja mehaničko-biološki obrađenog otpada, I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Štuhec, (2010.), Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/64225> , Korišteno: 15.07.2020.
4. Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, Dostupno [https://www.fzoeu.hr/hr/zastita\\_okolisa/zastita\\_okolisa/gospodarenje\\_otpadom/](https://www.fzoeu.hr/hr/zastita_okolisa/zastita_okolisa/gospodarenje_otpadom/), Korišteno: 01.07.2020.
5. Održivo gospodarenje otpadom, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Dostupno: <https://mzoe.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug-4925/otpad/odrzivo-gospodarenje-otpadom/1272> , Korišteno: 01.07.2020.
6. Anič Vučinić A . (2015.) Gospodarenje otpadom, Geotehnički fakultet, Varaždin, Interna skripta, str. 70.-83., str. 139.-141.
7. Flexibility of mechanical biological treatment plants, B. Plavac, I. Sultović, V. Filipan, (2016.) Dostupno: [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=249954](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=249954) , Korišteno: 16.07.2020.
8. The effectiveness of biodrying waste treatment in full scale reactor, M. Debicka, M. Zygadlo, J. Latosinska, (2017.) Dostupno: [https://www.researchgate.net/publication/316067983\\_The\\_effectiveness\\_of\\_biodrying\\_waste\\_treatment\\_in\\_full\\_scale\\_reactor](https://www.researchgate.net/publication/316067983_The_effectiveness_of_biodrying_waste_treatment_in_full_scale_reactor) , Korišteno: 07.07.2020.
9. Postrojenje za mehaničko-biološku obradu Marišćina
10. Modeliranje postupka biosušenja programskim paketom superpro designer, N. Kaniški, Diplomski rad (2017.), dostupno: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gfv%3A208/datastream/PDF/view> , Korišteno: 07.07.2020.
11. Velis S. A., Longhurst P. J., Drew G. H., Smith R., Pollard S. J. T. (2009.). Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. Bioresource technology, 100, pp. 2747-2761.
12. Grimes S. M., Taylor G. H., Cooper J. (1999). The availability and binding of heavy metals in compost derived from household waste. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 74, pp. 1125-1130.



13. Standard Test Methodes for Maximum Indeks Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table

14. STI Sinusoidal Waveform Vibration Calculator, Dostupno: [https://www.stiweb.com/Vibration\\_Calculator\\_s/104.htm](https://www.stiweb.com/Vibration_Calculator_s/104.htm) , Korišteno: 25.06.2020.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Odnos BDP-a i broja stanovnika na količinu komunalnog otpada [1]

Slika 2. Godišnja proizvodnja komunalnog otpada za razdoblje od 1995. do 2017. godine [2]

Slika 3. Sastav i udjeli miješanog komunalnog otpada [6]

Slika 4. Volumno-maseni odnos komponenata komunalnog otpada [6]

Slika 5. Shematski prikaz zatvorenog spremnika za biosušenje temeljeno na Herhof-om sustavu [10]

Slika 6. Utovar komore za biosušenje procesnim kranom [9]

Slika 7. Odvajanje magnetičnih metala od otpada [9]

Slika 8. Vibro ploča

Slika 9. Utvrđivanje frekvencije titranja vibro ploče

Slika 10. Kalup za određivanje zbijenosti vibro pločom

Slika 11. Određivanje visine cilindra iznad kalupa

Slika 12. Određivanje visine cilindra iznad kalupa

Slika 13. Uzorak ŽCGO Marinščina

Slika 14. Odabir reprezentativnog uzorka, metodom četvrtanja

Slika 15. Masa praznog kalupa

Slika 16. Punjenje kalupa uzorkom

Slika 17. Vaganje kalupa sa uzorkom

Slika 18. Odnos amplitude i suhe gustoće

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva otpada u zemljama različitog stupnja razvoja

Tablica 2. Prikaz odnosa gustoće zbijenog prema nezbijeom otpadu [6]

Tablica 3. Tehnika separacije za ciljani materijal [5]

Tablica 4. Prikaz dobivenih rezultata

## POPIS KRATICA

MBO – mehaničko-biološka obrada otpada

RH – Republika Hrvatska

BDP – bruto društveni proizvod

GIO – gorivo iz otpada

PVC – polovinil klorid

NIR – Near Infra Red separator

ŽCGO – Županijski centar za gospodarenje otpadom