

# Mjerenje stišljivosti MBO otpada

---

Ivanušec, Jurica

Undergraduate thesis / Završni 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:130:742487>

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

JURICA IVANUŠEC

MJERENJE STIŠLJIVOSTI MBO OTPADA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva za 17.07.2020. u \_\_\_\_\_ sati.

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim povjerenstvom u Varaždinu.

Varaždin, 03.07.2020.

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva:

- 1) izv. prof. dr. sc. Igor Petrović
- 2) izv. prof. dr. sc. Boris Kavur
- 3) izv. prof. dr. sc. Krešo Ivandić

---

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

MJERENJE STIŠLJIVOSTI MBO OTPADA

KANDIDAT:

JURICA IVANUŠEC

*Ivanušeć*

MENTOR:

izv. prof. dr. sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: JURICA IVANUŠEC

Matični broj: 2657 - 2016./2017.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

MJERENJE STIŠLJIVOSTI MBO OTPADA

- Rad treba sadržati:
1. Uvod
  2. Mehaničko-biološki postupci obrade otpada
  3. Županijski centar za gospodarenje otpadom Marišćina
  4. Stišljivost otpada
  5. Ispitivanje stišljivosti MBO otpada
  6. Rezultati
  7. Zaključak
  8. Zahvala
  9. Literatura
  10. Popis slika
  11. Popis tablica


Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 16.03.2020.

Rok predaje: 03.07.2020.

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 završni rad pod naslovom:

### MJERENJE STIŠLJIVOSTI MBO OTPADA

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

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, 29.06.2020.

JURICA IVANUŠEC  
(Ime i prezime)

Ivanuše  
(Vlastoručni potpis)

---

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ  
OBJAVLJENIM RADOVIMA**


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

**MJERENJE STIŠLJIVOSTI MBO OTPADA**

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

U Varaždinu, 29.06.2026.

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



(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

Jurica Ivanušec, Mjerenje stišljivosti MBO otpada

Mehaničko-biološka obrada (MBO) predstavlja postupak obrade miješanog komunalnog otpada s ciljem da se, uz optimalne ekološke i gospodarske odrednice, minimizira potencijal otpada koji se mora odlagati. Da bi uspješno projektirali odlagalište otpada potrebno je poznavati mehaničke parametre MBO otpada. Stišljivost je važan mehanički parametar MBO otpada i poznavanje njegovih parametara nam omogućuje procjenu iznosa slijeganja tijela odlagališta. Stišljivost ispitujemo u edometru, a rezultati se prikazuju edometarskim dijagramom. Kroz ovaj rad predstavljen je pokus mjerenja stišljivosti mehaničko-biološki obrađenog (bioosušenog) komunalnog otpada na nestandardnom edometrskom uređaju promjera uzorka 15 cm.

Ključne riječi: mehaničko-biološka obrada (MBO); miješani komunalni otpad; stišljivost; slijeganje; edometar



## ABSTRACT

Jurica Ivanušec, Measuring stiffness of MBT waste

Mechanical-biological treatment (MBT) of waste is a process of treating municipal solid waste in such a way which, along with optimal environmental and economic objectives, minimizes the harmfulness of waste that has to be landfilled. In order to successfully design a landfill, it is necessary to know the mechanical parameters of MBT waste. Stiffness is an important mechanical parameter of MBT waste and knowing its stiffness properties allows us to estimate the amount of the settlement of a landfill body. Stiffness is usually examined in an oedometer device, while results are presented in an oedometric diagram. The paper presents an experiment in which the stiffness of mechanically-biologically treated (biodried) municipal solid waste is measured on a non-standard oedometric device with a sample which is 15 cm in diameter.

Key words: mechanical-biological treatment (MBT); municipal solid waste; stiffness; settlement; oedometer

## SADRŽAJ:

1. Uvod.....	1
2. Mehaničko-biološki postupci obrade otpada .....	4
2.1. Efikasnost postupka mehaničko-biološke obrade .....	5
3. Županijski centar za gospodarenje otpadom Marišćina .....	6
3.1. Opis postrojenja za mehaničko-biološku obradu.....	6
3.2. Prihvat i mehanička predobrada .....	7
3.3. Biosušenje .....	8
3.3.1. Postrojenje za biološku obradu.....	9
3.4. Mehanička obrada .....	11
3.4.1. Izdvajanje sitnih tvari .....	12
3.4.2. Izdvajanje željeznih metala .....	12
3.4.3. Izdvajanje neželjeznih metala .....	13
3.4.4. Odvajanje goriva iz otpada .....	14
3.4.5. Zračni separator.....	14
3.4.6. Optički separator.....	15
3.4.7. Finalna obrada goriva iz otpada .....	16
3.5. Gorivo iz otpada i bioplin.....	16
4. Stišljivost otpada .....	17
4.1. Parametri stišljivosti .....	19
5. Ispitivanje stišljivosti MBO otpada .....	23
5.1. Edometarski uređaj .....	23
5.2. Opis edometra .....	23

5.3. Karakteristike ispitivanog materijala .....	27
5.3.1. Sastav ispitivanog uzorka otpada .....	27
5.3.2. Granulometrijski sastav .....	28
5.3.3. Udio organske tvari .....	29
5.3.4. Gustoća čestica otpada .....	29
5.4. Postupak mjerenja .....	30
6. Rezultati .....	32
6.1. Osnovni geotehnički parametri.....	32
6.2. Krivulja slijeganja .....	33
6.3. Edometarski modul .....	33
7. Zaključak .....	35
8. Zahvala .....	36
9. Literatura .....	36
10. Popis slika .....	37
11. Popis tablica .....	38

## 1. Uvod

Otpad predstavlja svaku tvar ili predmet koji je posjednik odbacio, ili namjerava odbaciti ili je obavezan odbaciti. Prema mjestu nastanka otpad možemo podijeliti na komunalni i industrijski [5]. Nastaje svakodnevnim ljudskim aktivnostima i veliki je problem za društvo, okoliš i gospodarstvo. Svojim djelovanjem može ugroziti zdravlje ljudi i okoliš.

Otpad se danas smatra resursom. Primjerice, iz komunalnog otpada se može iskoristiti preko 80% korisnih komponenti [5]. Slobodno kažemo da otpad nije smeće, već sirovina na pogrešnom mjestu. Budući da se otpad stvara u sve većim količinama, potrebno je uspostaviti kvalitetan i učinkovit sustav zbrinjavanja.

Prema konceptu održivog razvoja, konačnom odlaganju na odlagališta mora prethoditi obrada otpada. Rezultat obrade je smanjena količina otpada koji će se odložiti na odlagalište i smanjenje proizvedenih količina plina i filtrata po odlaganju. Mehaničko-biološka obrada (MBO) predstavlja jedan od primjera takvih tehnologija obrade otpada.

U zadnjih desetak godina i u Hrvatskoj je počelo projektiranje i izgradnja pogona za mehaničku i biološku obradu otpada s ciljem smanjenja količina otpada koji je potrebno odložiti na odlagalište. Primjer takve obrade je Županijski centar za gospodarenje otpadom (ŽCGO) Marišćina, koji se nalazi u Primorsko-goranskoj županiji.

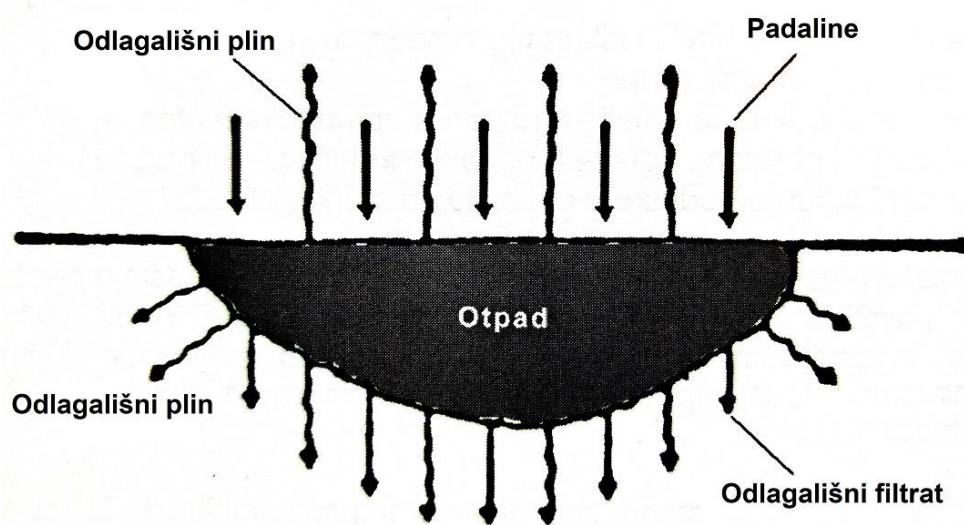
Cilj obrade otpada na ŽCGO Marišćina je povrat korisnih sirovina sustavom automatske separacije te proizvodnja ostatnog biorazgradivog materijala pogodnog za proizvodnju bioplina nakon odlaganja na odlagalištu otpada.

Ako sagledavamo hijerarhiju gospodarenja otpadom u Europskoj uniji, na prvo mjesto dolazi sprječavanje nastanka otpada. Dakle, u proizvodnji i dizajnu proizvoda smanjujemo mogućnost nastanka otpada. Nakon sprječavanja nastanka, otpad ponovno koristimo u najvećoj mogućoj mjeri. Recikliranjem izdvajamo korisne sirovine i ponovno ih koristimo u proizvodnji proizvoda. Otpad koji ne možemo reciklirati služi za dobivanje energije.

Sakupljanje otpada odvija se u građevinama za sakupljanje otpada (npr. reciklažno dvorište, pretovarna stanica i dr.). Obradu otpada vršimo u raznim postrojenjima (npr. postrojenje za mehaničko-biološku obradu otpada), a skup aktivnosti koji uključuje obradu, uporabu i/ili zbrinjavanje otpada odvija se u centru za gospodarenje otpadom (CGO).

U zadnjem i najmanje poželjnom koraku, otpad odlažemo na odlagalište. Odlagalište otpada se definira kao mjesto na površini ili ispod površine zemljišta gdje se otpad odlaže.

Odlaganje otpada treba vršiti bez stvaranja štetnih posljedica na okoliš i zdravlje ljudi. Odlagališta mogu imati izražen utjecaj na zagađenje vode, tla, zraka i zdravlje ljudi, i to kroz negativno djelovanje filtrata, odlagališnog plina i drugih štetnih supstanci koje se oslobađaju u procesu razgradnje otpada u tijelu odlagališta (Slika 1).



Slika 1. Odlaganje otpada na odlagalište i štetno djelovanje odlagališnog filtrata i plina na okoliš (vode, tlo, zrak) [3]

Do negativnog utjecaja odlagališta na okoliš najčešće dolazi uslijed pojave nestabilnosti, oštećenja i havarija. Stoga je poznavanje mehaničkih svojstava odloženog otpada neophodno kako bi projektiranje odlagališta bilo pouzdano.

Važnost poznavanja mehaničkih parametara MBO otpada dolazi do izražaja kod osiguranja odlagališta odnosno stabilnosti njegovih privremenih i trajnih pokosa, zaštitnih slojeva te sustava za otplinjavanje. Kroz ovaj rad predstavljen je pokus mjerenja stišljivosti mehaničko-biološki obrađenog komunalnog otpada kao jednog od mehaničkih parametara neophodnih za procjenu iznosa slijeganja tijela odlagališta.

## 2. Mehaničko-biološki postupci obrade otpada

Mehaničko-biološka obrada (MBO) je postupak obrade ostatnog odnosno miješanog komunalnog otpada s ciljem da se, uz optimalne ekološke i gospodarske odrednice, minimizira potencijal otpada koji se mora odlagati. [4]

Do sada je razvijen veliki broj varijanti MBO, tako da se pod tim pojmom obuhvaćaju postrojenja s velikim razlikama u tehničkoj opremljenosti i uvjetima rada. Zbog toga kod svake analize MBO treba već na početku jasno odrediti o kojoj se varijanti MBO radi. Razlikujemo četiri osnovne varijante mehaničko-biološke obrade. [4]

Prva i najjednostavnija varijanta MBO obuhvaća mehaničko izdvajanje/sortiranje otpada, te aerobnu biološku obradu. Sve se količine otpada nakon biološke obrade odlažu, uz smanjeni volumen i sadržaj organskog ugljika odnosno uz smanjenu reaktivnost otpada. Također se postiže manje smanjenje težine i higijenzacija otpada.

Druga varijanta MBO sastoji se iz kombinacije čistog MBO postupka s aerobnom biološkom razgradnjom i posebnog termičkog postupka obrade s reciklažom lagane, energetski vrijedne frakcije. Aerobna biološka razgradnja odvija se u komorama za biosušenje uz prisustvo svježeg zraka. Izdvajanjem lagane/suhe frakcije (papira, kartona, plastike, kože, tekstila, gume i sl.), koja je u pravilu većih dimenzija, bitno se smanjuje volumen i reaktivnost ostatnog otpada. Iz lagane se frakcije generira takozvano gorivo iz otpada (GIO engl. RDF (refuse derived fuel)), koje se može energetski oporabiti-reciklirati u postrojenjima koja su dislocirana. Također se GIO može međuskladištiti tako da se koristi u vrijeme kada je najveća potreba za energijom.

Treća varijanta je postupak MBO s aerobnom biološkom obradom, koji pored strojnog sortiranja uključuje i ručno izdvajanje na pokretnoj traci.

Četvrta varijanta je MBO s kombiniranim anaerobno-aerobnim biološkim postupkom. Kod tog postupka, koji nije integriran s termičkom obradom lagane frakcije, sortiranje se provodi u spremniku za otapanje (pulperu). Lagana, biološki teško razgradiva frakcija, (npr. plastika) izravno se odvodi na odlagalište. Teška uglavnom anorganska frakcija dodatno se sortira na iskoristive tvari (npr. metale, staklo) i ostale tvari koje se odvoze na odlagalište otpada.

Lagana biološki brzo razgradiva frakcija, nakon otapanja u pulperu, odvodi se u anaerobni postupak biološke obrade. Tijekom anaerobne obrade proizvodi se bioplina koji se može dobro energetski iskoristiti. Čvrsti ostatak anaerobne obrade se zatim aerobno biološki obrađuje te odlaže na odlagalište.

## 2.1. Efikasnost postupka mehaničko-biološke obrade

Iskustva iz razvijenih europskih država pokazuju da se mehaničko-biološkom obradom može smanjiti potreba za volumenom odlagališta od 40 do čak 60%. Istovremeno se smanjuje emisija odlagališnog plina za čak 80 do 90%. Kao i ostali postupci obrade otpada prije odlaganja, MBO osigurava i druge prednosti:

- smanjenje slijeganja odlagališta
- smanjenje količina, a naročito organskog opterećenja procjednih voda
- smanjenje unutarnje temperature odlagališta
- smanjenje reaktivnosti odloženog otpada
- povećanje materijalne i energetske reciklaže
- smanjenje štetnih emisija u okoliš
- olakšanje vođenja pogona odlagališta (manje neugodnih mirisa, prašine, plastike i papira na mjestu istovara i otvorenim odlagališnim površinama).



### 3. Županijski centar za gospodarenje otpadom Marišćina

Izgrađen je u Primorsko-goranskoj županiji na sjevernom dijelu Općine Viškovo. Sastoji se od: odlagališta, pročistača otpadnih voda, lagune za privremeno prikupljanje oborinskih voda, ulazne zone s vagom, mehaničko-biološkog postrojenja, upravne zgrade, servisno-garažnog prostora i prostora za privremeno skladištenje opasnih komponenti komunalnog otpada.

Cijeli proces gospodarenja otpadom započinje u pretovarnim stanicama gdje se otpad razdjeljuje i pretovaruje. Preostali, nesortirani komunalni otpad se odvozi na mehaničko-biološku obradu u ŽCGO Marišćina.

#### 3.1. Opis postrojenja za mehaničko-biološku obradu

Postrojenje za mehaničko-biološku obradu otpada (MBO) Marišćina godišnje može obraditi do 100.000 tona komunalnog otpada. Sastoji se od:

- prihvatnog bunkera
- mehaničke predobrade
- biološke obrade i
- mehaničke rafinacije.

Nakon obrade miješanog (nesortiranog) komunalnog otpada, kao proizvod dobiva se:

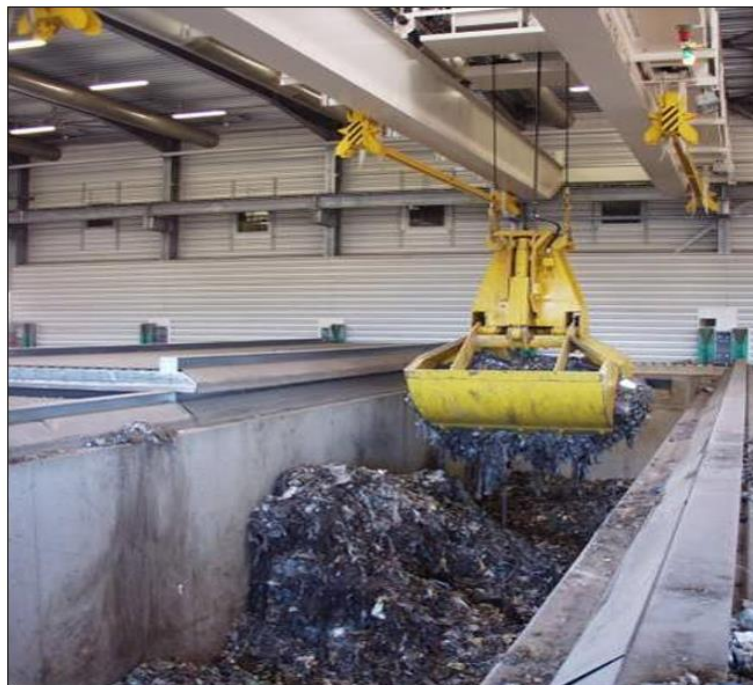
- gorivo iz otpada (GIO visoke ili srednje/niske kvalitete)
- korisni materijali za daljnju uporabu (željezni i neželjezni metali) i
- biorazgradivi materijali i škart (pogodni za proizvodnju bioplina).

Gorivo iz otpada odvozi se van centra za gospodarenje otpadom (CGO) na energetske iskorištavanje, a korisni materijali na uporabu. Biološko obrađena frakcija odlaže se unutar CGO u kontrolirano bioreaktorsko odlagalište, gdje se daljnjim postupkom proizvodi bioplina, a zatim iz plina električna energija.

### 3.2. Prihvat i mehanička predobrada

Miješani komunalni otpad isporučuje se iz pretovarnih stanica do postrojenja te se svakodnevno dostavlja kamionima. Na ulazu, vagama se mjeri masa kamiona. Nakon vaganja, otpad se istovaruje iz otpadnih kamiona izravno u betonski prihvatni bunker u postrojenju za prihvat otpada. Rukovanje otpadom unutar bunkera izvodi se prihvatnim kranom, koji ima automatski i ručni način rada. Operater vizualno provjerava otpad kako bi vidio ima li unutar bunkera neprikladnog otpada, u čijem slučaju on preuzima kontrolu nad kranom i neprikladan otpad istovaruje u kontejnere smještene uz bunker.

Otpad se prihranjuje u predusitnjivač, nakon čega dolazi do usitnjivača gdje se usitjava do 200 mm. Usitnjeni otpad skuplja se u privremenom bunkeru koji se nalazi ispod usitnjivača. Procesni kran prima usitnjeni materijal iz privremenog bunkera i istovaruje u komoru za biološko sušenje kako bi se pokrenuo proces biosušenja (Slika 2).



Slika 2. Procesni kran utovaruje komoru za biološko sušenje

### 3.3. Biosušenje

Postrojenje za biosušenje koristi 12 komora za biosušenje i nalazi se u istoj hali kao dio postrojenja za prihvatanje otpada. Ciljevi biosušenja su:

- stabilizacija i higijenzacija organske materije
- uklanjanje vode i
- povećanje kalorične ogrjevnosti otpada.

Biološka toplina proizvedena tijekom ovog procesa koristi se za uklanjanje vlage iz materijala pomoću ventilacijskog sustava komore. Ogrjevna vrijednost suhog otpada je značajno viša od vlažnog otpada i samo suhi otpad može biti učinkovito odvojen u različite frakcije otpadnog materijala. Odvojeni materijal od suhog otpada je čistiji i proizvodi višu kvalitetu u gorivu iz otpada (GIO). Lako razgradive organske tvari u komorama za biosušenje se pretvaraju u toplinu tijekom kratkog aerobnog procesa biorazgradnje. Toplina se koristi za isparavanje vlage te da se osuši preostali otpad.

Vanjska toplina nije potrebna za proces sušenja. Voda je uklonjena iz otpada toplim zrakom zasićenim vlagom, izlazeći iz komore. Nakon biološkog procesa sušenja, osušeni otpad je spreman za daljnju obradu.

Zbog visokih temperatura koje se dosežu u masi (50–60 °C), ovaj aerobni proces je valjan kao sustav za stabilizaciju, uklanjanje neugodnih mirisa i higijenzaciju otpada.

Sustav je zatvoren što znači da je svaka komora opremljena hermetičkim poklopcem unutar okvira koji je zatvoren tijekom biološkog procesa. Kada proces završi, poklopac se automatski otvara kako bi se omogućilo pražnjenje i ponovno punjenje komore.

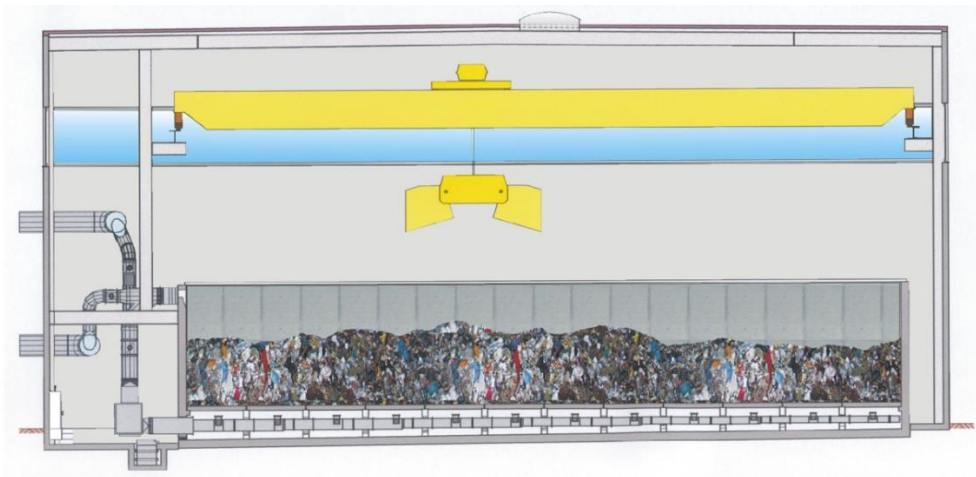
### 3.3.1. Postrojenje za biološku obradu

Intenzivna razgradnja odvija se u zatvorenoj komori za biosušenje koja je zabrtvljena za ulaz zraka i vlage. Tijekom intenzivne razgradnje, ugljikohidrati, proteini i masti iz kuhinjskog otpada itd. se mikrobiološki transformiraju u kratkom vremenskom razdoblju pomoću procesno kontroliranog dovoda zraka koji je prilagođen biološkim zahtjevima.

Automatski sustav kontrole kontrolira i podešava protok volumena i temperaturu. Aerobno smanjenje lako razgradivih organskih tvari dovodi do samozagrijavanja materijala, a s njim do zagrijavanja zraka koji protječe. Prinudna ventilacija otpada u komori ubrzava taj proces.

Topli zrak može prihvatiti više vode nego hladni. Kako zrak teče kroz samo grijani materijal tako i prihvaća sve više i više vode. Kada topli, gotovo zasićeni zrak izlazi iz komore, voda izlazi s njim. To dovodi do smanjenja vlažnosti otpada. Budući da je aerobni biološki proces redukcije vode neophodan, mikroorganizmi si smanjuju životnu osnovu povećanjem dehidracije. Ostaje osušeni otpad, u kojem je biološki proces redukcije zaustavljen zbog vrlo niskog sadržaja vode.

Komora je izgrađena od betona, izolirana i opremljena perforiranim podnim pločama (Slika 3). Prostor ispod podnih ploča je podijeljen u segmente izgrađene u obliku tlačnih komora. To omogućuje da se dovod zraka kontrolira zasebno za svaki segment te da se materijal prozračiti i osuši homogeno, čak i ako je materijal unutar komore drugačije gustoće i sastava u različitim dijelovima komore.



Slika 3. Komora za biosušenje

U biološkom sušenju, zbog dotoka kisika stvara se  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  (u obliku vodene pare). Rezultat je suh stabilan materijal s malim sadržajem vlage.

Tijekom procesa sušenja, dovod zraka mora biti procesnom kontrolom prilagođen za potrebe bioloških procesa unutar komore.

Svježi zrak je potreban kako bi se osigurala opskrba kisikom za aerobne biološke procese, pa čak i za hlađenje materijala na kraju sedmodnevnog biološkog sušenja.

### 3.4. Mehanička obrada

Postrojenje za proizvodnju goriva iz otpada proizvodi sljedeće frakcije iz biosušenog otpada:

- gorivo iz otpada
- željezne i neželjezne metale
- biorazgradiva frakcija koja se sastoji od finih i teških materijala
- PVC i drugi ostaci.

Učinkovitost automatskog odvajanja otpada te čistoća i kvaliteta odvojenih frakcija ovise o prethodnom smanjenju sadržaja vode kroz proces biološkog sušenja.

Da bi uspješno presortirali otpad potrebni su nam suhi ili pak mokri uvjeti. Miješani komunalni otpad je vlažan i stoga nije pogodan za proces sortiranja, te se iz tog razloga otpad provodi kroz proces biološkog sušenja nakon čega nastaje suhi materijal koji je kasnije moguće sortirati.

Nakon procesa biosušenja, bioosušeni materijal se prenosi procesnim kranom u tračni bunker biosušenog materijala. Tračni bunker je opremljen uređajem za doziranje i mjernim bubnjem, omogućujući mu da dozira konstantan, podesiv protok bioosušenog otpada na nizvodni tračni transporter.

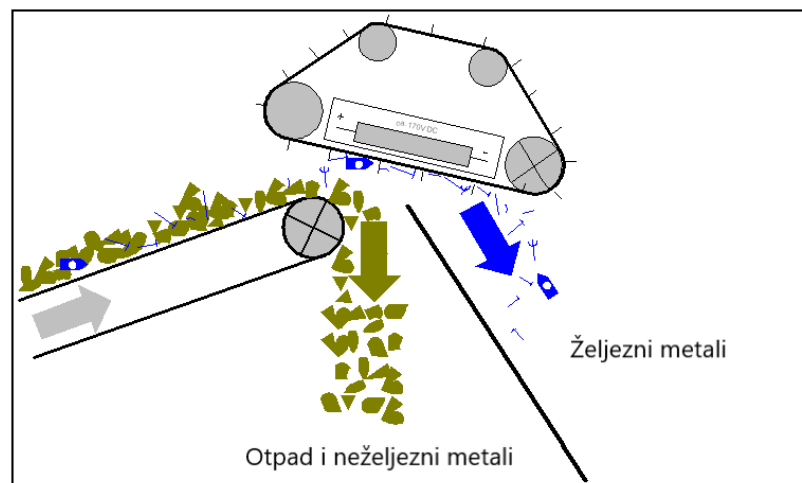
### 3.4.1. Izdvajanje sitnih tvari

Tračni transporter prihranjuje sito, kako bi se razdvojio protok otpada na grube komade ( $>20$  mm) i sitnije komade ( $<20$  mm). Odvajanje se provodi kako bi se uklonio sitni materijal, koji se sastoji uglavnom od inertnog i organskog materijala bez značajne kalorične vrijednosti. Sitna frakcija se prihranjuje do spremnika, a gruba frakcija do magnetskog separatora.

### 3.4.2. Izdvajanje željeznih metala

Izdvajanje željeznih metala iz frakcije  $> 20$  mm ostvaruje se u magnetskom separatoru (Slika 4). Nakon izdvajanja željezni materijali se prebacuju u kontejnere putem tračnih transportera. Ostatak materijala se prihranjuje do vrtložnog strujnog separatora.

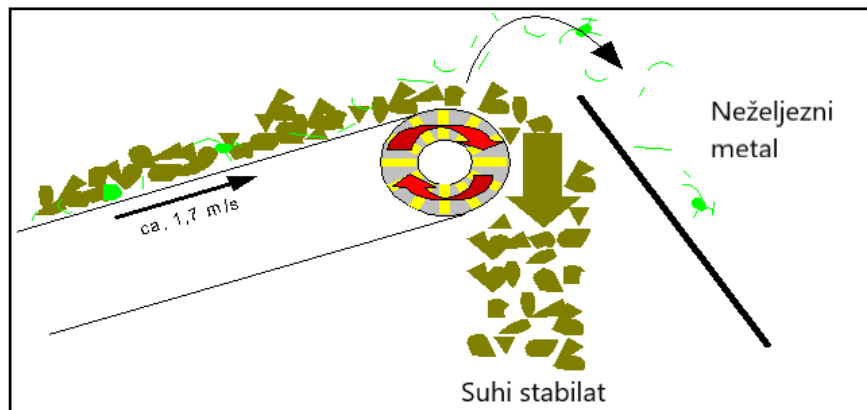
Magnet je elektromagnetski separator projektiran za vrlo teške uvjete rada, za mokre, prašnjave i abrazivne materijale kao i za potpuno automatiziranu primjenu u stalnom radu.



Slika 4. Separator željeznih metala

### 3.4.3. Izdvajanje neželjeznih metala

Ostatak materijala iz magnetskog separatora se prihranjuje tračnim transporterom do separatora s vrtložnim strujama (Slika 5), koji izdvaja neželjezne metale iz otpadnog protoka.



Slika 5. Separator neželjeznih metala

Princip rada vrtložnog strujnog separatora se temelji na formiranju vrtložnih struja na površini svih vodljivih materijala, zbog brzo mijenjajućeg magnetskog polja. Te vrtložne struje međudjeluju s magnetskim poljem, proizvodeći odbojnu snagu koja je u slučaju metala dovoljno snažna da ih odvaja iz glavnog protoka materijala.

U vrtložnim strujnim separatorima izmjenično magnetsko polje nastaje brzo rotirajućim trajnim magnetima unutar bubnja glave tračnog transportera. Na taj način se neželjezni metali odvajaju i padaju u tračne transportere koji ih prihranjuju do kontejnera za neželjezne metale.

Ostatak materijala se nadalje prihranjuje do zračnog separatora.



#### 3.4.4. Odvajanje goriva iz otpada

Odvajanje goriva iz otpada (GIO engl. solid recovered fuel (SRF)) se provodi u dva koraka. U prvom koraku lagani materijal koji se sastoji od materijala s visokom kalorijskom vrijednosti poput plastike, papira, itd. se odvaja od teških materijala poput kamenja, inertnog materijala i sl. u zračnom separatoru.

Odvojeni teški materijal se prihranjuje do kontejnera, a lagani materijal do optičkog separatora.

Dva optička separatora izdvajaju ne samo PVC, već služe i za separaciju odnosno odabir materijala zavisno o njegovom sadržaju vlage za proizvodnju SRF-a. U ovom slučaju optički separatori mogu se koristiti za:

- uklanjanje PVC-a, pri čemu će optički separatori detektirati i ukloniti PVC kao ostatnu frakciju
- separaciju SRF-a, pri čemu će optički separatori selektivno detektirati i izdvajati materijale s malim sadržajem vlage (plastiku, papir itd.) kao SRF frakciju

#### 3.4.5. Zračni separator

Svrha zračnog separatora je odvajanje „teške frakcije“ (inertni materijal) od „lake frakcije“ iz koje se proizvodi GIO. Radi na principu zračnog strujanja koje odvaja materijale različite specifične težine.

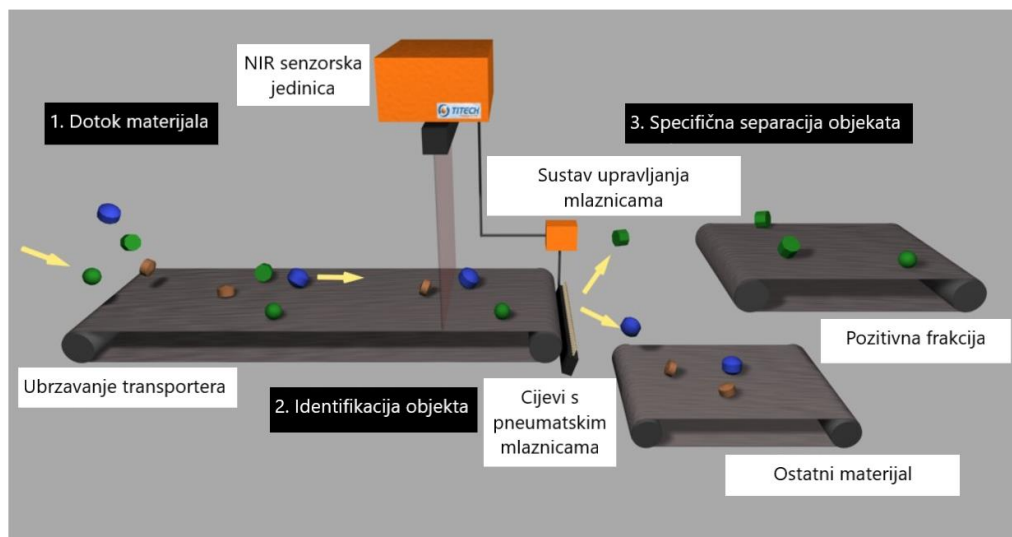
Zračni separator sortira materijal prema veličini, obliku i gustoći. Protok materijala koji treba sortirati se ubrizgava u komoru u kojoj se uzdiže zrak. Unutar komore za razdvajanje, zračni otpor stvara silu na predmete prema gore koja djeluje suprotno gravitacijskoj sili i uzdiže materijal koji se sortira u zrak.

### 3.4.6. Optički separator

Optički separator (engl. NIR (near infra red)) je višenamjenski uređaj za sortiranje koji „čisti“ laku frakciju zračnog separatora.

Sustav sortiranja NIR radi s vrlo osjetljivim spektrometrom koji detektira reflektirano blisko infracrveno zračenje i procjenjuje ga u skladu sa specifičnim zadacima.

Na Slici 6 je prikazano načelo rada NIR separatora. Materijal se pokreće u jednoslojnom načinu na pokretnu traku. Ondje se odvija zračenje i detekcija. Prikupljeni podaci se obrađuju i dovode do upravljačkog sustava za mlazne cijevi.



Slika 6. Načelo rada NIR separatora

Prema cilju sortiranja, otkriveni dijelovi se ispuhuju pomoću pneumatskih mlaznica.

NIR separator služi za odvajanje klorirane plastike iz otpada i poboljšanje kvalitete GIO odnosno zadovoljavanje kriterija visoko kvalitetnog goriva postavljenih od potrošača GIO. Detekcija klorirane plastike (PVC) vrši se pomoću infracrvenih zraka, dok se samo odvajanje vrši pomoću komprimiranog zraka.

Ovako izdvojena klorirana plastika ni količinom ni svojom kvalitetom (čistoćom) ne opravdava svoju materijalnu uporabu te se stoga odvozi na odlagalište kao dio biološki obrađene frakcije.

### 3.4.7. Finalna obrada goriva iz otpada (SRF-a)

Usitnjeni SRF mora proći kroz konačno usitnjavanje kako bi postigao potrebne dimenzije. SRF iz optičkih separatora odlazi do dva naknadna usitnjivača. Oba usitnjivača imaju mogućnost proizvodnje visokokvalitetnog SRF-a dimenzija 25 x 25 mm ili SRF-a niske do srednje kvalitete dimenzija 100 x 100 mm. Debljina materijala u SRF-u zavisi od debljine ulaznog materijala odnosno otpada.

### 3.5. Gorivo iz otpada i bioplin

Završni dio postrojenja za mehaničko-biološku obradu na Marišćini dijeli se na dvije tehnološke grupe: gorivo iz otpada kao vrijedan energent odnosno zamjena za fosilna goriva i preostali dio od oko 35% ulazne količine otpada koji se odlaže na bioreaktorsko odlagalište. Zatvaranjem ploha na bioreaktorskom odlagalištu kao dio procesa razgradnje nastaje bioplin koji će se koristiti za proizvodnju električne energije.

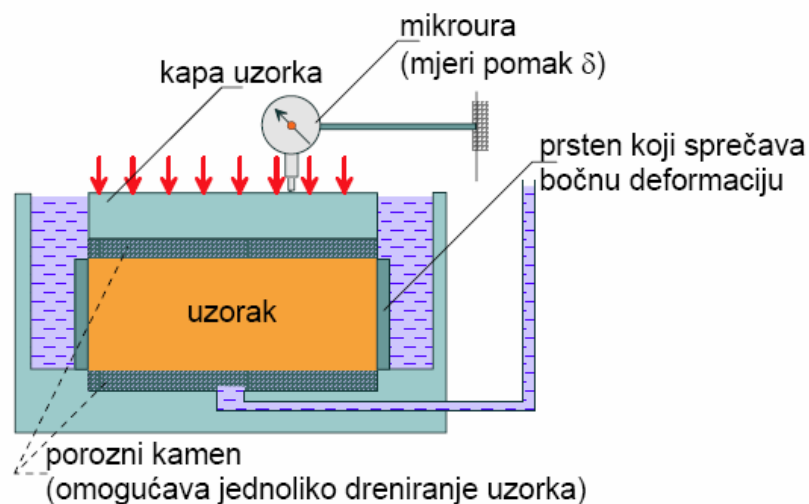
U konačnici na odlagalištu trajno ostaje tek manji dio ukupno proizvedenog otpada. Upravo taj manji dio otpada koji je prošao mehaničko-biološku obradu i koji je predviđen za konačno odlaganje će nam trebati za pokus mjerenja stišljivosti MBO otpada.

#### 4. Stišljivost otpada

Promjena stanja naprezanja u tijelu odlagališta zbog opterećenja, razgradnje organskog materijala ili drugih pojava, uzrokuje promjenu oblika i volumena otpada odnosno pojavu deformacije koju nazivamo „slijeganje“. Da bi predvidjeli veličinu i vremenski tijek slijeganja tijela odlagališta, najprije moramo utvrditi parametre stišljivosti otpada.

Stišljivost otpada je pojava uspravne deformacije otpada pod utjecajem promjene efektivnih naprezanja. Efektivna naprezanja u otpadu mogu se mijenjati uslijed promjene totalnih naprezanja ili uslijed promjene porednog tlaka.

Mjerenje stišljivosti odnosno određivanje parametara stišljivosti provodit ćemo primjenom metoda koje su razvijene u mehanici tla u svrhu ispitivanja tla. Mehanička svojstva komunalnog otpada nisu dovoljno istražena zbog heterogenosti otpada, velike razlike u raspodjeli veličina čestica i procesa razgradnje organskog materijala. Mjerenje stišljivosti komunalnog otpada provodi se u edometru (Slika 7), u uvjetima promjene samo jedne od šest komponenti deformacije. Dakle, u edometru se simulira jednodimenzionalna stišljivost otpada.



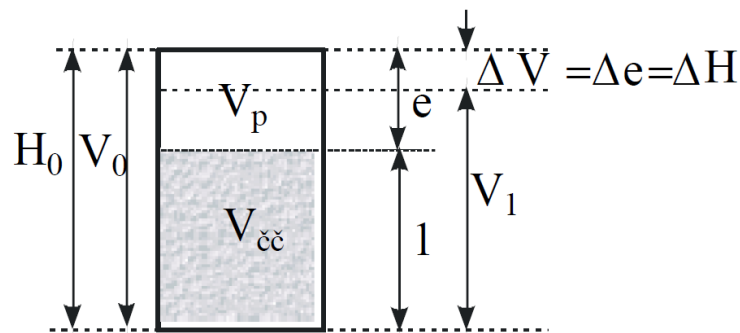
Slika 7. Shema edometra [6]

Stanje naprezanja u uzorku je troosno, a stanje deformacija jednoosno zbog spriječenog bočnog širenja. Tijekom pokusa, uzorak se postepeno opterećuje i prati se uspravna deformacija u vremenu za svaki pojedini stupanj opterećenja. Vremenski tijek deformacija, za pojedinu vrijednost opterećenja, izazvan usporenim istiskivanjem vode iz pora otpada naziva se proces konsolidacije.

Uzorak otpada opterećuje se u inkrementima, nakon čega se za svaki inkrement opterećenja odredi ukupna promjena visine (pomak) ( $-\Delta H$ ) i relativna deformacija  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = -\frac{\Delta H}{H_0} \quad (\text{izraz 1.})$$

Pri čemu su veličine  $\Delta H$  i  $H_0$  prikazane na Slici 8.



Slika 8. Odnos pora i deformacije u uzorku [1]

$V_p$  - volumen pora

$e$  - koeficijent pora

$V_{\check{c}\check{c}}$  - volumen čvrstih čestica

$\Delta e$  - promjena koeficijenta pora

$H_0$  - početna visina

$\Delta H$  - promjena visine (pomak)

$V_0$  - početni volumen

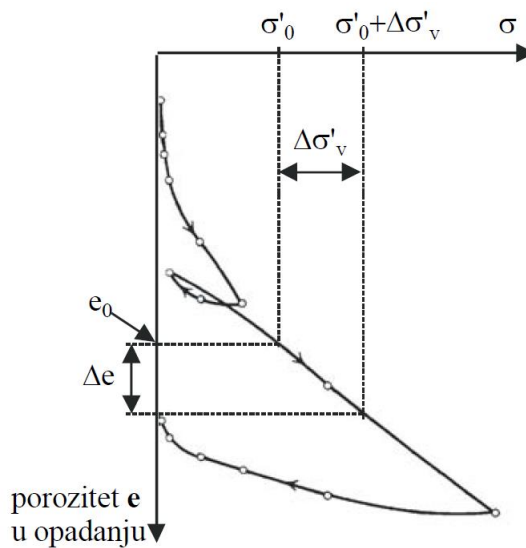
$\Delta V$  - promjena volumena

Promjena koeficijenta pora može se izračunati iz sljedeće formule:

$$-\Delta e = (1 + e_0) \cdot (-\varepsilon) \quad (\text{izraz 2.})$$

gdje je  $e_0$  početni koeficijent pora uzorka.

Rezultati pokusa se obično prikazuju u edometarskom dijagramu, gdje se na apscisi prikazuje opterećenje  $\sigma$  u logaritamskom mjerilu, a na ordinati koeficijent pora  $e$  (vrijednosti se smanjuju u smjeru osi), kao na Slici 9.



Slika 9. Edometarski dijagram [1]

#### 4.1. Parametri stišljivosti

Pokusom u edometru mogu se dobiti sljedeći parametri stišljivosti:

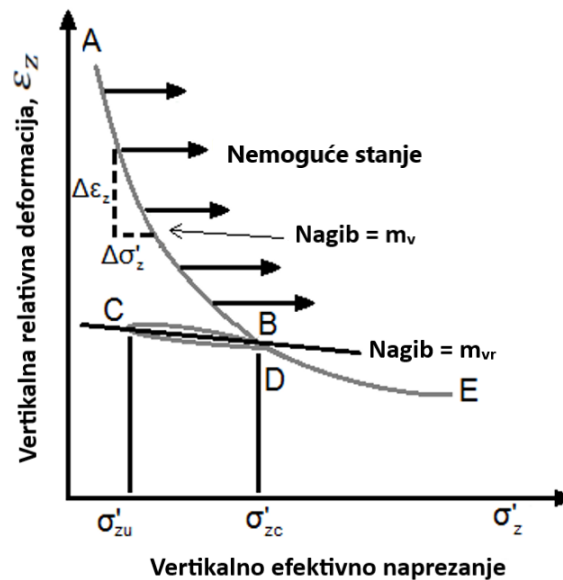
- modul stišljivosti,  $M_v$
- modul promjene volumena,  $m_v$
- koeficijent stišljivosti,  $a_v$
- indeks stišljivosti,  $C_c$
- indeks bujanja,  $C_r$

Promatrajući edometarski dijagram (Slika 9), može se napisati izraz za koeficijent stišljivosti ( $a_v$ ):

$$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (\text{izraz 3.})$$

Modul stišljivosti definiran je izrazom (Slika 10):

$$M_v = -\frac{\Delta \sigma'_v}{\varepsilon} \quad (\text{izraz 4.})$$



Slika 10. Odnos efektivnog naprezanja i deformacija u edometarskom dijagramu

Kako modul stišljivosti nije konstanta materijala te ovisi o intenzitetu i razini naprezanja, modul stišljivosti se za svaki inkrement naprezanja računa zasebno. Osim što je ponašanje materijala otpada nelinearno, ono je i elastoplastično, što znači da je samo dio deformacija povratan, a drugi dio deformacija ostaje trajan. Pri ponovnom naprezanju materijal će biti krući.

Uvrstimo li izraz za deformaciju ( $-\varepsilon = -\frac{\Delta e}{(1+e_0)}$ ), modul stišljivosti se može izraziti i na slijedeći način:

$$M_v = -\frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta e} (1 + e_0) \quad (\text{izraz 5.})$$

Uvažavajući izraz za koeficijent stišljivosti: ( $a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta\sigma'_v}$ ) modul stišljivosti  $M_v$  može poprimiti i oblik:

$$M_v = \frac{(1+e_0)}{a_v} \quad (\text{izraz 6.})$$

pri čemu je  $a_v$  koeficijent stišljivosti za odabrani odsječak naprezanja.

Recipročna vrijednost modula stišljivosti naziva se modul promjene volumena ( $m_v$ ):

$$m_v = \frac{a_v}{(1+e_0)} \quad (\text{izraz 7.})$$

Pomoću modula promjene volumena ( $m_v$ ) može se izravno proračunati slijeganje za promatrani odsječak sloja za koji se vrši proračun na način da je slijeganje ( $s$ ):

$$s = \Delta\sigma'_v \cdot m_v \cdot H \quad (\text{izraz 8.})$$

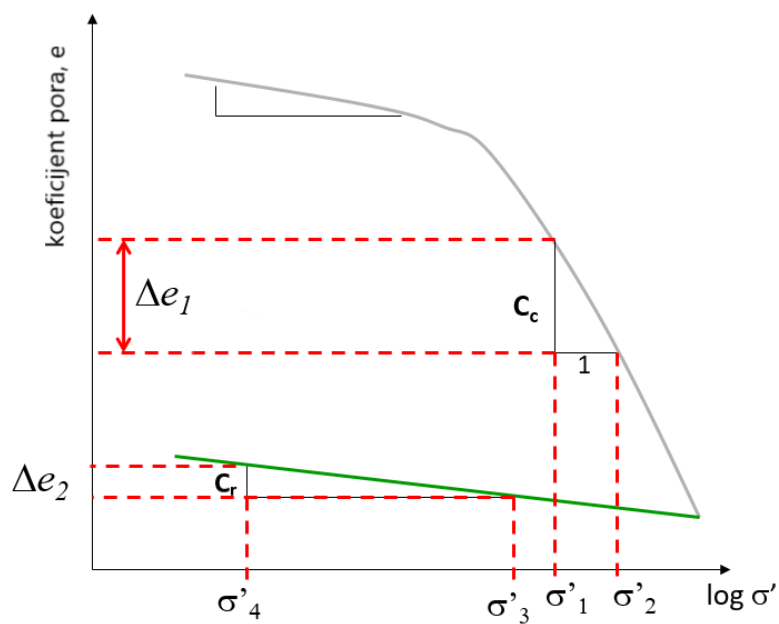
gdje je ( $H$ ) visina odabranog odsječka sloja za koji se vrši proračun.



Pomoću dijagrama na Slici 11 može se za ispitani uzorak odrediti indeks stišljivosti ( $C_c$ ) i indeks bujanja ( $C_r$ ):

$$C_c = - \frac{\Delta e_1}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \quad (\text{izraz 9.})$$

$$C_r = - \frac{\Delta e_2}{\log \frac{\sigma'_3}{\sigma'_4}} \quad (\text{izraz 10.})$$



Slika 11. Edometarski dijagram

## 5. Ispitivanje stišljivosti MBO otpada

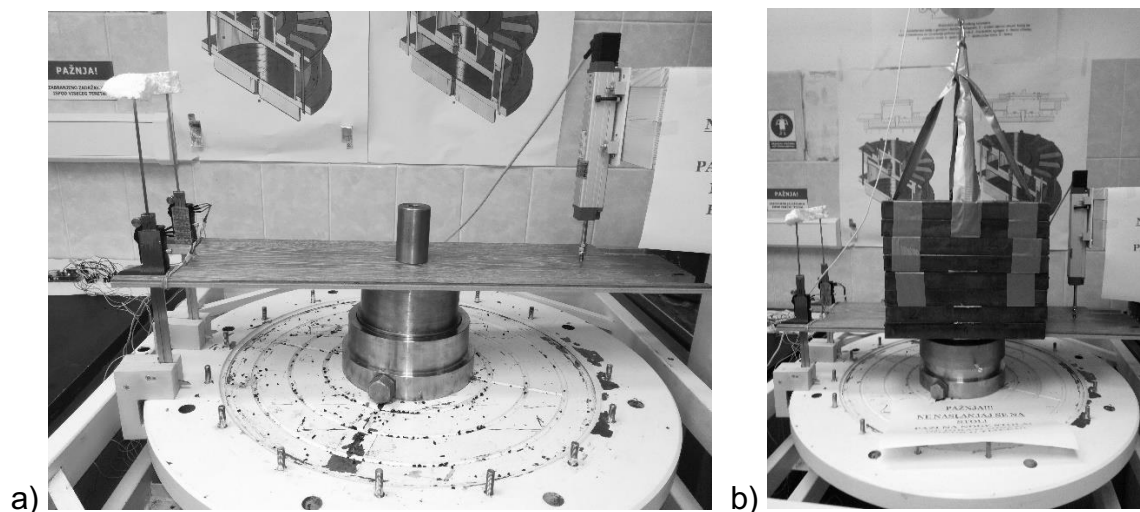
### 5.1. Edometarski uređaj

Postoje mnoge izvedbe i varijante edometarskih uređaja koji se koriste za ispitivanje stišljivosti, kako u mehanici tla, tako i u mehanici otpada, a jedan od njih koji je između ostalog korišten i u ovom ispitivanju odnosno mjerenju stišljivosti MBO otpada bit će opisan u narednom tekstu.

### 5.2. Opis edometra

#### Dijelovi edometra

Čitav sklop edometra (Slika 12) sastoji se od: potisne ploče (gornje ploče), gornjeg poklopca, čelijskog prstena, mjerila pomaka spojenog na računalni sustav za prikupljanje podataka, dva pomična mjerila spojena na računalo sustavom Arduino, krute ravne ploče (debljine 10 mm, širine 200 mm, i duljine 740 mm) sa otvorom (rupom) u sredini, i radnog stola s dizalicom.



Slika 12. Sklop edometra: a) bez utega; b) sa utezima

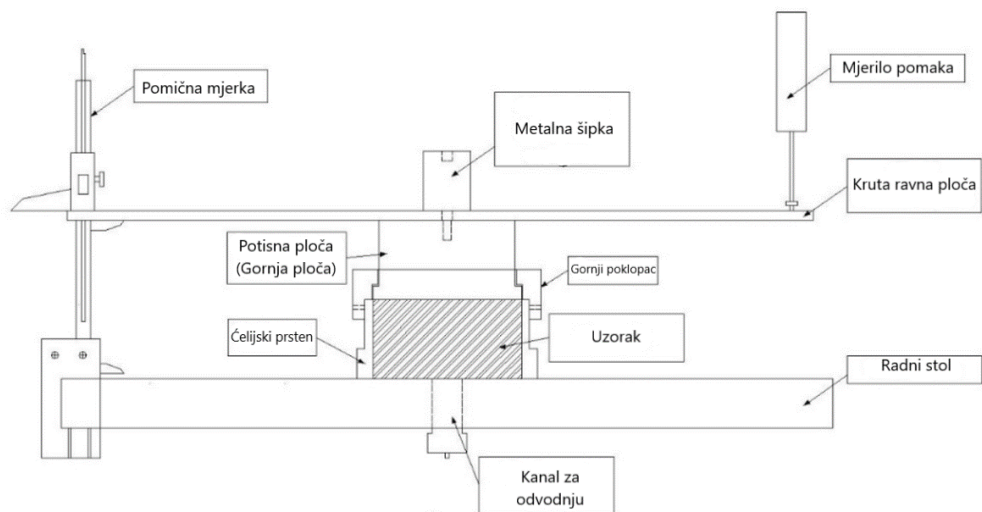
Kao opterećenje se koristi četvrtasta metalna ploča (uteg) debljine 30 mm, širine i duljine 295 x 295 mm, sa otvorom (rupom) u sredini promjera 50 mm (Slika 12). Ukupno primijenjeno opterećenje je deset opisanih metalnih ploča (utega), svaka težinom od 20 kg ( $\pm 0,2-0,3$  kg), što stvara ukupni pritisak slijeganja od 119,5 kPa na uzorak otpada.

Način postavljanja opterećenja na uzorak vrši se pomoću užadi, snažne ljepljive trake, dizalice i kolotura.

### Edometarska ćelija

Na Slici 13 prikazan je presjek ćelije edometra. Ćelija se sastoji od gornjeg poklopca spojenog sa tri čelična vijka u vodoravnom smjeru sa ćelijskim prstenom. Potisna ploča prolazi kroz gornji poklopac i ide sve do uzorka. Početna vrijednost pritiska na potisnoj ploči proizvedena njezinom vlastitom težinom je 5,39 kPa. Potisna ploča na vrhu ima otvor s navojem, tako da se u njega može zaviti okrugla, četverodijelna metalna šipka (ukupne duljine bez navoja, 275 mm). Višedijelna metalna šipka olakšava postavljanje tereta na sredinu uzorka.

Slika 13 također pokazuje da radni stol ima urezani kanal kako bi osigurao odvodnju viška pore vode. Na vrhu uzorka, ispod gornje ploče, postavljena je geomembrana kako bi se spriječilo da višak pore vode istječe iz ćelije kroz vrh. Kako bi se spriječilo začepljenje odvodnih otvora na dnu ćelije postavlja se geotekstil.



Slika 13. Shema edometra s mjernim sklopom

### Primijenjena rješenja tijekom razvoja uređaja

Da bi se smanjilo trenje između potisne ploče (gornje ploče) i čelijskog prstena, potisna ploča je posuta prahom od talka prije ugradnje uzorka.

Na potisnoj ploči postavljena je kruta drvena ploča, s rupom u sredini, tako da se kroz nju može pričvrstiti metalna šipka. Kao što se može vidjeti na Slici 12 i 13, s desne strane uzorka, za mjerenje stišljivosti korišteno je mjerilo pomaka. Zapisnik podataka zabilježio je svakih 10 sekundi promjenu visine uzorka pod opterećenjem.

Na lijevoj strani uzorka korištena su dva pomična mjerila s maksimalnim mjernim hodom od 150 mm. Svako mjerilo je postavljeno na jedan rub krute drvene ploče tako da tri mjerne točke (2 pomična mjerila i mjerilo pomaka formiraju trokut) čime je omogućeno praćenje nagiba gornje ploče. Pomična mjerila su povezana na računalo sa sustavom Arduino, gdje se promjena visine uzorka bilježila svake sekunde. Način stavljanja tereta na uzorak vrlo je specifičan. Korištenjem kolotura, snaga potrebna za podizanje tereta od 20 i 40 kg u zrak je znatno smanjena (Slika 14).



Slika 14. Kolotur koji se koristi za postavljanje potisne ploče i utega

### 5.3. Karakteristike ispitivanog materijala

#### 5.3.1. Sastav ispitivanog uzorka otpada

Uzorak otpada (Slika 15) koji je uzet odmah nakon mehaničko-biološke obrade u samom postrojenju na Marišćini i koji je namijenjen odlaganju na bioreaktorsko odlagalište sadržavao je 42,48% neidentificirane frakcije veće od 2 mm, 27,72% neidentificirane frakcije manje od 2 mm, 10,62% stakla, 6,43% plastike, 4,71% papira/kartona, 2,76% kamenja, 2,15% kuhinjskog otpada, 1,18% drveta, 0,94% metala, 0,46% keramike, 0,22% tekstila, 0,2% kostiju/kože i 0,13% gume.



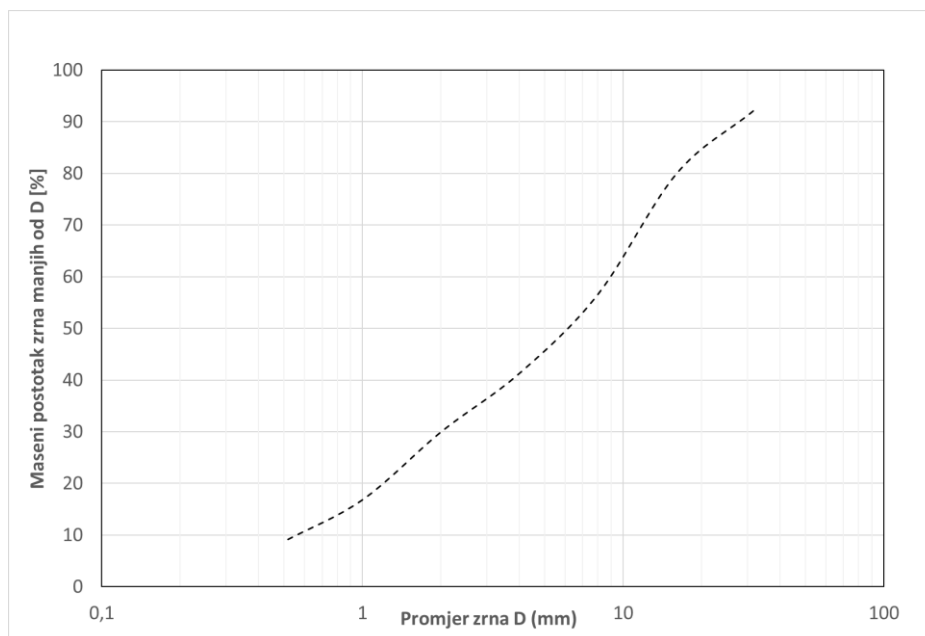
Slika 15. Uzorak MBO otpada

### 5.3.2. Granulometrijski sastav

Kroz seriju od 7 sita (Slika 16) prosijano je ukupno 25 uzorka. Sita su bila promjera (D) 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm i 0,5 mm. Prosječna veličina čestica MBO otpada prikazana je granulometrijskom krivuljom na Slici 17.



Slika 16. Dobivene frakcije nakon prosijavanja



Slika 17. Granulometrijski dijagram

### 5.3.3. Udio organske tvari

Ispitan je reprezentativan uzorak od ukupno 50 grama. Postotak organske tvari se određivao u peći za žarenje (mufolna peć) na 440 °C (Slika 18). Peć je prije žarenja umjeravana od strane certificiranog laboratorija za umjeravanje. Utvrđen je organski sadržaj miješanog uzorka od 51,6%.



Slika 18. Peć za žarenje (Mufolna peć)

### 5.3.4. Gustoća čestica otpada

Gustoća čestica MBO otpada određena je modificiranim plinskim piknometrom. Metoda plinskog piknometra prilagođena je ASTM D 5550 standardu. Rezultati plinskog piknometra variraju od  $1,69 \frac{g}{cm^3}$  do  $2,19 \frac{g}{cm^3}$ , a prosječna vrijednost gustoće čestica za ispitivani otpadni materijal je  $1,87 \frac{g}{cm^3}$ .



#### 5.4. Postupak mjerenja

Postupak mjerenja temeljio se na suhom uzorku MBO otpada koji je prethodno osušen za potrebe ispitivanja. Gustoća ugrađenog uzorka iznosila je  $380 \frac{kg}{m^3}$ , što je u skladu s postignutom gustoćom otpada na odlagalištu koju je utvrdio operater centra za gospodarenje otpadom Mariščina.

Konačna masa ugrađenog uzorka bila je 0,4224 kg, dok je konačna visina uzorka bila 63 mm. Da bi se postigla ciljana gustoća, svaki se sloj zbijao uz pomoć utega od 2 kg (Slika 19).



Slika 19. Zbijanje sloja uzorka

Tablica 1 sadrži osnovne geotehničke parametre za suhi uzorak na početku ispitivanja gdje,  $\rho$  označava ukupnu gustoću,  $w$  sadržaj vlage,  $\rho_d$  suhu gustoću,  $\rho_s$  prosječnu gustoću čvrstih čestica,  $e_0$  koeficijent pora i  $S_r$  stupanj zasićenja.

Tablica 1. Osnovni početni parametri ispitivanog uzorka

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w$ (%) [ST]	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) [ST]	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) [ST]	$e_0$	$S_r$ (%)
Uzorak 1	0,380	0	0,380	1,894	3,984	0

ST-suha tvar

Prvi korak u postupku konsolidacije bio je postavljanje početnog opterećenja kojeg stvara potisna ploča (gornja ploča) (Slika 20). Neposredno nakon postavljanja potisne ploče zabilježeno je početno slijeganje. Nakon očitavanja početnog slijeganja, uzorak je podvrgnut dodatnom opterećenju od 11,78 kPa. Na Slici 21 nalazi se detaljan redoslijed opterećenja uzorka, pri čemu je svaki korak opterećenja (osim potisne ploče) trajao približno 24 sata prije primjene sljedećeg koraka. Ukupno opterećenje u završnoj fazi konsolidacije bilo je 119,5 kPa (Slika 22). Budući da je konačna visina odlagališta Marišćina projektirana na 21 m, predviđena maksimalna razina naprezanja na dnu odlagališta otpada iznosi oko 80 kPa. Stoga se za potrebe ovog istraživanja ukupno primijenjeno opterećenje smatralo dostatnim.



Slika 20. Postavljanje potisne ploče



Slika 21. Postupak opterećenja uzorka



Slika 22. Opterećenje uzorka utezima

Kako bi se smanjilo trenje između potisne ploče i ćelijskog prstena, bočna površina potisne ploče bila je posuta prahom od talka, dok je unutarnja strana ćelije edometra bila podmazana silikonskim sprejom.

## 6. Rezultati

### 6.1. Osnovni geotehnički parametri

Osnovni geotehnički parametri za uzorak 1 na kraju ispitivanja prikazani su u tablici 2. Uspoređujući tablice 1 i 2, može se vidjeti da su se vrijednosti  $\rho$  i  $\rho_d$  povećale.

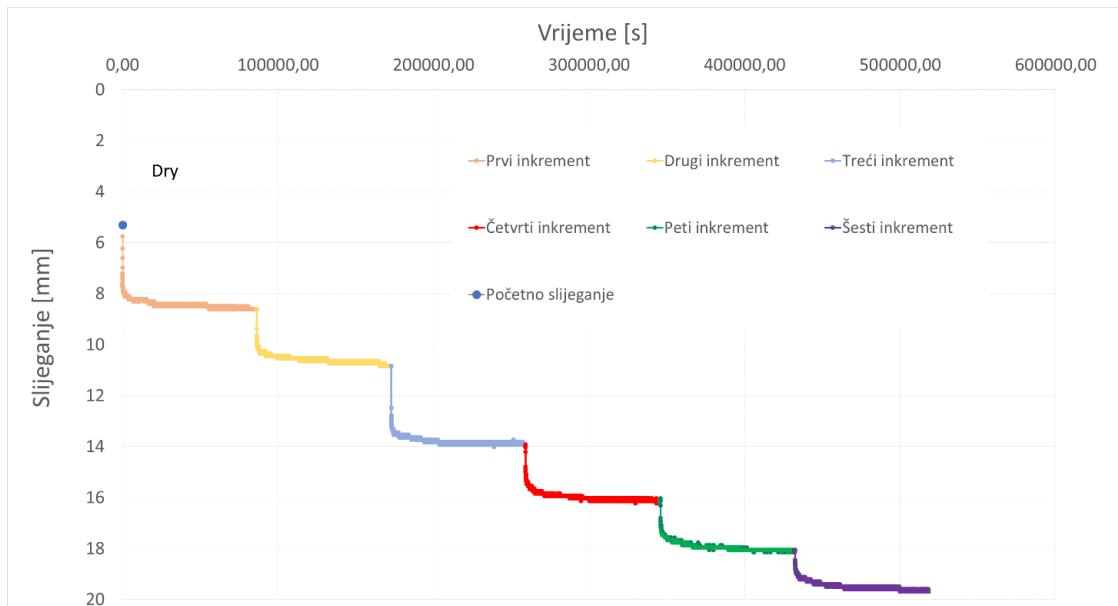
Tablica 2. Osnovni parametri uzorka na kraju ispitivanja edometrom

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%) [ST]	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) [ST]	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) [ST]	e <sub>1</sub>	S <sub>r</sub> (%)
Uzorak 1	0,553	0	0,553	1,894	2,42	0

ST-suha tvar

## 6.2. Krivulja slijeganja

Inicijalno slijeganje izmjereno je pomičnom mjerkom. Početno slijeganje iznosilo je 5,31 mm (Slika 23). Nakon mjerenja početnog slijeganja, uteg 1 postavljen je na vrh potisne i krute ploče. Kao što se može vidjeti sa Slike 23, na suhom uzorku otpada, pri opterećenju od 119,5 kPa, može se očekivati relativna deformacija oko 20%.



Slika 23. Krivulja slijeganja za ispitivani uzorak

## 6.3. Edometarski modul

Edometarski modul ( $M_v$ ) je definiran slijedećim izrazom:

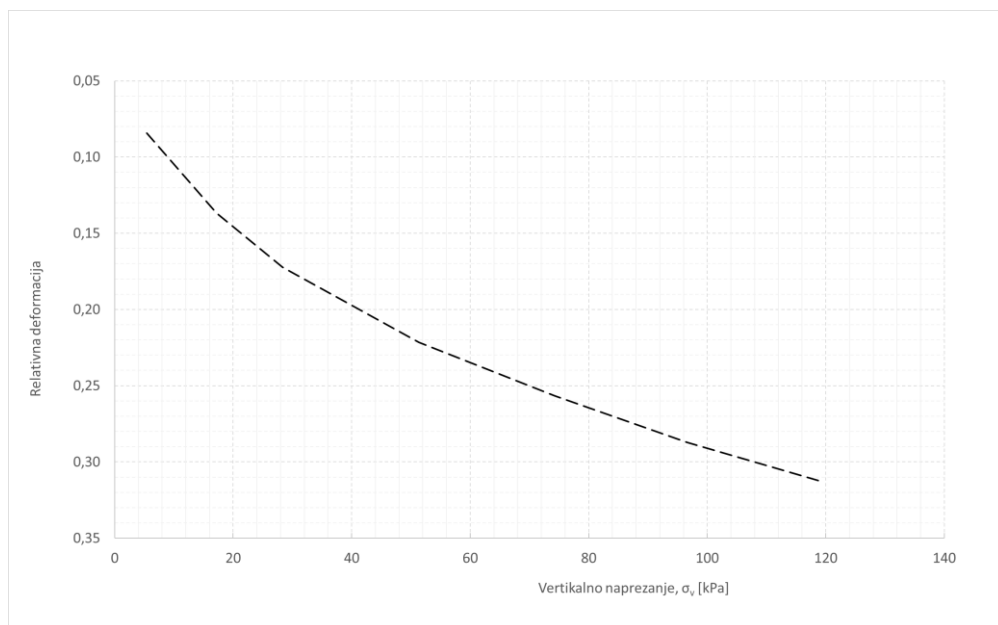
$$M_v = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta h} \cdot h_0 \quad (\text{izraz 11.})$$

gdje je  $\Delta\sigma_v$  povećanje vertikalnog ukupnog naprežanja [kPa],  $\Delta h$  je odgovarajuća promjena visine uzorka, a  $h_0$  je početna visina uzorka.

Za ispitivani uzorak, edometarski moduli dobiveni u ovom istraživanju prikazani su u tablici 3. Moduli su utvrđeni iz krivulje prikazane na Slici 24.

Tablica 3. Edometarski moduli ( $M_v$ ) uzorka 1

Raspon opterećenja [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
$M_v$ [kPa]	63,85	225,22	314,78	466,97	654,16	732,64	880,27



Slika 24. Krivulja relativne deformacije za ispitivani uzorak

## 7. Zaključak

Otpad nije smeće, već sirovina na pogrešnom mjestu. Prema konceptu održivog razvoja, konačnom odlaganju na odlagališta mora prethoditi obrada otpada. Rezultat obrade je smanjena količina otpada koji će se odložiti na odlagalište i smanjenje proizvedenih količina plina i filtrata po odlaganju.

U zadnjih desetak godina i u Hrvatskoj je počelo projektiranje i izgradnja pogona za mehaničku i biološku obradu otpada s ciljem smanjenja količina otpada koji je potrebno odložiti na odlagalište. Primjer takve obrade je Županijski centar za gospodarenje otpadom (ŽCGO) Marišćina. Cilj obrade otpada na Marišćini je povrat korisnih sirovina sustavom automatske separacije te proizvodnja ostatnog biorazgradivog materijala pogodnog za proizvodnju bioplina nakon odlaganja na odlagalištu otpada.

Do negativnog utjecaja odlagališta na okoliš najčešće dolazi uslijed pojave nestabilnosti, oštećenja i havarija. Stoga je poznavanje mehaničkih svojstava odloženog otpada neophodno kako bi projektiranje odlagališta bilo pouzdano.

Važnost poznavanja mehaničkih parametara MBO otpada dolazi do izražaja kod osiguranja odlagališta odnosno stabilnosti njegovih privremenih i trajnih pokosa, zaštitnih slojeva te sustava za otplinjavanje. Stišljivost predstavlja jedan od mehaničkih parametara MBO otpada i poznavanje njegovih parametara je neophodno za procjenu iznosa slijeganja odlagališta.

U konačnici na odlagalištu Marišćina trajno ostaje tek manji dio ukupno proizvedenog otpada. Upravo iz tog manjeg dijela otpada, koji je prošao mehaničko-biološku obradu te je predviđen za konačno odlaganje na bioreaktorsko odlagalište i za proizvodnju bioplina, je i uzet uzorak kako bi se ispitala njegova stišljivost.

Mjerenje stišljivosti provodi se primjenom metoda koje su razvijene u mehanici tla u svrhu ispitivanja tla. Stišljivost se ispituje u edometru, a kao rezultat se dobiju parametri stišljivosti na temelju kojih daljnjim proračunima možemo procijeniti iznos slijeganja tijela odlagališta.

## 8. Zahvala

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

## 9. Literatura:

[1] Roje-Bonacci, T. Mehanika tla. 3. izd. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet; 2007.

[2] Nonveiller, E. Mehanika tla i temeljenje građevina. Zagreb: Školska knjiga, 1979.

[3] Sredojević, J. Obrada i deponije otpada. Zenica: Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet; 2003.

[4] Milanović Z. Mehaničko-biološka obrada otpada. Gospodarstvo i okoliš, 54/2002, 38

[5] Anić –Vučinić, A. Gospodarenje otpadom, Interna skripta; Varaždin 2014.

[6] Kvasnička P., Domitrović, D. Mehanika tla. Interna skripta; Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; Zagreb 2007.

## 10. Popis slika

Slika 1. Odlaganje otpada na odlagalište i štetno djelovanje odlagališnog filtrata i plina na okoliš (vode, tlo, zrak) [3]

Slika 2. Procesni kran utovaruje komoru za biološko sušenje

Slika 3. Komora za biosušenje

Slika 4. Separator željeznih metala

Slika 5. Separator neželjeznih metala

Slika 6. Načelo rada NIR separatora

Slika 7. Shema edometra [6]

Slika 8. Odnos pora i deformacije u uzorku [1]

Slika 9. Edometarski dijagram [1]

Slika 10. Odnos efektivnog naprezanja i deformacija u edometarskom dijagramu

Slika 11. Edometarski dijagram

Slika 12. Sklop edometra: a) bez utega; b) sa utezima

Slika 13. Shema edometra s mjernim sklopom

Slika 14. Kolotur koji se koristi za postavljanje potisne ploče i utega

Slika 15. Uzorak MBO otpada

Slika 16. Dobivene frakcije nakon prosijavanja

Slika 17. Granulometrijski dijagram

Slika 18. Peć za žarenje (Mufolna peć)



Slika 19. Zbijanje sloja uzorka

Slika 20. Postavljanje potisne ploče

Slika 21. Postupak opterećenja uzorka

Slika 22. Opterećenje uzorka utezima

Slika 23. Krivulja slijeganja za ispitivani uzorak

Slika 24. Krivulja relativne deformacije za ispitivani uzorak

## 11. Popis tablica

Tablica 1. Osnovni početni parametri ispitivanog uzorka

Tablica 2. Osnovni parametri uzorka na kraju ispitivanja edometrom

Tablica 3. Edometarski moduli ( $M_v$ ) uzorka 1