

Kemija na odlagalištima otpada

Šimatović, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Medicine / Sveučilište u Rijeci, Medicinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:184:815689>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Medicine - FMRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ
SANITARNOG INŽENJERSTVA

Luka Šimatović
KEMIJA NA ODLAGALIŠTIMA OTPADA
Završni rad

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ
SANITARNOG INŽENJERSTVA

Luka Šimatović
KEMIJA NA ODLAGALIŠTIMA OTPADA
Završni rad

Rijeka, 2024.

Mentor rada: izv.prof.dr.sc. Mirna Petković Didović, dipl.ing.kemije

Završni rad obranjen je dana _____ u/na _____
_____, pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof.dr.sc. Dalibor Broznić, predsjednik povjerenstva
2. izv.prof.dr.sc. Marin Tota
3. izv.prof.dr.sc. Mirna Petković Didović

Rad sadrži 32 stranice, 3 slike, 1 tablicu i 25 literaturnih navoda.

SAŽETAK

Odlagališta otpada predstavljaju složene ekosustave gdje se odvijaju brojni kemijski procesi koji značajno utječu na dinamiku okoliša i zdravlje ljudi. Razumijevanje kemije na odlagalištima otpada od ključne je važnosti za analizu sastava otpada, koji obuhvaća anorganske i organske tvari. Svaka tvar prolazi kroz specifične kemijske procese, rezultirajući stvaranjem iscjednih voda prepunih zagađivača te plinova poput ugljikovog dioksida i metana. Interakcije između mikrobne aktivnosti tijekom biorazgradnje na odlagalištima ključne su za razgradnju složenih organskih spojeva. Zagađivači, uključujući organske tvari, mikroorganizme i teške metale, prisutni su u tim vodenim otopinama, mogu predstavljati ozbiljnu prijetnju ekosustavima i zdravlju ljudi. Stoga su učinkoviti sustavi prikupljanja i upravljanja plinom nužni za smanjenje negativnih učinaka odlagališta na okoliš. Inovativne strategije sanacije, poput poboljšanih postupaka oksidacije i biorazgradnje, od vitalne su važnosti za pročišćavanje kontaminirane podzemne vode i tla te za promicanje ekološki prihvatljivog gospodarenja otpadom. Buduća istraživanja usmjerena su na dublje razumijevanje složene kemije odlagališta otpada i razvoj ekološki održivih pristupa gospodarenju otpadom, što će doprinijeti zdravijem planetu. Posebna pažnja posvećena je razvoju novih tehnologija za detekciju i neutralizaciju zagađivača te implementaciji boljih regulacija i politika upravljanja otpadom. Ovaj rad istražuje kemijske procese na odlagalištima, analizira utjecaj mikrobne aktivnosti na razgradnju otpada te razmatra inovativne metode sanacije i upravljanja plinom kako bi se ublažili negativni učinci na okoliš i zdravlje ljudi. Zaključci ovog istraživanja naglašavaju važnost interdisciplinarnog pristupa u rješavanju problema povezanih s odlagalištima otpada, uključujući suradnju znanstvenika, inženjera i političara u kreiranju održivih rješenja.

Ključne riječi: biorazgradnja; kemijski procesi; odlagališta otpada; zagađivala

SUMMARY

Landfills represent complex ecosystems where numerous chemical processes significantly impact environmental dynamics and human health. Understanding the chemistry of landfills is crucial for analyzing the composition of waste, which includes inorganic and organic substances. Each substance undergoes specific chemical processes, resulting in the creation of leachate full of pollutants and gases such as carbon dioxide and methane. Interactions between microbial activities during biodegradation at landfills are essential for the decomposition of complex organic compounds. Pollutants, including organic chemicals, microorganisms, and heavy metals, are present in these aqueous solutions, which can pose a serious threat to ecosystems and human health. Therefore, effective gas collection and management systems are necessary to reduce the negative impacts of landfills on the environment. Innovative remediation strategies, such as enhanced oxidation processes and biodegradation, are vital for the purification of contaminated groundwater and soil, promoting environmentally friendly waste management. Future research is directed toward a deeper understanding of the complex chemistry of landfills and the development of environmentally sustainable waste management approaches, which will contribute to a healthier planet. Special attention is given to the development of new technologies for detecting and neutralizing pollutants and the implementation of better regulations and waste management policies. This paper investigates the chemical processes in landfills, analyzes the impact of microbial activity on waste decomposition, and considers innovative remediation and gas management methods to mitigate negative effects on the environment and human health. The conclusions of this research emphasize the importance of an interdisciplinary approach to addressing landfill-related issues, including the collaboration of scientists, engineers, and policymakers in creating sustainable solutions.

Keywords: biodegradation; chemical processes; landfills; pollutants

Sadržaj

1. UVOD I PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	1
1.1. UVOD	1
1.2. ODLAGALIŠTA OTPADA	2
1.3. OSNOVNE KOMPONENTE ZBRINJAVANJA OTPADA PREMA EU STANDARDIMA.....	2
1.3.1. <i>Temelj i brtveni sloj odlagališta</i>	2
1.3.2. <i>Sustav za prikupljanje i obradu procjednih voda</i>	3
1.3.3. <i>Sustav za prikupljanje i obradu plina</i>	3
1.3.4. <i>Natkrivanje odlagališta</i>	3
1.4. VAŽNOST PROUČAVANJA KEMIJE NA ODLAGALIŠTIMA OTPADA	3
1.5. PREGLED PROCESA ODLAGANJA OTPADA.....	3
1.6. KLJUČNE STAVKE UPRAVLJANJA ODLAGALIŠTIMA OTPADA	4
2. SVRHA RADA	5
2.1. RAZUMIJEVANJE KEMIJSKIH REAKCIJA NA ODLAGALIŠTIMA	5
2.2. PROCJENA UTJECAJA NA OKOLIŠ	5
2.3. PREMOŠĆIVANJE PRAZNINA U ZNANJU I UNAPREĐENJE ISTRAŽIVANJA	6
2.4. DOPRINOS ODRŽIVOM GOSPODARENJU OTPADOM	6
3. PREGLED LITERATURE.....	8
3.1. PROCJEDNE VODE	8
3.2. ISTRAŽIVANJE ZAGAĐENJA I DEGRADACIJE TLA NA ODLAGALIŠTU OTPADA U REPUBLICI ČEŠKOJ.....	13
4. RASPRAVA	16
4.1. STVARANJE METANA NA ODLAGALIŠTIMA	19
4.1.1. <i>Hidroliza</i>	19
4.1.2. <i>Acidogeneza (fermentacija)</i>	19
4.1.3. <i>Acetogeneza</i>	19
4.1.4. <i>Metanogeneza</i>	20
4.2. STVARANJE AMONIJAKA NA ODLAGALIŠTIMA	20
4.2.1. <i>Razgradnja dušikovih spojeva</i>	20
4.2.2. <i>Pretvorba amonijaka u amonijev kation</i>	21
4.3. KEMIJSKE REAKCIJE U STVARANJU PROCJEDNE VODE	21
4.3.1. <i>Otapanje i kompleksiranje</i>	21
4.3.2. <i>Taloženje i adsorpcija</i>	21
4.3.3. <i>Acidobazne reakcije</i>	22
4.4. NAPREDAK I INOVACIJE U GOSPODARENJU OTPADOM: ISTRAŽIVANJE NOVIH METODA I TEHNIKA.....	22
4.4.1. <i>Poboljšane tehnologije recikliranja</i>	22
4.4.2. <i>Napredne tehnologije pretvaranja otpada u energiju</i>	23
4.4.3. <i>Inovativne tehnike upravljanja odlagalištima</i>	24
4.4.4. <i>Nove tehnologije gospodarenja otpadom</i>	24
5.1. KEMIJSKA I EKOLOŠKA SLOŽENOST PROCJEDNIH VODA.....	26
5.2. EKOLOŠKI UTJECAJ I ISTRAŽIVANJE KONTAMINACIJE	26
5.3. IZAZOVI POVEZANI S MIKROPLASTIKOM	27
5.4. NAPREDNE TEHNOLOGIJE ZA OBRADU PROCJEDNIH VODA.....	27
5.5. UPRAVLJANJE ODLAGALIŠTEM I ENERGETSKI OPORAVAK	28
5.6. INOVACIJE U GOSPODARENJU OTPADOM	28
6. LITERATURA.....	29
7. ŽIVOTOPIS.....	32

1. Uvod i pregled područja istraživanja

1.1. Uvod

Odlagališta otpada oduvijek su bila neizbježan dio naše civilizacije, od najranijih naselja pa sve do današnjih modernih gradova. Kako su društva rasla, tako je rasla i potreba za sustavima koji bi omogućili sigurno i učinkovito zbrinjavanje otpada. Od jednostavnih jama u zemlji, gdje su se odbacivali neželjeni materijali, do složenih inženjerskih rješenja koja danas poznajemo, povijest odlagališta prati ljudski razvoj i prilagodbu u suočavanju s problemima otpada.

Prvi zabilježeni narod koji je započeo s odlaganjem otpada bili su drevni Grci, u Knossosu 3000 godina p.n.e. Odlagali su krute otpatke u jame te ih potom zakopavali.[1] Početak “modernog” odlaganja otpada krenuo je u Sjedinjenim Američkim Državama 1937. u gradu Fresno, Kalifornija. Otpad je na dnevnoj bazi bio pokrivan zemljom kako bi se spriječili mirisi, nametnici i požari.[2]

U Europskoj Uniji 1999. godine donešena je tzv. „*Direktiva odlagališta otpada*“ službeno imenovana Direktiva vijeća 1999/31/EC koja prikazuje regulative o gospodarenju otpadom na odlagalištima s ciljem da „*spriječi ili u najvećoj mogućoj mjeri smanji negativne učinke na okoliš, posebice onečišćenje površinskih voda, podzemnih voda, tla i zraka, te na globalni okoliš, uključujući učinak staklenika, kao i svaki iz toga proizašao rizik za ljudsko zdravlje, odlaganje otpada, tijekom cijelog životnog ciklusa odlagališta.*“[3]

Zanimljiv podatak s naših prostora je da su najveće stope komunalnog otpada upućenog na uporabu zabilježene u Međimurskoj županiji (33,6 %), **Primorsko-goranskoj županiji** (14,4 %) i Varaždinskoj županiji (13,5 %).[4]

1.3.2. Sustav za prikupljanje i obradu procjednih voda

Procjedne vode predstavljaju veliki rizik za okoliš jer mogu sadržavati brojne kemikalije koje se ispiru iz otpada. Sustav za prikupljanje procjednih voda uključuje drenažne cijevi, filtere i slojeve šljunka koji skupljaju tu vodu. Nakon skupljanja, procjedne vode se pročišćavaju u specijaliziranim postrojenjima kako bi se uklonile štetne tvari prije nego što se voda ispusti natrag u okoliš ili upotrijebi u druge svrhe.

1.3.3. Sustav za prikupljanje i obradu plina

Tijekom anaerobne razgradnje organskog otpada na odlagalištima nastaju plinovi poput metana i ugljičnog dioksida. Ti se plinovi moraju učinkovito skupljati kako bi se spriječila potencijalno opasne emisije i eksplozije. U tu svrhu koristi se sustav cijevi za prikupljanje plinova koji plinove transportiraju do postrojenja gdje se mogu spaliti ili koristiti za proizvodnju energije.

1.3.4. Natkrivanje odlagališta

Nakon zatvaranja odlagalište se prekriva slojem zemlje, geosintetskih materijala i vegetacije. Ovaj pokrovni sloj sprječava infiltraciju kišnice, smanjuje rizik od emisije plinova u atmosferu i pomaže u stabilizaciji odlagališta.[3]

1.4. Važnost proučavanja kemije na odlagalištima otpada

Proučavanje kemije odlagališta je bitno jer razgradnja otpada dovodi do stvaranja raznih nusproizvoda koji mogu značajno utjecati na okoliš. Ti nusproizvodi uključuju procjednu vodu – tekućinu koja nastaje kada voda protječe kroz otpadne materijale – i odlagališni plin koji se prvenstveno sastoji od metana (CH_4) i ugljičnog dioksida (CO_2). I procjedne vode i odlagališni plin predstavljaju rizike: procjedne vode mogu onečistiti podzemne i površinske vode, dok odlagališni plin doprinosi emisiji stakleničkih plinova i može uzrokovati eksplozije ako se njime ne rukuje pravilno. Razumijevanje kemijskih reakcija i interakcija unutar odlagališta može pomoći u ublažavanju ovih rizika i poboljšati mjere zaštite okoliša.[7]

1.5. Pregled procesa odlaganja otpada

Odlagališta rade kroz niz složenih fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa. U početku se otpad podvrgava aerobnoj razgradnji zbog prisutnosti kisika. Kako se kisik iscrpljuje, prevladavaju anaerobni uvjeti, što dovodi do razgradnje organskih tvari pomoću mikroorganizama koji proizvode metan i ugljikov dioksid. Kemijski sastav otpada, prisutnost vlage i dizajn odlagališta utječu na te procese. Ispitivanjem ovih čimbenika, istraživači mogu

razviti bolje metode za upravljanje emisijama i procjednim vodama s odlagališta kao i očuvanjem okoliša.

1.6. Ključne stavke upravljanja odlagalištima otpada

Za učinkovito upravljanje odlagalištima mora se riješiti nekoliko ključnih stavki. To uključuje:

1. Upravljanje procjednim vodama: Sprječavanje onečišćenja izvora vode procjednom vodom je primarna briga. To zahtijeva razumijevanje kemijskog sastava procjedne vode i načina na koji ona djeluje s oblogama odlagališta i prirodnim barijerama.[8]
2. Kontrolu emisija plinova: Upravljanje emisijama odlagališnih plinova uključuje hvatanje i korištenje metana za smanjenje emisija stakleničkih plinova i sprječavanje potencijalnih opasnosti.[9]
3. Analizu sastava otpada: Analizom kemijskog sastava otpada mogu se informirati o strategijama za smanjenje otpada, recikliranje i alternativne metode odlaganja.[10]
4. Dugoročna stabilnost i praćenje: Osiguravanje dugoročne stabilnosti zatvorenih odlagališta i praćenje mogućih utjecaja na okoliš ključni su za zaštitu javnog zdravlja i okoliša.[11]

2. Svrha rada

Svrha ovog rada je višestruka:

- produbiti razumijevanje kemijskih procesa na odlagalištima
- procijeniti utjecaj nusproizvoda odlagališta na okoliš
- identificirati nedostatke u trenutačnim metodama
- pridonijeti razvoju održivije prakse upravljanja otpadom.

Primarna svrha ovog rada je istražiti i analizirati složene kemijske procese koji se odvijaju unutar odlagališta i razumjeti njihove implikacije na upravljanje okolišem i održivost. Udubljujući se u kemiju odlagališta otpada, cilj ovog rada je pružiti sveobuhvatno razumijevanje načina na koji se otpad razgrađuje, kemijskih nusproizvoda koji nastaju i načina na koji ti nusproizvodi djeluju na okoliš. Ovo znanje je neophodno za poboljšanje prakse upravljanja odlagalištima, ublažavanje rizika za okoliš i doprinos širim ciljevima smanjenja otpada i održivosti.

2.1. Razumijevanje kemijskih reakcija na odlagalištima

Jedan od glavnih ciljeva ovog rada je ispitati kemijske reakcije koje se odvijaju unutar odlagališta. Kako se otpad odlaže i počinje razgrađivati, prolazi kroz različite faze kemijske transformacije, na što utječu čimbenici kao što su vrsta otpada, prisutnost mikroorganizama, sadržaj vlage i temperatura. U početku dolazi do aerobne razgradnje, gdje organski otpad reagira s kisikom pri čemu nastaju ugljični dioksid, voda i toplina. Kako se kisik troši, stvaraju se anaerobni uvjeti, što dovodi do nastanka metana, ugljičnog dioksida i drugih hlapljivih organskih spojeva. Ovaj rad će detaljno istražiti ove kemijske reakcije, fokusirajući se na to kako različiti otpadni materijali doprinose stvaranju štetnih nusprodukata kao što su procjedne vode i odlagališni plin. Razumijevanjem ovih reakcija možemo identificirati ključne čimbenike koji utječu na brzinu i opseg razgradnje, što zauzvrat može utjecati na strategije za kontrolu i smanjenje utjecaja odlagališta na okoliš.

2.2. Procjena utjecaja na okoliš

Druga kritična svrha ovog rada je procijeniti utjecaj kemijskih nusprodukata nastalih na odlagalištima na okoliš. Procjedne vode, tekućina koja nastaje kada voda prodire kroz otpad,

sadrže mješavinu organskih i anorganskih kemikalija, teških metala i drugih zagađivača koji mogu zagađiti podzemne i površinske vode ako se njima ne upravlja na odgovarajući način. Slično tome, odlagališni plin, koji se prvenstveno sastoji od metana i ugljičnog dioksida, pridonosi emisiji stakleničkih plinova i predstavlja rizik od eksplozije i neugodnih mirisa. Ovaj će rad procijeniti potencijalne opasnosti za okoliš povezane s ovim nusproduktima, uzimajući u obzir njihove neposredne i dugoročne učinke. Cilj je dati detaljnu analizu o tome kako kemija na odlagalištima doprinosi onečišćenju okoliša i identificirati učinkovite metode za ublažavanje tih rizika. To uključuje istraživanje trenutne prakse u obradi procjednih voda i hvatanju plina, kao i raspravu o inovativnim tehnologijama i pristupima koji bi mogli poboljšati upravljanje odlagalištima u budućnosti.

2.3. Premošćivanje praznina u znanju i unapređenje istraživanja

Daljnja svrha ovog rada je premostiti postojeće praznine u znanju u području kemije na odlagalištima. Iako postoji značajan broj istraživanja o ovoj temi, i dalje postoje područja u kojima je naše razumijevanje nepotpuno, posebno u pogledu dugoročnog ponašanja odlagališta i interakcija između različitih kemijskih vrsta unutar procjedne vode i odlagališnog plina. Pregledom i sintetiziranjem postojeće literature, ovaj rad ima za cilj istaknuti te nedostatke i predložiti smjernice za buduća istraživanja. Primjerice, razumijevanje kemijske stabilnosti otpadnih materijala tijekom desetljeća ili čak stoljeća ključno je za predviđanje dugoročnog utjecaja odlagališta na okoliš. Osim toga, ovaj rad će istražiti ulogu novih zagađivača, kao što su lijekovi i mikroplastika u procjednim vodama i formiranim plinovima s odlagališta, koji su tek nedavno postali fokus istraživanja okoliša. Bavljenje ovim temama može doprinijeti razvoju održivijih praksi gospodarenja otpadom i informirati nadležne službe o političkim odlukama koje se odnose na odlaganje otpada i zaštitu okoliša.

2.4. Doprinos održivom gospodarenju otpadom

U konačnici, svrha ovog rada je doprinijeti tekućim naporima za razvoj održivijih praksi gospodarenja otpadom. Pružajući detaljnu analizu kemije na odlagalištima, ovaj rad nastoji dati informacije o strategijama za smanjenje utjecaja odlagališta na okoliš, poboljšanje procesa razgradnje otpada i povećanje učinkovitosti uporabe resursa. To uključuje istraživanje primjene kemijskih principa za optimizaciju dizajna odlagališta, upravljanje emisijama i učinkovito tretiranje zagađivača. Nalazi i uvidi iz ovog rada namijenjeni su podršci kreatorima politike, inženjerima i znanstvenicima koji se bave okolišem u donošenju

informiranih odluka o gospodarenju otpadom. Integrirajući kemijsko znanje s praktičnim rješenjima smjer je ka pomicanju prema održivijem i ekološki odgovornijem pristupu upravljanju rastućim problemom otpada.

3. Pregled literature

3.1. Procjedne vode

U kontekstu okruženja odlagališta otpada, procjedne vode se odnose na tekućinu koja curi iz uskladištenih materijala ili zemlje. Posljedično, procjedne vode sadrže povišene razine štetnih tvari koje potječu iz materijala kroz koje su prošle. Osim toga, procjedne vode s deponija nastaju kao nusprodukti razgradnje čvrste organske tvari. Najopasniji sastojci takvih procjednih voda mogu se kategorizirati u četiri osnovne vrste: topljive organske tvari, anorganske tvari, teški metali i ksenobiotički organski spojevi. Visoke koncentracije ovih komponenti tijekom početne kisele faze prvenstveno se pripisuju intenzivnim procesima razgradnje. Nasuprot tome, tijekom metanogene faze, procjedne vode postaju stabilnije, pokazujući niže koncentracije, smanjeni omjer BPK/KPK i smanjene razine teških metala. Međutim, koncentracija amonijaka ostaje nepromijenjena, te predstavlja postojani onečišćivač u procjednim vodama odlagališta. Ovi kemijski sastojci predstavljaju značajan rizik od onečišćenja okoliša.[12] Ispituje se dinamika odlagališta, njihov utjecaj na okoliš i različiti načini obrade. Danas postrojenjima za pročišćavanje upravljaju stručnjaci diljem svijeta sa ciljem postizanja visoke kvalitete otpadnih voda. Istražuje se nekoliko tehnologija pročišćavanja, ističući vrlo učinkovite sustave koji spadaju u četiri glavne kategorije: prijenos procjednih voda, koji uključuje recikliranje i kombinirano pročišćavanje s kućnom kanalizacijom; kemijski i fizički procesi, uključujući zračno uklanjanje, adsorpciju, kemijsku oksidaciju, kemijsko taloženje, koagulaciju/flokulaciju i sedimentaciju/flotaciju; i membranske tehnologije te biološka obrada kroz biorazgradnju, koristeći aerobne i anaerobne metode. [13]

Procjedne vode koje potječu s odlagališta predstavljaju vrlo zamršenu ekološku matricu koja može imati toksična svojstva štetna i za ekosustave i za ljudsko zdravlje. U svjetlu toga, obavljene su toksikološke procjene na procjednoj vodi s lokalnog odlagališta u Hryniewiczzeu u Poljskoj. Istraživanja su obuhvatila fizikalno-kemijske analize iscjednih voda, njihove učinke na tlo i vegetaciju, kao i istraživanja na modelima bakterijskih i ljudskih stanica. U analiziranoj procjednoj vodi utvrđene su povišene koncentracije metala i organskih tvari, posebice opasnih policikličkih aromatskih ugljikovodika (engl. *polycyclic aromatic hydrocarbons*, PAH). Posljedično, procjedne vode utjecale su na promjene u razinama asimilacijskih pigmenta i izazvale oksidativni stres kod biljaka uzgojenih u tlu tretiranom procjednim vodama. Utjecaj procjedne vode na proliferaciju *Sporosarcina pasteurii*,

Kommentar [M2]: Fali podnaslov ovog odlomka

Kommentar [M3]: Sve bakterije u italic

Staphylococcus aureus, *Lactobacillus rhamnosus*, *Saccharomyces boulardii* i *Candida albicans* varirao je ovisno o specifičnom soju i dozi primijenjene procjedne vode odlagališta tzv. „Landfill Leachate“ (LL). Uočeno je značajno povećanje brojnosti *S. aureus* nakon izlaganja LL-u. U pokusima koji su uključivali stanične linije ljudskog raka koje predstavljaju tri tipa glioblastoma i jedan tip kolorektalnog adenokarcinoma, značajno povećanje održivosti stanične linije DLD-1 bilo je posebno vidljivo nakon tretmana s LL. Rezultati, posebno poticanje rasta stanica raka i porast populacija patogenih bakterija, naglašavaju potencijalnu toksičnu prirodu ispitanih iscjednih voda. To dodatno potvrđuju povišene razine oksidativnog stresa uočenih u biljkama. Nalazi naglašavaju potrebu za stalnim nadzorom odlagališta otpada i procjednih voda koje nastaju na njima.[14]

Onečišćenje podzemnih voda uzrokovano istjecanjem procjedne vode s odlagališta postalo je veliki problem. Razumijevanje načina na koji zagađivala migriraju s ovih odlagališta u obližnje podzemne vode ključno je za razumijevanje obrazaca širenja i opsega onečišćenja. Razvijanje učinkovitih, a s druge strane isplativih metoda praćenja ključno je operaterima odlagališta otpada za regulaciju onečišćenja podzemnih voda povezano s aktivnostima samih odlagališta. Primarni cilj ovog istraživanja bio je procijeniti učinkovitost konzervativnih obilježivača, natrija (Na^+) i klorida (Cl^-), u usporedbi s konvencionalnim zagađivačima poput olova (Pb), cinka (Zn) i ostalih određenih permanganatom oksidacijom (engl. *chemical oxygen demand*, COD_{Mn}), u procjeni razine onečišćenja od odlagališta komunalnog krutog otpada do podzemnih voda. U tu svrhu odabrano je tipično gradsko odlagalište čvrstog otpada za analizu podrijetla Cl^- , kvalitete podzemne vode i prostorno-vremenskih varijacija višestrukih onečišćivača. Geokemijskom analizom dokazano je da su NaCl i $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ dominantne tvari podzemnih voda u ovom istraživanju, a odlagalište je identificirano kao primarni izvor Cl^- u podzemnim vodama, s prosječnim doprinosom od 78 %. Podzemne vode u blizini odlagališta pokazale su više koncentracije Na^+ (15,6–914,0 mg L^{-1}), Cl^- (8,9–1352,0 mg L^{-1}), COD_{Mn} (0,54–95,9 mg L^{-1}) i $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (0,33–49,0 mg L^{-1}), dok su razine Pb (0,2–391,0 $\mu\text{g L}^{-1}$) i Zn (2,0–112,8 $\mu\text{g L}^{-1}$) bile niže. Nasuprot tome, podzemne vode dalje od odlagališta pokazale su niže koncentracije Na^+ (3,2–8,5 mg L^{-1}), Cl^- (0,1–0,7 mg L^{-1}), COD_{Mn} (0,28–4,78 mg L^{-1}) i $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (0,03–0,52 mg L^{-1}), ali više koncentracije Pb (1,2–483,0 $\mu\text{g L}^{-1}$) i Zn (1,6–357,0 $\mu\text{g L}^{-1}$).

Ključni čimbenik koji je utjecao na kvalitetu podzemne vode u blizini odlagališta bio je $\text{NH}_4^+\text{-N}$, s najvišim indeksom onečišćenja (P_i) od 492,85, dok je Pb bio glavni čimbenik koji je utjecao na kvalitetu vode u područjima udaljenijim od odlagališta, s najvišim P_i od 10,9. Iako nisu primijećene značajne sezonske varijacije ni za jednu onečišćujuću tvar, bio je

Komentar [M4]: Posvuda maknuti ovaj prazni red između odlomaka

evidentan prostorni trend, s razinama onečišćenja koje su se smanjivale kako se udaljenost od odlagališta povećavala, što je obrazac posebno podržan konzervativnim mjerenjima Cl^- i Na^+ . Ovo istraživanje pokazuje da su konzervativni ioni poput Cl^- i Na^+ učinkovitiji u praćenju opsega onečišćenja od komunalnih odlagališta čvrstog otpada do podzemnih voda. Stoga praćenje ovih konzervativnih iona u podzemnim vodama može pružiti jasnije razumijevanje opsega onečišćenja koje potječe s odlagališta.[15]

Ograničene su informacije o opsegu kontaminacije procjednih voda s odlagališta mikroplastikom (MP), za koje se zna da su vrlo zagađene i da ih je teško pročistiti. Ovim radom prikazati će se izvori, brojnost i karakteristike (kao što su tip polimera, veličina i oblik) MP-a pronađenih u procjednim vodama odlagališta. Također sažeti će se nekoliko istraživanja koja su ispitivala ispuštanje MP-a u okoliš iz procjedne vode nekontroliranih odlagališta. Osim toga, rad prikazuje i potencijalne metode sanacije MP-a u procjednim vodama odlagališta, uključujući fizičke, kemijske i biološke procese obrade, kao i izgrađena močvarna područja. Također dati će se i zaključci utvrđivanjem nedostataka u istraživanju i davanjem preporuka za buduća istraživanja o MP-ovima u procjednim vodama s odlagališta. Nalazi naglašavaju hitnu potrebu za standardiziranom metodom analize MP-a i naglašavaju važnost povećanja istraživanja isplativog i učinkovitog uklanjanja MP-a iz procjednih voda s odlagališta. Rad također naglašava nužnost smanjenja plastičnog otpada na odlagalištima i minimiziranje razina MP u procjednim vodama kroz provedbu hitnih mjera javne politike.[16]

Procjedne vode s odlagališta, složen i opasan tekući otpad, predstavljaju značajne rizike za okoliš i javno zdravlje zbog svog različitog sastava i potencijala onečišćenja. Ovaj pregled istražuje izazove upravljanja procjednim vodama s odlagališta, posebice njihov utjecaj na kvalitetu vode, tla i zraka. Procijenjena je učinkovitost naprednih tehnologija za obradu procjednih voda u smanjenju ovih utjecaja. Isticanje održivog razvoja i načela obnovljivog gospodarstva ključno je za rješavanje ovih problema. Učinkovito smanjenje otpada i recikliranje mogu značajno smanjiti volumen odlagališta i stvaranje procjednih voda, potencijalno smanjujući troškove održavanja do 57,7 %. Kompostiranje ne samo da pretvara organski otpad u vrijedan kompost, već također dovodi do stvaranja metana (CH_4) za energiju, poboljšavajući učinkovitost gospodarenja otpadom. Tehnologije oporabe energije, kao što su rasplinjavanje i piroliza, pretvaraju otpad u korisnu energiju, čime se smanjuje ovisnost o odlagalištima i smanjuje utjecaj na okoliš. Napredne metode obrade, uključujući integrirane napredne oksidacijske procese (engl. *advanced oxydation processes*, AOP) u kombinaciji s biološkim procesima i izgrađenim močvarama poboljšanim adsorbentima,

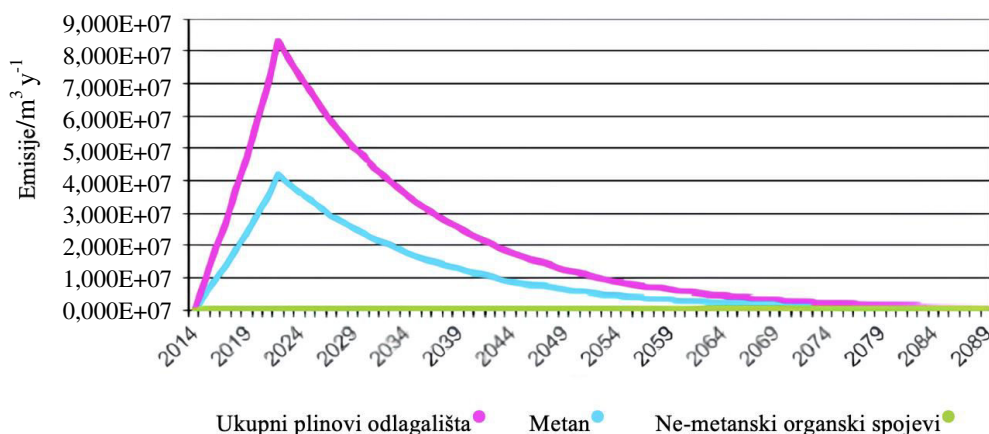
pokazale su obećavajuće rezultate u smislu isplativosti i učinkovitosti obrade, s potencijalnim uštedama do 32 % u troškovima obrade. Iz tog razloga buduća bi se istraživanja trebala usredotočiti na nove tehnologije poput nanotehnologije i umjetne inteligencije za optimizaciju procesa i procjenu utjecaja komunalnih procjednih voda na kvalitetu zraka. Stalne inovacije u obradi procjednih voda i održive prakse bitne su za učinkovito gospodarenje otpadom.[17]

Projekti odlagališnog plina (LFG) za proizvodnju energije nude nekoliko prednosti, ali bitno je procijeniti dugoročne učinke javnih politika koje potiču preusmjeravanje otpada s odlagališta kako bi se osigurala izvedivost ovih projekata. Ovo istraživanje ima za cilj procijeniti utjecaj javnih politika na recikliranje, smanjenje otpada i smanjenje nepropisnog odlaganja krutog komunalnog otpada (engl. *municipal solid waste*, MSW) na potencijal za proizvodnju električne energije na odlagalištima, kao i njihov učinak na ekonomsku održivost. Model „System Dynamics“ korišten je za procjenu proizvodnje metana, uzimajući u obzir promjene u količini i sastavu komunalnog otpada tijekom vremena. Rezultati su pokazali da scenariji s manjim preusmjeravanjem biorazgradivog otpada imaju najveći potencijal za proizvodnju metana i električne energije. Ekonomski, analiza je pokazala da nijedan od scenarija nije održiv bez dodatnog prihoda od ugljičnih kredita. Međutim, svi bi scenariji mogli postati održivi podizanjem stope prodaje energije na više od 93,2 USD/MWh. Drugi održivi pristup uključivao bi smanjenje diskontne stope putem državnih poticaja na ispod 10 % i smanjenje investicijskih troškova na manje od 77 % izvorne vrijednosti. Ti su čimbenici presudni za dugoročno planiranje i donositeljima odluka pružaju uvid u buduću učinak tih politika.[18]

Staklenički plinovi, posebice metan, značajno pridonose globalnom zagrijavanju, pri čemu je metan oko 80 puta jačeg utjecaja od ugljičnog dioksida u razdoblju od 20 godina. Istraživanje otkriva da su se emisije metana naglo povećale u posljednja dva stoljeća zbog industrijalizacije i urbanog rasta, što je dovelo do porasta proizvodnje otpada i odgovarajućeg porasta korištenja odlagališta. Brzo širenje gradova i sve veći broj stanovnika rezultirali su ogromnim porastom globalnog otpada. Projekcije pokazuju da bi do 2050. globalni otpad mogao dosegnuti 4,2 milijarde tona. Odlagališta otpada glavni su izvori emisija metana, a aktivnosti gospodarenja otpadom među najvećim su doprinosima, osobito u urbanim sredinama. Velik dio krutog komunalnog otpada je organski i anaerobno se razgrađuje, stvarajući metan djelovanjem mikroba. U istraživanju se navodi da se odlagalištima u Dhaki (Bangladeš) loše upravlja, nedostaju učinkoviti sustavi za prikupljanje i korištenje metana, što rezultira značajnim ekološkim problemima poput onečišćenja zraka i tla, kao i

kontaminacije podzemnih voda. Istraživanje koristi različite modele za procjenu emisija metana s dva glavna odlagališta otpada u Dhaki: Amin-Bazar i Matuail. Ovi modeli uključuju IPCC model razgradnje nultog reda (Zero Order Decay Model), koji pretpostavlja konstantnu brzinu proizvodnje metana; IPCC model razgradnje prvog reda (First Order Decay Model), koji pretpostavlja smanjenje nastanka metana tijekom vremena; USEPA Land-GEM (Landfill Gas Emission Model) model, koji uzima u obzir sastav otpada i klimu; modificirani trokutasti model; i *in situ* metode koje uključuju izravna mjerenja. Istraživanje otkriva da različiti modeli daju različite procjene emisija metana, pri čemu mjerenja na licu mjesta pokazuju niže emisije od onih koje predviđaju modeli. Model Land-GEM-V-3.02 Site-Specific-1 poznat je po svojoj točnosti, koja je blisko usklađena s podacima na licu mjesta. Nalazi naglašavaju potrebu za preciznim modelima procjene metana kako bi se poboljšalo upravljanje odlagalištima i smanjile emisije stakleničkih plinova. Primjena boljih praksi recikliranja, metoda pokrivanja tla i tehnologija za hvatanje metana mogla bi značajno smanjiti emisije metana i potencijalno pretvoriti plin u obnovljivu energiju.[19]

Komentar [M5]: Moraš unutar slike zamijeniti sve eng nazive s hrvatskima, obavezno. Maknuti crni okvir sa slike i opis slike (i tu i posvuda). U opisu slike navesti „Preuzeto i preuređeno iz ref. XX.“



Slika 2. Grafikon predviđanja emisije plinova za odlagališta otpada Matuail u Dhaki u Bangladešu, izražen u metrima kubnim po godini. Primjer na modelu Land-GEM-V-3.02 Site-Specific-1. Preuzeto i preuređeno iz ref. [19].

3.2. Istraživanje zagađenja i degradacije tla na odlagalištu otpada u Republici Češkoj

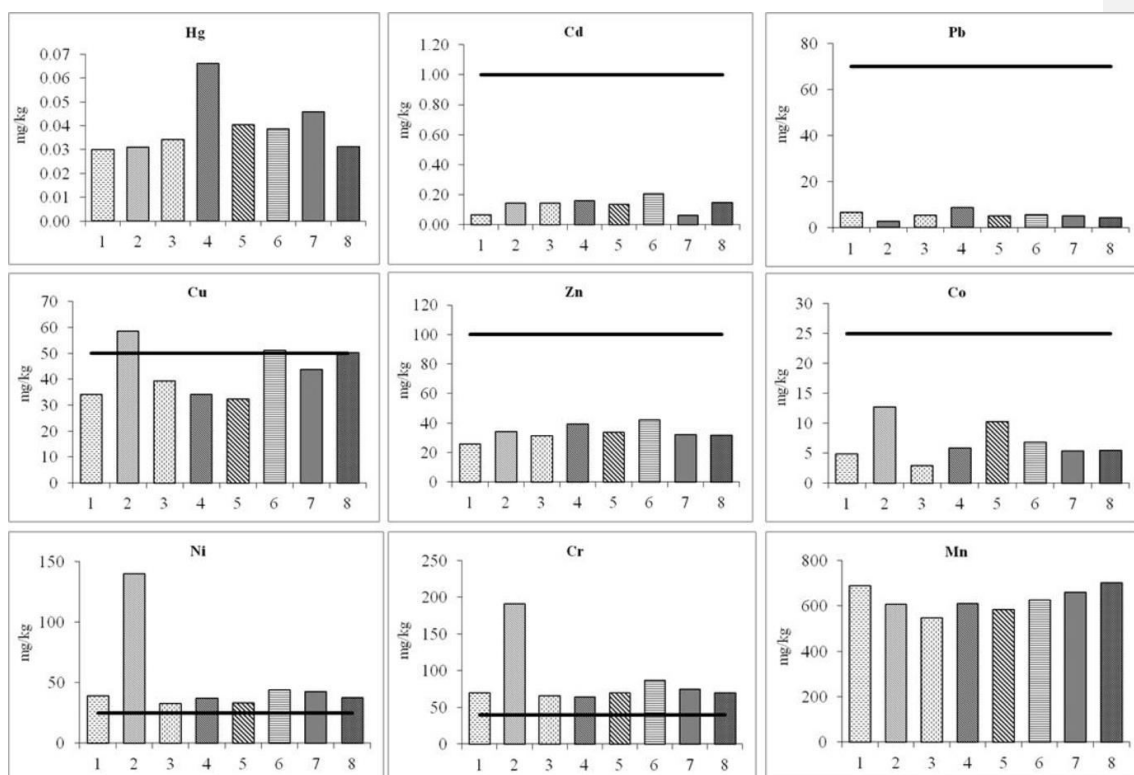
Degradacija zemljišta uzrokovana ljudskim aktivnostima ima značajan negativan utjecaj na globalni okoliš i ekosustave. Kruti otpad pojavio se kao gorući ekološki problem, s procjenama koje pokazuju da se globalno proizvede između 0,5 i 4,5 kilograma krutog otpada po osobi dnevno. Prevladavajući načini gospodarenja ovim otpadom su odlagališta i spaljivanje. Naime, do 95 % krutog komunalnog otpada (MSW) diljem svijeta odlaže se na odlagališta. Iako su se odlagališta u početku smatrala sigurnom metodom odlaganja, to vrijedi samo za one s odgovarajućim inženjeringom. Moderna odlagališta opremljena su oblogama i upijajućim materijalima kako bi se spriječilo istjecanje onečišćujućih tvari u tlo i vodu. Neodgovarajuće upravljanje odlagalištima izaziva zabrinutost zbog mogućih utjecaja na okoliš i zdravlje, posebice zbog izloženosti otrovnim kemikalijama kao što su dioksini, teški metali i drugi zagađivači. To je dovelo do pojačanog nadzora odlagališta, naglašavajući potrebu za temeljitom procjenom rizika od onečišćenja tla i podzemnih voda procjednim vodama. Iako se mnogo istraživanja usredotočuje na učinke procjednih voda na podzemne vode, manje je podataka dostupno o onečišćenju tla i njegovim toksikološkim učincima. Tlo ima presudnu ulogu u Zemljinim sustavima, utječe na hidrološke, erozijske, biološke i geokemijske cikluse i osigurava osnovna dobra i usluge. Razumijevanje utjecaja zagađenja na tlo, uključujući kontaminaciju teškim metalima, ključno je za zdravlje okoliša. Onečišćenje tla teškim metalima predstavlja značajan ekološki rizik zbog svoje toksičnosti. Iako se ti metali prirodno pojavljuju u niskim koncentracijama, njihova raširena prisutnost i toksičnost čine ih glavnim zagađivačima. Nedavna izvješća ukazuju na visoke koncentracije teških metala kao što su arsen (As), kadmij (Cd), bakar (Cu), olovo (Pb) i cink (Zn) u tlima raznih zemalja. Na primjer, kontaminacija arsenom povezana je s ozbiljnim zdravstvenim rizicima u Bangladešu, Indiji i Kini, dok je nakupljanje kadmija utjecalo na sigurnost mesa u Novom Zelandu i Australiji. U urbanim područjima također je došlo do kontaminacije tla toksičnim metalima zbog pretjerane upotrebe određenih pesticida. Biljke se mogu koristiti kao bioindikatori za procjenu toksičnosti u kontaminiranom okolišu. Ovo je istraživanje imalo za cilj procijeniti onečišćenje tla na odlagalištu u blizini Klatovyja u jugozapadnoj Češkoj Republici analizom sadržaja teških metala i procjenom fitotoksičnosti. Uzorci tla prikupljeni su tijekom 2014. s osam točaka na lokaciji odlagališta, uključujući tijelo odlagališta, njegov rub i okolna područja. Uzorci su zamrznuti, samljeveni, prosijani i pohranjeni na $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ do

analize. Ispitani su na teške metale kao što su živa (Hg), kadmij (Cd), olovo (Pb), bakar (Cu), cink (Zn), kobalt (Co), nikal (Ni), krom (Cr) i mangan (Mn) na Zavodu za kemiju i biokemiju Agronomskog fakulteta Sveučilišta Mendel u Brnu. Točke uzorkovanja odabrane su kako bi se pružila usporedna analiza tijela odlagališta, njegovih granica te obližnjeg poljoprivrednog i šumskog zemljišta. Istraživanje je uključivalo test fitotoksičnosti s bijelom gorušicom (*Sinapis alba L.*) kao bioindikatorom. Četrnaest dana nakon postavljanja pokusa bilježen je broj klica i rastućih biljaka u posudama. To je ponovljeno nakon dvadeset i jednog dana, a rezultati su dokumentirani tablicama i fotografijama. Kapacitet klijanja izračunat je kao postotak na temelju vrijednosti iz slijepe probe. Ispitivanja rasta biljaka pokazala su da uzorci tla s tijela odlagališta i njegove okoline imaju visoku sposobnost klijanja, u rasponu od 101 % do 137 % pri koncentraciji od 50 %. U koncentraciji od 25 % klijavost je bila nešto niža, ali se i dalje kretala od 86 % do 137 %. Iako nisu primijećene značajne promjene u izgledu ili rastu biljaka, neki uzorci premašili su granične vrijednosti za teške metale kao što su krom (Cr), bakar (Cu) i nikal (Ni). Uzorak 2 pokazao je najviše koncentracije ovih metala, uz značajno povišene razine u odnosu na ostale uzorke. Uzorci 6 i 7 također su imali povišene razine, ali ne tako visoke kao uzorak 2.[20]

Komentar [M6]: Svuda odvojiti % od broja

Tablica 1. Koncentracije teških metala u uzorcima tla (1-8) s odlagališta otpada u blizini Klatoyja u jugozapadnoj Češkoj Republici. Preuzeto i preuređeno iz ref. [20]

Uzorak	Hg (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Co (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)
1	0,0300	0,0670	6,5554	34,07	25,67	4,888	39,13	69,99	689,55
2	0,0311	0,1446	2,5703	58,62	34,20	12,712	140,03	190,73	608,07
3	0,0343	0,1446	5,1769	39,37	31,51	2,953	32,65	65,92	547,52
4	0,0663	0,1576	8,5287	34,25	39,29	5,825	36,94	64,06	610,10
5	0,0403	0,1343	5,1095	32,43	33,93	10,284	33,11	70,10	584,58
6	0,0386	0,2044	5,4088	51,24	41,97	6,874	44,05	86,69	625,12
7	0,0459	0,0600	5,0800	43,80	32,10	5,375	42,76	74,85	661,00
8	0,0312	0,1471	4,1255	50,20	31,68	5,469	37,59	69,94	701,39



Slika 3. Grafikoni prikazuju koncentracije teških metala u uzorcima tla (1-8) kao i maksimalno dozvoljene količine (u periodu istraživanja zakonski nije bila određena MDK za živu). Preuzeto i preuređeno iz ref. [20]

4. Rasprava

Procjedne vode, koje nastaju na odlagalištima otpada, predstavljaju izuzetno složen i opasan ekološki problem zbog svoje raznolike kemijske strukture i visokog potencijala za kontaminaciju okoliša. Procjedne vode nastaju kad kišnica ili druge tekućine prolaze kroz odloženi otpad, pri čemu se otapaju i prenose razne štetne tvari. Ove vode sadrže visoke koncentracije topljivih organskih tvari, anorganskih tvari, teških metala i ksenobiotičkih organskih spojeva, što ih čini izuzetno opasnim. Posebno zabrinjavajuća faza je početna kisela faza, tijekom koje dolazi do intenzivnih procesa razgradnje, rezultirajući visokim koncentracijama ovih komponenti. S vremenom, tijekom metanogene faze, procjedne vode postaju stabilnije, snižavaju se koncentracije zagađivača, ali amonijak ostaje prisutan i predstavlja trajnu prijetnju okolišu.

Ove kemijske komponente predstavljaju ozbiljan rizik za okoliš jer mogu značajno kontaminirati tlo, vodene ekosustave i podzemne vode. Zbog toga se provode intenzivna istraživanja kako bi se razumjela dinamika odlagališta, utjecaj procjednih voda na okoliš te razvile učinkovite metode obrade. Trenutno se diljem svijeta koriste napredne tehnologije za obradu procjednih voda, s ciljem smanjenja onečišćenja i postizanja visoke kvalitete ispuštenih voda. [21]

Procjedne vode s odlagališta predstavljaju ozbiljan ekološki problem zbog svog toksičnog potencijala, kako za ekosustave, tako i za ljudsko zdravlje. Toksikološka ispitivanja provodila su se na uzorcima procjedne vode s lokalnog odlagališta u Poljskoj, pri čemu su analizirani njihovi fizičko-kemijski sastavi, učinci na tlo i vegetaciju te utjecaj na stanice bakterija i pojavu karcinoma. Rezultati su pokazali povišene koncentracije opasnih metala i organskih tvari, uključujući policikličke aromatske ugljikovodike (PAH), što je dovelo do značajnog utjecaja na okoliš. Na primjer, procjedne vode su uzrokovale promjene u asimilacijskim pigmentima i izazvale oksidativni stres kod biljaka uzgojenih u tlu izloženom tim vodama. Nadalje, utjecaj na rast bakterija i ljudskih stanica varirao je ovisno o specifičnom soju i dozi, pri čemu je zabilježen značajan porast brojnosti patogenih bakterija kao što je *Staphylococcus aureus*, kao i povećana održivost staničnih linija raka. Ovi rezultati ističu potencijalnu opasnost od procjednih voda s odlagališta, potvrđujući potrebu za kontinuiranim nadzorom i poboljšanjem metoda pročišćavanja.

Jedan od ključnih problema povezanih s procjednim vodama je njihova sposobnost da kontaminiraju podzemne vode. Pokretnost zagađivača iz odlagališta u okolne podzemne vode ozbiljno ugrožava kvalitetu tih resursa, što zahtijeva razvoj učinkovitih metoda za praćenje i

kontrolu ovog procesa. Primarni cilj mnogih istraživanja u ovom području je identificirati učinkovite indikatore koji mogu pomoći u praćenju razine onečišćenja, kao što su konzervativni ioni natrija (Na^+) i klorida (Cl^-). Uspoređujući ih s tradicionalnim zagađivačima poput olova (Pb), cinka (Zn) i onima određivanima permanganatnom oksidacijom, istraživanja su pokazala da su Na^+ i Cl^- vrlo pouzdani u praćenju opsega onečišćenja. Geokemijske analize su utvrdile da su NaCl i $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ dominantni spojevi podzemnih voda u blizini odlagališta, pri čemu je odlagalište identificirano kao glavni izvor Cl^- u podzemnim vodama. Ova otkrića naglašavaju važnost praćenja konzervativnih iona za preciznije razumijevanje širenja onečišćenja iz odlagališta otpada.[22-23]

Osim toga, nedostatak informacija o onečišćenju mikroplastikom (MP) u procjednim vodama s odlagališta predstavlja dodatni izazov za zaštitu okoliša. Mikroplastika je sveprisutan zagađivač koji se teško uklanja i ima širok raspon negativnih učinaka na ekosustave i ljudsko zdravlje. Radovi su identificirali izvore, brojnost i karakteristike mikroplastike u procjednim vodama te su saželi nekoliko istraživanja koja prate njihovo ispuštanje u okoliš iz nekontroliranih odlagališta. Razvijeni su različiti pristupi za uklanjanje mikroplastike iz procjednih voda, uključujući fizičke, kemijske i biološke metode, kao i izgrađena močvarna područja. Ipak, naglašena je potreba za standardizacijom metoda analize mikroplastike i povećanjem broja istraživanja koja će omogućiti učinkovito i isplativo uklanjanje mikroplastike iz ovih opasnih voda. Povećanjem svijesti o ovom problemu i uvođenjem strožih javnih politika, moguće je smanjiti količinu plastičnog otpada na odlagalištima i tako smanjiti prisutnost mikroplastike u procjednim vodama.[24]

Procjedne vode s odlagališta otpada predstavljaju složen problem koji zahtijeva integrirani pristup za zaštitu okoliša i javnog zdravlja. U ovom kontekstu, napredne tehnologije za obradu, uključujući biološke i kemijske procese te upotrebu izgrađenih močvara, pokazuju veliki potencijal za smanjenje razina zagađivala. Ulaganje u održive prakse, poput recikliranja i smanjenja volumena otpada, može znatno smanjiti nastanak procjednih voda i troškove održavanja odlagališta. Istodobno, tehnologije oporabe energije, kao što su rasplinjavanje i piroliza, omogućuju pretvaranje otpada u korisnu energiju, čime se dodatno smanjuje utjecaj na okoliš. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na razvoj novih tehnologija, poput nanotehnologije i umjetne inteligencije, kako bi se optimizirali procesi obrade i smanjili negativni učinci procjednih voda na kvalitetu zraka i vode.[25]

Osim problema povezanih s procjednim vodama, projekti odlagališnog plina (LFG) za proizvodnju energije također imaju potencijalno značajan utjecaj na okoliš. Odlagališni plinovi su treći najveći izvor antropogenih emisija metana, a projekti koji koriste ove plinove

za proizvodnju energije mogu smanjiti ukupne emisije stakleničkih plinova i pridonijeti globalnim naporima za smanjenje klimatskih promjena. Ipak, kako bi ovi projekti bili ekonomski isplativi, potrebno je pažljivo procijeniti dugoročne učinke javnih politika koje potiču preusmjeravanje otpada s odlagališta. Modeli predviđanja, poput System Dynamics, koriste se za procjenu proizvodnje metana, uzimajući u obzir promjene u količini i sastavu otpada tijekom vremena. Iako su rezultati pokazali da scenariji s manjim preusmjeravanjem biorazgradivog otpada imaju najveći potencijal za proizvodnju metana i električne energije, ekonomska održivost tih projekata ovisi o dodatnim prihodima, poput ugljičnih kredita, ili povećanju stope prodaje energije. Dugoročno planiranje i prilagodba politika ključni su za osiguranje održivosti ovih projekata.

Odlagališta služe kao primarni način zbrinjavanja otpada; međutim, oni predstavljaju znatne izazove za okoliš, posebice stvaranjem procjednih voda i odlagališnih plinova. S kemijskog stajališta, ti se nusproizvodi sastoje od zamršenih smjesa koje zahtijevaju sveobuhvatno razumijevanje za njihovo učinkovito upravljanje i ublažavanje.

Procjedne vode nastaju kada voda, obično od oborina ili površinskog otjecanja, procuri kroz otpadne materijale na odlagalištu. Dok ta voda prolazi odlagalištem, otapa razne organske i anorganske tvari, što rezultira tekućim otpadnim vodama koje mogu biti ozbiljno onečišćene. Na karakteristike procjednih voda utječu čimbenici kao što su priroda otpada, starost odlagališta i varijable okoliša poput temperature i padalina.

U početnim fazama rada odlagališta, procjedne vode su obilježene povišenim razinama organskih spojeva, uključujući hlapljive masne kiseline (engl. *volatile fatty acids*, VFA) kao što su octena kiselina (CH_3COOH), propanska kiselina ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$) i maslačna kiselina ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$). Ovi spojevi nastaju anaerobnom razgradnjom organskog otpada potpomognutom aktivnošću mikroba. Ovo razdoblje, koje se naziva acidogena faza, karakterizira nizak pH u iscjednim vodama, obično u rasponu od 4,5 do 6, zbog nakupljanja organskih kiselina.

Kako odlagalište prelazi u metanogenu fazu, organske kiseline podvrgavaju se daljnjoj razgradnji u metan (CH_4) i ugljikov dioksid (CO_2) djelovanjem metanogenih bakterija. Ovaj prijelaz rezultira stabilizacijom sastava procjedne vode, sa smanjenim razinama organskih kiselina i neutralnijim pH, općenito između 6 i 8. Ipak, čak i tijekom ove uznapredovale faze, procjedne vode mogu i dalje sadržavati značajne količine zagađivala, uključujući amonijev kation (NH_4^+), teške metale i ksenobiotičke organske spojeve.

Amonijev kation je posebno zabrinjavajući u procjednim vodama, prvenstveno nastalim razgradnjom spojeva koji sadrže dušik u otpadu. Koncentracija amonija može biti

značajno visoka, često premašujući 500 mg/L, što predstavlja potencijalni rizik od onečišćenja podzemnih voda. Osim toga, kemijske reakcije unutar iscjednih voda uključuju transformaciju različitih tvari.

4.1. Stvaranje metana na odlagalištima

Stvaranje metana (CH₄) na odlagalištima je rezultat anaerobne razgradnje organskog otpada. Taj se proces odvija u nekoliko faza, a svaku pokreću različite skupine mikroorganizama:

4.1.1. Hidroliza

Složene organske tvari, kao što su ugljikohidrati, proteini i masti, hidrolitičke bakterije razgrađuju u jednostavnije molekule.

Jednadžbe: a) C_nH_{2n}O_n → Jednostavni šećeri

b) Proteini → Amino kiseline

c) Masti → Masne kiseline + Glicerol

Hidrolitičke bakterije izlučuju enzime koji razgrađuju velike organske molekule u jednostavnije monomere koje drugi mikroorganizmi mogu dalje iskoristiti.

4.1.2. Acidogeneza (fermentacija)

Jednostavne molekule proizvedene u hidrolizi dalje se razgrađuju na hlapljive masne kiseline (VFA), alkohole (-OH), vodik (H₂) i ugljikov dioksid (CO₂) pomoću acidogenih bakterija.

Jednadžba:

Jednostavni šećeri → CH₃COOH(aq) + CH₃CH₂COOH(aq) + CH₃(CH₃)₂COOH(g)

Komentar [M7]: Kemijske spojeve pisati uspravno, i njih i (aq)

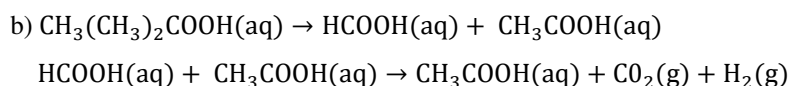
Acidogene bakterije pretvaraju jednostavne organske spojeve u kiseline i plinove, pridonoseći kiselim uvjetima koji prevladavaju u ranim fazama razgradnje odlagališta.

4.1.3. Acetogeneza

Hlapljive masne kiseline i alkohole acetogene bakterije pretvaraju u octenu kiselinu (CH₃COOH), vodik i ugljikov dioksid.

Jednadžbe:

a) CH₃CH₂COOH(aq) → CH₃COOH(aq) + CO₂(g) + H₂(g)

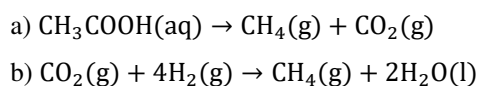


Acetogene bakterije odgovorne su za konačnu pretvorbu VFA u acetat (CH_3COO^-) i druge jednostavnije spojeve koje mogu iskoristiti metanogene bakterije.

4.1.4. Metanogeneza

Metanogene bakterije pretvaraju octenu kiselinu i vodik u metan i ugljikov dioksid.

Jednadžbe:



U metanogenoj fazi, metanogene bakterije koriste acetat i vodik za proizvodnju metana (CH_4) i ugljičnog dioksida, koji su primarni sastojci odlagališnog plina.

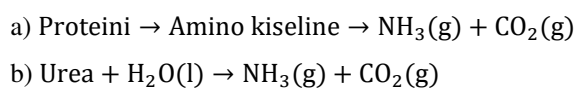
4.2. Stvaranje amonijaka na odlagalištima

Amonijev kation (NH_4^+) značajna je komponenta procjednih voda odlagališta i prvenstveno nastaje razgradnjom organske tvari koja sadrži dušik. Ovaj proces uključuje nekoliko ključnih faza:

4.2.1. Razgradnja dušikovih spojeva

Organski spojevi dušika, kao što su proteini i urea, razgrađuju se na amonijak (NH_3) i amonijeve katione (NH_4^+).

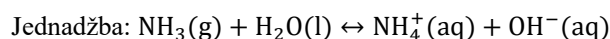
Jednadžbe:



Mikrobna aktivnost dovodi do razgradnje dušikovih spojeva u organskom otpadu u amonijak. U vodenim sredinama amonijak može postojati kao amonijevi ioni ovisno o pH vrijednosti procjedne vode.

4.2.2. Pretvorba amonijaka u amonijev kation

Amonijak može reagirati s vodom stvarajući amonijeve ione u ravnoteži ovisnoj o pH.



U kiselim uvjetima prevladavaju amonijevi ioni, dok je u alkalnim uvjetima češći plin amonijak. Procjedne vode s odlagališta često imaju gotovo neutralan do blago alkalni pH, tako da je amonijev kation obično dominantan oblik.

4.3. Kemijske reakcije u stvaranju procjedne vode

Stvaranje procjedne vode uključuje nekoliko kemijskih reakcija, uključujući one koje se odnose na otapanje organskih i anorganskih materijala iz otpada, kao i reakcije kompleksiranja i taloženja. Ključne reakcije uključuju:

4.3.1. Otapanje i kompleksiranje

Reakcija: Organske kiseline i drugi topljivi spojevi otapaju se iz otpadnog materijala.

Jednadžba:

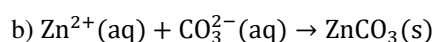
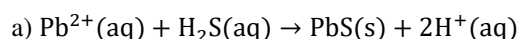


Organske kiseline poput octene kiseline mogu otopiti metale i druge zagađivače iz otpadnih materijala. Na primjer, octena kiselina može povećati topljivost metala kao što su olovo (Pb^{2+}) i kadmij (Cd^{2+}).

4.3.2. Talozjenje i adsorpcija

Neki metalni ioni u procjednoj vodi mogu se istaložiti ili adsorbirati na čestice.

Jednadžbe:

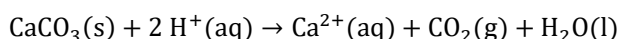


Metalni ioni poput olova mogu reagirati sa sulfidnim ionima stvarajući netopljivi olovo sulfid (PbS), dok se cink može istaložiti kao cink karbonat ($ZnCO_3$) u alkalnim uvjetima. Ova precipitacija smanjuje koncentraciju ovih metala u procjednoj vodi.

4.3.3. Acidobazne reakcije

Kiseli uvjeti mogu uzrokovati otapanje karbonata i drugih alkalnih tvari.

Jednadžba:



Kalcijev karbonat ($CaCO_3$) u otpadnom materijalu može se otopiti u kiseloj procjednoj vodi, oslobađajući ione kalcija (Ca^{2+}) i pridonoseći ukupnoj ionskoj snazi procjedne vode.

Ukratko, nastajanje metana i amonija na odlagalištima potiče slijedom biokemijskih procesa koji uključuju različite vrste mikroorganizama i kemijskih reakcija. Metan se primarno proizvodi metanogenezom iz acetata i vodika, dok amonij nastaje razgradnjom dušične organske tvari i njezinom naknadnom ravnotežom s amonijakom. Kemija stvaranja procjednih voda uključuje složene interakcije organskih kiselina, metalnih iona i uvjeta okoliša, što sve pridonosi izazovima sastava i tretmana procjednih voda s odlagališta.

4.4. Napredak i inovacije u gospodarenju otpadom: istraživanje novih metoda i tehnika

Gospodarenje otpadom kritično je pitanje s kojim se susreću moderna društva, vođeno potrebom za ublažavanjem utjecaja na okoliš, smanjenjem troškova i promicanjem održivosti. Kako globalno stanovništvo raste i obrasci potrošnje se mijenjaju, potražnja za učinkovitim rješenjima za gospodarenje otpadom se pojačava. Ova rasprava istražuje različite napredne metode za poboljšanje gospodarenja otpadom, nadovezujući se na uvide u procjedne vode s odlagališta i procese stvaranja plina, te razmatra nove tehnologije koje mogu revolucionirati prakse gospodarenja otpadom.

4.4.1. Pobješane tehnologije recikliranja

Mehaničko recikliranje

Mehaničko recikliranje uključuje razvrstavanje, usitnjavanje i ponovnu preradu otpadnih materijala u nove proizvode. Napredne tehnologije sortiranja, poput optičkog sortiranja i robotskih sustava, značajno su poboljšale učinkovitost mehaničkog recikliranja. Optički razvrstivači koriste infracrvenu spektroskopiju za prepoznavanje i odvajanje različitih vrsta

plastike, dok roboti opremljeni umjetnom inteligencijom mogu razvrstavati reciklirajuće materijale s visokom preciznošću. Ova tehnologija smanjuje onečišćenje i povećava kvalitetu recikliranih materijala.

Kemijsko recikliranje

Kemijsko recikliranje razgrađuje plastiku na njihove osnovne monomere pomoću kemijskih reakcija, koji se potom mogu ponovno polimerizirati u novu plastiku. Metode poput pirolize, rasplinjavanja i solvolize ključne su tehnike:

- Piroliza: uključuje zagrijavanje plastike u nedostatku kisika kako bi se proizvela mješavina plinova, tekućina i krutih ostataka. Plinovi i tekućine mogu se dalje rafinirati u goriva ili sirovine za novu plastiku.
- Rasplinjavanje: Pretvara plastiku u sintetički plin (mješavina vodika, ugljičnog monoksida i ugljičnog dioksida) na visokim temperaturama. Sintetički plin se može koristiti za proizvodnju električne energije ili kemikalija.
- Solvoliza: koristi otapala za depolimerizaciju plastike u njezine sastavne monomere, koji se zatim mogu pročistiti i ponovno upotrijebiti. Ova metoda je posebno učinkovita za razgradnju složenih polimera kao što je PET (polietilen tereftalat).

4.4.2. Napredne tehnologije pretvaranja otpada u energiju

Spaljivanje s povratom energije

Moderna postrojenja za spaljivanje opremljena su naprednim tehnologijama izgaranja i sustavima za kontrolu emisija kako bi se smanjio utjecaj na okoliš. Ova postrojenja spaljuju otpad na visokim temperaturama, pretvarajući ga u toplinu, električnu energiju i pepeo. Proizvedena energija može se koristiti za proizvodnju električne energije ili daljinsko grijanje, čime se smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima.

Anaerobna probava

Anaerobna digestija je biološki proces u kojem mikroorganizmi razgrađuju organski otpad u nedostatku kisika, proizvodeći bioplin (mješavina metana i ugljičnog dioksida) i digestat. Bioplin se može koristiti za proizvodnju energije, dok se digestat može koristiti kao gnojivo bogato hranjivim tvarima. Inovacije u ovom području uključuju: Anaerobni digestori velike brzine su sustavi koji povećavaju brzinu probave i proizvodnje bioplina optimizacijom temperature, pH i vremena zadržavanja. Dvostupanjska anaerobna probava odvaja faze hidrolize i metanogeneze u različite reaktore, poboljšavajući ukupnu učinkovitost i prinos bioplina.

Rasplinjavanje i rasplinjavanje plazma lukom

Rasplinjavanje: pretvara organski otpad u sintetički plin pomoću visokih temperatura i ograničenog kisika. Sintetski plin se može koristiti za proizvodnju električne energije, kemikalija ili sintetičkih goriva. Rasplinjavanje plazma lukom: koristi električni luk za stvaranje ekstremno visokih temperatura, pretvarajući otpad u plazmu, koja zauzvrat proizvodi sintetički plin i staklastu trosku. Troska je materijal koji se ne ispire i može se koristiti u građevinarstvu, dok se sintetički plin može koristiti za proizvodnju energije.

4.4.3. Inovativne tehnike upravljanja odlagalištima

Rudarstvo i rekultivacija na odlagalištima

Rudarstvo na odlagalištima uključuje iskopavanje starih odlagališta kako bi se povratili vrijedne tvari, poput metala i plastike, te obradilo ili saniralo onečišćeno tlo. Ovaj proces može smanjiti količine odlagališta i obnoviti korisne resurse, iako je energetski intenzivan i skup.

Poboljšanja upravljanja procjednom vodom i plinom

Pročišćavanje procjednih voda: napredne tehnologije pročišćavanja, uključujući membransku filtraciju, reverznu osmozu i napredne oksidacijske procese (AOP), mogu poboljšati kvalitetu procjednih voda. Membranska filtracija odvaja zagađivače na temelju veličine, dok reverzna osmoza koristi pritisak za probijanje vode kroz polupropusnu membranu, uklanjajući otopljene krutine. AOP-ovi uključuju stvaranje visoko reaktivnih vrsta poput hidroksilnih radikala za razgradnju organskih zagađivača. Poboljšani sustavi za sakupljanje plina, uključujući vertikalne i horizontalne bušotine, poboljšavaju učinkovitost hvatanja metana. Integracija ovih sustava s tehnologijama pretvaranja plina u energiju može maksimalno povećati iskorištenje zarobljenog metana.

4.4.4. Nove tehnologije gospodarenja otpadom

Nanotehnologija u obradi otpada

Nanotehnologija ima potencijal revolucionirati gospodarenje otpadom kroz razvoj naprednih materijala i procesa. Nanomaterijali, kao što su nano-katalizatori i nano-adsorbenti, mogu poboljšati uklanjanje onečišćujućih tvari iz procjedne vode i poboljšati učinkovitost procesa obrade otpada. Na primjer, nanočestice titanijevog dioksida mogu se koristiti u fotokatalitičkim procesima za razgradnju organskih kontaminanata pod UV svjetlom.

Umjetna inteligencija (AI) i strojno učenje

Algoritmi umjetne inteligencije i strojnog učenja mogu optimizirati operacije gospodarenja otpadom poboljšanjem točnosti sortiranja, predviđanjem obrazaca stvaranja otpada i

poboljšanjem procesa recikliranja. Roboti vođeni umjetnom inteligencijom mogu razvrstavati materijale za recikliranje učinkovitije od sustava kojima upravljaju ljudi, dok modeli strojnog učenja mogu predvidjeti trendove stvaranja otpada i optimizirati rute prikupljanja.

Odlagališta bioreaktora

Bioreaktorska odlagališta ubrzavaju razgradnju organskog otpada uvođenjem kontroliranih količina vode i zraka. Ova metoda povećava proizvodnju procjedne vode i stvaranje metana, koji se može uhvatiti za oporabu energije. Bioreaktorska odlagališta također ubrzavaju stabilizaciju otpada, smanjujući dugoročne rizike za okoliš.

Inovacije u pročišćavanju otpadnih voda i procjednih voda

Izgrađena močvarna područja: Ovi sustavi koriste prirodne procese koji uključuju biljke, tlo i mikroorganizme za obradu procjednih voda. Izgrađena močvarna područja mogu učinkovito ukloniti organske zagađivače, hranjive tvari i teške metale iz procjedne vode, nudeći održivu i jeftinu opciju tretmana. Elektrokemijske metode, kao što su elektrokoagulacija i elektrooksidacija, koriste električne struje za uklanjanje kontaminanata iz procjedne vode. Ove tehnike mogu razgraditi organske zagađivače, istaložiti teške metale i poboljšati ukupnu kvalitetu procjedne vode.[25]

5. Zaključak

Procjedne vode s odlagališta otpada predstavljaju jedan od najkompleksnijih i najopasnijih ekoloških problema u modernom upravljanju otpadom. Ove vode nastaju kada oborinske vode ili druge tekućine prodiru kroz odloženi otpad, pri čemu se otapaju i prenose razne štetne tvari. Ovaj proces rezultira stvaranjem procjednih voda koje sadrže visoke koncentracije organskih i anorganskih tvari, teških metala i ksenobiotičkih organskih spojeva. Kako bi se razumjeli ozbiljni rizici i pristupi rješavanju ovog problema, važno je sagledati kemijske i ekološke aspekte nastanka procjednih voda, izazove u njihovom upravljanju te napredne tehnologije koje se primjenjuju za njihovu obradu i smanjenje utjecaja.

5.1. Kemijska i ekološka složenost procjednih voda

Procjedne vode su rezultat složenih kemijskih reakcija koje se odvijaju u različitim fazama razgradnje otpada na odlagalištima. U početnoj fazi, poznatoj kao kisela faza, visoka koncentracija hlapljivih masnih kiselina (VFA) uzrokuje nisku pH vrijednost i intenzivne procese razgradnje. Ovo stanje karakterizira velika prisutnost organskih kiselina kao što su octena, propanska i maslačna kiselina, uz prisutnost teških metala i ksenobiotičkih spojeva. Kako odlagalište prelazi u metanogenu fazu, procesi razgradnje postaju stabilniji, smanjuje se koncentracija organskih kiselina i pH se približava neutralnom. Ipak, i dalje ostaju značajne koncentracije amonijaka, koji je poznat po svojoj nepromijenjenosti i sposobnosti kontaminacije podzemnih voda. Amonijak, kao produkt razgradnje dušičnih spojeva, predstavlja značajan ekološki rizik zbog svoje visoke koncentracije i sposobnosti da kontaminira vodene ekosustave. Također, prisutnost teških metala poput olova i cinka, te organskih spojeva poput policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH), dodatno otežava situaciju. Ovi kontaminanti mogu uzrokovati dugoročne ekološke probleme i prijetiti zdravlju ljudi.

5.2. Ekološki utjecaj i istraživanje kontaminacije

Rizik od kontaminacije okoliša kroz procjedne vode je višestruk. Toksikološka ispitivanja na uzorcima procjedne vode pokazala su povišene koncentracije opasnih metala i organskih tvari, što može imati štetan učinak na tlo, vegetaciju, te bakterijske i ljudske stanične linije. Na primjer, promjene u asimilacijskim pigmentima biljaka i oksidativni stres koji se javljaju zbog procjednih voda ukazuju na ozbiljan utjecaj na ekosustave. Također, povećan rast patogenih bakterija i održivost staničnih linija raka potvrđuju potrebu za intenzivnim

nadzorom i poboljšanjem metoda pročišćavanja. Podzemne vode su posebno osjetljive na kontaminaciju, jer pokretnost zagađivača iz odlagališta može ozbiljno narušiti kvalitetu tih resursa. Identifikacija učinkovitih indikatora za praćenje razine onečišćenja, kao što su konzervativni ioni natrija (Na^+) i klorida (Cl^-), pomaže u razumijevanju širenja onečišćenja i omogućuje preciznije mjerenje utjecaja procjednih voda na podzemne vode. Geokemijske analize pokazuju dominaciju NaCl i $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ tvari u podzemnim vodama u blizini odlagališta, što dodatno naglašava potrebu za praćenjem i kontrolom zagađenja.

5.3. Izazovi povezani s mikroplastikom

Mikroplastika predstavlja dodatni izazov u upravljanju procjednim vodama. Kao sveprisutni zagađivač, mikroplastika se teško uklanja iz voda i ima širok raspon negativnih učinaka na ekosustave i ljudsko zdravlje. Istraživanja su pokazala da mikroplastika može potjecati iz nekontroliranih odlagališta i zahtijeva razvoj standardiziranih metoda analize i učinkovitih tehnika uklanjanja. Povećanje svijesti i strože javne politike mogu pomoći u smanjenju količine plastičnog otpada na odlagalištima i tako smanjiti prisutnost mikroplastike u procjednim vodama.

5.4. Napredne tehnologije za obradu procjednih voda

Kako bi se smanjila šteta od procjednih voda, primjenjuju se različite tehnologije obrade. Ove metode uključuju recikliranje i kombinirano pročišćavanje s kućnom kanalizacijom, biološku obradu pomoću aerobnih i anaerobnih procesa, kemijske i fizičke procese te upotrebu membranskih tehnologija. Napredne metode poput membranske filtracije, reverzne osmoze i naprednih oksidacijskih procesa (AOP) omogućuju smanjenje koncentracije štetnih tvari i poboljšanje kvalitete ispuštenih voda. Biološke metode obuhvaćaju aerobne i anaerobne procese koji koriste mikroorganizme za razgradnju organskih tvari, dok kemijski i fizički procesi uključuju metode poput taloženja i adsorpcije za uklanjanje zagađivača. Upotreba membranskih tehnologija, uključujući filtraciju i osmozu, pokazuje velik potencijal za učinkovito pročišćavanje procjednih voda. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i ograničenja, što zahtijeva integrirani pristup u odabiru najučinkovitijih tehnika za specifične uvjete odlagališta.

5.5. Upravljanje odlagalištem i energetska oporavak

Osim obrade procjednih voda, učinkovito upravljanje odlagalištima također uključuje rješavanje odlagališnih plinova, posebno metana. Projekti koji koriste odlagališne plinove za proizvodnju energije mogu značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova i doprinijeti globalnim naporima za smanjenje klimatskih promjena. Međutim, ekonomska održivost ovih projekata ovisi o preciznom planiranju, uključujući procjenu dugoročnih učinaka i primjenu javnih politika koje potiču preusmjerenje otpada.

5.6. Inovacije u gospodarenju otpadom

Napredne tehnologije za gospodarenje otpadom obuhvaćaju poboljšane metode recikliranja, pretvaranje otpada u energiju te inovativne tehnike upravljanja odlagalištima. Mehaničko recikliranje koristi napredne tehnologije sortiranja, dok kemijsko recikliranje razgrađuje plastiku na osnovne monomere. Tehnologije pretvaranja otpada u energiju, uključujući spaljivanje s povratom energije i anaerobnu probavu, omogućuju učinkovitije korištenje otpada i proizvodnju energije. Rudarstvo na odlagalištima i poboljšanje sustava za sakupljanje plina također doprinose smanjenju utjecaja na okoliš i povratu korisnih resursa.

U zaključku, procjedne vode s odlagališta predstavljaju ozbiljan ekološki problem koji zahtijeva integrirani pristup u upravljanju i obradi. Razumijevanje kemijskih procesa, ekoloških rizika i primjena naprednih tehnologija ključni su za smanjenje štetnih učinaka i zaštitu okoliša. Nastavak istraživanja i inovacija u ovom području nužan je za učinkovito rješavanje problema procjednih voda i osiguranje održivog gospodarenja otpadom.

6. Literatura

1. Guinness Book of World Records - First Landfill Sites [Internet]. 2020 [citirano 19. kolovoz 2024.]. Dostupno na: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/636988-first-landfill-sites>
2. Fresno Sanitary Landfill (1937) [Internet]. Fresno, SAD: Historic Fresno; [citirano 19. kolovoz 2024.]. Dostupno na: <https://historicfresno.org/nrhp/landfill.htm>
3. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste [Internet]. 1999/31/EC 26.4.1999. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:31999L0031>
4. Mikulić N. Strateška studija o utjecaju prijedloga plana gospodarenja otpadom RH 2015-2021 na okoliš [Internet]. [Zagreb]; 2015 [citirano 19. kolovoz 2024.]. Dostupno na: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/SPUO/nadležno_mzoe/strateska_studija_o_utjecaju_prijedloga_plana_gospodarenja_otpadom_rh_2015-2021_na_okolis.pdf
5. Strategija Ujedinjenih naroda za smanjenje rizika od katastrofa. Landfilling [Internet]. [citirano 19. kolovoz 2024.]. Dostupno na: <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/tl0043>
6. ZAŠTO CENTAR NE MOŽE UGROZITI PODZEMNE VODE, A TIME I ZDRAVLJE LJUDI U DALMACIJI? [Internet]. Split: Regionalni Centar Čistog Okoliša; 2021 [citirano 15. kolovoz 2024.]. Dostupno na: <https://rcco.hr/zasto-centar-ne-moze-ugroziti-podzemne-vode-a-time-i-zdravlje-ljudi-u-dalmaciji/>
7. Basic Information about Landfill Gas [Internet]. [citirano 19. kolovoz 2024.]. Dostupno na: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
8. Lee C, Lin S. Handbook of Environmental Engineering Calculations 2 [Internet]. 2. izd. Mc Graw-Hill Companies; 2007 [citirano 13. kolovoz 2024.]. 1712 str. Dostupno na: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/41724/1/73.pdf>
9. Mishra P. Landfill Emissions and Their Impact on the Environment. International Journal of Engineering Research & Technology. 08. kolovoz 2020.;9(8):6. Dostupno na: <https://pdfs.semanticscholar.org/7259/6b3ebd8a169e2ce1e2e77295930e51e9deb2.pdf>
10. Ludwig C, Hellweg S, Stucki S. Municipal Solid Waste Management. 1. izd. Berlin, Njemačka: Springer Berlin, Heidelberg; 2002. 535 str

11. Engelmann P de M, Santos VHJM dos, Barbieri CB, Augustin AH, Rodrigues LF. Environmental monitoring of a landfill area through the application of carbon stable isotopes, chemical parameters and multivariate analysis. *Waste Management*. lipanj 2018.;76:591–605. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.027>
12. Townsend TG, Reinhart DR. The Hydrodynamics of Leachate Recirculation Landfills. U: *Landfill Bioreactor Design & Operation* [Internet]. 1. izd. Lewis Publishers; [citirano 17. kolovoz 2024.]. str. 85–115. Dostupno na: <https://doi.org/10.1201/9780203749555>
13. Abdel-Shafy HI, Ibrahim AM, Al-Sulaiman AM, Okasha RA. Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Engineering Journal* [Internet]. siječanj 2024. [citirano 15. kolovoz 2024.];15(1). Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X1830093X?via%3Dihub13>.
14. Jabłońska-Trypuć A, Wołejko E, Wydro U, Leszczyński J, Wasil M, Kiełtyka-Dadasiewicz A. Chemical Composition and Toxicological Evaluation of Landfill Leachate from Białystok, Poland. *Sustainability* [Internet]. [citirano 16. kolovoz 2024.]; Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/su15231649714>.
15. Meng J, Xiao G, Qi M. Comparing roles of multiple contamination indicators in tracing groundwater pollution nearby a typical municipal solid waste (MSW) landfill. *Heliyon* [Internet]. 08. ožujak 2024. [citirano 16. kolovoz 2024.];10(16). Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35601>
16. Seren Acarer Arat. Microplastics in landfill leachate: Sources, abundance, characteristics, remediation approaches and future perspective. *Desalination and Water Treatment* [Internet]. srpanj 2024. [citirano 15. kolovoz 2024.];319. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100445>
17. Igwegbe CA, López-Maldonado EA, Landázuri AC, Ovuoraye PE, Ogbu AI, Vela-García N, i sur. Sustainable municipal landfill leachate management: Current practices, challenges, and future directions. *Desalination and Water Treatment* [Internet]. 2024. [citirano 18. kolovoz 2024.];320. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100709>
18. Galavote T, Chaves G de LD, Yamane LH, Siman RR. The effects of municipal waste reduction and recycling policies on the economic feasibility of landfill gas generation. *Energy for Sustainable Development* [Internet]. kolovoz 2024. [citirano 17. kolovoz 2024.];81. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101493>

19. Toha M, Rahman MM. Estimation and prediction of methane gas generation from landfill sites in Dhaka city, Bangladesh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [Internet]. lipanj 2023. [citirano 15. kolovoz 2024.];7. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100302>
20. Adamcová D, Vaverková MD, Bartoň S, Havlíček Z, Břoušková E. Soil contamination in landfills: a case study of a landfill in Czech Republic. *Solid Earth*. 02. studeni 2016.;7:239–47, [citirano 15. kolovoz 2024.]; Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/se-7-239-2016>
21. Kötz A, Schwarz L. Application of conservative tracers in landfill leachate studies for contamination assessment. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2015;182:99–108.
22. Liu J. Geochemical characteristics and contamination of groundwater around landfills: A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(9):10109–27.
23. Kabir, M. S., Wang, H., Luster-Teasley, S., Zhang, L., & Zhao, R. (2023). Microplastics in landfill leachate: Sources, detection, occurrence, and removal. *Environmental Science and Ecotechnology*, 16(100256), 100256. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100256>
24. GodvinSharmila, Shanmugavel SP, Tyagi VK, Rajesh Banu J. Microplastics as emergent contaminants in landfill leachate: Source, potential impact and remediation technologies. *J Environ Manage* [Internet]. 2023;343(118240):118240. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118240>
25. Yadav J, Chauhan P. Recent advances in synthesis, characterization, and application of nanotechnology in wastewater treatment- A review. *Nanosci Nanotechnol-Asia* [Internet]. 2022;12(3). Available from: <http://dx.doi.org/10.2174/2210681212666220405162938>

7. Životopis

Luka Šimatović rođen je 18.10.2001. u Rijeci. Od 2008. do 2016. pohađao je Osnovnu školu “Srdoči” u Rijeci, od 2016. do 2020. pohađao je Medicinsku školu u Rijeci te je 2021. godine upisao Sveučilišni prijediplomski studij sanitarnog inženjerstva pri Medicinskom fakultetu u Rijeci. U sklopu fakulteta sudjelovao je kao predavač na Sanitas kongresu 2024. godine predstavljajući temu završnog rada. Bio je demonstrator na vježbama iz kolegija Analitička kemija.