



UNIVERZITET CRNE GORE

METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

VESNA BOLJEVIĆ

**ANALIZA MOGUĆNOSTI PRIMJENE SAVREMENIH
TEHNOLOGIJA ZA RECIKLAŽU STAKLA U CRNOJ GORI**

MASTER RAD

Podgorica, 2024.godina



UNIVERZITET CRNE GORE

METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

**ANALIZA MOGUĆNOSTI PRIMJENE SAVREMENIH
TEHNOLOGIJA ZA RECIKLAŽU STAKLA U CRNOJ GORI
MASTER RAD**

Studijski program: Zaštita životne sredine

Student: Vesna Boljević

Broj indeksa: 9/23

Mentor: Prof. dr Jelena Šćepanović

Podgorica, 2024. godina

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Boljević Vesna

Datum rođenja: 26.11.1986.godine, Podgorica, Crna Gora

Prethodne studije: Metalurško -tehnološki fakultet, smjer: Zaštita životne sredine

Godina diplomiranja: 2010

INFORMACIJE O MASTER RADU:

Metalurško -tehnološki fakultet

Smjer: Zaštita životne sredine

Naslov rada: Analiza mogućnosti primjene savremenih tehnologija za reciklažu stakla u Crnoj Gori

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA:

Datum prijave master rada: 04.10.2024.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 23.10.2024.

Mentor: Prof. dr Jelena Šćepanović

KOMISIJA ZA OCJENU TEME I PODOBNOSTI MAGISTRANDA/OCJENU RADA/ODBRANU RADA

Komisija za ocjenu teme: : Prof.dr Jelena Šćepanović

Komisija za ocjenu rada: Prof.dr Darko Vuksanović

Komisija za odbranu rada: Prof. dr Veselinka Grudić

Lektor: Autolektura

Datum odbrane: 25.12.2024.

Univerzitet Crne Gore

Metalurško -tehnološki fakultet

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat: **Vesna Boljević**

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu , ja,dolje potpisani/potpisana

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom:

„ANALIZA MOGUĆNOSTI PRIMJENE SAVREMENIH TEHNOLOGIJA ZA RECIKLAŽU STAKLA U CRNOJ GORI“

rezultat sopstvenog istraživačkog rada,da nijesam kršio/kršila autorska prava i koristio/koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno dijelo.

U Podgorici,

Potpis studenta

ZAHVALNICA

Veliku zahvalnost dugujem mojoj mentorki prof.dr Jeleni Šćepanović na pruženoj prilici da se detaljnije bavim ovom inspirativnom tematikom. Veliko hvala na pomoći prilikom razrade ovog rada.

Želim da se zahvalim i članovima komisije prof.dr Darku Vuksanoviću i prof.dr Veselinki Grudić na užurnosti i sugestijama.

Najveću zahvalnost za neizmjereno razumijevanje i motivaciju dugujem mojoj porodici koja je uvijek bila uz mene i pružala mi bezrezervnu podršku u svemu.

IZVOD

Upravljanje otpadom, a posebno reciklaža stakla, predstavlja značajan izazov i priliku za unapređenje ekološke održivosti u Crnoj Gori. Ovaj rad analizira trenutne prakse i identifikuje mogućnosti za primjenu savremenih tehnologija za reciklažu staklenog otpada, koje bi mogle poboljšati efikasnost sistema upravljanja otpadom u Crnoj Gori. Empirijski dio rada pruža uvid u ekonomske i ekološke prednosti primjene tehnologija kao što su balistička separacija, magnetna separacija i optičko sortiranje, koje mogu značajno smanjiti količinu otpada na deponijama i povećati stopu reciklaže. Kroz analizu iskustava iz Evropske unije, predložene su strategije prilagođene lokalnom kontekstu, kao što su sistemi povrata depozita (DRS) i proširena odgovornost proizvođača (EPR). Rezultati pokazuju da je moguće postići značajne ekonomske i ekološke koristi primjenom modernih reciklažnih tehnologija i modela upravljanja otpadom, čime se doprinosi ciljevima cirkularne ekonomije i usklađivanju sa evropskim standardima. Ovo istraživanje može poslužiti kao osnova za dalje strategije i investicije u sektor reciklaže u Crnoj Gori.

Ključne riječi: *reciklaža stakla, Crna Gora, upravljanje otpadom, savremene tehnologije, ekonomski i ekološki uticaji, cirkularna ekonomija*

Abstract

Waste management, specifically glass recycling, represents a significant challenge and opportunity to enhance environmental sustainability in Montenegro. This study analyzes current practices and identifies opportunities for implementing modern technologies for glass waste recycling, which could improve the efficiency of waste management systems in Montenegro. The empirical part of the study provides insight into the economic and environmental benefits of technologies such as ballistic separation, magnetic separation, and optical sorting, which can significantly reduce landfill waste and increase recycling rates. Drawing from European Union practices, strategies tailored to the local context are proposed, such as deposit return systems (DRS) and extended producer responsibility (EPR). The results show that substantial economic and ecological benefits can be achieved by adopting modern recycling technologies and waste management models, thereby contributing to the goals of a circular economy and alignment with European standards. This research may serve as a foundation for further strategies and investments in Montenegro's recycling sector.

Keywords: *glass recycling, Montenegro, waste management, modern technologies, economic and environmental impacts, circular economy*

SADRŽAJ

1. Uvod.....	3
2. Vrste i karakteristike stakla	5
2.1. Sirovinski sastav stakla	5
2.2. Svojstva stakla.....	6
2.3. Proces proizvodnje stakla.....	8
2.4. Vrste stakla i primjena	10
3. Upravljanje staklenim otpadom i reciklaža stakla.....	12
3.1. Pravni aspekt	12
3.2. Otpadno staklo.....	14
3.3. Separacija stakla	20
3.4. Tehnologija reciklaže stakla	24
3.5. Ekonomski i ekološki efekti reciklaže stakla	28
3.6. Budućnost reciklaže stakla	30
4. Analiza mogućnosti reciklaže stakla u Crnoj Gori.....	31
4.1. Recentna istraživanja.....	32
4.2. Pravni i institucionalni okvir	34
4.3. Trenutno stanje i izazovi u upravljanju staklenim otpadom u Crnoj Gori	35
5. Postrojenje za reciklažu u Podgorici	41
5.1. Postojeće stanje	41
5.2. Tehničke opcije za reciklažu stakla	44
5.3. Kriterijumi za izgradnju postrojenja u Podgorici	45
5.4. Projekcije buduće produkcije staklenog otpada u Centralnom regionu	46
5.5. Tehnička oprema i procesi za reciklažu stakla	48
5.6. Nabavka novog postrojenja i proširenje postojećih kapaciteta	50
5.7. Alternativne tehnologije za reciklažu staklenog otpada	53
5.8. Analiza ulaganja u reciklažu stakla u Podgorici.....	54
5.8.1. Cost-Benefit analiza	54
5.8.2. SWOT analiza	55
6. Diskusija rezultata u kontekstu postavljenog hipotetičkog okvira.....	58
7. Zaključak	61
Literatura	Error! Bookmark not defined.

1. Uvod

Staklo je idealan materijal za ambalažu zbog svoje otpornosti na hemijske reakcije, što omogućava duže očuvanje proizvoda. Proizvodi se od prirodnih sirovina, a može se beskonačno reciklirati, što ga čini ekološki prihvatljivim. Reciklaža stakla u Crnoj Gori predstavlja ključni element za postizanje održivog razvoja i optimalno upravljanje otpadom, kako je naglašeno u strateškim dokumentima Vlade Crne Gore. S obzirom na izuzetno dug period razgradnje materijala poput stakla, koji u prirodi praktično ostaje netaknut, postaje imperativ osigurati efikasne sisteme za reciklažu. Trenutno se u Crnoj Gori reciklira svega oko 20% sakupljenog staklenog otpada, što je ispod potrebnog kapaciteta i standarda. Postojeći izazovi obuhvataju nedovoljno razvijenu infrastrukturu, nisku ekološku svijest javnosti i nedostatak programa za odvajanje otpada na izvoru.

Ovaj master rad istražuje složenosti reciklaže stakla, sa posebnim fokusom na upravljanje staklenim otpadom u Crnoj Gori. Cilj je prikazati vrste i karakteristike stakla, trenutnu situaciju i buduće prognoze količina staklenog otpada, kao i poređenje sa praksama upravljanja staklenim otpadom u zemljama Evropske unije. Posebna pažnja biće posvećena analizi zakonodavnog okvira i izazova sa kojima se suočava Crna Gora u ovom domenu.

U okviru istraživanja, posvećena je pažnja trenutnom stanju upravljanja staklenim otpadom, pri čemu su identificirani ključni izazovi poput infrastrukturnih i tehničkih prepreka, kao i niska svijest građana o značaju reciklaže. Ovi faktori ukazuju na potrebu za definisanjem sveobuhvatnog pristupa koji bi omogućio efikasnije upravljanje i reciklažu staklenog otpada.

Kao osnova za istraživanje, korišćeni su raspoloživi podaci o količinama generisanog staklenog otpada, uz razmatranje uspješnih praksi i tehnoloških procesa primijenjenih u zemljama Evropske unije. Na temelju ovih podataka, istraživanje nudi prijedloge za modernizaciju i optimizaciju procesa prikupljanja, transporta i obrade staklenog otpada, s posebnim osvrtom na mogućnosti njihove implementacije u specifičnim uslovima Crne Gore.

Osnovni cilj ovog rada je pružiti detaljan pregled trenutnog stanja upravljanja staklenim otpadom u Crnoj Gori, identifikovati prepreke u postojećem sistemu, te predložiti konkretne preporuke i tehnologije za njegovo unapređenje. U tom kontekstu, analizirani su potencijali za

unaprjeđenje ekološke i ekonomske održivosti kroz primjenu modernih tehnologija, uz korišćenje pozitivnih iskustava iz Evropske unije. Poseban akcenat stavljen je na definisanje optimalnih tehnoloških rješenja koja odgovaraju lokalnim potrebama i mogućnostima, s ciljem postizanja višestrukih koristi: smanjenja ekološkog otiska, povećanja stope reciklaže i razvoja održivog privrednog modela.

Istraživački proces obuhvatio je više koraka, uključujući analizu postojećih istraživanja i praksi u Evropskoj uniji, identifikaciju ekonomskih i ekoloških prednosti reciklaže stakla, statističku obradu podataka o staklenom otpadu u Crnoj Gori, te projektovanje mogućeg postrojenja za reciklažu. Osim toga, komparativna analiza zakonodavnog okvira Crne Gore sa zakonodavstvima zemalja koje su uspješno riješile problem upravljanja staklenim otpadom poslužila je kao polazna osnova za predlaganje prilagođenih rješenja.

Konačno, istraživanje je fokusirano na razmatranje tehnoloških, ekoloških i ekonomskih aspekata reciklaže stakla, uz procjenu njenog doprinosa održivom razvoju i očuvanju prirodnih resursa. Kroz integraciju teorijskih i praktičnih nalaza, rad nudi smjernice za kreiranje strategija i politika koje bi omogućile efikasno upravljanje staklenim otpadom i njegovu reciklažu u Crnoj Gori.

2. Vrste i karakteristike stakla

2.1. Sirovinski sastav stakla

Staklo je neorganski amorfni materijal koji se dobija zagrijavanjem različitih sirovina na visokim temperaturama, čime dolazi do njihove fuzije i formiranja homogenog staklenog materijala. Sirovinski sastav stakla varira u zavisnosti od njegove namjene, vrste i specifičnih zahtjeva krajnjeg proizvoda. Ipak, osnovne komponente ostaju relativno konstantne i čine bazu gotovo svih staklenih materijala.

Glavne komponente sirovinskog sastava [1].

1. Kvarcni pijesak (SiO_2) - Kvarcni pijesak je osnovna sirovina za proizvodnju stakla, koja u ukupnom sastavu čini oko 60–75%. Njegova uloga je ključna, jer je silicijum-dioksid osnovni sastojak koji omogućava formiranje čvrste staklene mase. Čistoća pijeska ima direktan uticaj na prozirnost i kvalitet stakla, pa se za proizvodnju koristi visokokvalitetni kvarcni pijesak sa minimalnim sadržajem nečistoća poput željeza, koje mogu izazvati neželjene obojenosti u staklu.

2. Soda (Na_2CO_3) - Natrijum-karbonat (soda) čini oko 12–15% sirovinskog sastava i ima funkciju snižavanja temperature topljenja kvarcnog pijeska, čime se proizvodni proces čini energetski efikasnijim. Soda omogućava bolju preradu staklene mase i njeno lakše oblikovanje. Takođe, doprinosi kemijskoj stabilnosti stakla, ali i povećava njegovu sklonost otapanju u vodi, što se kompenzuje dodavanjem kreča.

3. Kreč (CaCO_3) - Kalcijum-karbonat se dodaje kako bi se poboljšala otpornost stakla na vodu, hemijske uticaje i habanje. Sadržaj kreča u sirovinskom sastavu obično iznosi 10–12%. Kreč stabilizuje staklo i povećava njegovu dugotrajnost, čineći ga pogodnim za širok spektar primjena, posebno u industriji ambalaže i arhitekturi.

4. Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) - Dolomit je važan izvor magnezijuma i kalcijuma, koji staklu daju dodatnu otpornost na temperaturne promjene i povećavaju njegovu čvrstoću. Dodavanjem dolomita staklo postaje otpornije na termalni šok, što je posebno važno kod staklenih posuda koje se koriste za kuvanje i skladištenje. Njegov udeo u sirovinskom sastavu varira između 5–10%.[2].

5. Feldspat (K_2O , Al_2O_3) - Feldspat je ključan za snižavanje tačke topljenja smjese i povećanje homogenosti staklene mase. Njegova uloga je osiguravanje ravnomjerne distribucije alkalnih oksida, što doprinosi povećanju hemijske stabilnosti i mehaničke otpornosti stakla. Feldspat se često koristi u proizvodnji staklenih vlakana i tehničkog stakla [1].

6. Dodaci za bojenje i dekolorizaciju - Dodaci za bojenje i dekolorizaciju igraju važnu ulogu u definisanju završnog izgleda i transparentnosti stakla. Na primjer, jedinjenja željeza daju staklu zelenu ili smeđu boju, dok se selen i kobalt koriste za neutralizaciju neželjenih boja i postizanje savršene prozirnosti [1]. Ovi dodaci su od posebnog značaja u proizvodnji arhitektonskog stakla i staklenih ambalaža.

Osim osnovnih komponenti, u proizvodnji stakla se koriste i sekundarne sirovine poput recikliranog staklenog krša, što ne samo da doprinosi očuvanju prirodnih resursa, već i smanjuje potrošnju energije potrebne za topljenje. Korišćenje recikliranih materijala postaje sve značajniji dio savremenih pristupa u industriji stakla, posebno u kontekstu održivog razvoja i kružne ekonomije [2].

2.2. Svojstva stakla

Staklo posjeduje jedinstvena svojstva koja ga čine ključnim materijalom za širok spektar primjena, od građevinarstva i industrije do svakodnevne upotrebe. Njegova hemijska stabilnost, estetska vrijednost i tehnička svojstva omogućavaju upotrebu u raznovrsnim proizvodima, dok njegova reciklažna priroda doprinosi održivosti i očuvanju prirodnih resursa.

Ključna svojstva stakla su:

1. Prozirnost - Prozirnost stakla jedno je od njegovih najprepoznatljivijih svojstava, zahvaljujući kojem je idealno za prozore, fasade, staklenike, ogledala i druge proizvode gdje je vizuelna komunikacija ključna. Staklo omogućava prolaz svjetlosti dok pruža zaštitu od vanjskih uticaja. Njegova prozirnost može biti prilagođena različitim zahtjevima kroz specifične tretmane površine, poput oblaganja filmovima za kontrolu svjetlosti ili refleksije, što ga čini pogodnim za energetske efikasne prozore i fasade [1].

2. Čvrstoća i otpornost na udar - Iako prirodno krhko, staklo može biti izuzetno čvrsto na pritisak i udar kada se pravilno tretira. Kaljeno staklo, koje se dobija zagrijavanjem na visokim

temperaturama i naglim hlađenjem, ima pet puta veću čvrstoću od običnog stakla. Laminirano staklo, s druge strane, sadrži slojeve između staklenih panela koji osiguravaju dodatnu otpornost i zaštitu od razbijanja. Ova svojstva čine ga pogodnim za upotrebu u automobilske industriji, arhitekturi i zaštitnim staklima [2].

3. Oblikovanje i prilagodljivost - Staklo se može oblikovati različitim tehnikama, uključujući duvanje, livenje, valjanje i presovanje, što omogućava široku primjenu u dizajnu, industriji i umjetnosti. Njegova sposobnost prilagođavanja obliku čini ga idealnim za proizvodnju posuda, arhitektonskih elemenata i umjetničkih instalacija. Savremene tehnologije omogućavaju kreiranje staklenih površina složenih oblika i tekstura, čime se dodatno šire mogućnosti njegove upotrebe.

4. Transmisija svjetlosti - Količina svjetlosti koja prolazi kroz staklo zavisi od njegove debljine, sastava i dodatnih premaza. Visoka transmisija svjetlosti čini staklo ključnim materijalom za prozore, staklene fasade i solarne panele. U modernoj arhitekturi, ovo svojstvo omogućava stvaranje svijetlih i energetski efikasnih prostora, dok oblaganje stakla niskoemisionim premazima doprinosi regulaciji toplote i zaštiti od UV zračenja [1].

5. Toplotna izolacija (U-vrijednost) - Staklo je postalo jedan od ključnih materijala u energetski efikasnoj gradnji, zahvaljujući mogućnosti regulacije toplotnog gubitka. Dvoslojna i troslojna stakla sa prostorom ispunjenim inernim gasovima poput argona minimizuju toplotne gubitke, dok stakla sa niskoemisionim premazima dodatno poboljšavaju izolacione karakteristike. U-vrijednost, koja mjeri kapacitet materijala za gubitak toplote, kod ovakvih stakala je znatno smanjena, čineći ih idealnim za održivu gradnju [1].

6. Otpornost na hemikalije i vremenske uslove - Staklo je izuzetno otporno na većinu hemijskih supstanci, uključujući kiseline, baze i soli, što ga čini pogodnim za upotrebu u laboratorijama, hemijskoj industriji i eksterijerima koji su izloženi agresivnim vremenskim uslovima. Njegova neporozna površina omogućava lako održavanje i sprječava apsorpciju nečistoća, što dodatno doprinosi njegovoj trajnosti i otpornosti na koroziju.

7. Reciklaža i održivost - Jedno od najznačajnijih svojstava stakla je njegova sposobnost beskonačnog recikliranja bez gubitka kvaliteta. Reciklirano staklo se koristi kao sirovina za proizvodnju novih staklenih proizvoda, pri čemu se štedi energija i smanjuje emisija CO₂. Proces reciklaže zahtijeva niže temperature topljenja nego što je potrebno za primarne sirovine, što ga čini energetski i ekološki prihvatljivim [2].

8. Estetika i prilagodljivost dizajnu - Estetska svojstva stakla omogućavaju njegovu upotrebu u dekorativnim i umjetničkim aplikacijama. Prozirnost, refleksija svjetlosti i mogućnost bojenja ili graviranja pružaju staklu neograničene mogućnosti za upotrebu u arhitekturi i dizajnu enterijera.

Ova svojstva čine staklo univerzalnim materijalom koji se koristi u različitim industrijama, doprinosi energetskej efikasnosti i održivom razvoju, te nudi estetsku i funkcionalnu vrijednost koja zadovoljava savremene tehničke i ekološke zahtjeve.

2.3. Proces proizvodnje stakla

Proizvodnja stakla predstavlja kompleksan proces koji obuhvata niz uzastopnih faza, od pripreme sirovina do konačne obrade i kontrole kvaliteta. Svaka faza je od suštinskog značaja za postizanje željenih svojstava, funkcionalnosti i estetike krajnjih proizvoda. Zahvaljujući tehnološkim inovacijama, proces proizvodnje stakla je postao energetski efikasniji i ekološki prihvatljiviji, dok istovremeno omogućava izradu visokokvalitetnih proizvoda prilagođenih raznim industrijskim i svakodnevnim potrebama.

Faze proizvodnje stakla

1. Priprema sirovina - Osnovne sirovine za proizvodnju stakla uključuju kvarcni pijesak (SiO_2), sodu (Na_2CO_3), kreč (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) i razne dodatke za bojenje ili dekolorizaciju. Ove sirovine se pažljivo mjere i miješaju kako bi se osigurao homogen hemijski sastav smjese. Preciznost u doziranju sirovina ima ključnu ulogu u postizanju optimalnih karakteristika staklene mase. Prije unošenja u peći, sirovine prolaze kroz postupke miješanja, mljevenja i homogenizacije kako bi se eliminisale nečistoće i postigla ujednačenost smjese [1].

2. Topljenje - Proces topljenja je centralna faza u proizvodnji stakla, tokom koje dolazi do fuzije sirovina i stvaranja viskozne tečne mase. Ovaj proces se odvija u pećima koje postižu temperature između 1400 i 1600°C. Tokom topljenja, dolazi do hemijskih reakcija koje uključuju razlaganje karbonata i oslobađanje gasova poput CO_2 . Cilj ovog procesa je formiranje homogene staklene mase bez mjehurića ili drugih nedostataka. Savremene peći koriste plin, električnu energiju ili kombinaciju oba izvora, uz primjenu izolacionih tehnologija koje smanjuju energetske gubitke i emisiju štetnih gasova [1].

3. Oblikovanje - Tečna staklena masa se oblikuje dok je još u viskoznom stanju. Različite tehnike oblikovanja omogućavaju proizvodnju širokog spektra staklenih proizvoda:

- Float proces koristi se za proizvodnju ravnog stakla, gdje se tečna staklena masa izliva na površinu rastopljenog kositra, stvarajući savršeno ravne ploče.
- Duvanje se primjenjuje za izradu boca, posuda i umjetničkih staklenih predmeta.
- Livenje omogućava oblikovanje specijalnih proizvoda, poput sočiva, optičkih instrumenata ili ukrasnih predmeta.

Ove metode zahtijevaju visoku preciznost i kontrolu kako bi se osigurala ujednačenost oblika i dimenzija [2].

4. Hlađenje (žarenje) - Nakon oblikovanja, staklo mora biti postepeno ohlađeno u kontrolisanim uslovima kako bi se spriječile unutrašnje napetosti koje bi mogle dovesti do pucanja ili deformacija. Ovaj proces se odvija u posebnim pećima za žarenje, gdje se temperatura stakla postepeno snižava tokom određenog vremenskog perioda. Kontrolisano hlađenje omogućava stabilizaciju strukture stakla i poboljšava njegovu mehaničku otpornost [1].

5. Procesi dorade - Doradni procesi su neophodni kako bi se postigli visoki standardi funkcionalnosti i estetike gotovih proizvoda. Ovi procesi uključuju:

- Brušenje i poliranje, za eliminaciju oštih ivica i poboljšanje prozirnosti.
- Nanošenje zaštitnih premaza, koji staklo čine otpornijim na ogrebotine, mrlje i UV zračenje.
- Graviranje i bojenje, za dekorativne i estetske svrhe. Savremeni procesi dorade često koriste automatizovane mašine koje omogućavaju preciznu i efikasnu obradu velikih serija proizvoda [1].

6. Kontrola kvaliteta - Svaki gotov proizvod prolazi rigoroznu kontrolu kvaliteta kako bi se osigurala njegova otpornost, funkcionalnost i vizuelna privlačnost. Kontrola kvaliteta uključuje mjerenje dimenzija, ispitivanje otpornosti na udar, provjeru transparentnosti i druge testove koji potvrđuju tehničke standarde. Ova faza je od ključne važnosti za zadovoljstvo krajnjih korisnika i održavanje ugleda proizvođača [1].

Proizvodnja stakla je sofisticiran proces koji zahtijeva pažljivo planiranje, tehnološku preciznost i kontinuirane inovacije kako bi se zadovoljile rastuće potrebe tržišta i standardi održivosti. Uvođenjem novih tehnologija i optimizacijom procesa, industrija stakla postaje sve efikasnija, ekološki odgovornija i konkurentnija na globalnom nivou.

2.4. Vrste stakla i primjena

Staklo je materijal koji se prilagođava različitim zahtjevima zahvaljujući svojoj raznovrsnosti i mogućnostima prilagođavanja fizičkih i hemijskih svojstava. Različite vrste stakla razvijene su kako bi zadovoljile specifične potrebe u industriji, građevinarstvu i svakodnevnim aplikacijama, pri čemu svaka vrsta ima jedinstvene karakteristike i primjene.

Float staklo - Float staklo je jedna od najčešće korišćenih vrsta stakla, koja se proizvodi putem float procesa. Ovaj proces podrazumijeva izlivanje tečne staklene mase na površinu rastopljenog kositra, čime se postiže savršeno ravna i glatka površina. Float staklo karakterišu izuzetna transparentnost i uniformnost, što ga čini idealnim za izradu prozora, staklenih fasada, izloga i ogledala. Njegova fleksibilnost u obradi omogućava dodatnu doradu, poput kaljenja ili laminiranja, za specifične namjene [2].

Laminirano staklo - Laminirano staklo sastoji se od dva ili više slojeva stakla međusobno povezanih slojem polivinil-butirala (PVB) ili sličnih materijala. Ova struktura pruža visoku otpornost na udarce i razbijanje, čime se povećava sigurnost i smanjuje rizik od povreda. Kada se slomi, slojevi zadržavaju fragmente stakla, čime se sprječava njihovo rasipanje. Laminirano staklo se često koristi u sigurnosnim aplikacijama, kao što su automobilska stakla, fasade visokih zgrada, staklene ograde i bankarske kase. Dodatno, ovaj tip stakla pruža UV zaštitu i značajno smanjuje prodor buke [2].

Ojačano staklo (kaljeno staklo) - Kaljeno staklo je posebno termički obrađeno kako bi se povećala njegova čvrstoća i otpornost na udarce. Ovaj proces uključuje zagrijavanje stakla na visoku temperaturu, nakon čega se ono brzo hladi, čime se postiže ravnomjerno raspoređena unutrašnja napetost. Kaljeno staklo se raspada na sitne, neoštre fragmente kada se slomi, čime se značajno smanjuje rizik od povreda. Ovo staklo je idealno za primjenu u građevinarstvu (vrata, pregrade, stepeništa), industrijskim postrojenjima i svakodnevnim proizvodima poput kuhinjskih aparata [2].

Izolacione staklene jedinice (termopan staklo) - Izolacione staklene jedinice sastavljene su od dva ili više slojeva stakla, između kojih se nalazi sloj zraka ili inertnog gasa (najčešće argona). Ova konstrukcija pruža visoku toplotnu i zvučnu izolaciju, čime se značajno smanjuje energetska potrošnja zgrada. Termopan staklo se koristi za prozore, staklene fasade i vrata u energetske efikasnim objektima, te predstavlja standard u modernoj arhitekturi [2].

Tonirano staklo - Tonirano staklo sadrži dodatke metalnih oksida koji mu daju karakterističnu boju i smanjuju prodor sunčeve svjetlosti i UV zračenja. Ovo staklo je posebno pogodno za fasade zgrada i prozore u toplim klimama, jer pomaže u održavanju unutrašnje temperature i smanjuje potrebu za klimatizacijom. Tonirano staklo dolazi u različitim bojama, uključujući zelenu, smeđu, plavu i sivu, što omogućava i estetsku i funkcionalnu primjenu.

Specijalizovane vrste stakla - Pored osnovnih vrsta, postoje i specijalizovana stakla razvijena za specifične potrebe [1]:

- Vatrootporno staklo koristi se u industrijskim objektima i protivpožarnim pregradama, jer može izdržati visoke temperature bez pucanja.
- Samočišćeće staklo ima sloj fotokatalitičkog premaza koji omogućava razgradnju nečistoća pod uticajem UV svjetlosti, što smanjuje potrebu za održavanjem.
- Električno grijano staklo integrisano je sa grijačima i koristi se za sprječavanje zamagljivanja i zaleđivanja u hladnim klimama.

Različite vrste stakla omogućavaju širok spektar primjena, od građevinskih i industrijskih do dekorativnih i sigurnosnih, čime se potvrđuje njegova univerzalna uloga u savremenom društvu. Napredak u tehnologijama proizvodnje i obrade dodatno proširuje mogućnosti korišćenja stakla u budućnosti.

3. Upravljanje staklenim otpadom i reciklaža stakla

Upravljanje otpadom predstavlja sve veći izazov u savremenom društvu s obzirom na kontinuirani rast potrošnje, pri čemu otpadno staklo čini značajan dio ukupnog komunalnog otpada. Upravljanje otpadom u urbanim sredinama je posebno izazovno zbog prisustva lakih frakcija, poput plastike i papira, koje smanjuju prosječnu gustinu otpada i povećavaju ukupnu zapreminu komunalnog otpada.

3.1. Pravni aspekt

Odlaganje otpada na deponije predstavlja globalni izazov, naročito u kontekstu zaštite životne sredine, očuvanja zdravlja ljudi i obezbjeđivanja opstanka biljnog i životinjskog svijeta. Savremeni pristupi upravljanju otpadom naglašavaju potrebu za smanjenjem odlaganja na deponije, uz istovremeni razvoj održivih sistema za reciklažu i ponovnu upotrebu. Evropska unija, svjesna značaja ovog pitanja, usvojila je niz pravnih dokumenata, strateških smjernica i uputstava kako bi unaprijedila upravljanje otpadom i smanjila negativne uticaje deponija na životnu sredinu.

Međunarodni propisi o upravljanju otpadom - Međunarodni okvir upravljanja otpadom temelji se na saradnji država i uspostavljanju univerzalnih standarda. Ključni akti uključuju Bazelsku konvenciju o kontroli prekograničnog kretanja opasnog otpada i njegovom zbrinjavanju (1989), koja reguliše prekogranično kretanje opasnog otpada i osigurava njegovu ekološki prihvatljivu obradu, te predviđa zabranu ulaska opasnog otpada u države koje ne žele da ga primaju.

Takođe, brojne međunarodne konferencije, uključujući Konferenciju Ujedinjenih nacija o životnoj sredini [3], postavile su temelje za dalji razvoj međunarodnog prava o zaštiti životne sredine.

Zakonski okvir Evropske unije za upravljanje otpadom - Evropska unija je usvojila sveobuhvatan sistem direktiva i uredbi za regulisanje upravljanja otpadom. Ovaj sistem obuhvata opšte principe prevencije otpada, ponovne upotrebe, reciklaže i održivog zbrinjavanja otpada. Najvažniji propisi uključuju:

1. Okvirna direktiva o otpadu (2008/98/EZ): Ova direktiva definiše hijerarhiju otpada, gdje prioritet imaju prevencija, ponovna upotreba i reciklaža. Postavlja ciljeve za reciklažu komunalnog otpada (50% do 2020. godine) i predviđa ambiciozne ciljeve kroz izmjenu Direktive (EU) 2018/851, uključujući reciklažu 55% otpada do 2025. godine, 60% do 2030. i 65% do 2035. godine.

2. Direktiva o deponijama otpada (1999/31/EC): Propisuje tehničke zahtjeve za odlaganje otpada, smanjuje količinu otpada koji se deponuje i zabranjuje odlaganje netretiranog otpada. Cilj je smanjenje deponovanja otpada na 10% do 2035. godine.

3. Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu (94/62/EZ): Upravlja ambalažnim otpadom kroz ciljeve za reciklažu i ponovnu upotrebu, uključujući ambalažu od stakla, plastike, papira i metala. Izmjenama kroz Direktivu (EU) 2018/852 postavljeni su ciljevi od 75% za reciklažu stakla do 2030. godine.

4. Direktiva o elektronskom i električnom otpadu (2012/19/EU): Reguliše sakupljanje, reciklažu i tretman električnog i elektronskog otpada, postavljajući obavezu za države članice da osiguraju infrastrukturu za sakupljanje i reciklažu ovog otpada.

5. Direktiva o otpadnim baterijama i akumulatorima (2006/66/EZ): Zabranjuje upotrebu opasnih materijala poput žive i kadmijuma u baterijama, te osigurava sistem za njihovo odvojeno sakupljanje i tretman.

6. Direktiva o spaljivanju otpada (2000/76/EC): Propisuje granične vrijednosti emisija i standarde za spaljivanje otpada, sa ciljem smanjenja negativnog uticaja na zdravlje i životnu sredinu.

7. Uredba (EZ) 1013/2006 o prekograničnom kretanju otpada: Reguliše transport otpada unutar EU i prema zemljama izvan EU, uključujući stroge procedure za transport opasnog otpada.

Novi zakonodavni okvir: „Paket o otpadu“ - „Paket o otpadu“ usvojen 2018. godine donosi ažurirane mjere za promovisanje cirkularne ekonomije, uključujući:

- Reciklažu najmanje 65% komunalnog otpada do 2035. godine.
- Smanjenje deponovanja na najviše 10% ukupnog otpada.
- Odvojeno sakupljanje biootpada do 2023. i tekstila do 2025. godine.

Ove mjere su osmišljene da podstaknu održivo upravljanje otpadom i kreiranje novih radnih mjesta u sektoru reciklaže.

Nacionalno zakonodavstvo i usklađenost sa EU direktivama - Za zemlje kandidate, poput Crne Gore, usklađivanje sa standardima Evropske unije predstavlja poseban izazov. Otvaranje pregovaračkog poglavlja 27, posvećenog zaštiti životne sredine i klimatskim promjenama, nameće obavezu sprovođenja brojnih zakonodavnih i praktičnih reformi u oblasti upravljanja otpadom. Srbija će morati da unaprijedi svoj pravni okvir i razvije efikasne sisteme za smanjenje, reciklažu i odlaganje otpada kako bi postigla traženi nivo usklađenosti.

Analiza pravnih izvora Evropske unije, izvještaja o njihovoj primjeni u državama članicama, te prakse Suda pravde Evropske unije pruža korisne smjernice za domaće zakonodavce. Ovi izvori omogućavaju prepoznavanje najboljih praksi i identifikaciju izazova, što može poslužiti kao osnova za unapređenje nacionalne politike upravljanja otpadom i postizanje ciljeva održivog razvoja [3].

3.2. Otpadno staklo

Jedna od ilustrativnih definicija pojma otpada glasi: „Otpad nije smeće.” Iako se u svakodnevnom govoru često poistovjećuju pojmovi otpada i smeća, sve više se prepoznaje važnost pravilnog postupanja s otpadom kako bi se spriječilo njegovo pretvaranje u smeće. Naime, otpad postaje smeće samo u slučaju neadekvatnog upravljanja ili neodgovornog ponašanja prema njemu [6]. U tom kontekstu, fizičke osobine otpada, poput gustine, imaju važnu ulogu u procesima prikupljanja, transporta i obrade. Gustina otpada, koja se odnosi na masu po jedinici zapremine, može znatno varirati u zavisnosti od vrste materijala i njihovog fizičkog stanja [7].

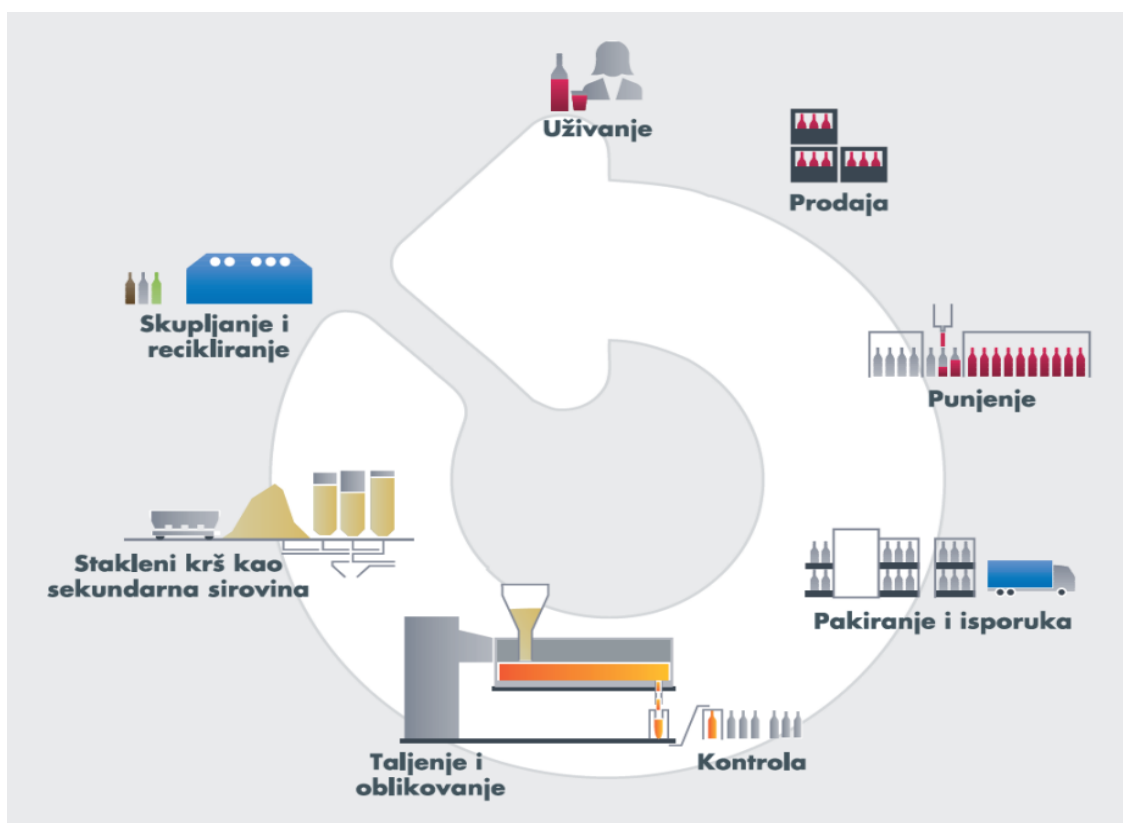
Problem je dodatno pojačan time što otpad može biti izvor zagađenja, ugroziti zalihe podzemnih voda, kao i kvalitet vazduha i zemljišta, te može poslužiti kao leglo vektora zaraznih bolesti.

Gustina otpadnog stakla - Gustina različitih komponenti otpada se značajno razlikuje i može se klasifikovati u nekoliko kategorija:

- **Nasipna gustina otpada (t/m^3):** Odnosi se na masu otpada po jedinici zapremine prije bilo kakvog zbijanja. Na primjer, ravno staklo ima nasipnu gustinu od približno $320 \text{ kg}/m^3$, dok šuplje staklo, poput boca, ima veće vrijednosti nasipne gustine, približno $510 \text{ kg}/m^3$ [7].

- **Zbijena gustina otpada (t/m^3):** Predstavlja masu otpada po jedinici zapremine nakon zbijanja, što omogućava efikasnije skladištenje i transport. Gustina se može povećati zbijanjem, čime se smanjuje volumen potrebnog skladišnog prostora [7].

Na slici 1 prikazan je kružni tok stakla u prirodi [8].



Slika 1. Kružni tok stakla u prirodi [8]

U Tabeli 1 dat je prikaz gustine pojedinih komponenti otpada u t/m³ [6].

TIP OTPADA	GUSTINA, t/m³
Papir	0,032–0,080
Tekstil	0,082–0,206
Organske materije	0,168–0,501
Šljaka i pepeo	0,320–0,961
Metali	0,048–1,100
Staklo	0,160–0,481
Plastika	0,032–0,128
Koža	0,096–0,256
Guma	0,066–0,192
Drvo	0,128–0,320

Tabela 1. Prikaz gustine pojedinih komponenti otpada u t/m³ [6]

Vrijeme razlaganja staklenog otpada - Staklo spada među materijale koji se praktično ne razlažu prirodnim putem. Dok se biološki otpad može razgraditi u roku od nekoliko mjeseci, staklene flaše ostaju u prirodi nepromijenjene hiljadama godina, što staklo čini dugotrajnom ekološkom prijetnjom ukoliko se ne reciklira pravilno. [9]

Za različite materijale vrijeme razlaganja značajno varira kao što se vidi na Tabeli 2.[9]

Tabela 2. Vrijeme razlaganja različitih materijala

Materijal	Vrijeme razlaganja
Hrana, cvijeće, organski materijali	1-2 nedjelje
Papir	10-30 dana
Pamučna odjeća	2-5 mjeseci
Drvo	10-15 godina
Konzerve, limenke	100-500 godina
Plastika, PET boce	Od nekoliko stotina do 1000 godina
Staklene flaše	Nikad

Promjene u strukturi otpada - Tokom posljednjih pedeset godina, struktura komunalnog otpada značajno se promijenila. Smanjen je udio mineralnih komponenti, poput pepela, dok se povećao udio papira, plastike i stakla. Ove promjene u sastavu komunalnog otpada su posljedica rastuće upotrebe ambalaže, posebno staklene, kao i povećane potrošnje gotovih prehrambenih proizvoda [9]. U ruralnim područjima, organski otpaci se često ponovo koriste, dok u urbanim sredinama dominira ambalaža raznih vrsta.

U Tabeli 3 dat je prikaz sastava komunalnog otpada u različitim državama, podijeljenim prema nivou prihoda: sa srednjim, visokim i niskim prihodima [6].

Tabela 3. Prikaz sastava komunalnog otpada u različitim državama, podijeljenim prema nivou prihoda: sa srednjim, visokim i niskim prihodima [6].

SASTAV								
Država		Zapaljivi				Nezapaljivi		
		Ostaci hrane	Papir	Plastika	Tekstil	Staklo	Građevinski otpad	Metal
Države sa srednjim prihodima	Indija	42	30	10.4	7	5	1.5	4.1
	Nepal	60	7.5	12	12	1.3	6.7	0.5
	Tajland	42.7	12.1	10.9	7.3	6.6	6.9	3.5
	Malezija	61.5	16.5	15.3	1.9	1.2	0.4	0.3
	Bangladeš	68.3	10.7	4.3	2.2	0.7	–	2
	Indonezija	70.2	10.9	8.7	6.2	1.7	-1.8	
	J. Koreja	32.8	23.8	0	40.6	2.8	–	0
	Filipini	49	19	17	9	–	–	6
	Poljska	35	18	11	20	12	–	4
	Kina	67.3	8.8	13.5	4.5	5.2	–	0.7
Prosjeak		53	15.2	10.5	10.1	4.0	6.7	2.4
Države sa visokim prihodima	Turska	43	7.8	14.2	23	6.2	0	5.8
	Japan	34	33	13	12	5	0	3
	USA	13.9	28.5	12.4	8.4	4.6	19.8	9
	UK	17.3	21.4	8.8	3.3	9	26.6	4
	Grčka	42	21	11	17	5.4	0	3.6
	Njemačka	21	31	10	17	16	0	5
	Danska	39	23	7	21	6	0	4
	Rusija	34.9	15	11.3	4.8	13.7	15.1	4.7
	Francuska	24	26	13	19	14	0	4
Prosjeak		29.9	23	11.2	13.9	8.9	6.8	4.8
Države sa niskim prihodima	Tanzanija	37	11	7	2	4	8	1
	Kenija	52	17.3	11.8	5.1	6.7	2.4	2.8
	Uganda	37.8	6.7	7.8	1.3	0.7	33.6	0.8
	Alžir	62	9	12	0	1	0	2
	Nigerija	47	6	10	7	7	18	5
	Gana	73	6.6	3.3	2.2	1.5	11.2	2.1
Prosjeak		51.5	9.4	8.7	2.9	3.5	17.3	2.3

Ova razlika u sastavu otpada može se povezati s ekonomskim razvojem, načinom života i navikama potrošača u različitim regijama.

Države sa srednjim prihodima - U ovoj grupi zemalja (Indija, Nepal, Tajland itd.), najveći udio u otpadu čine ostaci hrane (prosječno 53%). Ostali značajni udjeli uključuju papir (15,2%), plastiku (10,5%) i tekstil (10,1%). Nezapaljivi otpad, poput stakla (4%) i građevinskog otpada (6,7%), ima manji udio.

Države sa visokim prihodima - Zemlje poput SAD-a, Njemačke, Japana i Velike Britanije karakteriše veći udio papira (prosječno 23%) i plastike (11,2%) u otpadu, što ukazuje na viši nivo potrošnje proizvoda sa složenim ambalažnim materijalima. Ostaci hrane su znatno niži u odnosu na zemlje sa srednjim prihodima, čineći oko 29,9% otpada. Staklo (8,9%) i građevinski

otpad (6,8%) imaju veći udio u nezapaljivim materijalima, što ukazuje na bolje razvijene sisteme za odvojeno prikupljanje i reciklažu.

Države sa niskim prihodima - U zemljama sa niskim prihodima (Tanzanija, Kenija, Gana, itd.), ostaci hrane čine dominantan dio otpada (prosječno 51,5%), slično kao i u zemljama sa srednjim prihodima. Papir, plastika i tekstil su prisutni u nižim udjelima, dok građevinski otpad (17,3%) čini značajan dio nezapaljivog otpada. Metal i staklo su zastupljeni u nižim udjelima, što može odražavati nižu potrošnju proizvoda s tim materijalima.

Tabela 4. Prikaz osnovnih svojstva komunalnog otpada u razvijenim zemljama i zemljama u razvoju [6]

SVOJSTVA OTPADA		ZEMLJE	
		RAZVIJENE	ZEMLJE U RAZVOJU
Količina otpada po stanovniku	kg/dan	0,8–2,2	0,3–1,0
	t/god	0,3–0,8	0,1–0,4
Gustina	kg/m ³	100–200	200–500
Vlažnost	% mas.	20–40	40–80
Toplotna vrijednost	MJ/kg	8–12	3–10
Sastav:			
Papir, karton	% mas.	20 – 40	10–30
Staklo, keramika		4–10	1–10
Metali		3–13	1–5
Plastika		4 - 10	1–8
Koža, guma		1–5	1–5
Drvo, slama		1–5	1–5
Tekstil		2–5	1–10
Biootpad		20–50	40 - 85
Opasni otpad		0,5–3	0,5–1
Razni drugi inertni materijali		1–20	1–40

. Uočljive su razlike u količini otpada po stanovniku, gustini, vlažnosti, kao i toplotnoj vrijednosti otpada između ove dvije grupe zemalja. U razvijenim zemljama prosječna količina otpada po stanovniku kreće se od 0,8 do 2,2 kg dnevno, dok je u zemljama u razvoju ova vrijednost niža, između 0,3 i 1,0 kg dnevno. Gustina otpada u zemljama u razvoju je također znatno veća (200-500 kg/m³) nego u razvijenim zemljama (100-200 kg/m³), što ukazuje na razlike u sastavu i načinu prikupljanja otpada.

Sastav otpada se takođe razlikuje, gdje razvijene zemlje imaju veći udio reciklabilnih materijala poput papira i kartona (20-40%), dok zemlje u razvoju imaju značajan udio biootpada (40-85%). Udio stakla i keramike je relativno sličan u obje grupe zemalja, ali s manjim rasponom u razvijenim zemljama. Ovi podaci ukazuju na različite izazove u upravljanju otpadom, gdje su razvijene zemlje usmjerene na reciklažu i smanjenje otpada, dok zemlje u razvoju još uvijek imaju visok udio biorazgradivog otpada.

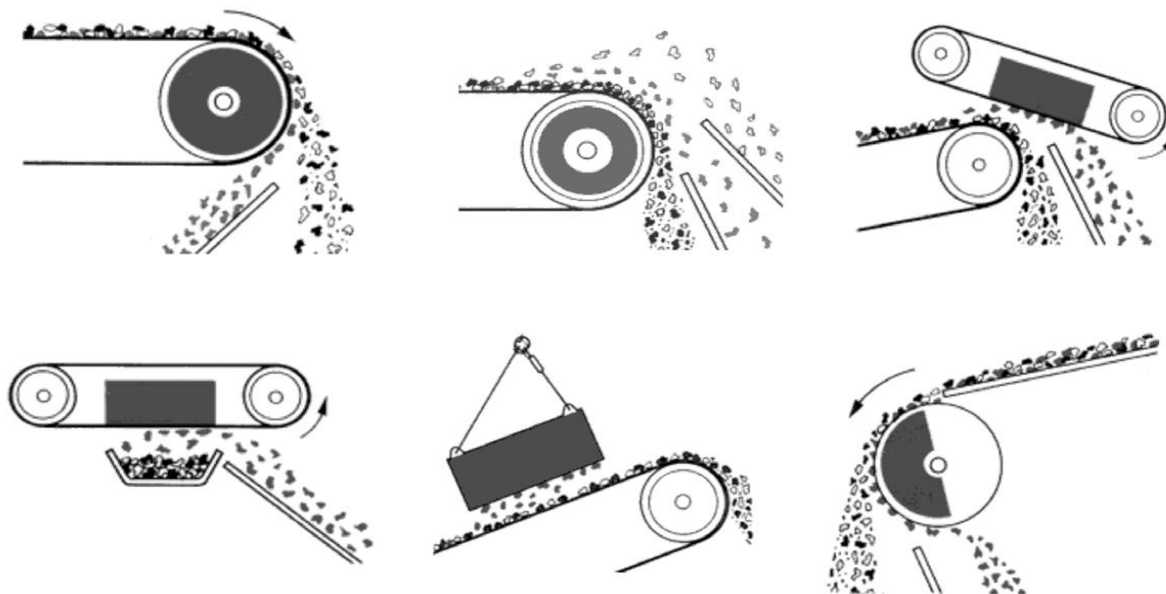
3.3. Separacija stakla

Tehnologije razdvajanja stakla igraju ključnu ulogu u optimizaciji reciklaže. Primarna svrha ovih tehnologija je da omoguće efikasno odvajanje staklenih materijala iz mješovitog otpada, uz očuvanje kvaliteta recikliranog stakla i smanjenje zagađenja. Sortiranje stakla može se obaviti ručno ili automatizovano uz korišćenje naprednih tehnologija, kao što su optika i magnetna separacija.

Optički senzori se koriste za razvrstavanje stakla po boji – što je ključni korak, jer različite boje stakla sadrže različite hemijske sastave, što utiče na kvalitet finalnog recikliranog proizvoda [10].

Magnetni separatori efikasno uklanjaju metalne nečistoće iz staklenih materijala, kao što su gvožđe i aluminijum, koji mogu ometati proces topljenja stakla i smanjiti njegov kvalitet. Nakon sortiranja i separacije, staklo se transportuje u drobilice kako bi se usitnilo na manje delove, čime se smanjuje volumen i olakšava dalja prerada. [10].

Slika 2 prikazuje konstrukciona rješenja magnetnih separatora [12].

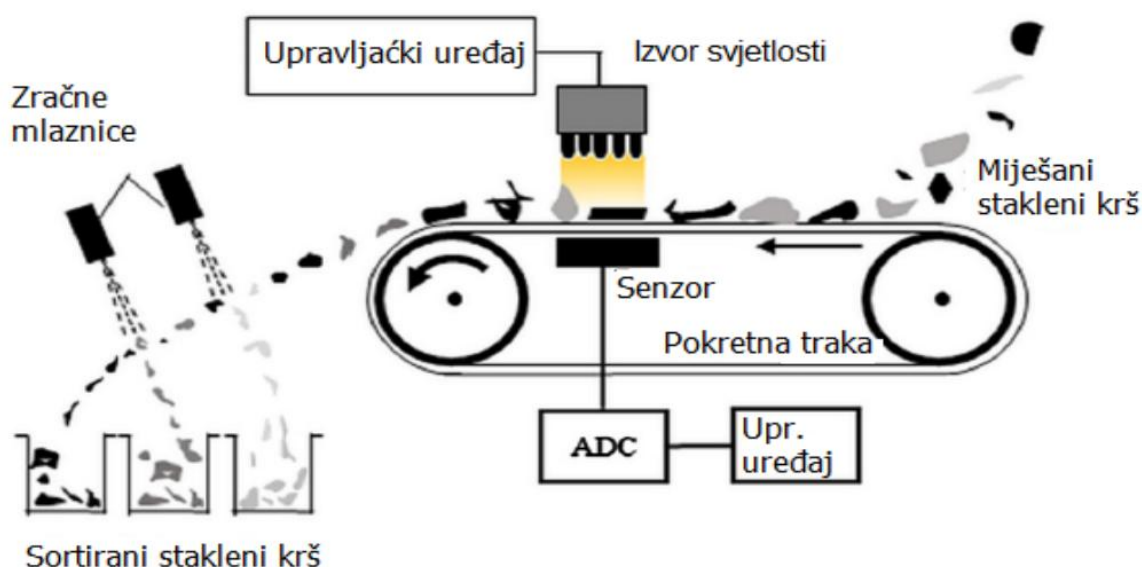


Slika 2. Konstrukciona rješenja magnetnih separatora [12]

Odvajanje nemagnetičnih materijala, kao što su aluminijumski čepovi i drugi metali koji ne reaguju na magnetno polje, koristi drugačiju tehnologiju koja se naziva separator vrtložnih struja. Ova tehnologija zasniva se na principu elektromagnetske indukcije, gdje rotirajući magnet stvara promjenjivo magnetsko polje koje uzrokuje pojavu vrtložnih struja u nemagnetičnim metalima. Te struje proizvode suprotno magnetsko polje, što dovodi do odbacivanja nemagnetičnih metalnih čestica s pokretne trake, odvajajući ih od staklenog krša.

Proces drobljenja, koji slijedi nakon sortiranja, predstavlja centralni korak u pripremi stakla za dalju preradu. Drobilice stakla su dizajnirane da izdrže velike mehaničke sile i habanje uzrokovano drobljenjem tvrdih materijala. Bujanj drobilice, napravljen od visoko otpornih čelika, omogućava dugoročnu upotrebu bez značajnog trošenja, dok mogućnost zamjene sita različitih veličina omogućava prilagođavanje granulacije drobljenog stakla prema specifičnim industrijskim potrebama. Efikasno drobljenje stakla ne samo da smanjuje zapreminu otpada, već i poboljšava transportnu logistiku i olakšava skladištenje, čime doprinosi ukupnoj ekonomičnosti reciklažnog procesa [10].

Princip optičkog sortiranja staklenog krša u vidljivom spektru svjetlosti prikazan je na slici 3 [12].



Slika 3. Princip optičkog sortiranja staklenog krša u vidljivom spektru svjetlosti [12]

Sljedeći korak u procesu je sušenje staklenog krša kako bi se omogućilo kvalitetnije sortiranje. Suvi stakleni krš prolazi kroz vibraciona sita koja razdvajaju čestice na osnovu njihove granulacije, čime se izdvajaju sitne frakcije manje od 7 mm, dok se veće čestice usitnjavaju na željenu veličinu od 7 do 60 mm. Nakon drobljenja, usitnjeni krš prolazi kroz dodatne faze obrade u kojima se lakši materijali, poput papira, etiketa i polimera, uklanjaju pomoću vazdušnog vrtloga ili ciklonskog separacionog uređaja [10].

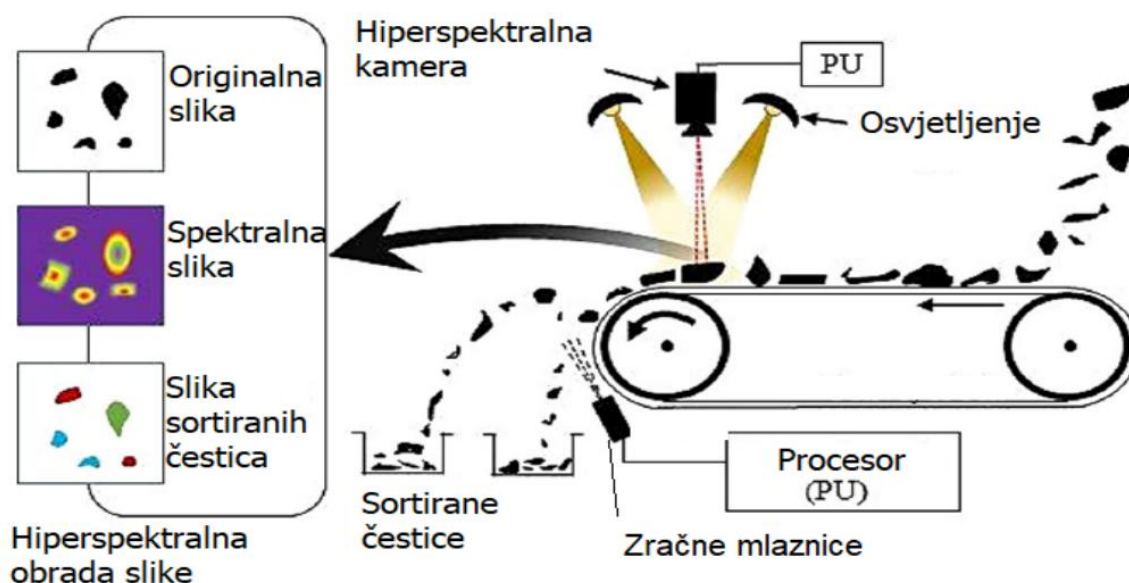
Optičko i spektralno sortiranje staklenog krša predstavlja automatizovan proces koji koristi kamere, lasere i hiperspektralne senzore za identifikaciju i razvrstavanje staklenih čestica po boji, veličini i hemijskom sastavu. Optički senzori detektuju boju stakla pomoću svjetlosnih izvora koji osvjetljavaju čestice dok prolaze pokretnom trakom, a senzori prate promjene u refleksiji svjetlosti [10]. Ova tehnologija omogućava precizno razvrstavanje, čak i u slučajevima kada čestice imaju naljepnice ili druge nečistoće.

Spektralno snimanje kombinovano s analizom hemijskog sastava predstavlja naprednu tehnologiju koja omogućava automatsko izdvajanje neželjenih materijala poput keramike, kamena i porculana, koji nisu pogodni za dalju upotrebu u proizvodnji staklenih ambalaža [29]. Ovaj proces koristi različite dijelove elektromagnetskog spektra, uključujući vidljivo, infracrveno i ultraljubičasto zračenje, kako bi se detaljno analizirale optičke i hemijske karakteristike materijala unutar staklenog krša.

Hiperspektralni uređaji igraju ključnu ulogu u ovom postupku, jer prikupljaju podatke kroz širok spektar elektromagnetskog zračenja, omogućavajući identifikaciju svake pojedinačne čestice s visokom preciznošću. Uređaji analiziraju refleksiju ili apsorpciju svjetlosti na različitim talasnim dužinama, što omogućava identifikaciju specifičnih hemijskih sastava materijala na osnovu njihovih jedinstvenih spektralnih otisaka. Na primjer, keramika, kamen i porculan imaju različita spektralna svojstva od stakla, što omogućava njihovo efikasno prepoznavanje i uklanjanje iz reciklažnog toka. [10].

Ova tehnologija takođe omogućava brzu analizu i sortiranje materijala dok se kreću na pokretnoj traci. Detekcija neželjenih čestica se vrši u milisekundama, nakon čega vazdušne mlaznice precizno izbacuju te čestice iz toka staklenog krša. Spektralno snimanje poboljšava kvalitet recikliranog stakla i optimizuje procese u reciklaži, osiguravajući da krajnji proizvod ispunjava sve standarde kvaliteta.

Na slici 4 prikazan je proces hiperspektralne separacije i obrade staklenog krša [12].



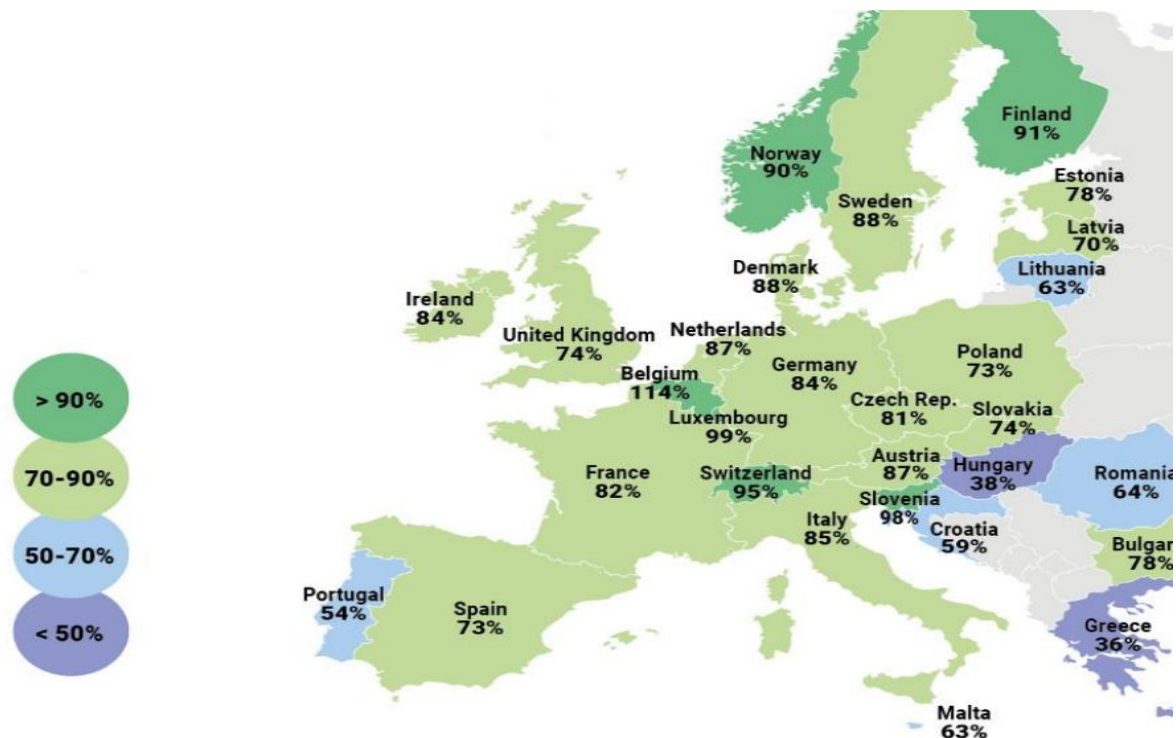
Slika 4. Prikaz procesa hiperspektralne separacije i obrade staklenog krša [12]

Cijeli sistem obrade staklenog krša uključuje i skladištenje gotovih frakcija stakla prema boji i granulaciji. Takođe, posebna pažnja posvećuje se zbrinjavanju otpada koji nastaje tokom procesa, što uključuje pravilno skladištenje i prodaju materijala preduzećima koja mogu iskoristiti ili adekvatno zbrinuti otpadne frakcije [12].

3.4. Tehnologija reciklaže stakla

Arheološki dokazi pokazuju da je praksa topljenja i ponovne upotrebe slomljenog stakla postojala već u drevnim vremenima, što potvrđuje održivost i dugotrajnu primjenjivost ove prakse. Zanimljivo je da su se čak i rimske vojne formacije bavile sakupljanjem slomljenog stakla za reciklažu, što ukazuje na značaj društvenih struktura u podršci reciklažnim praksama. U situacijama kada su sirovi materijali teško dostupni, reciklaža stakla postaje ekonomska nužnost, što naglašava strateški značaj reciklažnih postrojenja u modernom ekonomskom i ekološkom kontekstu .

Na slici 5 prikazana je stopa reciklaže staklenog otpada u Evropi u 2021. godini. [18]



Slika 5. Prikaz stope reciklaže staklenog otpada u Evropi u 2021. godini [18]

Iako se reciklaža stakla praktikuje od davnina, a staklene posude su redovno ponovo korišćene tokom devetnaestog i dvadesetog vijeka, današnja reciklaža u velikim razmjerama počela je tek sedamdesetih godina prošlog vijeka [13]. Prelazak sa moguće održivijeg i ekološki osvještenijeg ponovnog korišćenja stakla na "praktičniju" reciklažu desio se kroz promociju tehnoloških dostignuća i marketing. Ovaj prelazak bi se istorijski mogao interpretirati kao

nazadovanje uzrokovano promjenom kulture i dinamike potrošnje, što je simptomatično za našu "kulturu bacanja" [13]. Posljedica tog prelaska je da se danas staklo reciklira gotovo svuda u Evropi, u različitim obimima.

Savremene tehnologije reciklaže stakla igraju ključnu ulogu u smanjenju ukupne količine otpada i očuvanju prirodnih resursa. Količina staklenog otpada varira od zemlje do zemlje, ali reciklaža je u velikoj mjeri prihvaćena kao efikasna strategija za smanjenje deponijskog otpada, posebno u razvijenim zemljama. U Evropskoj uniji, reciklaža stakla je dostigla visok nivo, pri čemu su zemlje poput Švajcarske, Belgije, Finske i Njemačke već početkom 21. vijeka ostvarivale stope reciklaže od preko 90%, dok se zemlje u razvoju, poput Srbije i Bosne i Hercegovine, još uvijek suočavaju sa infrastrukturnim i organizacionim izazovima u upravljanju staklenim otpadom .

Savremeni pristupi reciklaži stakla obuhvataju dva osnovna procesa. Prvi proces se bazira na ponovnoj upotrebi neoštećenih staklenih predmeta, kao što su boce, nakon što su prošli kroz prikupljanje, sortiranje i pranje. Ipak, zbog visokih troškova i složenosti logistike, ovaj pristup je manje zastupljen u industrijskoj praksi. Drugi, dominantniji proces, uključuje izdvajanje svih staklenih materijala iz otpada, bez obzira na stepen oštećenja, te njihovo usitnjavanje u stakleni krš, koji se koristi za proizvodnju novih staklenih proizvoda [14].

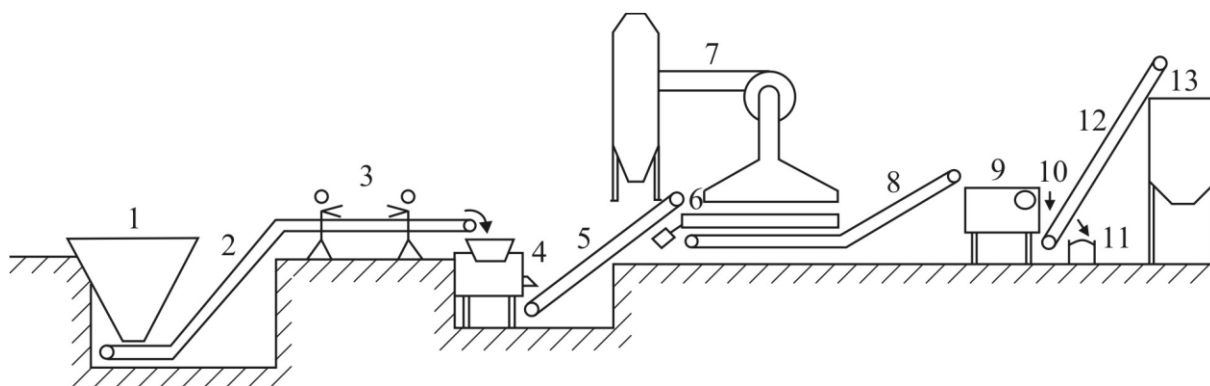
Tajna reciklabilnosti stakla leži u njegovim inherentnim termodinamičkim karakteristikama. Za razliku od glinenih keramika, koje su plastične i oblikovane na sobnoj temperaturi, a zatim pečene do čvrstoće na visokim temperaturama, staklo je čvrsto viskozna tečnost na visokim temperaturama, ali postaje kruto kada se ohladi. Može se ponovo zagrijati i omekšati u tečno stanje nekoliko puta kako bi se oblikovalo u nove forme, i upravo ova osobina ga čini idealnim materijalom za reciklažu [13]. U principu, staklo se može potpuno reciklirati neograničen broj puta bez gubitka svojih kvaliteta: ovo se naziva reciklažom "zatvorene petlje". Upotreba škriljca (drobljenog stakla) u proizvodnji novog stakla donosi tehničku prednost, jer snižava temperaturu topljenja, što doprinosi energetskej efikasnosti postrojenja za reciklažu. Osim toga, škriljac je znatno manje kontaminiran u odnosu na sirove materijale, što omogućava dobijanje čistijeg finalnog proizvoda .

Što se tiče količine ušteđenih resursa i energije, izračunato je da 1000 kg recikliranog stakla štedi 700 kg pijeska, 200 kg kreča i 200 kg sode; jedna staklena boca daje dovoljno energije da napaja sijalicu od 60 W tokom 4 sata, računar tokom 30 minuta ili televizor tokom 20 minuta .

Motivacije za reciklažu stakla uključuju ekološke i ekonomske razloge. S ekološke strane, istraživanje sprovedeno od strane Glass Packaging Institute pokazalo je da je krajnja destinacija recikliranog stakla važna za 75% ispitanika iz javnog sektora i 85% iz staklene industrije. Reciklaža stakla omogućava smanjenje količine otpada, štedi energiju i prirodne resurse te direktno doprinosi smanjenju zagađenja. Staklo ima omjer reciklaže 1:1, što znači da se reciklažom jedne staklene boce može stvoriti nova boca, obično za manje od 30 dana [16]. Potrošači su motivisani visokom efikasnošću reciklaže stakla u poređenju s plastikom, jer varijacije u sastavu plastike otežavaju proizvodnju konzistentnih plastičnih peleta iz recikliranih materijala.

Slične situacije javljaju se i u Sjedinjenim Američkim Državama. Na primjer, 2016. godine okrug Cobb u Džordžiji odlučio je da prestane sa prikupljanjem stakla u programu reciklaže, kao i opštine Spartanburg i Greenville u Južnoj Karolini, te Harrisburg u Pensilvaniji. Odluka je donesena jer su troškovi reciklaže stakla po toni počeli nadmašivati koristi [17].

Šema tehnološkog procesa reciklaže otpadnog stakla prikazana je na slici 6 [13].



Slika 6. Šema tehnološkog procesa reciklaže otpadnog stakla [13]

Tehnološka šema prikazuje proces separacije i reciklaže otpadnog stakla kroz nekoliko ključnih faza. Proces počinje unosom staklenog otpada u 1-usipnik, odakle se transporterom (2) prenosi na pokretnu traku za ručno odstranjivanje nečistoća kao što su keramika, kamenje i plastika (3). Nakon ovog koraka, staklo se drobi pomoću 4-droblilice, a potom se transporterom (5) prenosi do 6-vibracionog sita, gde se čestice razvrstavaju prema veličini.

Iz stakla se potom uklanjaju papir i ostali laki materijali putem specijalnih uređaja za odvajanje (7), dok ga 8-transporter dalje prenosi do 9-separatora metalnih predmeta, gde se magnetnim postupkom uklanjaju metalne nečistoće. Na kraju procesa, čisto usitnjeno staklo (10) odlaže se pomoću 12-transportera u 13-skladište, spremno za dalju upotrebu ili preradu, dok se izdvojeni metalni materijali skladište odvojeno [10]. Ovaj proces omogućava efikasnu reciklažu stakla i smanjenje otpada na deponijama.

Iako je reciklaža stakla efikasan način za smanjenje otpada, postoje određeni tehnički izazovi i ograničenja koja utiču na ovaj proces. Kvalitet i čistoća prikupljenog stakla igraju ključnu ulogu u određivanju njegove upotrebljivosti. Na primjer, staklo koje sadrži nečistoće ili je pomiješano s drugim materijalima može biti teže obraditi, što smanjuje efikasnost reciklaže i povećava troškove.

Još jedan izazov je tzv. *downcycling*, odnosno degradacija kvaliteta prilikom reciklaže. Kod nekih materijala, poput papira i plastike, ponovna upotreba može smanjiti kvalitet materijala, ali kod stakla to nije slučaj. Međutim, određeni tipovi stakla, poput kaljenog ili stakla s visokim sadržajem olova, mogu biti izazovni za reciklažu jer zahtijevaju specifične procese odvajanja i obrade [18].

Indikatori uspješnosti recikliranja [14] - Uspješnost recikliranja se mjeri kroz nekoliko indikatora:

- Stopa reciklaže: Količina materijala oporavljenog iz toka otpada.
- Efikasnost recikliranja: Odnos recikliranog materijala i ukupnog otpada.
- Reciklirani sadržaj: Udio recikliranih materijala u proizvodnom procesu.

Reciklaža staklenog otpada ne doprinosi samo očuvanju životne sredine, već ima i značajan ekonomski i društveni uticaj. Prvo, smanjuje troškove proizvodnje jer proizvodnja staklenih proizvoda od recikliranog materijala zahtijeva manje energije nego proizvodnja iz primarnih sirovina. Prema nekim procjenama, recikliranje stakla može smanjiti energetske potrebe za čak 30% u poređenju sa proizvodnjom iz osnovnih materijala .

Osim toga, reciklaža stakla stvara mogućnosti za nova radna mjesta, posebno u sektorima prikupljanja, sortiranja i prerade otpada. U skladu s tim, pravilno upravljanje otpadom i povećanje stope reciklaže mogu doprinijeti razvoju lokalne ekonomije, jer kompanije koje se bave reciklažom obezbjeđuju zapošljavanje, ali i pomažu u smanjenju uvoza sirovina. U

zemljama koje uspješno implementiraju cirkularnu ekonomiju, reciklaža postaje ključna komponenta ekonomskog rasta i ekološke održivosti .

3.5. Ekonomski i ekološki efekti reciklaže stakla

Reciklaža stakla donosi višestruke ekonomske i ekološke koristi. Ekološke prednosti uključuju smanjenje emisija CO₂, očuvanje prirodnih resursa i smanjenje opterećenja na deponije [20]. Recikliranje stakla može smanjiti potrošnju energije u proizvodnji novog stakla za 4-22%, dok reciklaža jedne tone stakla može uštedjeti do 30 tona nafte [12]. Procesi reciklaže stakla podrazumijevaju korišćenje staklenog otpada u proizvodnji smanjuje potrebu za primarnim sirovinama i energijom, dok se emisije štetnih gasova smanjuju za oko 20% [12].

Reciklažom jedne tone staklenog otpada može se uštedjeti približno [19]:

- 30.000 tona staklenog pijeska
- 100.000 tona sode
- 6.000 tona lož-ulja
- 18.000 MWh električne energije
- 76 miliona kubnih metara prirodnog gasa.

Ove uštede ne samo da imaju pozitivan ekološki učinak već predstavljaju i ekonomski dobitak za industriju stakla i značajno smanjuje količina otpada na deponijama [12]. Finansijska održivost reciklaže stakla može biti problematična u pojedinim regionima, gdje su troškovi obrade recikliranog stakla veći nego proizvodnja novog staklenog materijala [19]. U takvim slučajevima, saradnja između vlada, industrije i lokalnih zajednica može pomoći u stvaranju subvencionih programa ili poreskih olakšica kako bi se stimulisala reciklaža i smanjile finansijske prepreke. Korišćenjem recikliranog stakla kao sirovine, industrija stakla smanjuje zavisnost od skupljih primarnih materijala poput pijeska i sode.

Reciklaža stakla otvara nova radna mjesta u sektorima koji se bave prikupljanjem, obradom i ponovnom upotrebom staklenih proizvoda [19]. Ovaj proces stvara lanac vrijednosti koji uključuje potrošače, reciklažne centre i proizvođače stakla, čime se dodatno doprinosi ekonomskoj stabilnosti industrije.

Ekološke prednosti reciklaže stakla :

- Smanjenje upotrebe prirodnih resursa – Reciklirano staklo koristi znatno manje prirodnih sirovina, kao što su kvarcni pijesak, soda i kreč. Smanjenje emisija gasova – Topljenje recikliranog stakla zahtijeva niže temperature u poređenju sa primarnim sirovinama, što smanjuje emisiju CO₂ i drugih štetnih gasova. Osim toga, reciklažom stakla smanjuje se zagađenje vazduha za 20%, dok potrošnja sirove vode u procesu proizvodnje stakla opada za čak 50% . Ovi benefiti su posebno značajni u kontekstu globalnih napora za očuvanje prirodnih resursa i borbu protiv klimatskih promjena. [19]

- Ušteda energije – Korišćenje recikliranog stakla smanjuje energetske potrošnje u procesu proizvodnje za do 25%. Ušteda energije koja proizlazi iz reciklaže stakla predstavlja jedan od ključnih faktora za njegovu održivu upotrebu. Stakleni krš topi se na znatno nižim temperaturama u poređenju sa primarnim sirovinama kao što su kvarcni pijesak, soda i kreč. Smanjenje potrebne energije direktno smanjuje emisije ugljen-dioksida i drugih gasova staklene bašte, čime reciklaža postaje ne samo ekonomski isplativa već i ekološki neophodna. [20].

- Smanjenje otpada na deponijama – Staklo čini značajan dio komunalnog otpada, a njegovo recikliranje direktno smanjuje pritisak na deponije i pomaže u očuvanju prostora [12].

- Inovacije u procesu ponovnog korišćenja stakla - Savremene tehnologije reciklaže stakla, osim što omogućavaju smanjenje otpada i uštedu resursa, takođe doprinose inovacijama u procesu ponovnog korišćenja stakla, čineći ga ekonomičnijim i ekološki prihvatljivijim. U razvijenim zemljama, primjena naprednih metoda razdvajanja i drobljenja staklenog otpada omogućila je dostizanje stopa reciklaže koje prelaze 90%, što značajno smanjuje količinu otpada na deponijama i doprinosi zaštiti životne sredine. Nasuprot tome, zemlje u razvoju još uvijek se suočavaju s izazovima vezanim za infrastrukturu, organizaciju prikupljanja otpada i implementaciju odgovarajućih tehnologija [20].

Reciklirano staklo nalazi široku primjenu u različitim industrijama. Pored očigledne primjene u proizvodnji novih staklenih posuda, koristi se i u građevinskoj industriji, na primjer u izradi stakleno-betonskih panela i mozaik pločica, koji su popularni u bazenima i drugim dekorativnim površinama . Takođe, stakleni krš se koristi u proizvodnji izolacione staklene vune, koja doprinosi termoizolaciji zgrada i smanjenju potrošnje energije [20]. Ova vrsta izolacije predstavlja važan doprinos smanjenju energetske potrošnje, čime se dodatno smanjuju emisije štetnih gasova.

Stakleni krš nalazi primjenu i kao peleti za prečišćavanje vode, materijal u proizvodnji šmirgl papira, te kao dodatak hidroizolacionim materijalima [21]. U građevinskoj industriji, supersol, inovativan proizvod dobijen reciklažom stakla, koristi se u različitim konstrukcijama, uključujući arhitekturu i poljoprivredu [21]. Ove primjene ukazuju na značaj reciklaže stakla za očuvanje životne sredine, ali i za razvoj industrije, s obzirom na mogućnost ponovnog korišćenja materijala u različitim procesima.

3.6. Budućnost reciklaže stakla

Budućnost reciklaže stakla obećava dalji tehnološki napredak i inovacije koje će dodatno povećati efikasnost i smanjiti troškove reciklažnih procesa. Automatizovane linije za sortiranje otpada, napredni sistemi za upravljanje otpadom, kao i energetske efikasne peći za topljenje stakla, samo su neke od inovacija koje će igrati ključnu ulogu u poboljšanju održivosti ovog procesa [22].

Pored tehnoloških unapređenja, budućnost reciklaže zavisi i od uspostavljanja adekvatnog zakonskog okvira koji će podržati ove napore. Uvođenje strožih propisa o upravljanju otpadom i podsticanje primjene cirkularne ekonomije kroz subvencije i poreske olakšice može dodatno stimulirati rast tržišta za reciklirano staklo (29). Takve inicijative već su dovele do visokih stopa reciklaže stakla u zemljama poput Njemačke, Švajcarske i Belgije, koje su postavile standarde za druge države koje žele smanjiti svoj ekološki uticaj i postići ciljeve održivog razvoja [23].

Jedan od najvažnijih tehnoloških napredaka odnosi se na optimizaciju temperature topljenja recikliranog stakla. Naime, stakleni krš se topi na nižim temperaturama nego primarne sirovine, što omogućava značajne uštede energije [23].

Iako reciklaža stakla donosi brojne prednosti, ona se suočava s određenim izazovima koji utiču na efikasnost i održivost procesa. Visoki troškovi sakupljanja i transporta staklenog otpada, posebno u ruralnim i manje razvijenim područjima, predstavljaju prepreku za efikasno sprovođenje reciklažnih programa. Ove prepreke povećavaju operativne troškove i smanjuju ekonomsku isplativost reciklaže, naročito kada je riječ o fragmentisanom tržištu reciklaže.

Takođe, problem predstavlja i nedovoljna ekološka svijest kod potrošača, što otežava pravilno razvrstavanje staklenog otpada po boji i vrsti. U praksi, to može dovesti do zagađenja staklenog krša drugim materijalima, što povećava troškove daljeg procesa obrade. [24]

4. Analiza mogućnosti reciklaže stakla u Crnoj Gori

Upravljanje otpadom je jedan od ključnih ekoloških i ekonomskih izazova u savremenom društvu, sa velikim značajem za održivi razvoj i očuvanje životne sredine. Globalni trendovi i međunarodne politike, posebno Evropske unije (EU), sve više podstiču prelazak na cirkularnu ekonomiju koja se temelji na efikasnom korišćenju resursa, reciklaži i smanjenju količine otpada. Cirkularna ekonomija omogućava produženje životnog ciklusa proizvoda, smanjenje upotrebe novih sirovina i minimiziranje negativnog ekološkog uticaja. Evropska unija kroz svoje direktive, kao što je Direktiva 2008/98/EC, promoviše upravljanje otpadom koje uključuje smanjenje, ponovnu upotrebu, reciklažu i energetska iskorišćavanje otpada.

Crna Gora, kao zemlja koja teži članstvu u EU, suočava se sa potrebom usklađivanja svog zakonodavstva i praksi sa evropskim standardima. Ovo uključuje unapređenje sistema upravljanja otpadom, povećanje stope reciklaže i razvoj infrastrukture za odvojeno sakupljanje otpada. Poseban akcenat stavljen je na tretman specifičnih tokova otpada, kao što su stakleni otpad i staklena ambalaža. Staklo, kao materijal koji se može neograničeno reciklirati bez gubitka kvaliteta, predstavlja značajan potencijal za smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu i resurse, dok istovremeno pruža mogućnost za ekonomsku korist kroz ponovnu upotrebu i prodaju recikliranih materijala [25].

Trenutno, sistem upravljanja staklenim otpadom u Crnoj Gori suočava se s brojnim izazovima, uključujući nedostatak razvijene infrastrukture za reciklažu i nisku svijest javnosti o značaju reciklaže stakla. Ove prepreke otežavaju postizanje ciljeva koje propisuje zakonodavstvo i ograničavaju efikasnost sistema upravljanja otpadom. Cilj ovog rada je da pruži sveobuhvatnu analizu trenutnog stanja upravljanja staklenim otpadom u Crnoj Gori, identifikuje ključne pravne i institucionalne prepreke, istraži tehničke mogućnosti za unapređenje reciklaže, i ponudi ekonomske analize i preporuke koje bi mogle poboljšati sistem upravljanja staklenim otpadom.

4.1. Recentna istraživanja

Reciklaža u savremenim kontekstima predstavlja smanjenje otpada i emisije CO₂, uštedu energije i sirovina. Simić i saradnici naglašavaju značajnu ulogu fabrike za recikliranje stakla u čišćenju životne sredine. U razvijenim zemljama, reciklaža stakla funkcioniše kroz sistem povrata depozita, gdje potrošači mogu vratiti staklenu ambalažu maloprodajnim objektima ili mjestima za reciklažu i zauzvrat dobiti novac. Ovaj sistem ne samo da smanjuje količinu otpada i štedi energiju, već i materijalno obogaćuje društvo, doprinoseći očuvanju planete za buduće generacije [25].

Prema istraživanja [22], više od polovine ispitanika ima mogućnost prikupljanja stakla putem programa za odlaganje, dok skoro 50% koristi programe jednog toka. Oko polovine ispitanika smatra da bi troškove prikupljanja i obrade reciklabilnog materijala trebalo dijeliti između svih članova lanca reciklaže, koji uključuje potrošače, reciklažne centre, prerađivače recikliranog stakla i proizvođače staklenih ambalaža. Potrošači kupuju proizvode u staklenim posudama, koje se zatim prikupljaju u reciklažnim centrima. Nakon razvrstavanja po bojama, prerađivači recikliranog stakla pripremaju materijal za proizvođače ambalaže, čime se ciklus zatvara [22].

Suprotno tome, u Crnoj Gori zemlji trenutno ne postoji organizovana reciklaža stakla. Autori studije "Tehnologija reciklaže" predviđaju da bi, uz primjenu odgovarajućih mjera i razvijanje svijesti o njenom značaju, reciklaža stakla u nekoj znatnijoj mjeri mogla biti pokrenuta u bližoj budućnosti. Ovo bi moglo dovesti do postavljanja kontejnera za staklo u našim zajednicama, umjesto ili pored postojećih kontejnera koji trenutno ne doprinose reciklaži na efikasan način [21].

U Hrvatskoj se ukupno, odnosno oko dvije trećine svih staklenih boca (što je približno 30 milijardi) reciklira svake godine. Agencija za zaštitu okoline Hrvatske je 2012. godine izmjerila da hrvatski građanin u prosjeku proizvede 390 kg komunalnog otpada godišnje, što je 102 kg manje od prosjeka za EU. Nažalost, samo oko 16% ovog otpada se reciklira, a oko 7% recikliranog ukupnog otpada je staklo. U Hrvatskoj postoje samo dvije kompanije koje recikliraju staklo, ali reciklaža se regionalno podstiče kroz sistem povrata depozita za PET i staklene boce koje se mogu vratiti u prodavnicu, tačku za otkup ili reciklažna dvorišta. Međutim, trendovi reciklaže stakla u Hrvatskoj stalno rastu, s manje od 800 tona u 2012. do skoro 1200 tona u 2015. godini [19].

U Srbiji, istraživanje dr. Bobana Cvetanovića i dr. Petra Đekića [14], objavljeno u okviru projekta "Primjena koncepta zelenih praksi u razvoju programskih sadržaja – GREENP EDU Ministarstva prosvjete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije", naglašava značajne benefite reciklaže. Među ključnim prednostima su energetske uštede, smanjenje troškova i opterećenja deponija, kao i smanjenje zagađenja. Konkretno, reciklažom stakla ostvaruje se ušteda energije od 4 do 31%, smanjenje zagađenja vazduha za 20% i zagađenja vode za 76%, te potrošnje vode za 50%. Ovi podaci ističu važnost razvoja efikasnih reciklažnih tehnologija kao ključnog elementa za održivu budućnost.

Sve veća svijest o reciklaži stakla ubrzava inspekcije o upotrebi otpada stakla u različitim oblicima u raznim oblastima. Jedan od njegovih značajnih doprinosa je u građevinskom sektoru, gdje je otpad stakla ponovo korišćen za proizvodnju betona. [20]. U istraživanju su ispitivana svojstva betona u kojima je otpadna staklena prašina korišćena kao djelimična zamjena za pijesak u betonskim mješavinama u razmjerama od 10%, 20% i 50%. Upoređena je čvrstoća na pritisak betona starog 7, 14 i 28 dana sa betonom napravljenim od prirodnih finih agregata. Rezultati su pokazali da je najveća čvrstoća postignuta upotrebom otpadne staklene prašine nakon 28 dana. Čvrstoća pri pritisku uzoraka sa 10% sadržaja otpadne staklene prašine iznosila je 32.9373 MPa, što je više od kontrolnog uzorka betona nakon 28 dana. Korišćenje otpadne staklene prašine u betonu predstavlja zanimljivu mogućnost za ekonomiju na odlagalištima otpada i očuvanje prirodnih resursa [12].

U studiji "Economic study on recycling of building glass in Europe" [25] istraživane su ekonomske i ekološke prednosti reciklaže građevinskog stakla, a posebno se naglašava značaj kvantifikacije staklenog otpada koji nastaje tokom renoviranja i rušenja zgrada. U 2013. godini, u EU-28 je proizvedeno oko 1.5 miliona tona ovog otpada, s većim udjelom iz stambenog sektora. Reciklaža ovog materijala donosi značajne ekološke benefite, uključujući smanjenje emisije CO₂ i uštedu sirovina, gdje recikliranjem jedne tone stakla možemo uštedjeti 1.2 tone sirovina i smanjiti emisiju CO₂ za 300 kg. [25] Osim toga, primjena recikliranog stakla u građevinarstvu može značajno smanjiti količinu otpada na deponijama, što dovodi do godišnje uštede od oko 925,000 tona otpada i 1.23 miliona tona primarnih sirovina. Kako bi se maksimizirale ekonomske i ekološke koristi, preporučuje se razvoj lokalnih i regionalnih inicijativa za reciklažu, umjesto uspostavljanja centralizovanog sistema na nivou cijele EU, čime se dodatno smanjuju troškovi transporta i povećava efikasnost reciklažnog procesa. [25]

4.2. Pravni i institucionalni okvir

Pravni okvir za upravljanje otpadom u Crnoj Gori zasnovan je na Zakonu o upravljanju otpadom („Sl. list CG“, 34/24), koji definiše otpad kao svaku materiju ili predmet koji je njegov imalac odbacio ili namjerava da odbaci. Ovaj zakon postavlja osnovu za aktivnosti upravljanja otpadom, uključujući prikupljanje, transport, obradu, reciklažu i odlaganje otpada.

Zakon je usklađen sa relevantnim evropskim direktivama, poput Direktive 2008/98/EC o otpadu, koja propisuje hijerarhiju upravljanja otpadom s ciljem smanjenja njegovog negativnog uticaja na životnu sredinu. Hijerarhija se sastoji od smanjenja otpada na izvoru, ponovne upotrebe, reciklaže, energetske upotrebe otpada i odlaganja kao posljednje opcije. Ove smjernice omogućavaju Crnoj Gori da postepeno usklađuje svoje propise sa zahtjevima EU, čime se unaprjeđuje održivo upravljanje resursima.

Dodatni značajan pravni dokument je Uredba o upravljanju ambalažnim otpadom, koja je usklađena sa Direktivom o ambalaži i ambalažnom otpadu, a koja propisuje ciljeve za reciklažu različitih vrsta ambalažnog otpada, uključujući staklo. Cilj ovih propisa je smanjenje ukupne količine ambalažnog otpada i povećanje stope reciklaže, što je ključni korak ka prelasku na cirkularnu ekonomiju. Prema Državnom planu upravljanja otpadom za period 2024-2028. godine, planirano je povećanje stope reciklaže staklene ambalaže na najmanje 30% do 2028. godine, sa daljim ciljem od 50% do 2030. godine [26].

Institucionalni okvir za upravljanje otpadom u Crnoj Gori uključuje više tijela sa različitim odgovornostima za implementaciju zakona i strategija.

- Ministarstvo ekologije, prostornog planiranja i razvoja sjevera je odgovorno za razvoj politika, usklađivanje sa evropskim standardima i donošenje pravnih akata koji se odnose na upravljanje otpadom. Ovo ministarstvo vodi glavnu riječ u formulisanju strategija za zaštitu životne sredine, uključujući tretman staklenog otpada, i sprovodi inicijative za povećanje stope reciklaže.

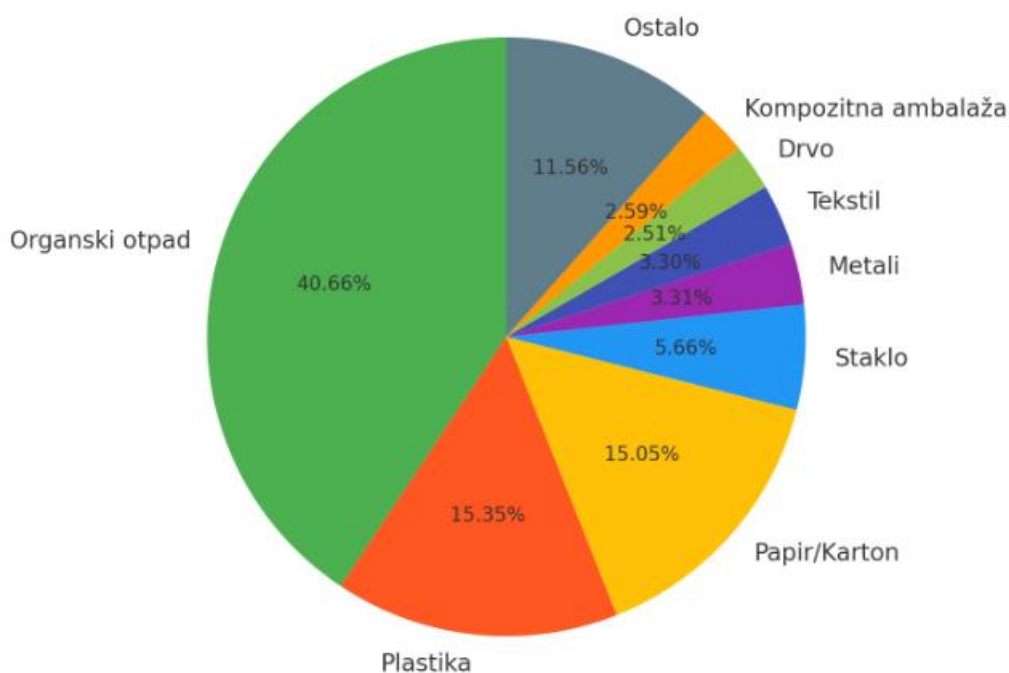
- Lokalne samouprave imaju operativnu ulogu u upravljanju komunalnim otpadom, što uključuje organizaciju sakupljanja, transporta i privremenog skladištenja otpada. One sarađuju sa javnim komunalnim preduzećima i privatnim firmama kako bi omogućile efikasno sakupljanje i tretman staklenog otpada na lokalnom nivou.

- Agencija za zaštitu životne sredine Crne Gore ima ključnu ulogu u nadzoru nad sprovođenjem zakona o upravljanju otpadom, uključujući monitoring podataka o generisanju i tretmanu otpada. Agencija je odgovorna za prikupljanje informacija o vrstama i količinama otpada, kao i za izdavanje dozvola za tretman i reciklažu otpada.

4.3. Trenutno stanje i izazovi u upravljanju staklenim otpadom u Crnoj Gori

Količina otpada koja se generiše u Crnoj Gori zavisi od više faktora, uključujući stepen urbanizacije, intenzitet turističkih aktivnosti, demografske karakteristike i ekonomsku dinamiku. Ovi faktori direktno oblikuju strukturu otpada, njegov obim i specifičnosti upravljanja.

Na slici 7 prikazan je sastav komunalnog otpada u Crnoj Gori za 2021. godinu.



Slika 7. Prikaz sastava komunalnog otpada u Crnoj Gori za 2021. godinu

Prema podacima MONSTAT-a, Crna Gora je u 2023. godini imala 616.177 stanovnika, od kojih 65,7% živi u urbanim područjima, dok 34,3% živi u ruralnim zajednicama. Urbanizovana područja, poput Podgorice, generišu prosječno 534,4 kilograma otpada po

stanovniku godišnje, dok je ta brojka za ruralne krajeve 374,1 kilogram. Turisti, koji predstavljaju značajan segment populacije tokom ljetnjih mjeseci, godišnje generišu približno 694,7 kilograma otpada po osobi, što stvara dodatni pritisak na infrastrukturu za upravljanje otpadom, naročito u primorskim opštinama kao što su Budva, Kotor i Herceg Novi.

U Crnoj Gori, staklo čini oko 5,7% ukupnog komunalnog otpada, što iznosi približno 18.433 tone godišnje ili 27,9 kilograma po glavi stanovnika. Glavni izvori staklenog otpada su domaćinstva, ugostiteljski sektor i turističke aktivnosti. Projekcije ukazuju na povećanje ovog udjela na 6,66% do 2030. godine, što bi značilo generisanje 24.181 tone staklenog otpada godišnje. Ovaj rast dodatno podvlači potrebu za efikasnijim sistemima reciklaže.

Analiza strukture otpada prikazuje dominaciju organskog otpada (40,7%), plastike (15,3%) i papira (15,1%) u ukupnoj masi, dok staklo zauzima četvrto mjesto. Ovako složena struktura zahtijeva precizno planiranje i implementaciju strategija za reciklažu, uz poseban fokus na staklo, s obzirom na njegove specifične osobine i mogućnost beskonačnog recikliranja.

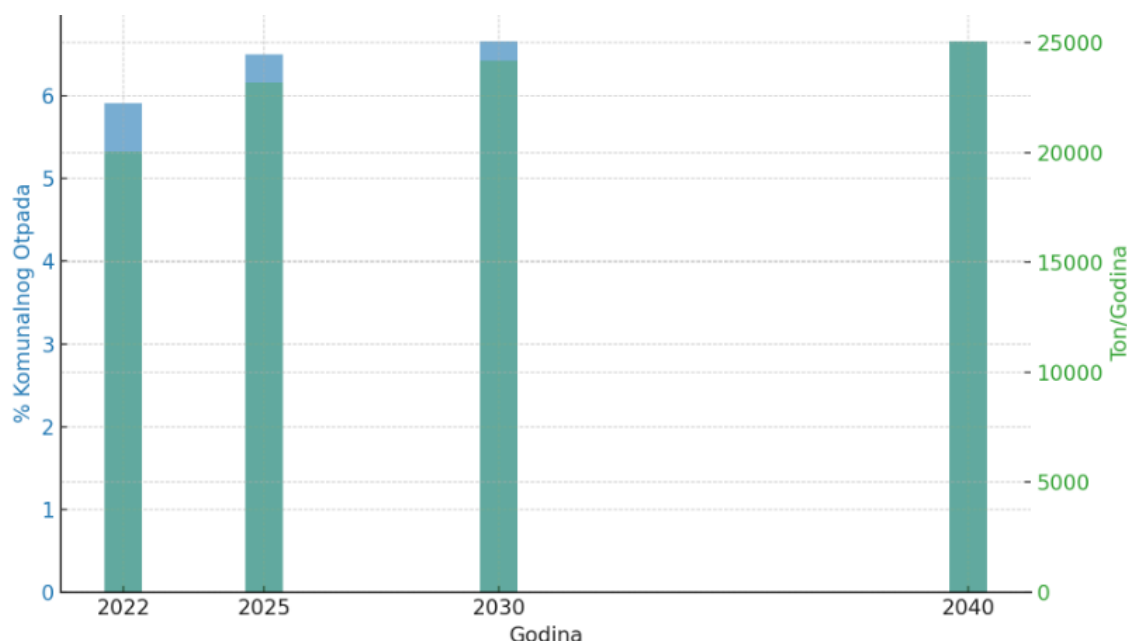
U Tabeli 7 je dat prikaz količina skupljenog komunalnog otpada (2019-2023) uključujući otpad prikupljen od strane javnih komunalnih preduzeća (JKP) i drugih izvora, količinu otpada po glavi stanovnika (kg/dan), kao i pokrivenost stanovništva uslugom sakupljanja otpada u periodu od 2019. do 2021. godine.[39].

Tabela 7. Prikaz količina skupljenog komunalnog otpada za period (2019.-2023. godina)

Godina	Ukupna količina komunalnog otpada (tone)	Količina sakupljena od strane JKP (tone)	Sakupljeno od drugih (tone)
2019	322567.9	308103.6	14464.3
2020	287315.9	273742.5	13573.4
2021	308904.2	293294.3	15609.9
2022	335797.6	314612.4	6527.1
2023	360136.8	330844.2	11386.7

Do 2025. godine, očekuje se povećanje udjela staklenog otpada na 6,50%, sa ukupno 23.176 tona godišnje. Do 2040. godine, ukupna količina staklenog otpada mogla bi dostići 25.055 tona godišnje (slika 8). Ove projekcije naglašavaju važnost unapređenja reciklažnih kapaciteta kako bi se osigurala održivost sistema upravljanja otpadom.

Takođe, sa dijagrama na slici 8 [27] se vidi da sa projekcijama za 2022. godinu, udio stakla u ukupnom komunalnom otpadu iznosi 5.91%, što je ekvivalentno 20,034 tona godišnje.



Slika 8. Prikaz udjela staklenog otpada za 2022., 2025., 2030. i 2040. godinu

Analiza generisanja i sastava otpada u Crnoj Gori ukazuje na značajne izazove, ali i prilike za optimizaciju sistema upravljanja otpadom, naročito kroz unapređenje reciklaže staklenog otpada. Ovi podaci pružaju osnovu za strateško planiranje i implementaciju mjera usklađenih sa ciljevima održivog razvoja.

Crna Gora, kao atraktivna turistička destinacija, bilježi značajno povećanje otpada tokom ljetnje sezone, kada se u zemlji zabilježi oko 1,5 miliona stranih posjetilaca sa ukupno 9,5 miliona noćenja. Povećana potrošnja, naročito proizvoda pakovanih u staklenim ambalažama, dovodi do rasta staklenog otpada, što naglašava potrebu za efikasnim sistemima prikupljanja i reciklaže. Tokom ovog perioda, izazov za lokalne zajednice je kako optimizovati prikupljanje otpada i spriječiti njegovo nekontrolisano odlaganje.

Distribucija generisanja otpada u Crnoj Gori varira po regionima. Glavni grad Podgorica proizvodi oko 28% ukupnog otpada, dok primorske opštine, zbog sezonskog turističkog priliva, doprinose sa 31%. Ove razlike zahtijevaju specifične pristupe, prilagođene potrebama svake regije, naročito kada je riječ o prikupljanju i obradi staklenog otpada, koji ima visok potencijal za reciklažu.

Prema podacima iz Državnog plana upravljanja otpadom za period 2024–2028.godine [26] procjenjuje se da je oko 95% staklenog otpada u Crnoj Gori pogodno za reciklažu, što predstavlja 11.981 tonu godišnje. Međutim, nedostatak adekvatne infrastrukture i logistike ograničava kapacitete reciklažnih sistema.

U Crnoj Gori upravljanje staklenim otpadom suočava se s brojnim infrastrukturnim izazovima. [27]. Trenutna infrastruktura obuhvata tri ključne transfer stanice i nekoliko reciklažnih centara koji se nalaze u Podgorici, Herceg Novom i Kotoru. Ove transfer stanice omogućavaju konsolidaciju manjih količina otpada i njihov transport do reciklažnih centara na efikasniji način, smanjujući troškove prevoza i omogućavajući bolju logistiku. Reciklažni centri u ovim gradovima specijalizovani su za obradu različitih reciklabilnih materijala, uključujući staklo, što im daje ključnu ulogu u nacionalnoj strategiji reciklaže.[27].

Ipak, postojeći kapaciteti za prikupljanje i obradu staklenog otpada nisu dovoljno razvijeni da pokriju potrebe svih opština. Mnoge lokalne samouprave, naročito one u ruralnim područjima, nemaju adekvatnu infrastrukturu za upravljanje otpadom, što dovodi do neravnomjernog pokrivanja uslugama prikupljanja. U takvim opštinama često se ne sprovodi odvojeno prikupljanje staklenog otpada, a prikupljeni otpad često završava na deponijama zajedno sa drugim komunalnim otpadom.

Crna Gora primjenjuje nekoliko modela za odvojeno sakupljanje staklenog otpada [26], uključujući:

- Sistem „od vrata do vrata“: U određenim urbanim područjima domaćinstvima su dodijeljeni specijalni kontejneri za stakleni otpad. Ovaj sistem omogućava veću kontrolu nad kvalitetom sakupljenog materijala i smanjuje kontaminaciju stakla drugim vrstama otpada, čime se poboljšava efikasnost procesa reciklaže.
- Sistem dovoza otpada: Ovaj model obuhvata postavljanje specijalizovanih kontejnera za stakleni otpad na javnim lokacijama, poput parkova i trgova, gdje građani sami donose stakleni otpad. Ovaj pristup pruža fleksibilnost i bolju pokrivenost, posebno u urbanim sredinama sa većim brojem stanovnika.
- Zvonasti kontejneri: Postavljeni su u gradskim područjima i specijalizovani za prikupljanje staklenog otpada. Ovi kontejneri su dizajnirani da olakšaju sakupljanje i transport veće količine stakla, čime se smanjuje potreba za čestim pražnjenjem.

Iako su postignuti određeni pomaci u razvoju infrastrukture, mnoge opštine još uvijek nemaju potrebne kapacitete i opremu za efikasno upravljanje staklenim otpadom. U nekim slučajevima, reciklažni centri ne rade punim kapacitetom zbog nedovoljnih ulaganja u modernizaciju opreme ili zbog nedostatka radne snage. Ove prepreke otežavaju postizanje ciljeva definisanih u Državnom planu upravljanja otpadom za povećanje stope reciklaže stakla na 40% do 2030. godine.[26].

U tabeli 8 dat je opis i kvantifikacija ciljeva Državnog plana kada je u pitanju stakleni otpad [26].

Tabela 8. Opis i kvantifikacija ciljeva Državnog plana kada je u pitanju stakleni otpad [26]

Vrsta otpada	Opis cilja	Ciljna godina	Kvantifikovani cilj (t/god)	Pravna referenca
Stakleni otpad	Najmanje 50% staklenog otpada iz domaćinstava i drugih izvora treba pripremiti za ponovnu upotrebu i reciklažu	2030	18.433	Prema čl. 21 nacarta Zakona o UO (2022)
Staklena ambalaža	Recikliranje 40% mase staklene ambalaže	2030	11.535	Prema čl. 62 nacarta Zakona o UO (2022)

Poboljšanje infrastrukture, kao i povećanje kapaciteta reciklažnih centara, ključni su za unaprjeđenje upravljanja staklenim otpadom i postizanje održivosti u upravljanju resursima. Dalja ulaganja u razvoj i proširenje sistema za sakupljanje, kao i poboljšanje dostupnosti kontejnera za odvojeno prikupljanje, posebno u turističkim područjima, mogu značajno doprinijeti smanjenju količine staklenog otpada koji se odlaže na deponije.

Jedan od ključnih ciljeva Državnog plana upravljanja otpadom za period 2024–2028. godine u Crnoj Gori je smanjenje količine otpada koji se odlaže na deponijama, s posebnim naglaskom na reciklažu staklenog otpada. Planom je predviđeno da će do 2028. godine najmanje 30% staklene ambalaže biti reciklirano, s postepenim povećanjem na 50% do 2030.

godine. Ovi ciljevi su usklađeni s ciljevima Evropske unije i predstavljaju dio šire strategije za prelazak Crne Gore na cirkularnu ekonomiju, gdje reciklaža stakla ima ključnu ulogu.

5. Postrojenje za reciklažu u Podgorici

5.1. Postojeće stanje

Stakleni otpad predstavlja vrijedan resurs kako sa ekološkog, tako i sa ekonomskog aspekta. Upravljanje staklenim otpadom u Crnoj Gori suočava se sa značajnim izazovima, uključujući neadekvatnu infrastrukturu, nedostatak odvojenog prikupljanja i nedovoljno razvijenu reciklažnu industriju. Ipak, tehničke opcije za reciklažu stakla koje su dostupne mogu značajno unaprijediti sistem upravljanja ovim resursom. Primjenom savremenih tehnologija, kao što su mehaničke metode separacije poput magnetne i balističke separacije, staklo se može efikasno izdvojiti iz komunalnog otpada.

Sanitarne deponije u Podgorici i Baru trenutno igraju ključnu ulogu u zbrinjavanju otpada, ali je očigledno da je potrebno uložiti dodatne napore u proširenje kapaciteta za reciklažu stakla. Ova ulaganja ne samo da bi smanjila količinu otpada na deponijama, već bi takođe doprinijela smanjenju emisija ugljen-dioksida i uštedi energije, što je od suštinske važnosti za dostizanje ekoloških ciljeva Crne Gore u skladu sa strategijama EU za održivi razvoj [26].

U slučaju Crne Gore, glavni grad Podgorica nudi značajan potencijal za razvoj centra za reciklažu stakla, pri čemu bi takva inicijativa imala višestruke ekonomske i ekološke koristi.

Jedna od ključnih kompanija u ovom procesu je „Deponija d.o.o. Podgorica,“ koja se bavi poslovima izgradnje, korišćenja i održavanja deponija komunalnog otpada, kao i reciklažom metalnih i nemetalnih otpadaka i ostacima.¹ Djelatnosti ovog preduzeća od javnog su interesa za grad Podgoricu i predstavljaju osnovu za unaprjeđenje lokalnog sistema upravljanja otpadom kroz reciklažu.

¹ Vidi <https://deponija.me/djelatnosti/>

Deponija d.o.o. implementirala je integrisani sistem menadžmenta kvaliteta i dobila relevantne sertifikate Crnogorskog instituta za sertifikaciju i kvalitet, što dodatno svjedoči o njenoj posvećenosti kvalitetu usluga i zadovoljstvu korisnika. [28].

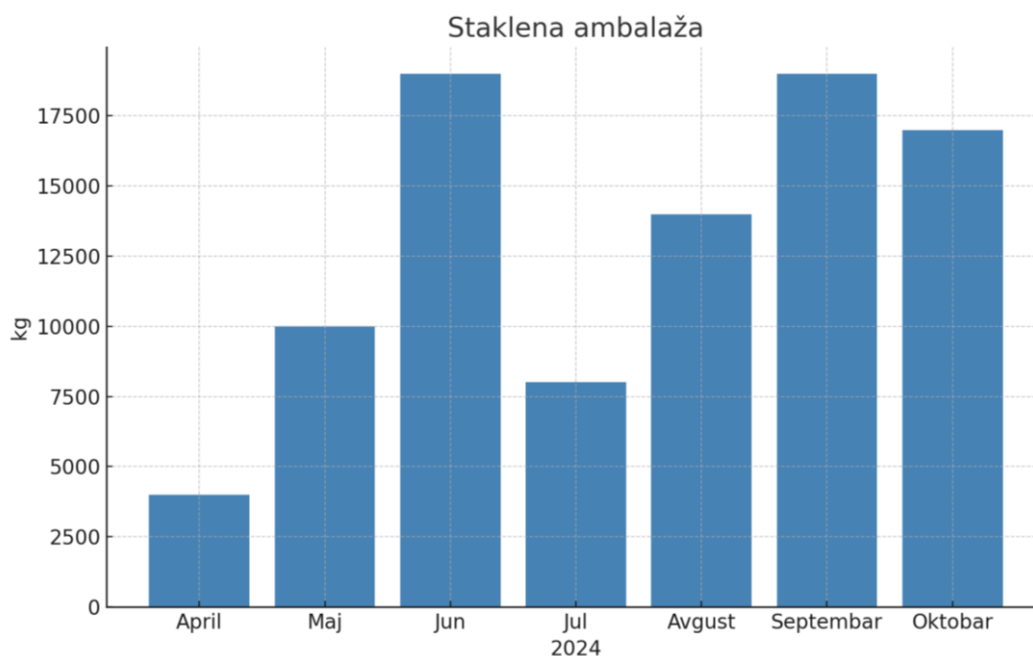
Deponija d.o.o. takođe ima jasnu misiju i viziju, usmjerene ka postizanju liderske pozicije na tržištu i obezbjeđivanju održivog razvoja organizacije, lokalne zajednice i šire zajednice u Crnoj Gori. Kroz aktivnosti odjela za deponovanje i reciklažu komunalnog otpada, kao i kroz pogone za reciklažu vozila van upotrebe i tretman procjednih voda, Deponija d.o.o. predstavlja ključnog aktera u implementaciji Strategije upravljanja otpadom Crne Gore. Ova strategija podrazumijeva planove za uspostavljanje deponije „Livade“ kao regionalne deponije za Glavni grad Podgoricu, Prijestonicu Cetinje i Opštinu Danilovgrad. [28].

Prema podacima MONSTAT-a iz 2020. godine, prikupljeno je 21.766 tona ambalažnog otpada, koji je bio namijenjen za reciklažu. Od ove količine, 21.530 tona materijala, uključujući staklo, bilo je odvojeno iz mješovitog komunalnog otpada, što jasno ukazuje na značajan potencijal za reciklažu ovog materijala (MONSTAT, 2021). Reciklažni centri u Podgorici, Herceg Novom i Kotoru igraju ključnu ulogu u obradi staklenog otpada, omogućavajući njegovu ponovnu upotrebu. Međutim, kapaciteti ovih centara često nijesu u potpunosti iskorišćeni zbog nedovoljne infrastrukture i finansijskih sredstava. Ulaganje u modernizaciju ovih postrojenja, kao i uspostavljanje novih reciklažnih centara, može značajno povećati kapacitete za obradu staklenog otpada i smanjiti njegov negativan uticaj na životnu sredinu.

S obzirom na postavljene ciljeve i obaveze, Deponija d.o.o. posjeduje kapacitet za realizaciju inovativnih rješenja u oblasti reciklaže staklenog otpada, pri čemu njena misija i vizija postaju od presudnog značaja za održivi razvoj grada Podgorice i Crne Gore u cjelini. Mogućnosti prikupljanja staklenog otpada prema različitim frakcijama (prozirno, zeleno, smeđe staklo) i implementacija više sistema odvojenog sakupljanja otpada su ključne jer omogućavaju bolje očuvanje kvaliteta stakla i lakše procese reciklaže. Dodatno, preporučeno je odvojeno prikupljanje reciklabilnih materijala na različitim javnim mjestima, što bi trebalo doprinijeti efektivnosti reciklaže.

Proces prikupljanja otpadnog stakla od strane Deponije d.o.o. započeo je u aprilu, kada su poznati restorani, marketi i drugi pravni subjekti iz Podgorice počeli s otkupom staklenog otpada. Inicijativa je naišla na različit odziv tokom mjeseci, što se može vidjeti po varijacijama u količini prikupljenog otpada. Ova varijabilnost može biti uzrokovana sezonskim promjenama u potrošnji, kao i dinamikom aktivnosti subjekata koji učestvuju u programu reciklaže.

Na slici 9 dat je dijagram prikazuje mjesečne količine prikupljenog staklenog otpada u Podgorici od aprila do oktobra 2024. godine, na osnovu podataka koja je autorka dobila od Deponije doo - Podgorica.



Slika 9. Dijagram mjesečne količine prikupljenog staklenog otpada u Podgorici od aprila do oktobra 2024. godine

U aprilu, program prikupljanja staklenog otpada započeo je s relativno manjom količinom od oko 4000 kg, dok je maj zabilježio porast na 10,000 kg. Količina je dostigla vrhunac u junu sa skoro 19,000 kg, što ukazuje na intenziviranje aktivnosti i vjerovatno veću angažovanost subjekata tokom ovog perioda. Tokom jula dolazi do pada na 7,000 kg, vjerovatno zbog sezonskih uticaja ili smanjenja potrošnje. U avgustu, količina ponovo raste na 15,000 kg, dok septembar bilježi najveću količinu poslije juna, sa prikupljenih 18,000 kg. Oktobar završava s 17,000 kg, što sugeriše stabilizaciju u prikupljanju otpada prema kraju perioda.

Ovi podaci pružaju važne uvide u početne rezultate programa reciklaže stakla u Podgorici. Kao prvi korak u analizi uspješnosti ovog procesa, omogućavaju procjenu trenutnih kapaciteta i identifikaciju eventualnih potreba za proširenjem inicijative. Na osnovu prikupljenih informacija, može se razmatrati unaprjeđenje logistike i promocije programa reciklaže, kako bi se povećao obuhvat i dodatno stimulisali subjekti na učestvovanje.

5.2. Tehničke opcije za reciklažu stakla

Kako je već ranije rečeno, stakleni otpad predstavlja vrijedan resurs kako sa ekološkog, tako i sa ekonomskog aspekta. Njegova sposobnost da se neograničeno reciklira bez gubitka kvaliteta čini ga idealnim materijalom u cirkularnoj ekonomiji. Međutim, upravljanje staklenim otpadom u Crnoj Gori suočava se sa izazovima kao što su neadekvatna infrastruktura, manjak kapaciteta za odvojeno prikupljanje i nedovoljno razvijena reciklažna industrija. Poboljšanja u ovom sektoru mogu se postići kroz modernizaciju postojećih kapaciteta i implementaciju naprednih tehnoloških rješenja za odvajanje staklenog otpada. Savremene tehnologije kao što su balistička separacija, magnetna separacija i optičko sortiranje omogućavaju efikasno izdvajanje stakla iz mješovitog otpada i smanjuju rizik od kontaminacije, što povećava kvalitet recikliranog materijala.

Opcije za sakupljanje staklenog otpada – Na osnovu dostupnih podataka i trenutnog stanja u Centralnom regionu Crne Gore, može se predvidjeti količine staklenog otpada u budućnosti, posebno u opštinama koje se nalaze u okviru Centralnog regionalnog sistema upravljanja otpadom. Ovaj region uključuje Glavni grad Podgorica i opštine Zeta, Tuzi, Danilovgrad, Nikšić, Plužine i Šavnik.

U tabeli 9 su prikazani podaci o procijenjenom broju stanovnika za 2028. godinu, generisanom otpadu u tonama godišnje i količini staklenog otpada u tonama godišnje za opštinu Podgorica i okolne opštine, na osnovu podataka iz Državnog plana upravljanja otpadom [26].

Tabela 9. Podaci o procijenjenom broju stanovnika za 2028. godinu, generisanom otpadu u t/god. i količini staklenog otpada u t/god. za Glavni grad Podgorica i okolne opštine, na osnovu podataka iz Državnog plana upravljanja otpadom [26].

Opština	Stanovništvo (procijenjeno za 2028)	Generisani otpad (t/god)	Stakleni otpad (t/god)
Podgorica	185.937	184.500	12.372
Zeta	12.469	11.500	770
Tuzi	13.450	11.000	737
Danilovgrad	18.067	16.500	1.106

Nikšić	71.700	72.500	4.860
Plužine	3.270	3.000	201
Šavnik	2.091	1.800	129
Ukupno	306.984	300.000	20.175

Opcije za broj frakcija u odvojenom sakupljanju

Sistem za odvojeno prikupljanje staklenog otpada može biti razvijen u zavisnosti od potreba i kapaciteta zajednica:

- Sakupljanje prema bojama (četiri frakcije ili više): Podjela stakla na prozirno, zeleno i smeđe omogućava očuvanje kvaliteta recikliranog materijala i olakšava njegovu preradu.
- Sakupljanje u tri frakcije: Ova metoda podrazumijeva prikupljanje stakla kao jedne frakcije, dok se papir i karton odvajaju zajedno sa drugim materijalima.
- Sakupljanje u jednoj frakciji: Kombinovano prikupljanje svih reciklabilnih materijala smanjuje troškove, ali smanjuje efikasnost reciklaže zbog veće kontaminacije.

5.3. Kriterijumi za izgradnju postrojenja u Podgorici

Prema kriterijumima predviđenim Državnim planom [26] opcija koja uključuje višefrakcioni sistem, dobila je najvišu ocjenu za zaštitu životne sredine sa preporukom na uspostavljanje reciklažnog postrojenja u Podgorici. Razlike u generisanju otpada tokom turističke sezone posebno su naglašene u primorskim opštinama poput Budve i Ulcinja, gdje se količina otpada povećava, te se predlaže centralizacija reciklaže u urbanim i turističkim sredinama.

Podgorica je prepoznata kao ključna lokacija za razvoj reciklažnog kapaciteta zbog:

1. Visokog učešća u generisanju otpada: Kao najveći grad u zemlji, Podgorica stvara najviše komunalnog otpada.

2. Postojeće infrastrukture: Deponija Livade raspolaže značajnim kapacitetima, što omogućava lakšu nadogradnju za potrebe reciklaže.
3. Geografske centralnosti: Lokacija omogućava lak pristup otpadu iz drugih djelova Crne Gore, čime se smanjuju troškovi transporta.
4. Ekonomske koristi: Izgradnja postrojenja generiše nova radna mjesta i omogućava prodaju recikliranog stakla.
5. Pristupa fondovima za održivi razvoj: Glavni grad može privući investicije i pristupiti evropskim fondovima za projekte koji promovišu cirkularnu ekonomiju.

5.4. Projekcije buduće produkcije staklenog otpada u Centralnom regionu

Na osnovu trenutnih trendova i Državnog plana upravljanja otpadom [26], očekuje se značajan porast količine staklenog otpada u Centralnom regionu Crne Gore do 2028. godine. Procjene pokazuju da će ovaj region generisati oko 24.575 tona staklenog otpada godišnje, pri čemu će Podgorica, kao najveći grad, imati učešće veće od polovine ukupne količine otpada. Glavni faktori koji doprinose ovom porastu uključuju rast broja stanovnika i ekonomski razvoj, što povećava potrošnju i, posljedično, količinu staklenog otpada.

U tabeli 10 su predstavljeni podaci o ukupnom otpadu generisanom u tonama godišnje, procentualnom učešću stakla u otpadu i količini staklenog otpada u tonama godišnje za odabrane opštine, uz procjenu potencijala staklenog otpada za 2023. godinu, na osnovu podataka iz Državnog plana upravljanja otpadom [26].

Tabela 10. Podaci o ukupnom otpadu generisanom u t/god., procentualnom učešću stakla u otpadu i količini staklenog otpada u t/godišnje za odabrane opštine, uz procjenu potencijala staklenog otpada za 2023. godinu, na osnovu podataka iz Državnog plana upravljanja otpadom [26].

Opština	Ukupan otpad (t/god)	Procenat stakla (%)	Stakleni otpad (t/god)
Podgorica	104.729	6%	6.284
Danilovgrad	8.341	6%	500,46
Tuzi	6.734	6%	404,04
Kolašin	3.104	6%	186,24
Mojkovac	3.356	6%	201,36
Cetinje	8.124	6%	487,44
Nikšić	36.342	6%	2.180,52

Veoma značajno za regulisanje odlaganja otpada je planirano proširenje kapaciteta sanitarnih deponija, naročito u Podgorici. Postavljanje zvonastih kontejnera u urbanim sredinama kao i regulisane opcije skladištenja staklenog otpada važno su pitanje koje treba detaljno razraditi [26].

Zonski pristup za prikupljanje otpada - Implementacija zonskog pristupa, kojim se prikupljanje otpada organizuje na osnovu geografske blizine i kapaciteta opština, mogla bi optimizovati logističke troškove i povećati efikasnost transporta. Ovaj pristup omogućava decentralizaciju procesa reciklaže, smanjujući pritisak na kapacitete u Podgorici i povećavajući efikasnost cjelokupnog sistema.

Planirano proširenje mreže MRF postrojenja- Kako bi se odgovorilo na rastuće potrebe za obradom sve veće količine staklenog otpada, planirano je proširenje kapaciteta MRF (postrojenja za preradu materijala) u ključnim opštinama. Cilj je unaprijediti reciklažne kapacitete i efikasnost u cijelom regionu. Navedeni su planirani kapaciteti po opštinama:

Treba napomenuti važnost specijalizovanih skladišnih prostora i transportnih stanica za stakleni otpad, kako bi se omogućila daljnja reciklaža. Fokus na transferne stanice, koje smanjuju troškove i optimiziraju transport do reciklažnih centara, može se proširiti na veće regije i dodatno unaprijediti efikasnost upravljanja otpadom.

Distribucija staklenog otpada po opštinama ističe ključnu ulogu Podgorice kao centralnog reciklažnog centra. Ostale opštine, poput Nikšića, Danilovgrada i Cetinja, takođe doprinose

značajnim količinama staklenog otpada i mogle bi poslužiti kao sekundarni centri za prikupljanje i distribuciju prema glavnom postrojenju u Podgorici.

Na osnovu dostupnih podataka i trenutnog stanja u Centralnom regionu Crne Gore, predviđeno su količine staklenog otpada do 2028. godine za opštine u okviru Centralnog regionalnog sistema upravljanja otpadom, uključujući Podgoricu, Zetu, Tuzi, Danilovgrad, Nikšić, Plužine i Šavnik.

1. Ukupno generisani otpad za Centralni region: Prema Državnom planu, očekuje se da će ukupna količina komunalnog otpada u ovom regionu u 2028. godini dostići 366.800 tona.

2. Učešće stakla u otpadu: Na osnovu kompozicije otpada, staklo čini približno 6,7% ukupne količine otpada. Koristeći ovaj procenat, dolazimo do procijenjene količine staklenog otpada:

Na osnovu prednjeg možemo izračunati produkciju staklenog otpada na godišnjem nivou, tako što ćemo izračunati učešće stakla u ukupnom generisanom otpadu.

$$366.800 \times 6,7\% = 24.575 \text{ tona godišnje}$$

Na osnovu projekcija iz Državnog plana, može se očekivati da će količine komunalnog otpada u Podgorici i okolnim opštinama nastaviti da rastu i nakon 2028. godine, s projekcijom povećanja do 2031. godine. Ove prognoze ukazuju na potrebu za dugoročnim planiranjem kapaciteta reciklažnih postrojenja, uključujući fleksibilnost u slučaju dodatnih proširenja.

5.5. Tehnička oprema i procesi za reciklažu stakla

Unaprjeđenje postojeće infrastrukture za sortiranje staklenog otpada kroz instalaciju naprednih optičkih uređaja omogućilo bi efikasnije odvajanje otpada po bojama i vrsti materijala. Ulaganjem u tehnologije koje razdvajaju metale i plastiku dodatno bi se povećala čistoća recikliranog stakla, smanjili operativni troškovi i ostvarili veći prihodi od prodaje visokokvalitetnog recikliranog stakla.

Optički uređaji i balistički separatori omogućavaju kvalitetnu separaciju staklenih materijala na osnovu specifičnih karakteristika poput boje i kvaliteta (MONSTAT, 2021; Državni plan upravljanja otpadom, 2024-2028). Reciklažno postrojenje u Podgorici trebalo bi

da koristi modernu tehničku opremu koja omogućava efikasnu obradu staklenog otpada. Neke od ključnih tehnologija uključuju:

1. Balistička Separacija: Balistički separator sa transportnom rešetkom koristi se za izdvajanje visoko reciklabilnih materijala poput papira, plastike i stakla iz komunalnog otpada. Specifično za staklo, ova tehnologija omogućava izdvajanje staklenih boca, tegli i drugih staklenih predmeta na osnovu njihove mase i oblika. Transportna rešetka separatora je nagnuta i sastoji se od vibrirajućih segmenata, koji se kreću naizmjenično. Tokom transporta otpada prema višem dijelu rešetke, različiti materijali se sortiraju prema svojim karakteristikama, dok stakleni predmeti, zbog svoje težine i oblog oblika, podliježu gravitaciji i kotrljaju se niz traku, gdje se lako odvajaju od drugih frakcija [28].

U slučajevima gdje se koristi balistički separator sa vazdušnom strujom, staklo se efikasno odvaja od lakših materijala. Ovaj separator koristi kombinaciju transportne trake i struje vazduha, gdje lakši materijali kao što su papir i plastika ostaju u gornjoj struji vazduha, dok staklo, zbog veće težine, pada na dno komore. Ovakav princip omogućava izdvajanje stakla sa visokim stepenom čistoće, smanjujući kontaminaciju i omogućavajući efikasnu reciklažu staklenih materijala [28].

Ovi balistički separatori imaju posebnu ulogu u unaprjeđenju kapaciteta i efikasnosti reciklažnih sistema, jer omogućavaju odvajanje staklenih komponenti sa visokom preciznošću, smanjujući kontaminaciju recikliranog stakla. Korišćenje balističkih separatora u kombinaciji sa drugim tehnologijama, kao što su optički separatori, značajno doprinosi postizanju visokih standarda u upravljanju staklenim otpadom, čime se doprinosi ekološkim ciljevima i održivom razvoju.

Magnetna Separacija: Iako se primarno koristi za izdvajanje metala iz otpada, magnetna separacija može pomoći u eliminaciji metalnih nečistoća iz staklenog otpada, čime se povećava kvalitet materijala za dalju obradu. Ovaj moderni dio postrojenja ima kapacitet obrade od 100 tona staklene ambalaže dnevno i vrijedan je oko 1,28 miliona eura.

2. Tromel separacija: Ova tehnologija koristi rotirajući bubanj sa različitim veličinama otvora za odvajanje materijala prema veličini. Tromel separacija je posebno korisna u

izdvajanje stakla iz mješovitog otpada, omogućavajući dalju obradu čistog staklenog materijala.

3. Optička separacija: Optički separacija predstavljaju savremeni tehnološki pristup selekciji i obrade staklenog otpada, omogućavajući precizno razdvajanje stakla prema bojama i kvalitetu, što doprinosi povećanju čistoće recikliranog materijala i smanjenju kontaminacije.

Ovi uređaji rade na principu optičke separacije, koji koristi specifične talasne dužine svetlosti i infracrvenog zračenja za identifikaciju materijala. Princip rada optičkih separacija zasniva se na jedinstvenom spektru emitovanog ili reflektovanog zračenja koje svaki tip materijala proizvodi pri izlaganju talasnim dužinama blizu infracrvenog spektra. Kako svaki materijal apsorbira i reflektuje zračenje različitih talasnih dužina, na osnovu detekcije emitovanog spektra moguće je identifikovati ciljani materijal. [28].

Proces separacije stakla odvija se kroz četiri faze sortiranja, koristeći komprimovani vazduh za razdvajanje staklenih čestica. Čestice se odvajaju redom: prvo zeleno staklo, zatim braon, dok se neprovidni materijali poput keramike i porcelana odstranjuju na kraju. Ova tehnologija postiže izuzetno visoku čistoću frakcija, do 99,7%, što značajno povećava kvalitet recikliranog stakla i omogućava njegovu dalju industrijsku upotrebu.

5.6. Nabavka novog postrojenja i proširenje postojećih kapaciteta

Optimizacija kapaciteta reciklažnog postrojenja u Podgorici predstavlja ključnu komponentu u ostvarivanju ciljeva održivog upravljanja staklenim otpadom i cirkularne ekonomije u Crnoj Gori. Predložene mjere za poboljšanje kapaciteta i efikasnosti uključuju proširenje postojećih kapaciteta, implementaciju zonskog pristupa za prikupljanje otpada i investiranje u opremu.

1. Povećanje kapaciteta postojećeg postrojenja - Reciklažni centar na deponiji „Livade“ u Podgorici, ima značajan potencijal za proširenje kapaciteta. Ovaj potez omogućio bi efikasnije tretiranje otpada i zadovoljavanje rastućih potreba za reciklažom, koje su u porastu uslijed demografskog i ekonomskog rasta. Proširenje kapaciteta doprinijelo bi smanjenju količine staklenog otpada na deponijama i povećalo količinu visokokvalitetnog recikliranog materijala koji je spreman za ponovnu upotrebu.

2. Implementacija zonskog pristupa za prikupljanje otpada - Primjena zonskog pristupa omogućila bi bolju organizaciju procesa prikupljanja i transporta otpada. Ovaj pristup podrazumijeva podjelu opština u geografske zone prema blizini i logističkim kapacitetima, čime se optimizuju troškovi transporta i smanjuje pritisak na centralno postrojenje u Podgorici. Kroz zonski pristup, opštine kao što su Nikšić, Danilovgrad i Cetinje mogle bi funkcionisati kao sekundarni centri za prikupljanje, čime se doprinosi boljoj regionalnoj organizaciji upravljanja otpadom.

Sistem za odvojeno prikupljanje staklenog otpada može se razviti na osnovu različitih brojeva frakcija otpada, zavisno od kapaciteta i potreba svake zajednice:

- Sakupljanje u četiri ili više frakcija: Staklo se može sakupljati prema bojama (prozirno, zeleno, smeđe), što omogućava očuvanje kvaliteta stakla i njegovu jednostavniju preradu.
- Sakupljanje u tri frakcije: Staklo se sakuplja kao jedna frakcija, dok se papir i karton sakupljaju odvojeno, a plastični i metalni otpad zajednički.
- Sakupljanje u jednoj frakciji: Svi reciklabilni materijali, uključujući staklo, sakupljaju se zajedno u jednom kontejneru, što smanjuje efikasnost reciklaže, ali pojednostavljuje logističke procese prikupljanja.

Sistemi sa više frakcija omogućavaju bolji kvalitet sakupljenog materijala i veću stopu reciklaže, dok sistemi sa manje frakcija smanjuju operativne troškove, ali na uštrb kvaliteta materijala za reciklažu.

3. Investicija u naprednu opremu - Uvođenje novih tehnologija, poput postrojenja za mehaničko-biološku obradu (MBT), moglo bi značajno unaprijediti procese sortiranja i obrade otpada. Ova vrsta tehnologije omogućava automatsko razdvajanje različitih vrsta otpada, uključujući staklo, plastiku i metal, što dovodi do čistijeg i vrjednijeg recikliranog materijala. Savremena oprema bi takođe smanjila operativne troškove kroz energetska efikasnost i smanjenje potrebe za ručnim radom. Prijedlog za unaprjeđenje sistema reciklaže staklenog otpada u Podgorici obuhvata sledeće opcije, uključujući osnovne inicijative kao i alternativne tehnologije koje mogu dodatno unaprijediti efikasnost i održivost procesa:

Razvoj MRF postrojenja (Material Recovery Facility) - Osnovna opcija je ulaganje u MRF postrojenje koje omogućava efikasno prikupljanje, odvajanje i pripremu reciklabilnih materijala, uključujući staklo. Do 2028. godine predlaže se proširenje kapaciteta ovog postrojenja kako bi se omogućila obrada do 25.683 tona staklenog otpada godišnje, što

predstavlja značajan napredak u kapacitetima za reciklažu u Podgorici. Dodatna investicija u modernizaciju MRF postrojenja može obuhvatiti tehnologije za povećanje efikasnosti sortiranja, smanjenje kontaminacije i poboljšanje kvaliteta recikliranog materijala.

Société VIA, u saradnji sa Éco Entreprises Québec (ÉEQ), koristi naprednu tehnologiju za sortiranje i čišćenje stakla u svom MRF postrojenju u Quebec Cityju². Ova tehnologija, razvijena u partnerstvu između Krysteline Technologies i Machinex-a, koristi patentirani „implozioni sistem“ (42) koji radi na principu stvaranja unutrašnje potpritisaka (implozije) koja rasparčava staklo u željene frakcije, pri čemu se sačuvaju krupniji dijelovi za ponovnu upotrebu, dok se nečistoće poput etiketa i čepova efikasno uklanjaju. Za razliku od tradicionalnih metoda koje često stvaraju oštre i opasne ivice, ovaj sistem stvara zaobljene fragmente stakla, što olakšava rukovanje i čini proces bezbjednijim. Rasparčavanje kroz ovaj sistem rezultira visokom čistoćom materijala – do 99% za fine frakcije i 95% za krupnije djelove. Ovaj kvalitet omogućava da se reciklirano staklo koristi u raznim industrijama bez potrebe za dodatnim čišćenjem ili preradom.

Na slici 10 prikazano je MRF postrojenje kompanije Société VIA u Quebec Cityju [29].



Slika 10. Prikaz MRF postrojenja kompanije Société VIA u Quebec Cityju [29]

² Usp. <https://www.recyclingtoday.com/article/mrf-glass-clean-up/>

Ova tehnologija troši manje energije od tradicionalnih metoda i omogućava bezbjedno rukovanje staklom sa zaobljenim ivicama, uz smanjenje troškova održavanja. ÉEQ i Machinex omogućili su modularan dizajn sistema, prilagođen različitim kapacitetima prerade, od 1 do preko 10 tona na sat. Ova tehnologija predstavlja značajan iskorak u pretvaranju stakla iz izazovnog otpada u vrijedan resurs, čineći reciklažu stakla profitabilnijom i održivijom za MRF postrojenja širom Sjeverne Amerike.

5.7. Alternativne tehnologije za reciklažu staklenog otpada

Osim osnovnog prijedloga za MRF postrojenje, postoje i dodatne tehnologije koje mogu unaprijediti sistem upravljanja staklenim otpadom u Crnoj Gori:

1. Postrojenja za hemijsku i termičku obradu – Ova postrojenja su korisna za tretman kontaminiranog staklenog otpada, omogućavajući regeneraciju stakla za industrijsku upotrebu. Hemijska obrada koristi specifične reagense za uklanjanje kontaminanata, dok termička obrada zagrijeva staklo kako bi uklonila organske nečistoće, omogućavajući reciklažu stakla koje je bilo u kontaktu sa opasnim materijama.

2. Postrojenja za suhu separaciju otpada – Suva separacija omogućava odvajanje reciklabilnih materijala uz minimalno korišćenje vode, čime se smanjuju troškovi za upravljanje vodom i rizik od zagađenja. Ova postrojenja koriste vibracione i gravitacione separatore za izdvajanje staklenih frakcija i drugih materijala, čineći ih pogodnim za različite vrste otpada.

3. Postrojenja za mokru separaciju otpada Mokra separacija koristi vodene tokove za odvajanje materijala prema gustini i veličini. Prednosti ove metode uključuju smanjenje kontaminacije i efikasnije izdvajanje stakla sitne frakcije od drugih materijala, čime se postiže visok stepen čistoće recikliranog materijala.

4. MBO postrojenja za mehaničko-biološku obradu – MBO postrojenja kombinuju mehaničke i biološke metode za odvajanje organskog otpada od reciklabilnih materijala. Ova postrojenja koriste tromele, magnetne separatore i balističke uređaje za izdvajanje stakla, dok se biološka komponenta bavi stabilizacijom organskog otpada, čime se smanjuje ukupna količina otpada koja ide na deponije.

5. Postrojenja za reciklažu specijalnih vrsta stakla – Specijalizovana postrojenja su usmjerena na reciklažu stakla iz specifičnih izvora, kao što su automobilsko i ravno staklo. Ova

postrojenja koriste tehnologije za odvajanje slojeva i uklanjanje premaza, omogućavajući ponovnu upotrebu stakla u građevinskoj industriji i industriji automobila.

6. Postrojenja za ponovnu upotrebu i preradu stakla – Postrojenja ove vrste omogućavaju preradu stakla u proizvode kao što su izolacioni materijali, staklene pene i dekorativni predmeti. Na taj način, reciklirano staklo dobija dodatnu vrijednost kroz primjenu u građevinskim materijalima, poboljšavajući njihove ekološke karakteristike i smanjujući pritisak na prirodne resurse.

Predložene opcije omogućavaju sveobuhvatno sagledavanje mogućih rješenja za upravljanje staklenim otpadom u Podgorici i okolnim opštinama. Osnovna ulaganja u MRF postrojenje i edukaciju građana pružaju osnovu za stabilan i efikasan sistem reciklaže, dok alternativne tehnologije omogućavaju dodatno prilagođavanje i povećanje kapaciteta u zavisnosti od specifičnih potreba i dostupnih resursa. Kombinovanjem ovih opcija, Podgorica može značajno unaprijediti svoj kapacitet za reciklažu i postati uzor za održivo upravljanje otpadom u regiji.

5.8. Analiza ulaganja u reciklažu stakla u Podgorici

5.8.1. Cost-Benefit analiza

Investicije u infrastrukturu i modernu opremu ključne su za postizanje dugoročne održivosti reciklažnih aktivnosti u Podgorici. Ova investicija ima cilj ne samo ekonomski povrat, već i smanjenje ekološkog uticaja i povećanje kapaciteta za reciklažu staklenog otpada.

Tabela 11. prikazuje ključne troškove ulaganja u reciklažno postrojenje prema podacima konsultanata koji su radili na Državnom planu [26]

Tabela 11. Prikaz ključnih troškova ulaganja u reciklažno [26]

Kategorija	Iznos (EUR)
Oprema za sakupljanje otpada	22,903,133
Reciklažni centri	5,340,000
MRF postrojenje	9,175,000
Ukupni troškovi	37,418,133

Ovi troškovi uključuju nabavku opreme i izgradnju potrebnih centara, kako bi se osigurala efikasna obrada i prikupljanje staklenog otpada. Godišnji operativni troškovi procijenjeni su na osnovu kapaciteta postrojenja u Podgorici:

- Troškovi prerade otpada u MRF postrojenju: 25 EUR/t
- Kapacitet MRF postrojenja: 25.683 t/god

Na osnovu ovih podataka, godišnji operativni trošak za preradu staklenog otpada iznosi 642,075 EUR.

Predviđeni godišnji prihod od prodaje recikliranog stakla zasnovan je na tržišnoj cijeni od 70 EUR po toni, što generiše ukupno:

- $70 \text{ EUR/t} \times 25.683 \text{ t/god} = 1,797,810 \text{ EUR/god}$

Razlika između prihoda i operativnih troškova daje neto godišnju korist:

- $\text{Neto godišnja korist} = 1,797,810 \text{ EUR} - 642,075 \text{ EUR} = 1,155,735 \text{ EUR}$

Troškovi inicijalne investicije u postrojenje (2,660,000 EUR) nadoknađuju se kroz manji povrat u roku od 3 godine, što predstavlja visok povraćaj investicije.

Ova Cost-Benefit analiza pokazuje da je ulaganje u reciklažno postrojenje u Podgorici ekonomski opravdano i isplativo. Pored visokog povraćaja investicije, postrojenje donosi značajne ekološke koristi, uključujući smanjenje količine otpada na deponijama, smanjenje emisije CO₂ i podršku ciljevima cirkularne ekonomije Crne Gore.

5.8.2. SWOT analiza

Upravljanje staklenim otpadom u Crnoj Gori predstavlja ključan segment u razvoju održivog sistema reciklaže, a sprovedena SWOT analiza omogućava identifikaciju ključnih prednosti, nedostataka, prilika i prijetnji u ovom sektoru. Ova analiza pruža sveobuhvatan uvid u trenutnu situaciju, ističući kako postojeće snage i prilike mogu biti iskorišćene za prevazilaženje slabosti i suočavanje sa potencijalnim prijetnjama.

Jedna od glavnih prednosti je postojanje infrastrukturnih kapaciteta u Podgorici, koji omogućavaju reciklažu do 25.683 tona staklenog otpada godišnje. Ova infrastruktura, uz povoljan geografski položaj, doprinosi efikasnom prikupljanju otpada iz okolnih opština. Pored

toga, visoki prihodi od prodaje recikliranog stakla i smanjenje ekološkog uticaja kroz niže emisije CO₂ istaknuti su kao ključni faktori finansijske i ekološke održivosti. Implementacija reciklaže značajno doprinosi konceptu cirkularne ekonomije, koji je sve više prepoznat kao globalno prihvaćen model održivog razvoja.

Međutim, analiza ukazuje na značajne slabosti, poput visokih inicijalnih investicionih troškova za modernizaciju postrojenja i niske stope naplate usluga prikupljanja otpada, što može ugroziti finansijsku stabilnost. Nedovoljna društvena svijest o važnosti reciklaže i ograničena infrastruktura u manjim opštinama dodatno otežavaju širu primjenu reciklažnih praksi.

Prilike su značajne, posebno s obzirom na povećanu potražnju za recikliranim materijalima na međunarodnom tržištu i mogućnost finansijske podrške kroz programe Evropske unije, poput IPA III. Edukacija građana i razvoj javno-privatnih partnerstava predstavljaju dodatne mogućnosti za unapređenje reciklažnog sistema, dok jačanje zakonske regulative može stvoriti povoljnije uslove za dalji rast sektora.

Uprkos ovim prilikama, prijetnje poput neizvjesnosti u vezi s donatorskim sredstvima, fluktuacije cijena recikliranih materijala i potencijalne promjene zakonodavstva ukazuju na potrebu za pažljivim planiranjem. Da bi se prevazišle slabosti i efikasno iskoristile prilike, neophodno je integrisati strateški pristup, koji će osigurati stabilnost finansijskog, operativnog i ekološkog aspekta upravljanja staklenim otpadom.

Kategorija	Elementi
Snage	- Postojeća infrastruktura kapaciteta 25.683 t/god, koja omogućava početnu efikasnost u reciklaži stakla. - Visoki prihodi od prodaje recikliranog stakla (1.797.810 EUR godišnje), koji doprinose finansijskoj održivosti. - Smanjenje ekološkog uticaja kroz reciklažu, koja smanjuje emisije CO₂ i pritisak na deponije. - Povoljna lokacija Podgorice kao centralne tačke za prikupljanje i obradu otpada iz okolnih opština. - Podrška konceptu cirkularne ekonomije, koja doprinosi dugoročnoj ekološkoj održivosti.
Slabosti	- Visoki inicijalni investicioni troškovi (2.660.000 EUR za MRF postrojenje), što zahtijeva značajna sredstva.

	- Niska stopa naplate usluga za prikupljanje otpada (oko 35% za domaćinstva), što može ugroziti stabilnost prihoda. - Nedovoljna društvena svijest o važnosti reciklaže među građanima, što smanjuje kvalitet i količinu odvojenog otpada. - Zavisnost od strane donacija i kredita (poput IPA III), što povećava finansijski rizik u slučaju kašnjenja ili gubitka sredstava. - Ograničena infrastruktura u manjim opštinama za sakupljanje i transport otpada, što može otežati efikasno regionalno prikupljanje staklenog otpada.
Prilike	- Povećana potražnja za recikliranim materijalima u međunarodnim tržištima, što može povećati prihode od prodaje recikliranog stakla. - Podrška Evropske unije kroz IPA III i druge finansijske inicijative, koja može pomoći u smanjenju finansijskog tereta. - Edukacija građana i promocija reciklaže može povećati stopu odvajanja otpada i smanjiti količinu stakla na deponijama. - Mogućnost razvoja javno-privatnih partnerstava, koja bi smanjila pritisak na državne finansije i uključila privatni sektor. - Jačanje zakonske regulative i politika upravljanja otpadom, koja može podržati dalji razvoj reciklažnog sektora u Crnoj Gori.
Prijetnje	- Finansijska neizvjesnost u vezi s donatorskim sredstvima i državnim kreditima može usporiti realizaciju projekata. - Fluktuacija cijena recikliranih materijala na globalnom tržištu, što može uticati na profitabilnost postrojenja. - Konkurencija u sektoru reciklaže u regionu može smanjiti tržišni udio i potencijalne prihode od reciklaže. - Nepredvidive promjene u zakonodavstvu o upravljanju otpadom, što može stvoriti dodatne pravne i operativne troškove. - Oslanjanje na nisku stopu naplate može dodatno destabilizovati finansije ako naplata ne poraste.

6. Diskusija rezultata u kontekstu postavljenog hipotetičkog okvira

Kako se iz prethodno navedenog može vidjeti, optimizacija kapaciteta reciklažnog postrojenja pruža višestruke ekonomske i ekološke koristi:

1. Finansijska korist: Povećana stopa reciklaže generiše dodatne prihode od prodaje recikliranih materijala, dok istovremeno smanjuje troškove odlaganja otpada na deponijama.
2. Energetske uštede: Reciklaža stakla zahtijeva manje energije u odnosu na proizvodnju staklenih proizvoda od sirovina, čime se smanjuju operativni troškovi.
3. Smanjenje ekološkog uticaja: Smanjuje se emisija stakleničkih gasova jer je potrebna manja količina sirovina i energije za proizvodnju recikliranog stakla. Takođe, smanjenje količine otpada na deponijama doprinosi očuvanju zemljišta i smanjenju zagađenja vazduha.

Na osnovu prikupljenih podataka i analize, prednosti ulaganja u reciklažno postrojenje u Podgorici su višestruke:

- Godišnji prihodi: 1.797.810 EUR
- Godišnji operativni troškovi: 642.075 EUR
- Neto godišnja korist: 1.155.735 EUR

Troškovi inicijalne investicije od 2.660.000 EUR za MRF postrojenje mogli bi se nadoknaditi za manje od tri godine, čime se ostvaruje visok povraćaj investicije. Stabilnost tarifa i postepeno uvođenje amortizacije dodatno doprinosi finansijskoj održivosti ovog projekta. Postrojenje bi time postalo ekonomski održiv resurs koji doprinosi ciljevima cirkularne ekonomije i ekološkim standardima Crne Gore.

Rezultati istraživanja pružaju sveobuhvatnu analizu trenutnog stanja i budućih mogućnosti za unaprjeđenje upravljanja staklenim otpadom u Crnoj Gori, potvrđujući relevantnost postavljenih istraživačkih pitanja i hipoteza.

Prvo istraživačko pitanje, koje se fokusira na analizu trenutnog stanja upravljanja staklenim otpadom i identifikaciju ključnih izazova, pokazuje da reciklaža stakla u Crnoj Gori trenutno nailazi na značajne prepreke. Nedovoljno razvijena infrastruktura, nizak stepen svijesti

javnosti o važnosti reciklaže, kao i ograničena legislativna podrška, predstavljaju osnovne izazove. Uprkos strateškom okviru koji predviđa povećanje stope reciklaže, postojeći sistem još uvijek ne omogućava adekvatno odvojeno prikupljanje stakla u svim opštinama. Ovi nalazi potvrđuju prvu hipotezu, ističući da bi primjena savremenih tehnoloških rješenja u prikupljanju i obradi staklenog otpada mogla značajno unaprijediti ekološku efikasnost sistema reciklaže.

Drugo istraživačko pitanje, koje istražuje potencijal savremenih tehnologija za reciklažu stakla, pokazuje da tehnologije poput balističke i magnetne separacije te optičkog sortiranja mogu donijeti značajne ekonomske i ekološke koristi. Empirijski rezultati ukazuju na to da bi ulaganja u naprednu tehnologiju mogla poboljšati efikasnost obrade otpada, podržavajući hipotezu o ekonomskoj opravdanosti početnih investicija. Na primjer, godišnja neto korist od prodaje recikliranog stakla u Podgorici procijenjena je na preko 1,15 miliona eura, dok se troškovi za MRF postrojenje mogu povratiti za manje od tri godine, čime se potvrđuje ekonomska održivost investicije.

Treće istraživačko pitanje, koje se odnosi na mogućnost primjene dobrih praksi iz Evropske unije, identifikuje uspješne modele kao što su proširena odgovornost proizvođača (EPR) i depozitni sistemi (DRS). Ovi modeli, ukombinovani sa savremenim tehnologijama, mogu biti primijenjeni u Crnoj Gori kako bi se efikasnije odgovorilo na zahtjeve cirkularne ekonomije i povećala stopa reciklaže stakla. Pored toga, dostupne evropske finansijske inicijative, kao što su IPA fondovi, mogu značajno olakšati pritisak na državne resurse i ubrzati implementaciju modernih rješenja.

Hipoteza 1: Uvođenje savremenih tehnologija za reciklažu stakla u Crnoj Gori značajno će povećati stopu reciklaže stakla i smanjiti negativni ekološki uticaj staklenog otpada.

Rezultati istraživanja potvrđuju ovu hipotezu. Modernizacija infrastrukture kroz primjenu balističke separacije i optičkog sortiranja značajno poboljšava kapacitet prikupljanja i obrade staklenog otpada. Analiza troškova i koristi ukazuje na to da ulaganje u napredne metode sortiranja može omogućiti veću čistoću recikliranog stakla, smanjenje operativnih troškova i povećanje prihoda od prodaje recikliranog stakla. Ova tehnologija doprinosi ne samo većoj stopi reciklaže, već i smanjenju količine otpada na deponijama, čime se ostvaruju direktne ekološke koristi. Potvrda ove hipoteze naglašava da modernizacija direktno doprinosi smanjenju ekološkog uticaja, povećava kapacitet reciklažnog sistema i doprinosi ciljevima održivosti.

Hipoteza 2: *Primjena modernih tehnologija za reciklažu stakla donosi ekonomske prednosti koje premašuju početne investicije.*

Rezultati ekonomske analize pružaju čvrstu osnovu za ovu hipotezu. Procijenjena godišnja korist od 1,15 miliona eura, u kombinaciji s mogućnošću povrata inicijalne investicije u roku od tri godine, potvrđuje održivost i isplativost investicije. Osim finansijskog povrata, reciklaža smanjuje troškove odlaganja otpada, donosi energetske uštede i doprinosi lokalnoj ekonomiji kroz prodaju recikliranog stakla. Ovi nalazi jasno ukazuju na potencijal reciklažnog sektora da doprinese ekonomskoj održivosti Crne Gore, potvrđujući drugu hipotezu da je investicija u modernu tehnologiju ekonomski opravdana i održiva na duži rok.

U cjelini, rezultati istraživanja potvrđuju oba aspekta hipotetičkog okvira, pokazujući da investicija u savremene tehnologije za reciklažu stakla može značajno povećati ekološku efikasnost sistema i pružiti održive ekonomske koristi koje nadmašuju početna ulaganja.

7. Zaključak

Rezultati istraživanja potvrđuju da tehnologije za reciklažu staklenog otpada, poput balističke separacije, magnetne separacije i optičkog sortiranja, mogu značajno unaprijediti efikasnost sistema upravljanja otpadom u Crnoj Gori. Primjena ovih tehnologija ne samo da smanjuje količinu staklenog otpada na deponijama već doprinosi i smanjenju emisija CO₂ i energetske efikasnosti. Analiza ukazuje da investicije u modernu tehnologiju imaju visok povraćaj i donose ekonomske prednosti koje premašuju početne troškove, čime reciklaža postaje profitabilna i održiva na srednji i dugoročni rok. Nadalje, integracijom praksi iz EU, kao što su sistemi povrata depozita i proširena odgovornost proizvođača, moguće je dodatno podstaći reciklažu i osigurati veće učešće građana.

Zaključci ovog istraživanja naglašavaju potrebu za daljim ulaganjima u infrastrukturu i edukaciju, kako bi Crna Gora mogla efikasnije preći na cirkularnu ekonomiju i ostvariti održivi razvoj. Unaprjeđenje sistema reciklaže stakla doprinosi ne samo smanjenju ekoloških negativnih uticaja već i ekonomskom razvoju kroz otvaranje novih radnih mjesta i rast prihoda od recikliranog materijala. Implementacija predloženih strategija i tehnologija može transformisati upravljanje staklenim otpadom u Crnoj Gori i učiniti ga održivim dijelom nacionalne ekonomije.

S obzirom na projekciju generisanja staklenog otpada u centralnom regionu Crne Gore do 2028. godine, posebno u Podgorici sa očekivanih 12.372 tone godišnje, Državni plan upravljanja otpadom, preporučuje se izgradnja postrojenja srednjeg kapaciteta za reciklažu stakla. Predloženi kapacitet ovog postrojenja iznosio bi najmanje 15.000 tona godišnje, što bi omogućilo obradu trenutnih i budućih količina otpada. Ovo postrojenje bi uključivalo savremene tehnologije, poput optičkih separatora, magnetne separacije i balističke separacije, kako bi se postigla visoka čistoća i efikasnost reciklaže.

Ekonomska opravdanost - Analiza troškova i koristi jasno ukazuje na ekonomsku isplativost:

- Početni troškovi: Prema Državnom planu upravljanja otpadom, predviđeni su na €9,18 miliona za razvoj MRF (Material Recovery Facility) postrojenja.
- Operativni troškovi: Procjenjuju se na približno €25 po toni obrađenog otpada, što iznosi ukupno €642.075 godišnje za predviđeni kapacitet.

- Prihodi: Tržišna cijena recikliranog stakla je €70 po toni, što generiše godišnji prihod od €1,8 miliona.

- Neto godišnja korist: Prihodi nakon odbitka operativnih troškova iznose €1,16 miliona godišnje, što omogućava povrat inicijalne investicije u roku od tri godine.

Ove brojke pokazuju da je ulaganje u postrojenje ekonomski opravdano i održivo, uz mogućnost dodatnog finansiranja putem evropskih fondova, poput IPA III.

Ekološka opravdanost - Reciklaža stakla donosi višestruke koristi za životnu sredinu:

1. Smanjenje pritiska na deponije: Reciklaža bi godišnje smanjila količinu otpada koji završava na deponijama za oko 15.000 tona.

2. Ušteda energije: Reciklaža stakla koristi do 30% manje energije nego proizvodnja novog stakla iz sirovina, čime doprinosi smanjenju emisije ugljen-dioksida.

3. Cirkularna ekonomija: Reciklaža stakla omogućava ponovnu upotrebu ovog resursa, što je u skladu sa ciljevima EU o održivom razvoju.

Tehničke karakteristike

- Savremena tehnologija: Postrojenje bi uključivalo optičke separatore za precizno razdvajanje stakla po bojama i kvalitetu, uz efikasnost separacije od preko 99%.

- Regionalna pokrivenost: Sistem zonskog prikupljanja otpada, uključujući opštine poput Danilovgrada i Nikšića, omogućio bi optimalno snabdijevanje postrojenja staklenim otpadom, uz smanjenje logističkih troškova.

Širi uticaj - Razvoj ovog postrojenja pozicionirao bi Podgoricu kao regionalnog lidera u upravljanju staklenim otpadom. Ova inicijativa ne samo da bi doprinijela očuvanju životne sredine, već bi otvorila nova radna mjesta i stimulisala lokalnu ekonomiju.

Takođe, iz sprovedenog istraživanja ukazana je potreba za formalizacijom neformalnog sektora i edukacijom stanovništva o značaju reciklaže, posebno staklenog otpada. Uvođenje inicijativa koje uključuju ove sektore može dodatno unaprijediti prikupljanje i povećati svijest o važnosti pravilnog odlaganja otpada.

Literatura

1. Petrović, E. (1972). *Praktikum iz tehnologije stakla: Osnovi tehnologije stakla*. 1972. Beograd: Tehnološko-Metalurški fakultet.
2. Aleksić, J. (1964). *Tehnologija stakla*. Paraćin: Fabrika stakla Paraćin.
3. Batrićević, A., & Paunović, N. (2017). Odlaganje otpada u Evropskoj uniji - normativni okvir i praksa. *Strani pravni život*, 4, 107-122.
4. European Union Directive (94/62/EZ). *Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu*.
5. European Union Directive (EU) 2018/852. *Izmene Direktive 94/62/EZ o ambalaži i ambalažnom otpadu*.
6. Pešević, D. (2023). *Upravljanje otpadom*. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu.
7. Ilić, M., & Miletić, B. (1998). *Gustina otpada i metode sortiranja*. Beograd: Fakultet za ekologiju.
8. Vetropak d.o.o. (2024). *Kružni tok stakla u prirodi*. Zelena Slovenija. Dostupno na: <https://www.petservis.ba/reciklaza/>.
9. Worrell, E., & Reuter, M. A. (2014). *Handbook of recycling: State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists*. Amsterdam, Boston: Elsevier.
10. Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2016). *Princip optičkog sortiranja staklenog krša u vidljivom spektru svetlosti*. Resources, Conservation and Recycling, 92, 190-205.
11. Simić, S., Stanojević, M., & Karličić, N. (2012). *Specifičnosti upravljanja otpadnim staklom*. U Zbornik Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji - Procesing, 7-8. jun 2012 (Vol. 20, No. 1, str. 21-28). Beograd: Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS).
12. Klasić, P. (2021). *Prikupljanje i recikliranje otpadnog ambalažnog stakla*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
13. Cvetanović, B., & Đekić, P. (2022). *Reciklažne tehnologije I*. Niš: Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija, Odsek Niš. 35-38
14. Close the Glass Loop. (2021). *Stopa reciklaže staklenog otpada u Evropi*.
15. Hestin, M., de Veron, S., & Burgos, S. (2016). *Economic study on recycling of building glass in Europe*. Deloitte. 101-102
16. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). *Reciklaža plastike: Izazovi i mogućnosti*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2115-2126. doi:10.1098/rstb.2008.0311.

17. Maletz, R., Dornack, C., & Ziyang, L. (2018). *Waste Glass Recycling: Advances and Challenges*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(2), 245-254.
18. Khan, A., Ahmad, R., & Majava, J. (2021). *Circular Economy Strategies in Industry*. Sustainability, 13(5), 235-247.
19. Franjić, A., & Freestone, I. (2017). *Glass recycling*. Dostupno na: <https://doi.org/10.17234/9789531757232-10>.
20. Keller, D. (2005). *Social and Economic Aspects of Glass Recycling*. U J. Bruhn, B. Croxford & D. Grigoropoulos (Eds.), *TRAC 2004: Proceedings of the Fourteenth Annual Theoretical Roman Archaeology Conference, University of Durham* (str. 65–78). Oxford: Oxbow.
21. Nedić, B., & Džunić, D. (2023). *Tehnologije reciklaže*. Kragujevac: Univerzitet, Fakultet inženjerskih nauka.
22. Opetuk, M. (2016). *Managing Waste and Recycling Systems*. Zagreb: Tehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
23. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D., Kuiper, P., & de Wit, H. (2012). *Recycling of composite materials*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 51, 53-68.
24. Schögggl, J. P., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2020). *Circular Economy in the Built Environment*. Journal of Cleaner Production, 244, 118-125.
25. Hestin, M., de Veron, S., & Burgos, S. (2016). *Economic study on recycling of building glass in Europe*. Deloitte. 101-102
26. Ministarstvo turizma. (2024). *Državni plan upravljanja otpadom za period 2024.-2028*. Objavljeno: 28.05.2024. Dostupno na: <https://www.gov.me/dokumenta/1b9a9af3-c1c1-43c2-a10b-48388084af11>
27. Vlada Crne Gore. (2015). *Strategija upravljanja otpadom u Crnoj Gori do 2030. godine*. Preuzeto sa: <https://www.gov.me/dokumenta/d8073954-d74f-4398-ba8c-2e6747c153f2>
28. Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija - Odsek Niš. (2022-23). *Separacija otpada*. Dostupno na: https://odseknis.akademijanis.edu.rs/wp-content/plugins/vts-predmeti/uploads/P6_SEPARACIJA%20OTPAD_A_2022-23.pdf
29. Soci  t   VIA. (n.d.). *MRF postrojenje za reciklažu u Quebec Cityju: Napredne tehnologije za   i  enje stakla*. Dostupno na: <https://www.recyclingtoday.com/article/mrf-glass-clean-up/>