

Potencijal otpadne plastike za niskougljičnu tranziciju društva

Subotić, Dora

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:513948>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dora Subotić

Zagreb, 2024. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Slaven Dobrović, dipl. ing.

Studentica:

Dora Subotić

Zagreb, 2024. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Slavenu Dobroviću na pomoći i susretljivosti prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svojim roditeljima Ani i Mirodaru na bezuvjetnoj podršci. Hvala sestrama što su uvijek tu. Hvala bakama i djedovima, vujci i teti na brizi. Hvala dragom Isusu jer bez njega ničeg ne bi bilo.

Hvala rodici Dini, Dujli, Mihi, Ivi, Doris, Sandri, Mariji i svim ostalim divnim prijateljima što su mi neiscrpan izvor inspiracije i pomoći.

Dora Subotić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 01	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dora Subotić** JMBAG: 0035211320

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Potencijal otpadne plastike za niskougljičnu tranziciju društva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The potential of waste plastics for the low-carbon transition of society**

Opis zadatka:

Niskougljična tranzicija društva je nužnost na koju su se obvezale zemlje članice Europske unije kao dio europskog zelenog plana kojim se želi postići klimatska neutralnost i poboljšati odnos prema resursima i okolišu. U tom pogledu važno mjesto ima kružni koncept gospodarenja otpadom, ujedno i otpadnom plastikom, čiji potencijali se često zanemaruju, a onda i propuštaju koristiti.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Obrazložiti načine postupanja otpadnom plastikom s gospodarskog i ekološkog aspekta. Ekološki aspekt treba uključiti pregled emisija stakleničkih plinova i ostalih zagađivala te utjecaj na resursnu učinkovitost. Gospodarski aspekt uključuje pregled energetske uštede i zahtjeva te kvantifikaciju materijskih produkata pojedinih postupaka gospodarenja otpadom.
2. Proračunati energetske, materijalne i emisijske potencijale za odabrane scenarije gospodarenja otpadnom plastikom za odabrano geografsko područje, uz analizu i prikaz rezultata tablično i grafički. Scenariji uključuju kružno gospodarenje s dominantnim materijskim recikliranjem, kemijsko recikliranje, energetska iskorištenje s proizvodnjom električne energije i odlaganje.
3. Obraditi dobivene rezultate te iskazati niskougljični potencijal.
4. Donijeti zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

16. studenoga 2023.

18. siječnja 2024.

22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Slaven Dobrović

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS GRAFOVA.....	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Postojeće stanje u Republici Hrvatskoj.....	2
1.2. Postojeće stanje u Gradu Zagrebu.....	3
2. GOSPODARENJE PLASTIČNIM OTPADOM.....	5
2.1. Vrste plastike i plastičnog otpada	6
2.2. Prikupljanje plastičnog otpada	10
2.3. Predobrada plastike za recikliranje	10
2.4. Obrada plastičnog otpada.....	15
3. MOGUĆI POSTUPCI S POLIMERNIM OTPADOM.....	16
3.1. Ponovna upotreba.....	16
3.2. Mehaničko recikliranje	17
3.3. Kemijsko recikliranje	20
3.4. Spaljivanje.....	22
3.5. Odlaganje	23
4. PRORAČUN POTENCIJALA OTPADNE PLASTIKE	24
4.1. Ulazni podaci za proračun.....	24
4.2. Mehaničko recikliranje	25
4.2.1. Mehaničko recikliranje pri sortiranju srednje učinkovitosti	25
4.2.2. Mehaničko recikliranje pri sortiranju visoke učinkovitosti	28
4.3. Piroliza	31
4.4. Spaljivanje.....	33
4.5. Odlaganje	36
4.6. Rezultati provedenih proračuna	36
4.6.1. Mehaničko recikliranje	37
4.6.1.1. Recikliranje srednje učinkovitosti.....	37
4.6.1.2. Recikliranje pri sortiranju visoke učinkovitosti.....	39
4.6.1.3. Recikliranje aluminija i željeza.....	40
4.6.2. Piroliza	44
4.6.3. Spaljivanje.....	46
4.6.4. Odlaganje	48
5. RASPRAVA.....	50
6. ZAKLJUČAK.....	56

LITERATURA..... 58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Udio komunalno otpada u RH po postupcima obrade, 2010.-2022. godina [5].....	2
Slika 2.	Udio recikliranja u RH u razdoblju od 2010. do 2022. godine u odnosu na propisane ciljeve [5]	3
Slika 3.	Udio materijala odloženih u žutu vrećicu.....	4
Slika 4.	Piramida prioriteta postupaka gospodarenja otpadom	6
Slika 5.	Osnovna podjela polimera [24]	7
Slika 6.	Shema odvajanja NIR-om [34].....	14
Slika 7.	Shema granica sustava obrade otpadne plastike recikliranjem	25
Slika 8.	Shema granica sustava obrade otpadne plastike pirolizom	31
Slika 9.	Shema granica sustava obrade otpadne plastike spaljivanjem	33
Slika 10.	Shema granica sustava obrade otpadne plastike odlaganjem	36
Slika 11.	Shema toka mase u procesu obrade otpadne plastike mehaničkim recikliranjem pri sortiranju srednje učinkovitosti	37
Slika 12.	Shema toka mase uslijed obrade plastičnog otpada postupkom pirolize	44
Slika 13.	Shema toka mase uslijed obrade plastičnog otpada postupkom spaljivanja	46
Slika 14.	Shema toka mase uslijed obrade otpadne plastike odlaganjem.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mase i udjeli pojedinih polimera u odvojeno prikupljenom plastičnom otpadu... 24	24
Tablica 2. Energija potrebna za recikliranje..... 26	26
Tablica 3. Emisijski faktori pri mehaničkom recikliranju..... 28	28
Tablica 4. Vrijednosti eneregenata porbnih za proizvodnju 1 t HDPE-a [30] 29	29
Tablica 5. Emisije energenata potrebnih za recikliranje jedne tone HDPE-a [30]..... 29	29
Tablica 6. Konačne vrijednosti energije u sustavu mehaničkog recikliranja pri visokoučinkovitom sortiranju..... 30	30
Tablica 7. Konačne vrijednosti emisija CO ₂ u sustavu mehaničkog recikliranja pri visokoučinkovitom sortiranju..... 30	30
Tablica 8. Energenti potrebni za proizvodnju 1 t pirolitičkog ulja 31	31
Tablica 9. Produkti pirolize jedne tone miješanog plastičnog otpada 32	32
Tablica 10. Energija uložena u proces pirolize 32	32
Tablica 11. Energija dobivena procesom pirolize 32	32
Tablica 12. Emisijski faktori energenata u procesu pirolize 33	33
Tablica 13. Uložena i dobivena energija u procesu spaljivanja 34	34
Tablica 14. Emisije nastale izgaranjem otpadne plastike..... 35	35
Tablica 15. Emitirane i izbjegnute emisije procesom spaljivanja 35	35
Tablica 16. Rezultati proračuna..... 38	38
Tablica 17. Energija potrebna za proizvodnju izvornog materijala i reciklata 41	41
Tablica 18. Emisije ekvivalenta CO ₂ nastale uslijed proizvodnje izvornog materijala i reciklata 42	42
Tablica 19. Rezultati proračuna..... 44	44
Tablica 20. Rezultati proračuna 47	47
Tablica 21. Rezultati proračuna..... 49	49
Tablica 22. Udjeli postupaka obrade..... 54	54
Tablica 23. Ukupna energija dobivena dobrim gospodarenjem otpadom..... 55	55
Tablica 24. Ukupne emisije izbjegnute gospodarenjem otpadom..... 55	55

POPIS GRAFOVA

Graf 1.	Dijagram usporednog prikaza utrošene i uštedene energije pri mehaničkom recikliranju polimera	27
Graf 2.	Graf usporednog prikaza emisijskih izvora i ponora pri mehaničkom recikliranju polimera.....	28
Graf 3.	Tablični dijagram usporedbe uložene i uštedene energije pri mehaničkom recikliranju.....	38
Graf 4.	Tablični dijagram usporedbe emisijskih ponora i izvora uslijed recikliranja	39
Graf 5.	Prikaz razlike neto energije mehaničkog recikliranja pri srednjeučinskom i visokoučinskom sortiranju	39
Graf 6.	Prikaz razlike ukupnih emisija mehaničkog recikliranja pri srednjeučinskom i visokoučinskom sortiranju	40
Graf 7.	Usporedni prikaz neto energija pri mehaničkom recikliranju metala, mehaničkom recikliranju plastike pri srednjeučinkovitom i visokoučinkovitom sortiranju.....	43
Graf 8.	Usporedni prikaz emisijskih ponora pri mehaničkom recikliranju metala, mehaničkom recikliranju plastike pri srednjeučinkovitom i visokoučinkovitom sortiranju.....	43
Graf 9.	Grafički prikaz energija u procesu pirolize	45
Graf 10.	Grafički prikaz izvora i ponora emisija CO ₂ uslijed pirolize	46
Graf 11.	Graf prikaza vrijednosti uložene i dobivene energije pri spaljivanju.....	47
Graf 12.	Graf prikaza emisijskih izvora i ponora za svaki polimer uslijed spaljivanja.....	48
Graf 13.	Grafički prikaz energetskog potencijala plastike za svaki postupak obrade	50
Graf 14.	Grafički prikaz emisijskog potencijala plastike za svaki postupak obrade	51
Graf 15.	Energetski potencijal obrade plastičnog otpada	53
Graf 16.	Emisijski potencijal obrade plastičnog otpada	53

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
CO ₂	ugljkov dioksid
CO ₂ eq	ekvivalent ugljikovog dioksida
EU	europska unija
ZGO	zakon o gospodarenju otpadom
HDPE	polietilen visoke gustoće
LDPE	polietilen niske gustoće
PET	polietilentereftalat
PP	polipropilen
PS	polistiren
PA	poliamid
PVC	polivinil klorid
EPS	ekspandirani polistiren
MPO	miješani plastični otpad
NIR	bliza infracrvena radijacija, eng. „near infrared“
EU ETS	Europski sustav trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih, eng. „European union emissions trading system“

SAŽETAK

Ovaj rad istražuje potencijal otpadne plastike kao ključnog čimbenika u ostvarivanju niskougljične tranzicije društva, s fokusom na Grad Zagreb u okviru kružnog gospodarenja otpadom. Teorijski su opisani postupci obrade plastičnog otpada kojima pripadaju mehaničko recikliranje, kemijsko recikliranje, spaljivanje i odlaganje. Također, opisan je sustav prikupljanja i sortiranja plastičnog otpada koji je nužan za postupke recikliranja. Za postupke mehaničkog recikliranja, pirolize, spaljivanja i odlaganja proveden je proračun energetskog i emisijskog potencijala koji je iskazan kroz neto energije i emisijske ponore ili izvore. Budući da je cilj Republike Hrvatske do 2025. reciklirati najmanje 55% komunalnog otpada i da rezultati provedenog proračuna pokazuju energetske i emisijske prednosti mehaničkog recikliranja pred ostalim postupcima obrade, posebno se razmatra značaj mehaničkog recikliranja plastike te ga se uspoređuje i kombinira s ostalim postupcima obrade. Dodatan se naglasak stavlja na visokoučinkovite sustave prikupljanja i sortiranja plastičnog otpada, pri čemu se mehaničkim recikliranjem postiže značajna energetska ušteda. Ostali postupci obrade pokazuju se manje vrijednim, a analiza rezultata naglašava ključnu ulogu visokoučinkovitih sustava sortiranja i recikliranja, u smanjenju potrošnje energije i emisija stakleničkih plinova, odnosno u iskorištenju potencijala kružnog gospodarenja otpadom za niskougljičnu tranziciju društva.

Ključne riječi: niskougljična tranzicija, kružno gospodarenje otpadom, plastični otpad, energetski potencijal, emisijski potencijal, materijalni potencijal, ponovna upotreba, mehaničko recikliranje, piroliza, spaljivanje, odlaganje.

SUMMARY

This master thesis explores the potential of plastic waste as a key factor in achieving a low-carbon transition in society, with a focus on the city of Zagreb within the framework of waste circular management. Theoretical descriptions include plastic waste processing methods such as mechanical recycling, chemical recycling, incineration and disposal. The system for collecting and sorting plastic waste, necessary for recycling processes, is also outlined. Energy and emission potential calculations were conducted for mechanical recycling, pyrolysis, incineration and disposal, expressed in terms of net energy and emission sinks or sources.

Given Croatia's goal to recycle at least 55% of municipal waste by 2025. and considering the energy and emission advantages revealed by the calculations, especially in favor of mechanical recycling over other processing methods, the significance of mechanical plastic recycling is thoroughly examined. Emphasis is placed on high-efficiency systems for collecting and sorting plastic waste, where mechanical recycling leads to significant energy savings. Other processing methods appear to be less valuable, and the results underscore the crucial role of high-efficiency sorting and recycling systems in reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. This highlights the potential of waste circular management for a low-carbon societal transition.

Key words: low-carbon transition, plastic waste potential, plastic waste, energy potential, emissions potential, material potential, circular waste management, reuse, mechanical recycling, pyrolysis, incineration, disposal.

1. UVOD

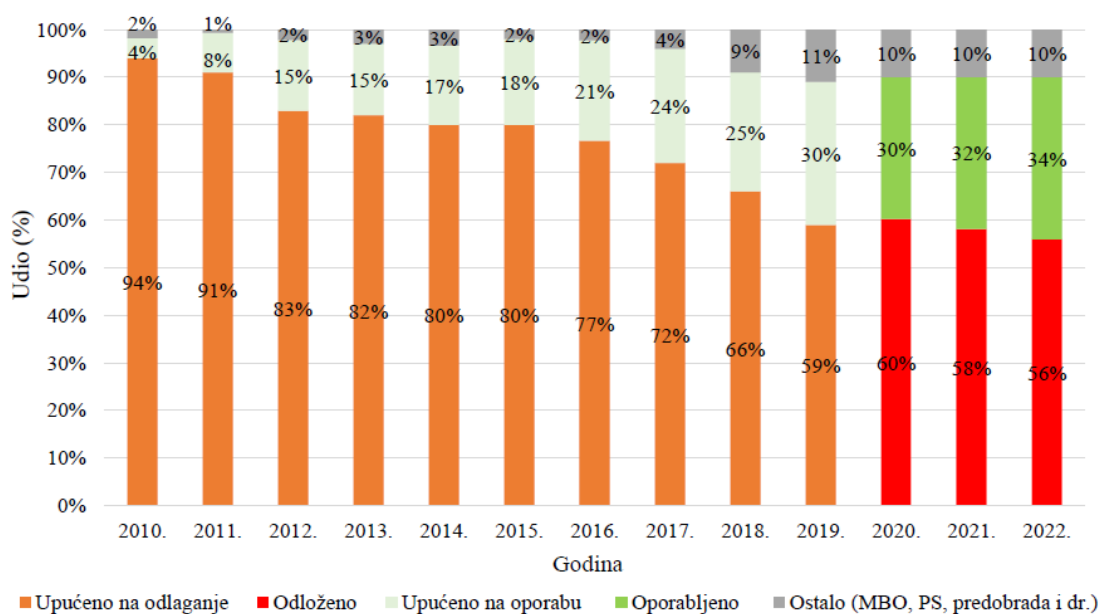
Europska je komisija 2019. predstavila Europski zeleni plan kojemu je ključni cilj postizanje klimatske neutralnosti u EU do 2050. godine, odnosno da Europa postane prvi klimatski neutralni kontinent. Europski zeleni plan obuhvaća niz strategija koje se odnose na različite sektore, uključujući energetiku, promet, poljoprivredu, industriju i druge. Ključne inicijative uključuju povećanje udjela obnovljivih izvora energije, poboljšanje energetske učinkovitosti, poticanje održive poljoprivrede, smanjenje onečišćenja, poticanje kružnog gospodarstva te poboljšanje javnog prijevoza.

Nacionalno zakonodavstvo usklađeno je s europskim direktivama kroz Zakon o gospodarenju otpadom (ZGO). ZGO-om se propisuju mjere u svrhu ostvarenja ciljeva Europskog zelenog plana i Akcijskog plana za kružno gospodarstvo kojima je gospodarenje otpadom integrirano u kružno gospodarstvo. Sukladno tome, Vlada Republike Hrvatske donijela je Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2023. – 2028. godine, čiji ciljevi proizlaze iz obveza koje su navedene u Zakonu gospodarenja otpadom, odnosno EU zakonodavstvu. Ciljevi gospodarenja otpadom propisuju se zbog poticanja prelaska na gospodarstvo koje je u većoj mjeri kružno i u kojem se što duže zadržava vrijednost proizvoda, materijala i resursa, a stvaranje otpada svodi se na najmanju moguću mjeru. U svrhu doprinosa kružnom gospodarstvu Europske unije, Republika Hrvatska mora najmanje 55%, 60%, 65% mase komunalnog otpada oporabiti recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu do 2025., 2030., 2035. godine. Budući da je Republika Hrvatska među državama članicama koje su 2013. reciklirale manje od 20% komunalnog otpada, dobivena je mogućnost odgode od pet godina za ispunjavanje navedenih ciljeva. Sukladno tome, Republika Hrvatska mora poduzeti potrebne mjere za ostvarenje sljedećih ciljeva:

- najmanje 50% mase komunalnog otpada mora se oporabiti recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu do 2025. godine;
- najmanje 55% mase komunalnog otpada mora se oporabiti recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu do 2030. godine;
- najmanje 60% mase komunalnog otpada mora se oporabiti recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu do 2035. godine. [1] [2] [3] [4]

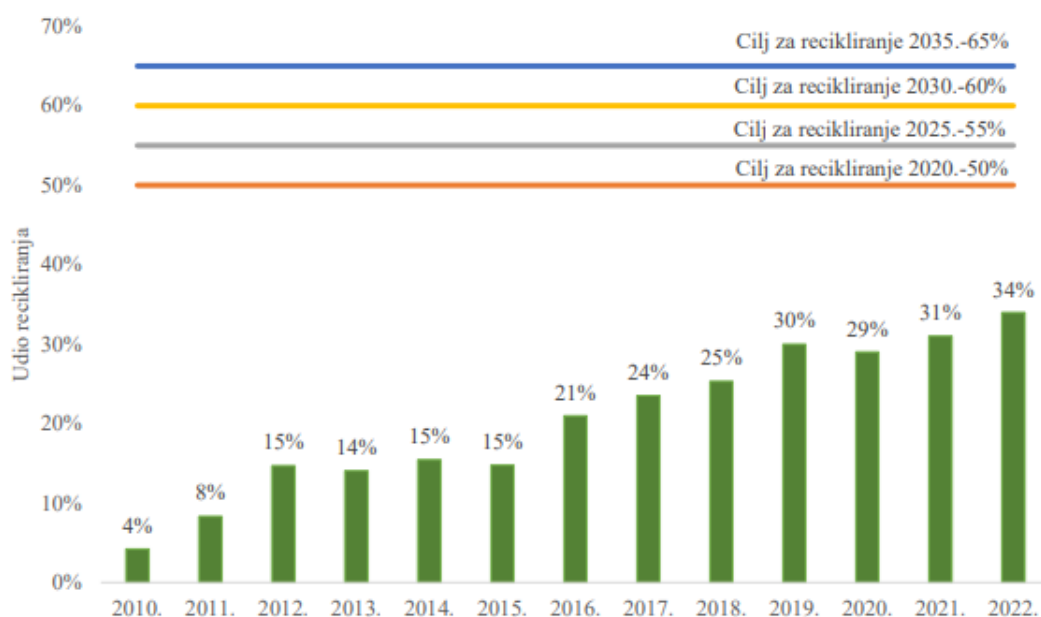
1.1. Postojeće stanje u Republici Hrvatskoj

U 2022. u Republici Hrvatskoj nastalo je 1.844.382 tona komunalnog otpada, od čega je 46% odvojeno sakupljeni komunalni otpada te iznosi 844.387 tona. Odvojeno sakupljeni komunalni otpada obuhvaća sve vrste komunalnog otpada osim miješanog komunalnog otpada, drugim riječima, on uključuje mješoviti otpad poput glomaznog otpada, otpada od čišćenja ulica, odvojeno prikupljenih reciklabilnih materijala i dr. Od ukupne mase odvojeno sakupljenog komunalnog otpada, 75% je oporabljeno, a preostala je količina bila privremeno uskladištena ili je završila na odlagalištima. Povećavanjem udjela komunalnog otpada upućenog na uporabu, smanjuje se količina komunalnog otpada upućenog na odlaganje. U 2022. godini 56% komunalnog otpada je odloženo, 34% je oporabljeno te je 10% upućeno na ostale postupke obrade (npr. mehaničko-biološka obrada otpada, privremeno skladištenje). [5]



Slika 1. Udio komunalno otpada u RH po postupcima obrade, 2010.-2022. godina [5]

Stopa recikliranja u 2022. godini jednaka je stopi uporabe i iznosi 34%. Do 2035., sukladno cilju propisanom u Zakonu o gospodarenju otpadom, treba postići da količina komunalnog otpada odloženog na odlagališta ne prelazi 10% mase ukupno proizvedenog komunalnog otpada. [5] Kao što se vidi na Slici 2 stopa recikliranja se povećava, no nedovoljno brzo. Zbog vidljivog kašnjenja u doseganju ciljeva, Hrvatskoj prijete penali, odnosno kazne za neispunjavanje europskih ciljeva iz gospodarenja otpadom.



Slika 2. Udio recikliranja u RH u razdoblju od 2010. do 2022. godine u odnosu na propisane ciljeve [5]

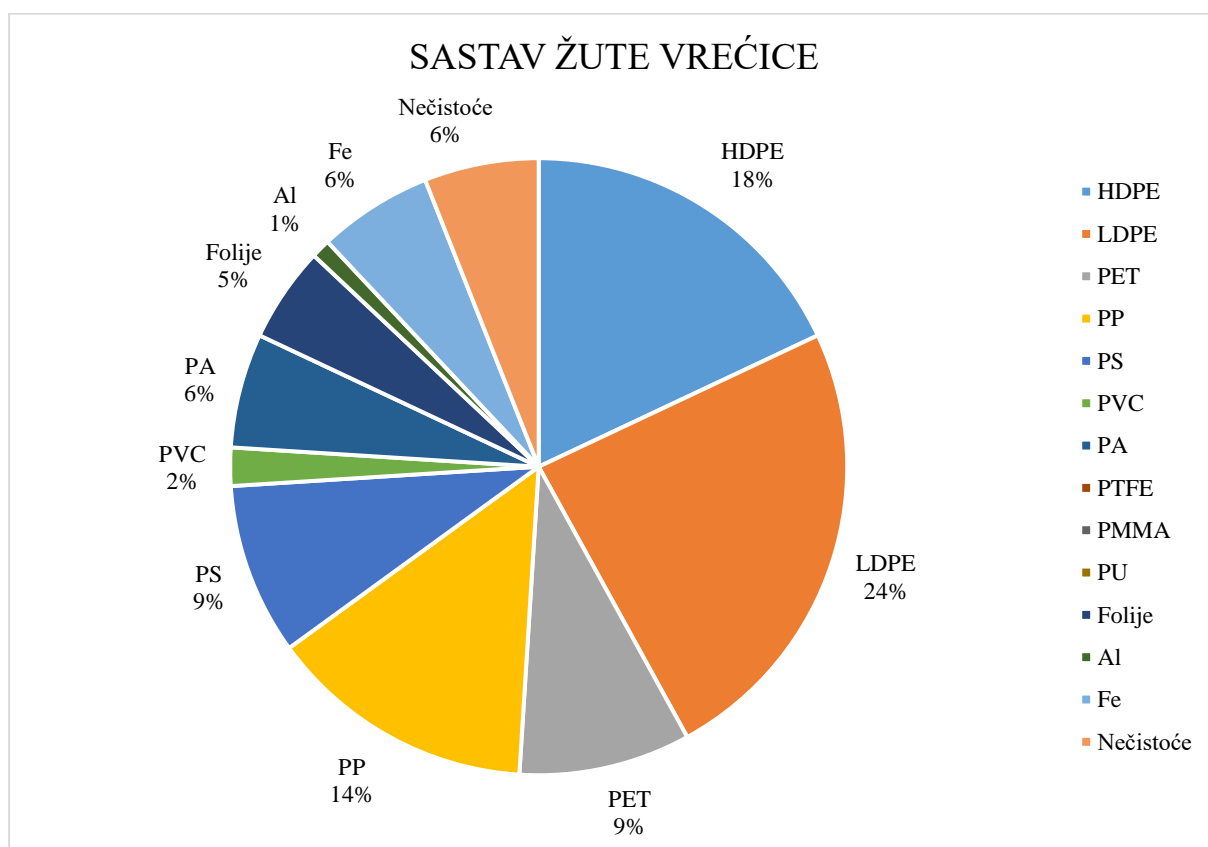
1.2. Postojeće stanje u Gradu Zagrebu

2022. godine u Gradu Zagrebu sakupljeno je 257.596 tona komunalnog otpada, što čini 18,22% ukupnog sakupljenog komunalnog otpada u Hrvatskoj. Stopa odvojenog sakupljanja u okviru javne usluge u 2022. za Grad Zagreb iznosi 28%, što iznosi 63.905 t. 71% ukupnog sakupljenog komunalnog otpada u Gradu Zagrebu je odloženo, a 17% je oporabljeno. Udio plastičnog otpada u odvojeno sakupljenom komunalnom otpadu u 2022. na nacionalnoj razini iznosi 10,78%. A u Gradu Zagrebu tijekom 2022. prikupljeno je 12.168 tona plastičnog otpada putem spremnika postavljenih na javnoj površini. U Gradu Zagrebu, 2023. na snagu je stupio novi način prikupljanja plastičnog otpada. Plastični otpad iz kućanstva prikuplja se putem žute vrećice, što je pojačalo odvojeno prikupljanje otpada. [5] U žute vrećice mogu se odložiti:

- polietilenske vrećice, folije, filmove, mjehurastu ambalažu (PE-HD, PE-LD, PET, PP)
- boce od jestivog ulja, destilirane vode, sredstava za čišćenje i pranje, kozmetike, lijekova (osim citostatika), prehrambenih proizvoda i sl. (PE- HD, PE-LD, PP i dr.)
- čaše i posude od jogurta, sira i sl. (PS, PP i dr.);
- ambalažu za razne prehrambene proizvode od pjenastog polistirena (*stiropora*) (EPS i dr.)
- višeslojnu ambalažu (tetrapak),

- ostale proizvode od plastike: boce za osvježavajuće napitke, čepove, plastične tanjure, pribor za jelo i sl. (PE-HD, PP, PVC, PS, PET i sl.);
- konzerve od hrane i limenke od pića. [6]

Potencijal plastičnog otpada u Gradu Zagrebu je tri do pet puta veći nego što je prikupljeno u 2022. prema Izvješću o komunalnom otpadu za 2022. To se može zaključiti jer je udio plastike u komunalnom otpadu 22,18% [31]. Za potrebe izrade energetskog i emisijskog potencijala plastičnog otpada, korištena je vrijednost masnog potencijala od 47.718,45 t plastike. Na Slici 2 prikazan je udio materijala u žutoj vrećici. Podaci o sastavu vrećice prikupljeni su analizom sastava vrećica iz različitih domaćinstava.



Slika 3. Udio materijala odloženih u žutu vrećicu

2. GOSPODARENJE PLASTIČNIM OTPADOM

Komunalnog otpada, tako i plastičnog, svake je godine sve više. Njegova sve veća akumulacija donosi razne ekološke, financijske i higijenske probleme. Otpadom se treba upravljati bez ugrožavanja ljudskog zdravlja i oštećenja okoliša, bez rizika za vodu, zrak, tlo, biljke ili životinje, bez uzrokovanja smetnji bukom ili mirisima i bez negativnog utjecaja na ruralna područja ili mjesta od posebnog interesa. Otpad je zapravo skup različitih vrijednih sirovina (biomasa, staklo, papir, plastika i dr.) koje se pravilnim prikupljanjem i oporabom može iskoristiti za proizvodnju novih materijala ili energenata.

Plastika svojom niskom cijenom proizvodnje omogućuje masovnu proizvodnju plastičnih proizvoda, čime oni postaju široko dostupni i često korišteni. Međutim, njihova postojanost u okolišu predstavlja ozbiljan ekološki problem. Dok je biološka nerazgradljivost plastike prednost u trajanju samog proizvoda, čim plastika postane otpad, suočavamo se s ozbiljnim posljedicama. Plastični otpad, posebno kada je odbačen u prirodu, ne pridržava se uobičajenog ugljikovog ciklusa poput drugih prirodnih materijala. Umjesto toga, plastika se fragmentira u makro, mikro, pa čak i nano čestice istog materijala. Ovaj proces ne znači da plastika postaje nevidljiva golom oku, već ostaje prisutna u okolišu u obliku sitnih čestica. Važno je napomenuti da ova fragmentacija ne znači da je plastika enzimatski konvertirana u CO₂ i druge razgradne produkte, naprotiv, ona ostaje trajno prisutna u obliku čestica koje mogu završiti u vodi, tlu i čak u prehrambenom lancu. Plastični otpad, posebno kada završi u rijekama, morima i oceanima, predstavlja ozbiljnu prijetnju okolišu. Mikroplastika, često dodana namjerno u proizvode kao sredstva za higijenu, rekvizite za zabavu ili materijale u poljoprivredi, također predstavlja značajan problem. Osim namjernih dodataka, mikroplastika nastaje i trošenjem različitih proizvoda u svakodnevnoj upotrebi, kao što su automobilske gume, oznake na cestama ili pranje tekstila. Sve ove forme plastike u okolišu stvaraju ozbiljne posljedice koje pokazuju koliko je hitna potreba za održivijim pristupom proizvodnji, potrošnji i gospodarenjem plastičnim otpadom.

Cilj kvalitetnoga gospodarenja otpadom smanjiti je količinu otpada, tako i plastike koja se odlaže na odlagališta. To je moguće pravilnim postavljanjem prioriteta pri postupanju s otpadom. Na prvome je mjestu spriječavanje njegovog nastanka. Sve više proizvoda pakira se u nepotrebnu ambalažu, mnogi proizvodi postali su jednokratni, a isto tako masovna proizvodnja i niske cijene nekih proizvoda potiču građane da kupuju nepotrebne predmete koje vrlo brzo odbace u otpad. Slijedno tome, mnoge je odbačene proizvode moguće preurediti i

popraviti za ponovno korištenje ili su potpuno ispravni i samo im je potrebno naći novog korisnika. Na trećem mjestu piramide prioriteta nalazi se recikliranje. Recikliranjem plastike proizvodi se reciklirana sirovina čijom se upotrebom smanjuje potreba za proizvodnjom nove, odnosno izvornih materijala. Na dnu piramide nalaze se ostali postupci obrade koji uključuju spaljivanje i odlaganje. [3]



Slika 4. Piramida prioriteta postupaka gospodarenja otpadom

Sprječavanje nastanka otpada većinski je zadaća proizvođača i onih koji donose pravila i zakone. Građani mogu pri kupnji odabrati proizvode s minimalnim pakiranjem ili izbjegavati jednokratne predmete, no te opcije nisu uvijek dostupne ili su financijski neprihvatljive mnogima. Također postavljanje uvjeta za ponovnu upotrebu zadaća je države i građana. Država bi trebala podići svijest građana o vrijednosti sirovina i energije, a tako i proizvoda. Zadaća je države omogućiti potrebnu infrastrukturu i propise koji omogućavaju ponovnu upotrebu proizvoda. Ponovna uporaba, recikliranje, spaljivanje i odlaganje plastičnog otpada, postupci su obrade koji su opisani u idućim poglavljima.

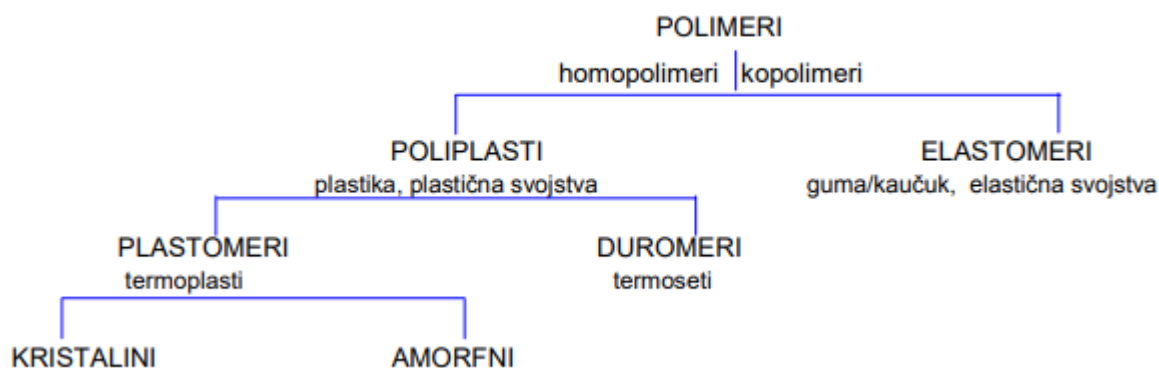
U ovom radu u obzir će se uzeti plastika sakupljena iz kućanstva.

2.1. Vrste plastike i plastičnog otpada

Plastika je skupni naziv za različite polimerne materijale koji imaju svoja karakteristična svojstva te se prema njima koriste u različitim industrijama. Njihova visoka mehanička svojstva čine ih snažnima i dugotrajnima, omogućujući široku primjenu u raznolikim sektorima. Osim

toga, polimeri se ističu kemijskom postojanošću, pružajući trajnost i otpornost na koroziju, što produljuje vijek trajanja proizvoda. Otpornost na vlagu predstavlja još jednu ključnu karakteristiku polimernih materijala. Ovi materijali ne podliježu negativnim utjecajima vlage, zadržavajući svoju strukturu i funkcionalnost čak i u vlažnim okruženjima. Niska gustoća polimera pridonosi smanjenju mase proizvoda, olakšavajući rukovanje i transport. Jedna je od ključnih prednosti polimernih materijala i njihova ekonomska isplativost, čineći ih pristupačnima za različite sektore industrije, što doprinosi općoj učinkovitosti proizvodnje. Osim toga, polimerni materijali iznimno su prilagodljivi oblikovanju, što omogućava fleksibilnost u dizajnu proizvoda. Ta karakteristika čini polimere idealnim materijalom za proizvodnju raznovrsnih predmeta, od jednostavnih svakodnevnih proizvoda do kompleksnih inženjerskih komponenti.

Veliki broj različitih vrsta polimera jedan je od razloga zbog kojih su polimeri u tako širokoj upotrebi. Od različitih vrsta polimera moguće je proizvesti alternativni proizvod svega što danas koristimo. Prednosti polimernih proizvoda njihova su dugovječnost, mogućnost svestrane upotrebe i niska cijena proizvodnje. Osnovna je podjela polimera na poliplaste i elastomere, koja se temelji na njihovim svojstvima, a ona mogu biti plastična ili elastična.



Slika 5. Osnovna podjela polimera [23]

Plastični otpada sadržan u mješini komunalnom otpadu sastavljen je od:

- Polietilen visoke gustoće (HDPE): spremnici
- Polietilen niske gustoće (LDPE): vrećice, igračke, premazi, spremnici
- Polietilentereftalat (PET): boce, tekstilna vlakna, folija za pakiranje hrane
- Polipropilen (PP): folija, mikrovalne posude, sanduci, električni dijelovi
- Polistiren (PS): šalice, tanjuri, igračke
- Polivinil klorid (PVC): boce, prozirna folija, igračke, bankovne kartice

- Poliamid (PA): folije za pakiranje hrane poput ulja, sira i proizvoda za kuhanje u vrećici, tekstilna vlakna [7]

HDPE

Polietilen visoke gustoće, skraćeno HDPE (eng. „High-density polyethylene“) duga je linearna polimerna lančana struktura s visokim stupnjem kristalnosti i niskim stupnjem razgranavanja, što rezultira visokim svojstvima čvrstoće i krutosti materijala. HDPE se ističe svojom visokom gustoćom, svojstvom koje značajno pojačava ukupnu čvrstoću i čini ga pogodnim za različite primjene. HDPE pokazuje dobru otpornost na kemikalije, što ga čini prikladnim za uporabu u spremnicima namijenjenima pohrani različitih tvari, uključujući i one korozivne prirode. Zbog svojih visokih svojstava čvrstoće, HDPE se široko koristi u proizvodnji boca za mlijeko, boca za deterdžente, spremnika za ulje, igračaka i još mnogo toga. Također, koristi se i u proizvodnji geomembrana koje pronalaze različite primjene, poput obloge deponija ili obloge ribnjaka. HDPE ima dobru kemijsku otpornost i može se reciklirati u plastičnu građu, namještaj i dijelove automobila. [9] [10]

LDPE

LDPE, odnosno polietilen niske gustoće (eng. „Low-Density Polyethylene“) termoplastični (plastomer) je polimer dobiven od etilenskih monomera, karakteriziran razgranatom molekulskom strukturom s niskim stupnjem kristalnosti. Za razliku od HDPE-a, LDPE ima razgranatiju strukturu što rezultira slabijim međumolekularnim silama te stoga manjom vlačnom čvrstoćom i tvrdoćom. Također, razgranatost utječe na manju kristalnost strukture te tako pridonosi nižoj gustoći i većoj duktilnosti u usporedbi s HDPE-om. Svojstva LDPE-a uključuju prozirnost, otpornost i podatnost, čineći ga posebno prikladnim za razne primjene. Ima izvrsnu otpornost na vodu te se široko primjenjuje u područjima poput pakiranja, proizvodnje spremnika i izrade fleksibilnih predmeta. Neki od proizvoda koji se izrađuju od LDPE-a plastične su vrećice, termoskupne folije, fleksibilne filmske ambalaže, spremnici, boce s pritiskom, poklopci i različite kućanske posude. Svi ovi predmeti uobičajeno se koriste u našem svakodnevnom životu pa se otpad od LDPE-a svakodnevno gomila. [10]

PET

Poli(etilen-tereftalat) (PET) plastomer je s molekularnom strukturom izvedenom iz tereftalne kiseline i etilen glikola. PET je odobren za pakiranje hrane i pića zbog svoje inertne i nereaktivne prirode. Osigurava sigurnost i integritet proizvoda koje sadržava. Upravo je zato postao odličan izbor za plastično pakiranje raznih prehrambenih proizvoda, a primjeri toga su boce napitaka poput mineralne vode, gaziranih i voćnih sokova. PET je često korištena plastika za jednokratne boce jer je jeftina, lagana, nepoderiva i lako se reciklira. Isto tako, PET plastika prikladna je za spremnike velikog kapaciteta, lagana je i otporna na pritisak. Ostale primjene PET-a uključuju električnu izolaciju, magnetske trake, rendgenske i druge fotografske filmove. Opsežna primjena PET-a dovodi do nakupljanja PET otpada na odlagalištima. [9][10]

PP

Polipropilen (PP) zasićeni je polimer s linearnim hidrokarbonskim lancem koji posjeduje dobru kemijsku i toplinsku otpornost. Za razliku od HDPE-a, PP se ne topi na temperaturama ispod 160°C. Ima manju gustoću od HDPE-a, ali veću tvrdoću i krutost, što ga čini poželjnim materijalom u plastičnoj industriji. PP ima raznoliku primjenu te se često koristi za proizvodnju spremnika za pohranu, ambalaže i komponenti u automobilskoj industriji (npr. branici). Također, može se koristiti za izradu tepiha, vlakana, presvlaka, geotekstila, užadi, slamki, višekratnih spremnika (tegle za cvijeće), namještaja, kanti i još mnogo toga. Visoka potražnja za PP-om u svakodnevnom životu uzrokuje povećanje količine otpada od PP-a svake godine. [9] [10]

PS

Polistiren (PS) je plastika izrađena od monomera stirena dobivenih iz tekućih petrokemijskih proizvoda. Struktura polistirena sastoji se od dugih lanaca ugljikovodika s fenilnom skupinom koja je vezana na svaki drugi atom ugljika. PS je prirodno bezbojan i proziran, ali ga je moguće obojiti bojilima. Njegovo svojstvo prozirnosti čini ga prikladnim za primjene gdje je važna vidljivost ili jasnoća. Također je lagan, krut i lako se može oblikovati u različite oblike. Toplinska i zvučna otpornost, čvrstoća te lakoća, čine polistiren pogodnim za upotrebu u različitim sektorima poput pakiranja hrane, elektronike, građevine, medicinske industrije, kućanskih aparata i igračaka. Najpoznatiji je oblik polistirena PS pjena, odnosno ekspanzirani polistiren (EPS) ili stiropor. Recikliranje EPS pjene predstavlja izazov jer njena lakoća i veliki volumen čine prikupljanje i transport energetski manje učinkovitim. Nadalje, često se pojavljuju problemi kontaminacije zbog teškoća u odvajanju od drugih materijala. Širok spektar primjena pokazuje na veliku količinu otpada od PS-a koja se svake godine nakuplja u komunalnom otpadu. Iako pri razdvajanju otpada postoji kategorija za plastiku, ljudi obično ne bacaju ambalažu od pjene u spremnik za recikliranje plastike, već je često odlažu u opći kontejner. [9][10]

PVC

Za razliku od drugih plastomera, poput polietilena, polistirena i polipropilena, koji se mogu omekšati zagrijavanjem i potpuno se dobivaju iz nafte, PVC se proizvodi miješanjem 57% klora (iz industrijskih soli) i 43% ugljika (iz ugljikovodika, npr. etilena iz nafte ili prirodnog plina). Svojstva klora čine PVC otpornim na vatru, te je pogodan za izradu električnih izolacija (izolaciju žica i kabela). Mogućnost miješanja PVC-a s različitim aditivima čini ga svestranom plastikom. PVC plastika često se koristi u građevinarstvu jer je jeftina i izdržljiva. Od njega se izrađuju vodovodne cijevi, te se koristiti se za proizvodnju sintetičke kože od koje se izrađuju odjeća i presvlake. PVC se također koristi za izradu prozorskih okvira, folije za hranu, medicinskih uređaja, vrećica za pohranu krvi, dijelova unutrašnjosti automobila, ambalaže, bankovnih kartica itd. [9] [10]

2.2. Prikupljanje plastičnog otpada

Svaki postupak obrade plastičnog otpada započinje prvim odvajanjem koje se događa u kućanstvu. Nužno je postaviti kvalitetan sustav odvajanja i prikupljanja plastičnog otpada kako bi se on mogao što kvalitetnije obraditi. Nužno je da građani odvajaju čist plastični otpad. Čist otpad podrazumijeva to da su s njega, prije bacanja među ostali plastični otpad, uklonjeni svi organski ostaci, nečistoće ili papir. To je izrazito bitno jer različite primjese nečistoća kao što su hrana i razne tekućine generiraju reaktivnu smjesu, odnosno dolazi do truljenja organskih ostataka, te na taj način onečišćavaju sav otpad s kojim dođu u kontakt. Isto tako, onečišćenje plastike uzorkovano je i razlijevanjem kemikalija, lijekova, šminke, sredstava za čišćenje i sličnih nečistoća po polimerima. Drugim riječima, u slučaju bacanja zagađenog otpada, čak jedan onečišćeni predmet zagađuje sav ostali otpad s kojim dođe u doticaj. Tako zagađene polimere nije moguće dovoljno temeljito oprati za korištenje u proizvodnji kvalitetnog reciklata, te oni bivaju prenamijenjeni u drugo i treće razrednu sekundarnu sirovinu. Time se gubi mogućnost stvaranja jednakovrijednih sirovina pa je kvalitetna, ali zagađena sirovina, osuđena na postupke nižeg slijeda kojima plastični otpad ne ostvaruje svoj potpuni energetski, emisijski ni maseni potencijal. Ovisno o korištenim tehnologijama sortiranja, zagađeni otpad vrlo često završava na odlagalištu.

Plastični otpad iz kućanstva prikuplja se pomoću sustava takozvane „Žute vrećice“. U njih je moguće odvojiti plastiku, metale i kartonske ambalaže za piće. Ovisno o čistoći i homogenosti prikupljenog otpada iz kućanstva, može se govoriti o učinkovitosti procesa sortiranja. Sustav prikupljanja plastičnog otpada iz kućanstava putem žute vrećice trebao bi težiti tome da osigura što učinkovitiji sustav sortiranja i samim time poveća isplativost procesa recikliranja. Odvojeno prikupljanje otpada u kućanstvu najučinkovitiji je način za prikupljanje što čišće plastike, te se također na taj način odvaja znatno više otpada, što rezultira smanjenjem količine plastike na odlagalištima. Žute vrećice odlažu se uz rub ceste ili u kontejnere za plastični otpad, od kuda ih skupljaju kamioni namijenjeni prikupljanju plastike.

2.3. Predobrada plastike za recikliranje

Nakon prikupljanja plastičnog otpada iz kućanstava, materijal stiže u sortirnicu gdje prolazi kroz detaljan postupak razdvajanja prema vrstama plastike i drugim željenim svojstvima. Komunalni sektor kroz dobro organizirani i kvalitetni sustav odvojenog prikupljanja, uz doradu na sortirnicama generira otpadnu plastiku u nekoliko kategorija, sukladno uputama

oporabitelj, odnosno potražnji na tržištu. Glavni dijelovi sortirnice pogoni su za prihvat i obradu odvojeno prikupljenog reciklabilnog otpada. Ovdje se materijal podvrgava procesima koji uključuju sortiranje po vrsti materijala i tržišnim kategorijama, prešanje, baliranje te privremeno skladištenje. Sortirnice su ključne za postizanje visokih standarda recikliranja, omogućujući efikasnost i optimizaciju gospodarenja plastikom. Bez ovakvih postrojenja, odvojeno prikupljanje vodi u tržišni neuspjeh i povećanje troškova poslovanja bez značajnog podizanja stupnja reciklaže. Plastični materijal, bez nečistoća, definirane kvalitete, donosi određeni prihod sektoru ili oslobađa od budućih troškova.

Postoje različite tehnologije odvajanja polimernog otpada koje se zasnivaju na fizikalnim i kemijskim svojstvima polimera. Podjela metoda odvajanja otpada na temelju svojstava polimera:

Fizikalna – gustoća

- flotacijsko taloženje mokri postupak
- suho odvajanje
- centrifugalno odvajanje
- odvajanje sa blisko i super kritičnim fluidima
- flotacijsko taloženje uz hidrofobnost
- flotacija pjenjenjem
- prema veličini čestica
- flotacijsko taloženje uz apsorpciju otapala

Kemijska

- prema temperaturi taljenja (mekšanja)
- selektivno otapanje

Optička

- odvajanje prema boji i prozirnosti
- komercijalni modeli

Svjetlosno- spektroskopske metode

- MIR spektroskopija
- NIR spektroskopija
- Laseri
- Raman spektroskopija
- Laserski inducirana emisijska spektralna analiza

- Plazma emisijska spektroskopija
- Polarizirano svjetlo, UV, iluminacija, fluorescentna apsorpcija
- X-zračna fluorescencija

Električna - elektrostatičnost

- triboelektrična olovka
- elektrifikacija trenjem: triboelekt. bubanj, električki nabijena traka
- odvajanje metalnih nečistoća vrtložnom strujom [23]

Sve ove metode imaju razvijene odgovarajuće tehnologije. Različitim sustavima prikupljanja otpada odgovaraju različita tehnička rješenja. U sklopu ovog rada biti će razmotren jedan od načina na koji bi se mogle primijeniti gore navedene metode.

OTVARANJE VREĆE

Prije početka procesa razvrstavanja otpada, potrebno je otvoriti vreće. Vreće se otvaraju u automatskom otvaraču vreća. Otvaranje vreća postupak je kojim se vreće s reciklabilnim materijalima automatski otvaraju, a sadržaj se dozira na pokretnu traku radi daljnje separacije. Suprotno tom postupku bilo bi direktno usitnjavanje sadržaja cijele vreće. Budući da se vreće otvaraju, a materijal razdvaja bez mljevenja ili stiskanja, daljnja je separacija učinkovitija. Ovaj je pristup posebno učinkovit za plastične filmove jer ostavlja veći dio filma u veličini koju je u kasnijim postupcima lakše prepoznati i/ili sortirati (ručno ili automatski). [11]

RAZDJANJE NA LAKU I TEŠKU FRAKCIJU

U predobradnim operacijama potrebno je odvojiti tzv. laganu i tešku frakciju otpada. Lagana frakcija sastavljena je od dvodimenzionalnih materijala (2D), odnosno plastičnih folija. A teška frakcija, sastavljena je od trodimenzionalnih materijala (3D), odnosno krutih plastika. Takvo razdvajanje moguće je provesti balistički separatorom, progresivno rotirajućim sitom ili vibracijskim dodavačem.

Balistički separator uređaj je koji služi za razdvajanje otpada s obzirom na masu. Materijali se pomiču na strmo nagnutoj pokretnoj traci s nizom oscilirajućih rotirajućih lopatica. Nagib trake postavljen je tako da 3D materijali padaju prema dolje, a kružno djelovanje lopatica gura 2D materijal prema gore i podiže ga na vrh trake – rezultirajući učinkovitom separacijom tih vrsta materijala. Balistički separator također pomaže u mehaničkom čišćenju i uklanjanju finih čestica, budući da oscilirajuće djelovanje lopatica oslobađa fine kontaminacije (prije svega prljavštinu i organske tvari) i uklanja ih kroz perforacije u lopaticama. Trenutna učinkovitost

separacije varira između 75-90%, ovisno o vrsti ulaznog materijala i pružatelju tehnologije. [13]

ODVAJANJE ZRAKOM

Razdvajanje zrakom postupak je koji se provodi zbog dodatnog odvajanja lake frakcije iz smjese plastičnog otpada. Taj postupak najčešće se provodi zračnim sitom.

Zračno sito uređaj koji radi tako što se lagana, 2D frakcija unosi se u konstantan zračni tok, obično s pokretne trake. Teški materijal pada kroz zračni tok na pokretnu traku za isporuku, a laki se materijal zadržava u zračnom toku i prenosi duž kanala, preko skretničke ploče ili rotirajućeg bubnja. Sav preostali laki materijal zatim se odvaja iz zračnog toka putem uređaja poznatog kao rotacijska brava ili rotacijski ventil. Zračni tok, također, može biti filtriran, zbog uklanjanja bilo kakvih čestica u slučaju da se zrak ispušta u atmosferu. Kao i kod balističke separacije, učinkovitost će varirati između 75-90%, ovisno o vrsti ulaznog materijala i pružatelju tehnologije. [13]

ODVAJANJE METALNOG OTPADA

U sastavu otpada u žutoj vreći nalaze se i metali. Ti metali mogu biti magnetični i nemagnetični. Za odvajanje magnetičnih metala koriste se uređaji koji funkcioniraju na principu magneta, a za odvajanje nemagnetičnih metala, kao što je aluminij, koristi se tehnologija vrtložne struje. [19]

RAZVRSTAVANJE POMOĆU SENZORA

Senzori su uređaji koji fizičku pojavu pretvaraju u električni signal. Odnosno, oni omogućuju automatizirano optičko sortiranje u procesu razvrstavanja otpada. Optičko sortiranje bitan je postupak jer smanjuje potrebu za ručnim odvajanjem otpada.

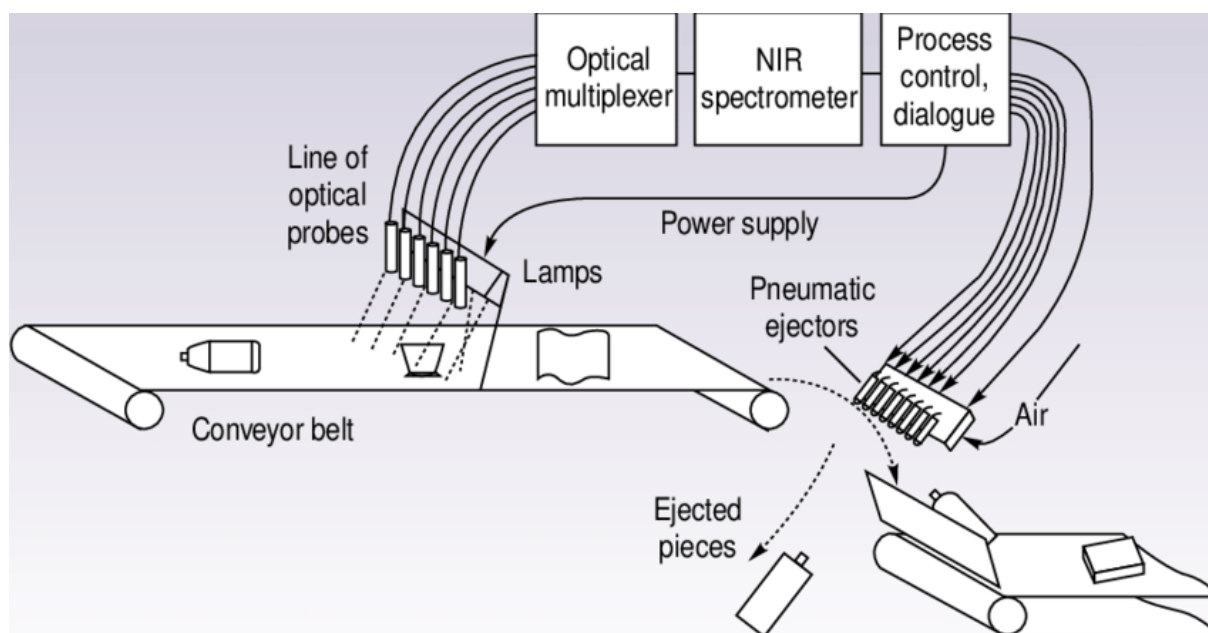
Pogoni za sortiranje koji sadržavaju uređaje na bazi senzora sastoje se od tri podsustava:

- **sustav za prilaz otpada** (vibracijski dodavači, pokretne trake) ima zadatak obaviti transport otpada do sustava senzora. Kako bi se otpad mogao razvrstavati uz pomoć tehnologije potrebno je osigurati razmak između jedinica otpada da bi senzori mogli prepoznati komponente
- **sustav senzora** (senzori za raspoznavanje polimera prema vrsti) ima ulogu odašiljanja zraka na otpad. Uz pomoć kamera i lasera sustav senzora ili jedinica senzora prepoznaje otpad prema vrstama i obavlja mjerenje dimenzija otpada te šalje signal u računalo gdje

se on obrađuje. Nakon obrade primljenih informacija računalo šalje zadatak sustavu za uklanjanje otpada s pokretne trake. U zadatku su definirane dimenzije i pozicija objekta.

- **sustav za uklanjanje** (roboti ili manipulatori) ima zadatak ukloniti otpad s pokretne trake i odložiti ga u pripadajuće spremnike, ovisno o vrsti otpada. [14]

Postoje različiti optički senzori koji se upotrebljavaju u procesima razvrstavanja otpada. Neki od njih su NIR, VIS, HSI. No, za razlikovanje polimernih materijala najčešće se koriste NIR (blizi infracrvena radijacija) senzori. NIR uključuje zračenje nesortirane, neidentificirane plastike blizim infracrvenim valovima (valna duljina od 600 do 2500 nm⁻¹). Optičko sortiranje pomoću NIR tehnologije odvija se tako da NIR svjetlo osvjetljava pokretnu traku, a zrake svjetlosti različitih valnih duljina reflektiraju se od materijala na traci. Senzor iznad trake određuje vrstu materijala na temelju očitane valne duljine i daje signal nizu mlaznica zraka da ispucaju materijal koji se želi izdvojiti. Ovo je ustaljena tehnologija za sortiranje čvrstih polimera, ali još je prilično nova za sortiranje filmova. Film velikih dimenzija teško je učinkovito izbaciti s transportera pomoću mlaznica zraka. Filmovi često preklapaju druge stavke na traci, što dovodi do pogrešnog razdvajanja. Osim toga, film crne boje (npr. vreće za smeće) ne reflektira svjetlost, pa ih senzori ne detektiraju. [13] [14][15] [16]



Slika 6. Shema odvajanja NIR-om [16]

RUČNO RAZVRSTAVANJE

Ako se jedna vrsta polimera nađe u frakciji druge vrste polimera, to se smatra zagađenjem frakcije te rezultira smanjenjem (mehaničkih) svojstava i stvara probleme pri ponovnoj obradi. Prikladan primjer takvog para polimera koji se svakako moraju razdvojiti je PET kontaminiran s PVC-om. Na obradnoj temperaturi PET-a, PVC će se razgraditi i emitirati visoko korozivan plin vodikova klorida. PET se, s druge strane, neće otopiti na parametrima obrade PVC-a. Upravo je zato potrebno dodatno provjeriti homogenost frakcija – i ta se provjera najpouzdanije provodi ručno. Ručno odvajanje zasniva se na principu vizualne identifikacije otisnutog broja na ambalaži te na osnovi nijansi i različitih obojenja. Ručno razdvajanje poboljšava se pri različitim uvjetima osvjetljenja. UV svjetlost može poboljšati razliku između PVC i PET boca.

BALIRANJE I SKLADIŠTENJE FRAKCIJA

Na kraju tehnološkog procesa razdvajanja, materijal je potrebno balirati. Baliranje je proces u kojem se smanjuje volumen izdvojenih reciklabilnih materijala u svrhu jednostavnijeg skladištenja i prijevoza. Stroj radi bale dimenzija predviđenih za optimalno popunjavanje prostora vozila za transport. Upravljanje može biti automatsko ili ručno. Vežanje se obavlja pomoću čelične žice koja se zavaruje oko bale. Korisno je ako se na usipnom grotlu preše za baliranje sortiranog materijala ugradi perforator koji služi za bušenje reciklabilnog materijala ne bi li se iz njega oslobodio zrak, čime se povećava efikasnost prešanja. Bušenje se obavlja pomoću dva rotirajuća bubnja na kojima se nalaze naoštreni šiljci. Preša za baliranje ostatnog otpada na isti način ima ugrađen usitnjivač (eng. „shredder“) [17]

2.4. Obrada plastičnog otpada

Kao što je već spomenuto u uvodu ovog poglavlja, preferirani način obrade upravo je recikliranje. Recikliranje može biti mehaničko ili kemijsko. Trenutno se zbog razvijenosti i dostupnosti tehnologija većinski koristi mehaničko recikliranje. Dobar sustav prikupljanja i razvrstavanja otpada omogućuje kvalitetnije reciklirate. No isto tako, kvalitetnijim razvrstavanjem smanjuje se količina otpada koja preostaje za dalju obradu ili na odlagalištu.

3. MOGUĆI POSTUPCI S POLIMERNIM OTPADOM

3.1. Ponovna upotreba

Ponovna upotreba (na engleskom *reuse*), jedan je od „popularno zvana 4R-a“ (eng. *reduce, reuse, recycle, recover*). Velik dio plastičnog otpada nastaje iz predmeta za jednokratnu upotrebu. Iako je EU zabranila prodaju jednokratnog pribora i posuđa za jelo, plastičnih slamki, štapića za uši, štapića za miješanje napitaka, štapića namijenjenih pričvršćivanju na balone i njihovu pridržavanju, spremnika za hranu i napitke te čaša izrađenih od ekspaniranog polistirena i proizvoda od oksorazgradive plastike, to i dalje nije dovoljno da bi se smanjila količina otpadne plastike.[7] Sve više proizvoda koji dosad nisu imali plastičnu, ili uopće nisu imali ambalažu, sada dobiva plastičnu ambalažu. Dobar je primjer toga povrće pojedinačno ili grupno zapakirano u plastičnu foliju, sladoledi u plastičnoj umjesto papirnatij kutiji te dodavanje plastičnih elemenata na papirnatu vrećicu za kruh.

U svrhu smanjenja otpadne ambalaže morale bi se primijeniti ozbiljne mjere omogućavanja ponovne upotrebe različitih proizvoda. Primjerice, plastične vrećice u kojima se kupuje voće i povrće lako su zamjenjive tkanenim vrećicama. Omogućavanje kupnje rinfuznih proizvoda uvelike bi smanjilo potrebu za jednokratnom plastičnom ambalažom. U tom bi slučaju kupac na prodajno mjesto došao s vlastitom ambalažom koja bi bila izrađena od stakla ili tvrde plastike. U Hrvatskoj već postoje takvi primjeri prodaje raznih napitaka i tekućih deterdženata. Osim rinfuzne prodaje, zanimljivo je proučiti mogućnost korištenja povratne staklene ambalaže. Tako bi se osim boca od piva, mogle vratiti boce soka, mlijeka, jogurta i sličnih tekućih proizvoda. No, takve bi sustave i principe trebalo primijeniti i na velike tržišne centre. Najbolji primjer kako bi trebao izgledati moderni tržišni centar je tržnica. Na tržnicu kupac dolazi sa svojom ambalažom, kupuje lokalne proizvode i potiče male poduzetnike.

Veliki utjecaj na akumuliranu plastičnu ambalažu stvara tekstilna industrija koja svoje proizvode prilikom slanja od proizvodnje do prodavaonica, odnosno kupca pojedinačno pakira u plastičnu foliju. Osim plastične folije, uz svaki proizvod dolazi i plastična vješalica koja se koristi samo jedanput. Tekstilna industrija izvor je mnogih ekoloških problema te je tema njezine reorganizacije vrlo široka. Za početak bi trebalo smanjiti količinu otpadne plastične ambalaže i obvezati trgovce na korištenje vlastitih vješalica.

Potiče se ponovna upotreba proizvoda na javnim događanjima, a dobar je primjer toga korištenje višekratne čaše po sistemu depozita. Taj je sustav zaživio na većini javnih događanja u EU. Prilikom kupnje pića u cijenu uključen je depozit čaše. Čaše su uglavnom plastične ili

keramičke, a nakon njihovog korištenja moguće ih je vratiti na mjesto kupnje pića i preuzeti depozit.

Osim jednokratnih plastičnih proizvoda koji ju potrebno ili izbjeći ili zamijeniti višekratnim proizvodima, u ukupnoj masi plastičnog otpada nalaze se i plastični premeti koji su zbog nemogućnosti popravka ili gubitka svrhe završili u otpadu. Iako se masovnom proizvodnjom snizila cijena različitih proizvoda, snizila se i pažnja koja se pridaje dizajnu mogućnosti popravka. Važno je osvijestiti građane o potrebi smanjenja plastičnog otpada i ulozi koju u tome ima ponovno korištenje proizvoda. Osnivanje centara za ponovnu upotrebu proizvoda jedno je od rješenja koja su zaživjela u nekim europskim gradovima. To su mjesta na kojima je moguće popraviti oštećene predmete ili prodati one koji su postali nepotrebni.

3.2. Mehaničko recikliranje

Mehaničko recikliranje proces je oporabe plastičnog otpada putem mehaničkih postupaka. Ono se sastoji od dvije glavne faze: predobrade plastičnog otpada i proizvodnje recikliranog plastičnog granulata. Faza predobrade uključuje sortiranje, mljevenje, pranje i sušenje. Proizvodnja reciklirane plastike uključuje odvajanje materijala, uklanjanje kontaminata, dodatno sortiranje, ekstruziju i peletizaciju. Proces svakog recikliranja, tako i mehaničkog, započinje postupkom sortiranja prema vrsti materijala. Zatim slijede postupci usitnjavanja, (mljevenja), pranja, sušenja, regranulacije (peletiranja) i komponiranja. Navedeni postupci ovise o sastavu otpada. Raspored obavljanja postupaka može slijediti različit redoslijed ili se neki postupci mogu ponavljati više puta da bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta obrade. Mehaničko recikliranje ne mijenja kemijsku strukturu materijala, što omogućuje višestruku ponovnu upotrebu/recikliranje polimernih materijala umjesto korištenja izvornog materijala, time stvarajući zatvorenu petlju. Uobičajene tehnike obrade nakon ponovnog taljenja uključuju brizganje, ekstruziju, rotacijsko oblikovanje i toplinsko prešanje.[18][19]

Prednost mehaničkog recikliranja smanjenje je količine otpada koja se šalje na odlagališta. Mehaničkim se recikliranje smanjuju resursi korišteni za proizvodnju novih polimera, smanjuje se opće onečišćenje plastičnim otpadom i povezanih ekoloških utjecaja. Također, uporabom plastika dobivenih mehaničkim recikliranjem umjesto izvornih plastika, smanjuju se emisije stakleničkih plinova. Nedostatak je mehaničkog recikliranja taj što su polimeri podložni degradaciji tijekom višestrukih ciklusa recikliranja, što može utjecati na kvalitetu konačnog recikliranog materijala.

POSTUPCI U MEHANIČKOM RECIKLIRANJU

Pranje je postupak koji se koristi za čišćenje plastičnih materijala. Njime se uklanjaju organski ostaci, prašina, ostaci ljepila, ostaci papirnatih etiketa i ostala površinska zagađivala. Usitnjena se plastika uglavnom pere u vodenim kupkama ili pomoću mlaznica za prskanje. Deterdženti ili neka druga sredstva za čišćenje dodaju se za što učinkovitiju razgradnju i uklanjanje tvrdokornih ostataka. Naljepnice i ljepila s ambalažnih materijala mogu biti izazovna za uklanjanje. Različite metode, uključujući toplinu, otapala ili mehaničko struganje, mogu se koristiti za uklanjanje naljepnica i ljepila s površine plastike. Nakon pranja potrebno je osušiti materijal da u procesu taljenja voda ne bi evaporirala.

Mljevenje je postupak usitnjavanja plastičnog materijala na razinu plastične pahulje (5-15 mm). Mljevenjem se povećava površina plastičnog materijala. Jer što je površina veća, to je učinkovitija izmjena topline tijekom procesa taljenja. Mljevenje također olakšava dodatno sortiranje plastike (npr. prema boji), budući da plastika dolazi u različitim oblicima i veličinama, usitnjavanje u komade jednakih veličina pojednostavljuje postupak sortiranja. Naime, mljevenje olakšava uklanjanje različitih zagađivala (naljepnice, ljepila ili organski ostaci) jer je tako usitnjene polimere moguće temeljitije oprati. Strojevi za mljevenje nazivaju se sjeckalicama ili granulatorima, a koriste se za daljnje smanjenje veličine plastičnih komada. Ovi strojevi koriste se rotirajućim oštricama ili drugim mehanizmima za rezanje i usitnjavanje plastike na manje čestice.[12][19]

Taljenje i ekstrudiranje odvijaju se u ekstruderu. Ekstruder koristi rotaciju vijka i grijaće elemente da bi omekšao i pomiješao materijale. To uključuje zagrijavanje usitnjene plastike do njezine točke taljenja ili temperature na kojoj ju je moguće oblikovati. Visoka temperatura i vijak na polimer djeluju smičnom silom, što uzrokuje kidanje lanaca u strukturi materijala. Taj proces može negativno utjecati na termomehanička svojstva materijala. To se može spriječiti pravilnim namještanjem parametara ekstruzije i dodavanjem aditiva poput ugljika i antioksidansa. Stroj topi materijal i homogenizira ga prije ulaska u matricu. Nakon što je plastika u tekućem stanju, izvlači se kroz matricu da bi se dobio željeni oblik. Ekstruzija je proizvodni postupak koji uključuje guranje ili vučenje materijala, u ovom slučaju, tekuće plastike, kroz oblikovani otvor ili matricu kako bi se proizveo kontinuirani oblik koji je najčešće u cilindričnom obliku. Postupak ekstruzije pomaže u oblikovanju dosljednog oblika i veličine recikliranog plastičnog materijala. Također, pomaže u daljnjem miješanju i homogenizaciji tekuće plastike. [15][18] Ekstruderi se mogu izraditi tako da uključuju dijelove za otplinjavanje,

omekšavanje, sušenje i filtriranje ekstrudata ne bi li se poboljšala kvaliteta taline polimera. Sekcije za otplinjavanje vakumirani su ili otvoreni otvori iz bačve koji dopuštaju oslobađanje niza hlapljivih spojeva unutar polimernih talina. Uklanjanje takvih hlapljivih tvari smanjuje hidrolizu, acidolizu i poboljšava miris taline polimera da bi se povećala vrijednost reciklata. Taline polimera također se mogu filtrirati kako bi se uklonili veći, nehlapljivi kontaminanti kao što su čestice prašine ili gela i poboljšala homogenost mješavine, mehanička i optička svojstva.[19]

Peletiranje je postupak u kojem se upotrebom mehanizma za rezanje ekstrudirana traka cilindričnog oblika reže na sitnije dijelove, da bi se stvorili jednako veliki komadići ekstrudirane plastike. Režu se u obliku malih cilindričnih granula ili zrnaca, tzv. peleta. Ta zrnca služe kao sirovina za proizvodnju novih plastičnih proizvoda.[12]

Različiti izazovi pojavljuju se prilikom recikliranja kako mono, tako i mješovitih plastika. Glavni problem leži u činjenici da će polimeri degradirati pod određenim uvjetima. Ti uvjeti uključuju: toplinu, oksidaciju, svjetlo, ionsko zračenje, hidrolizu i mehaničko smicanje. Tijekom mehaničkog recikliranja polimera, prevladavaju dvije vrste degradacije: termomehanička degradacija (degradacija uzrokovana postupkom recikliranja) i degradacija tijekom vijeka trajanja.

DEGRADACIJA PRI MEHANIČKOM RECIKLIRANJU

Termomehanička degradacija može se pojaviti tijekom termičke obrade plastičnog otpada zbog pregrijavanja. Uzrokovana je zagrijavanjem i mehaničkim smicanjem polimera tijekom procesa taljenja. Različiti procesi pokreću se u polimeru kada je izložen kombinaciji visoke temperature i smicanja. Najčešći su takvi procesi koji se pojavljuju u polimerima kidanje i grananje lanca. Ovisno o vrsti polimera, početnoj molekularnoj masi i temperaturi, jedan od ova dva suprotna procesa postaje dominantniji. Termomehanička degradacija obično počinje homolitičkim kidanjem C-C kovalentne veze u osnovnom lancu polimera, stvarajući slobodne radikale. Ti slobodni radikali mogu proći kroz neke kemijske reakcije poput disproporcije, uzrokujući kidanje lanca ili umrežavanje, poznato i kao grananje. Kidanje lanca najčešće se pojavljuje u terminalnim poveznim skupinama ili u osnovnom lancu polimera i smanjuje molekulsku masu polimera, a time i svojstva. Grananje lanca rezultira umrežavanjem i povećanjem molekulske težine. Tipičan primjer kidanja lanca pojavljuje se u PP, a neki su tipovi PE skloniji grananju lanca. Obje reakcije rezultiraju stupnjem nesaturacije i otpuštanjem niskomolekularnih hlapljivih komponenata. I degradacija i nespojivost snažno će utjecati na reološko ponašanje

taljevine tijekom procesiranja. Reološko ponašanje mješavina polimera i recikliranih materijala često je prilično složeno. Važni faktori uključuju kemijsku prirodu polimera u smjesama, temperaturu obrade, omjer viskoznosti, koncentracije i uvjete obrade. [12][19]

Druga vrsta degradacije ona je koja se pojavljuje tijekom vijeka trajanja zbog dugotrajne izloženosti različitim čimbenicima u okolišu. Tijekom vijeka trajanja plastični proizvodi izloženi su kombinaciji topline, kisika, svjetla, zračenja, vlage i mehaničkog naprezanja. Degradacija je uglavnom uzrokovana procesima fotooksidacije. Foto-degradacija je povezana s osjetljivošću polimera na apsorpciju štetnog dijela tropsferskog sunčevog zračenja. Većina polimera ima tendenciju apsorbirati visoke razine energije zračenja u UV dijelu spektra, što uzrokuje aktivaciju njihovih elektrona do veće reaktivnosti i oksidacije, cijepanja i drugih vrsta degradacije. [12][19]

I degradacija tijekom vijeka trajanja i termomehanička degradacija rezultiraju niskomolekularnim hlapljivim spojevima koji su uglavnom zadržani u polimeru kada je u krutom stanju. Međutim, u procesu mehaničke oporabe, dok je polimer u tekućem stanju, ova zagađivala mogu procesom difuzije ući u taljevinu i ometati učinkovitost obrade. Ova zagađivala ne samo da mogu narušiti svojstva proizvoda, već i samu obradu, budući da neki od njih mogu korodirati opremu za obradu. Kako bi se smanjio ovaj problem, potrebno je pravilno i redovito održavati strojeve. Ti su hlapljivi spojevi mali (oksigenirani) dijelovi izvornog polimera i mogu se identificirati različitim analitičkim tehnikama poput masene spektrometrije. [18]

Mehaničko recikliranje općenito je najekonomičniji pristup, međutim s određenim ograničenjima. Profitabilnost i ekonomska održivost ovise o materijalu koji se reciklira i stupnju onečišćenja toka otpada. Ostali čimbenici koji utječu na ukupne troškove i trebaju se uzeti u obzir uključuju naknade za prikupljanje, troškove prijevoza, učinkovitost procesa, vrstu materijala, itd. Iako je ekonomski isplativo, ako se ne kombinira s dodatnim tehnikama, postoje ograničenja u kvaliteti dobivenog materijala. U tom smislu, ekonomska učinkovitost snažno je povezana s čistoćom i vrstom materijala.

3.3. Kemijsko recikliranje

Kemijsko recikliranje skup je različitih tehnologija materijalnog oporavka kojima je zajedničko to da se tijekom recikliranja mijenja molekulska struktura te oblik i funkcije primarnog proizvoda. Pri kemijskom se recikliranju polimerni otpad može pretvoriti u monomer, sirovinu za dobivanje drugih kemikalija ili gorivo. Kemijskim se recikliranjem iz loše razvrstanog i

onečišćenog otpada mogu dobiti reciklirani materijali slični onima izvornima. Tekuće produkte, kao što su gorivo ili kemikalije, moguće je iskoristiti u rafinerijama i kemijskim postrojenjima kao zamjenu za fosilna goriva i nove kemijske proizvode. Izuzetno je to što se kemijski mogu oporaviti sve vrste polimernog otpada, odnosno plastomeri, duromeri i elastomeri. Kemijsko je recikliranje u teoriji jednostavniji i fleksibilniji postupak od mehaničkog recikliranja jer ne zahtijeva intenzivan proces sortiranja.

Najvažniji postupci kemijskog recikliranja su:

- hidriranje
- hidroliza
- piroliza
- rasplinjavanje plastičnog otpada. [23][26]

PIROLIZA

Piroliza je proces toplinske razgradnje molekula dugih lanaca polimera u manje kompleksne molekule pri visokim temperaturama (300-800°C) bez prisustva zraka (kisika). Kod ovog postupka plastični otpad prelazi iz krutog u plinovito stanje, takozvani pirolitički plin. Potom se hladi i kondenzira u pirolitičko ulje te kao ostatak procesa nastaje čađa (koks). Udio pojedinog produkta pirolize ovisi o radnim parametrima procesa (temperatura, tlak, vrijeme zadržavanja, protok inertnog plina, brzina zagrijavanja, brzina hlađenja), sastavu ulazne sirovine i tipu reaktora, te je ovisno o potrebama moguće dobiti zahtijevani udio pojedinog produkta. [23][26]

Reakcije pirolize dijele se prema temperaturi odvijanja procesa na:

- niskotemperaturnu pirolizu ili bubrenje (do 500°C)
- srednjetemperaturnu pirolizu (500-800°C)
- visokotemperaturnu pirolizu (> 800°C) [23]

Prije postupka pirolize potrebno je iz mase otpadne plastike izdvojiti metale, papire, organske ostatke i PVC. Soritana se plastika zatim usitnjava, pere i suši. Važno je osušiti usitnjene plastike prije pirolize da bi se kontrolirao sadržaj vlage u dobivenim sirovinama.

Klor iz PVC-a formira klorovodičnu kiselinu (HCl) koja ima korozivno djelovanje na strojne dijelove. Također, klor iz PVC-a stvara halogene spojeve, kojih i mala količina u ulju sprječava njegovu upotrebu kao goriva ili sirovine za petrokemijsku industriju. Kako bi ulje bilo iskoristivo, količina klora ne bi smjela premašiti 10 ppm. U svrhu rješavanja problema kontaminacije PVC-om u toku plastičnog otpada, predložena je piroliza pri nižoj temperaturi

(300 °C). Pri nižoj temperaturi u predpiroliznom reaktoru događa se degradacija PVC-a, a drugi tipovi plastike ostaju gotovo nepromijenjeni. Tim se postupkom može ukloniti i do 98% klora. Preostali klor u pirolitičkom plinu može se neutralizirati dodavanjem apsorbentata (CaCO_3 , CaO , NaHCO_3 , $\text{Na}_2(\text{CO}_3)_2$ ili NH_3). [24][25]

Pirolitičko je ulje zbog svoje relativno visoke kalorične vrijednosti i mnogih potencijala primjene (razna goriva) najtraženiji produkt pirolize. No, prije upotrebe potrebno ga je pročititi.

Vrsta reaktora uvjetuje izmješanost plastike i katalizatora, vrijeme zadržavanja materijala u reaktoru, prijenos topline i učinkovitost reakcije. Neki od reaktora koji se koriste su šaržni i polušaržni reaktor, reaktor za pirolizu u fiksnom i fluidizirajućem sloju te konusni reaktor (CSBR). [26]

3.4. Spaljivanje

Spaljivanje je najčešća tehnologija korištena u pokušaju rješavanja problema plastičnog otpada te je najčešća zamjena odlaganju na odlagalištu. Postupak spaljivanja, odnosno izgaranja je proces potpune termičke degradacije tvari oksidacijom s dovoljnom količinom kisika koji se u ložište dovodi putem zraka. U procesu izgaranja gorivo, odnosno otpadna plastika oksidira u ugljikov dioksid i vodenu paru, ostavljajući jedan dio neizgorenih produkata koji ložište napuštaju dimnim plinovima ili zaostaju u pepelu. Dozvoljena količina neizgorenog ugljika u pepelu je do 3% masenog udjela pepela. Spaljivanjem se gotovo sva kemijska energija sadržana u plastičnom otpadu pretvara u toplinsku energiju koja se u okviru pogona nastoji pretvoriti u korisne oblike koji mogu biti toplina i električna energija ili samo električna energija. U procesu spaljivanja otpada nastaju razne štetne emisije koje se grupiraju u čestične emisije ili prašinu, kiseline, dušikove okside i specifična organska zagađivala i teške metale. Zbog toga su spalionice otpada opremljene složenim sustavima za obradu dimnih plinova s kojima se nastoji postići održavati kvalitetu dimnih plinova unutar zakonom propisanih granica. Pritom se kontinuirano u pogonu koriste mnogi dodatni materijali kao što su CaCO_3 , CaO ili $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za neutralizaciju kiselina, urea/amonijak za redukciju dušikovih oksida, aktivni ugljen za adsorpciju organskih zagađivala i teških metala, cement za solidifikaciju letećeg pepela te moguće i druge tvari, ovisno tehnologiji pročišćavanja. Redovito je potrebno i pomoćno gorivo prilikom puštanja u rad i gašenja, kao i pri svakom smanjenju radne temperature ložišta ovisno o kvaliteti otpada. U uvjetima rada postrojenja postavljeni su zahtjevi na kvalitetu pepela, boravak i temperaturu dimnih plinova kao i na sastav dimnih plinova. Poseban problem u radu

spalionica predstavljaju materijali bogati klorom, kao što je polimer PVC (polivinil klorid), koji je kao materijal prisutan u određenim plastičnim materijalima i proizvodima. Takav materijal u ložištu bitno podiže nastajanje kiselina (HCl), ali i vrlo toksičnih spojeva kao što su poliklorirani dibenzo-para-dioksini (PCDD) i dibenzofurani (PCDF).

Među tehnike spaljivanja plastičnog otpada može se navesti:

- izgaranje na rešetki (kosa, stepenasta),
- izgaranje u fluidiziranom sloju,
- izgaranje u rotacijskim pećima cementara,
- suspaljivanje s ugljenom/biomasom u konvencionalnim termoelektranama. [20][21]

3.5. Odlaganje

Odlaganje otpada spada među najlošija postupanja kako otpadnom plastikom, tako i ostalim vrstama otpada. Budući da se na odlagališta odlažu sve vrste otpada, tako i onog biorazgradivog, odlagališta imaju neugodan miris, predstavljaju mikrobiološko i higijensku ugrozu te su ekološki nepovoljna. Odlaganjem se zauzimaju velike površine koje nemaju drugu budućnost nego biti umjetna brda nastala ljudskom akumulacijom otpada. Zbog mogućnosti onečišćenja procjeditim vodama (amonijak, nitriti, teški metali, organske tvari, toksični organski spojevi) ugrožena je kakvoća tla i podzemnih voda te je nužno pri gradnji odlagališta osigurati postavljanje temeljnog brtvenog sloja i osigurati sustav drenaže i obrade procjeditih voda. Produkti anaerobne fermentacije organskih tvari (npr. metan, sumporovodik, vodik, hlapive organske tvari, živa) onečišćuju atmosferu, otrovni su, zapaljivi i eksplozivni. U svrhu saniranja tih plinova gradi se vakumski sustav otplinjavanja i sustav za zbrinjavanje deponijskog plina, te se postavlja pokrivni brtveni sloj. [20]

Usprkos provođenja svih mjera sanacije ispušnih plinova i otpadnih voda zbog mogućnosti diferencijalnog slijeganja i klizanja pojedinih slojeva može doći do kidanja drenažnih sustava plina i vode te do oštećenja temeljnog brtvenog slojeva za procjedne vode i pokrovnog brtvenog sloja za odlagališni plin. Slijeganje i klizanje posljedica su debljine sloja otpada koji predstavlja problem stabilnosti heterogenog otpadnog materijala u tijelu odlagališta. [20] Dobar primjer opisanih događaja nedavni su odroni na zagrebačkom odlagalištu Jakuševac.

4. PRORAČUN POTENCIJALA OTPADNE PLASTIKE

Kako bi se pokazao potencijal plastike za niskougljičnu tranziciju društva proveden je proračun energetskeg, emisijskog i materijalnog potencijala za odabrane scenarije gospodarenja otpadnom plastikom na području Grada Zagreba. Rezultati provedenih analiza prikazani su tablično i grafički.

4.1. Ulazni podaci za proračun

U Gradu Zagrebu u 2022. godini odvojeno je sakupljeno 63.905 t komunalnog otpada, od čega je 12.168 t bila plastika. Stoga je u 2022. godini plastika činila 19,03% u odvojeno prikupljenom komunalnom otpadu. Radi novog načina prikupljanja obradljivog otpada, lako je očekivati da će se masa odvojeno prikupljene plastike u 2023. uvećati za najmanje 50%.

Vodeći se navedenom pretpostavkom, ukupna pretpostavljena masa otpada prikupljenog preko sustava žutih vrećica u 2023. godini bila je 47.718,450 t. U žutim se vrećicama nalazi oko 7% metalnih materijala koji se odvajaju. U Tablici 1 prikazana je masa pojedinih polimera i njihov udio u žutoj vrećici.

Tablica 1. Mase i udjeli pojedinih polimera u odvojeno prikupljenom plastičnom otpadu

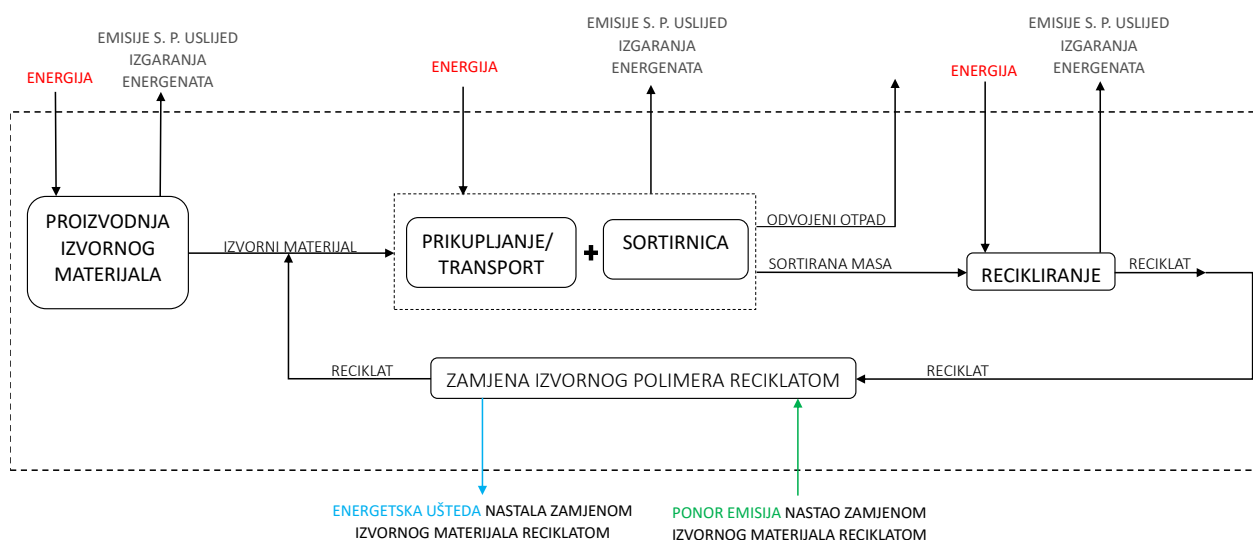
Vrsta polimera	Masa pojedinog polimera [kg/god]	Sastav žute vrećice [%]
HDPE	8.589.321	18%
LDPE	11.452.428	24%
PET	4.294.661	9%
PP	6.680.583	14%
PS	4.294.661	9%
PVC	954.369	2%
PA	2.863.107	6%
PTFE		
PMMA		
PU		
Folije	2.385.923	5%

Aluminij	477.185	1%
Željezo	2.863.107	6%
Nečistoće	2.863.107	6%
Suma	47.718.450	100%

U idućim poglavljima bit će prikazani proračuni uložene i uštedene energije te proračuni emisija ugljikovog dioksida s obzirom na različite postupke obrade otpadnih plastika prikupljenih putem sustava žute vrećice.

4.2. Mehaničko recikliranje

Slika 7 prikazuje granice sustava obrade otpadne plastike recikliranjem. Ovo je jednim dijelom kružni proces u kojemu se recikliranjem proizvodi reciklirani materijal koji zamjenjuje izvorni materijal te smanjuje potrebu za proizvodnjom novog materijala. Zamjenom izvornog polimera reciklatom nastaju emisijski ponori te su uštedene velike količine energije.



Slika 7. Shema granica sustava obrade otpadne plastike recikliranjem

4.2.1. Mehaničko recikliranje pri sortiranju srednje učinkovitosti

Sortiranje srednje učinkovitosti ono je u kojemu se osim čistog polimera nalazi zamjetna količina nečistih plastičnih predmeta ili pogrešno odvojenih organskih materijala. Budući da u ovom slučaju masa otpadne plastike nije gotovo savršeno čista, potrebno je uložiti dodatnu energiju kako bi se polimerni materijali odvojili na što čišće frakcije. Pri tome je potrebna

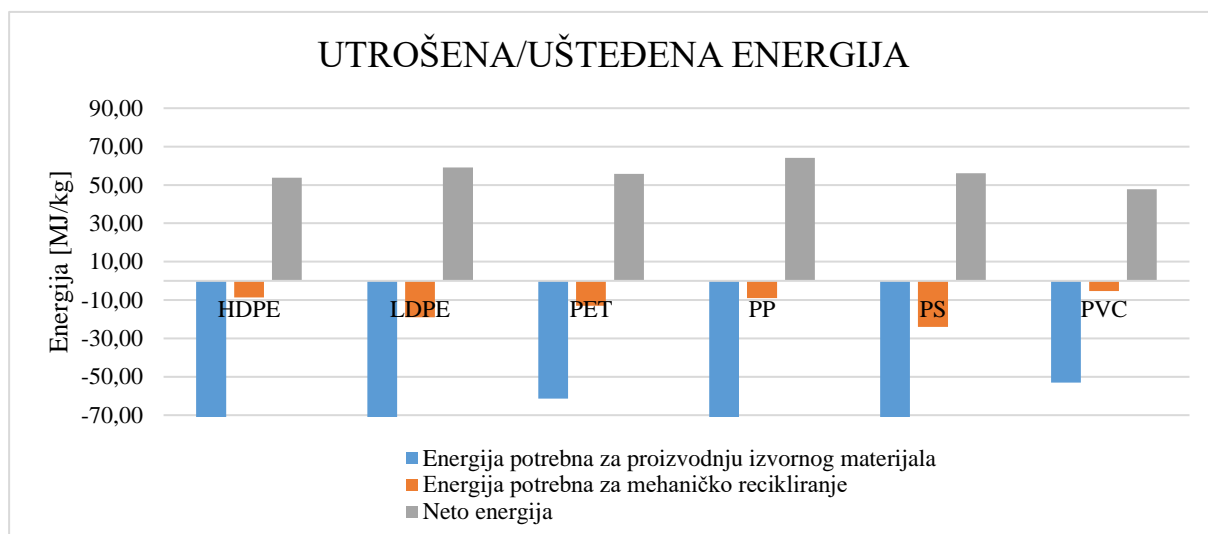
dodatna oprema za odvajanje i sortiranje, potrebni su dodatni postupci pranja i sušenja te je potrebno taliti materijale kako bi se osigurala čistoća proizvedenih peleta. Učinkovitost sortiranja ovisi o čistoći ulaznog materijala, odnosno otpadne plastike. Što je plastika čišća od organskih i ostalih ostataka, to je učinkovitost sortiranja veća.

Energija uštedena pri zamjeni izvornog materijala reciklatom, definira se kao neto energija recikliranja. Drugim riječima, neto energija predstavlja razliku energije potrebne za proizvodnju izvornog materijala i one potrebne za proizvodnju reciklata. Pri proizvodnji izvornog materijala energija je utrošena na crpljenje sirovina, proizvodnju materijala i transport sirovina. Recikliranjem se izbjegava cijeli taj proces te se energija troši na postupak recikliranja, sortiranje i transport otpada. U Tablici 2 prikazane su energije potrebne za proizvodnju izvornog materijala i reciklata, te neto energija recikliranja pri sortiranju srednje učinkovitosti, za svaki pojedini polimer. 20% vrijednosti energije potrebne za mehaničko recikliranje odnosi se na energiju utrošenu u transport i sortiranje. Ostalih je 80% energija utrošena u sam postupak recikliranja. Smanjenjem energije potrebne za transport i sortiranje povećava se energetska učinkovitost mehaničkog recikliranja.

Tablica 2. Energija potrebna za recikliranje

Vrsta polimera	Energija potrebna za proizvodnju izvornog materijala [MJ/kg]	Energija potrebna za mehaničko recikliranje [MJ/kg]	Neto energija - recikliranje [MJ/kg]
HDPE	-75,30 ^[32]	-8,70 ^[32]	53,71 ^[28]
LDPE	-78,08 ^[33]	-18,99	59,09 ^[28]
PET	-61,40 ^[32]	-13 ^[35]	55,79 ^[28]
PP	-73,00 ^[34]	-8,9 ^[32]	64,10
PS	-80,00 ^[34]	-23,92	56,08
PVC	-53,00 ^[34]	-5,3 ^[36]	47,70

Graf 1 služi boljem predočenju vrijednosti iz Tablice 2.



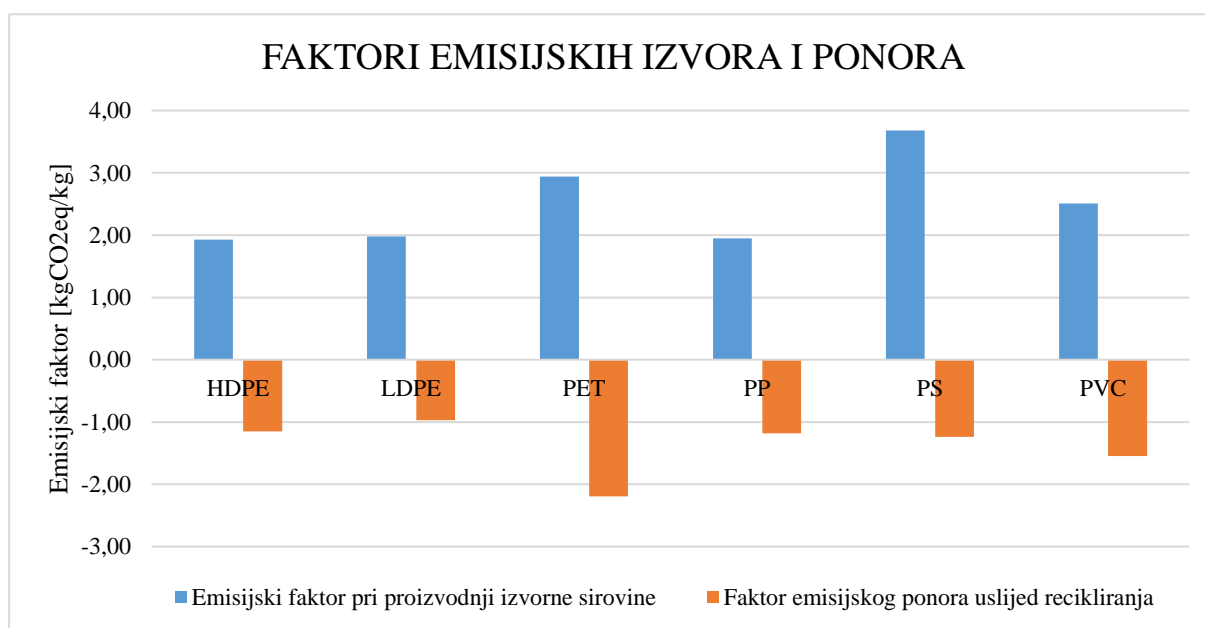
Graf 1. Dijagram usporednog prikaza utrošene i uštedene energije pri mehaničkom recikliranju polimera

Uštedom energije koja nastaje uslijed zamjene izvornog polimernog materijala reciklatom plastičnog otpada, postiže se emisijski ponor. Emisijski je ponor razlika u emisijama stakleničkih plinova emitiranih postupcima proizvodnje izvorne plastike i postupcima proizvodnje reciklirane plastike. Budući da se recikliranjem izbjegavaju postupci crpljenja sirovine, proizvodnje izvornog materijala te je smanjena potreba za transportom, izbjegnute su emisije iz tih postupaka. Također, smanjenjem opsega postupka sortiranja moguće je smanjiti emisije koje nastaju uslijed njegove provedbe. To pokazuje da treba težiti što čistijem toku otpadne plastike kako bi mehaničko recikliranje imalo veću emisijsku isplativost. Emisije stakleničkih plinova svedene su na ekvivalent CO_2 po kilogramu polimera. U Tablici 3 prikazani su emisijski faktori pri proizvodnji novog materijala te faktor emisijskog ponora pri recikliranju za svaki pojedini polimer. Faktor emisijskog ponora vrijednost je koja pokazuje koliko je emisija CO_2 uštedeno uslijed zamjene izvornog materijala reciklatom. Matematički je ono razlika između emisija nastalih pri proizvodnji izvornog materijala i emisija CO_2 nastalih pri proizvodnji recyklata.

Tablica 3. Emisijski faktori pri mehaničkom recikliranju

Vrsta polimera	Emisijski faktor pri proizvodnji izvorne sirovine [kgCO ₂ eq/kg polimera]	Faktor emisijskog ponora uslijed recikliranja ^[38] [kgCO ₂ eq/kg polimera]
HDPE	1,93 ^[37]	-1,15
LDPE	1,98 ^[37]	-0,97
PET	2,94 ^[37]	-2,19
PP	1,95 ^[38]	-1,18
PS	3,68 ^[37]	-1,24
PVC	2,51 ^[37]	-1,55

Graf 2 služi boljem predočanju vrijednosti iz Tablice 3.



Graf 2. Graf usporednog prikaza emisijskih izvora i ponora pri mehaničkom recikliranju polimera

4.2.2. Mehaničko recikliranje pri sortiranju visoke učinkovitosti

Visoko učinkoviti sustav recikliranja teško je kvantificirati, no u ovom je radu karakteriziran čistom ulaznom sirovinom koja zahtijeva minimalnu mehaničku obradu. Kako bi se naglasila važnost visokoučinskog sustava recikliranja prikazat će se rezultati recikliranja HDPE-a prikupljenog u sustavu visoke učinkovitosti. Proizvodi izrađeni od HDPE plastike

karakteristični su po svojoj krutosti i debljini što njihovu kontaktnu površinu po jedinici mase čini manjom u odnosu na ostale polimere u smjesi plastičnog otpada. Ta predispozicija HDPE-a olakšava njegovu mehaničku obradu i smanjuje energiju uloženu u taj proces. Isto tako, krutost i debljina čine ga pogodnim za izbjegavanje procesa peletiranja te se može samo samljeti u sitnije dijelove.

Prema izvoru [30] u Tablici 4 prikazani su energenti i njihove vrijednosti potrebne za proizvodnju jedne tone polietilena visoke gustoće. Zbrajanjem prikazanih vrijednosti i korištenjem njima pripadajuće donje ogrijevane vrijednosti, za mehaničko recikliranje jedne tone HDPE plastike potrebno je 1.078,71 MJ/t. Također, u zbroj je dodana energija uložena u sortiranje i transport te ona iznosi 290 MJ/t [40] [28] .

Tablica 4. Vrijednosti eneregenata porbnih za proizvodnju 1 t HDPE-a [30]

Energent	Utrošak energenta za recikliranje 1 t HDPE - a
Električna energija, [kWh]	330
Prirodni plin, [Nm³]	24
Nafta, [L]	0,6
<i>Ukupna potrebna energija, [MJ/t]</i>	1.078,71

Time je izbjegnuta proizvodnja nove sirovine koja bi osim dodatnog utroška električne energije, prirodnog plina i nafta iskoristila za 565 Nm³ prirodnog plina i 928 litara nafte kao sirovine za proizvodnju jedne tone izvornog polimera.

Sagorijevanjem eneregenata nastaju emisije CO₂. Emisije eneregenata potrebnih za recikliranje jedne tone HDPE-a prikazane su u tablici 5. Zbrajanjem prikazanih vrijednosti uz dodatak emisija uslijed sortiranja i transport (29,027 kgCO₂eq/t) dobiven je emisijski faktor pri recikliranju jedne tone polietilena visoke gustoće te ona iznosi 137,495 [kgCO₂eq/t].

Tablica 5. Emisije eneregenata potrebnih za recikliranje jedne tone HDPE-a [30]

Energent	Utrošak energenta za recikliranje 1 t HDPE - a	Emisije CO ₂ pri sagorijevanju eneregenata [kgCO ₂ eq/t]
Električna energija	330 [kWh]	59,730
Prirodni plin	24 [Nm ³]	47,124
Nafta	0,6 [L]	1,614
<i>Faktor emisija CO₂ pri recikliranju HDPE-a</i>	<i>137,495</i>	

Prema izvoru koji je korišten za analizu recikliranja HDPE-a pri sortiranju visoke učinkovitosti, za proizvodnju izvornog HDPE-a potrebno je uložiti 66.182,76 MJ/t. Taj broj u sebi sadržava vrijednosti energije pohranjene u sirovinama (prirodni plin i nafta) korištenim za proizvodnju izvornog materijala, kao i energije uložene u proces proizvodnje. Analogno tome izračunata je i vrijednost emisija ekvivalenta ugljikovog dioksida uslijed proizvodnje izvornog HDPE-a te ona iznosi 4.571,757 kgCO₂eq/t.

U Tablici 6 prikazane su konačne vrijednosti energija u sustavu mehaničkog recikliranja pri visokoučinkovitom sortiranju. Neto energija predstavlja energiju koja je uštedena zamjenom proizvodnje izvornog materijala, proizvodnjom reciklata.

Tablica 6. Konačne vrijednosti energije u sustavu mehaničkog recikliranja pri visokoučinkovitom sortiranju

Energija uložena u proizvodnju izvornog HDPE-a	66.182,76	MJ/t
Energija uložena u recikliranje HDPE-a	1.078,71	MJ/t
Neto energija	65.104,06	MJ/t

U Tablici 7 prikazane su konačne vrijednosti emisija CO₂ u sustavu mehaničkog recikliranja pri visokoučinkovitom sortiranju. Emisijski ponor uslijed recikliranja predstavlja emisije CO₂ koje su uštedene zamjenom proizvodnje izvornog materijala, proizvodnjom reciklata.

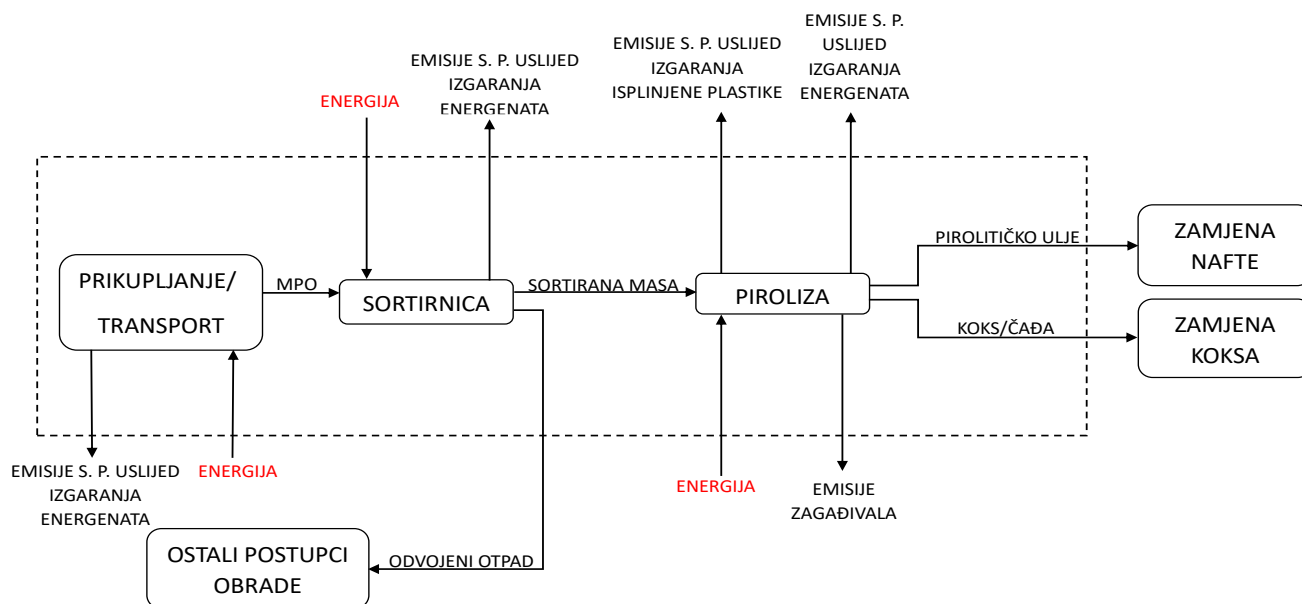
Tablica 7. Konačne vrijednosti emisija CO₂ u sustavu mehaničkog recikliranja pri visokoučinkovitom sortiranju

Faktor emisija CO ₂ pri proizvodnji izvornog HDPE-a	4.571,76	kgCO ₂ eq/t
Faktor emisija CO ₂ pri recikliranju HDPE-a	137,495	kgCO ₂ eq/t
Emisijski ponor uslijed recikliranja	4.434,26	kgCO ₂ eq/t

Uspoređujući rezultatne vrijednosti recikliranja pri visokoučinkovitom i srednjeučinkovitom sortiranju HDPE-a emisijski ponor veći je 3,86 puta, a ukupna uštedena energija veća je 1,21 puta. Te će se vrijednosti uzeti u obzir pri skaliranju vrijednosti uštedenih emisija i energije pri srednjeučinkovitom sortiranju u visokoučinkovito sortiranje. Rezultati skaliranja neće biti prikazani za svaki polimer pojedinačno, nego će se odnositi na ukupnu masu plastike. Time se dobiva emisijski ponor od -3.649,76 kgCO₂eq/t i neto energija od 53.146,92 MJ/t.

4.3. Piroliza

Granice sustava obrade otpadne plastike pirolizom obuhvaćaju sakupljanje i transport otpadne plastike, njezino sortiranje i proces pirolize u kojem se dobivaju pirolitičko ulje i koks.



Slika 8. Shema granica sustava obrade otpadne plastike pirolizom

Za provedbu procesa pirolize potrebno je uložiti energiju koja se dobiva iz prirodnog plina i električnu energiju. Također je potrebno utrošiti energiju u transport i sortiranje (250 MJ/t). [40] Pretpostavljeno je da od točke prikupljanja otpada do pogona za pirolizu otpad prijeđe put od 50 km, a energija potrebna za prijevoz iznosi $0,8 \text{ MJ t}^{-1} \text{ km}^{-1}$. [29] Sortiranje potrebno za proces pirolize jednostavnije je jer nije potrebno detaljno očistiti sirovinu ili je podijeliti na stroge frakcije, bitno je da se izdvoje metali i da se uklone lako zapaljivi materijali kao što su papiri i kartoni. Dakako, kvaliteta pirolitičkog ulja ovisi o homogenosti plastične frakcije.

Iz izvora [40] korišteni su podaci za postrojenje kapaciteta 5000 t godišnji te su oni prikazani u Tablici 8.

Tablica 8. Energenti potrebni za proizvodnju 1 t pirolitičkog ulja

za 1 t pirolitičkog ulja	1
Miješana plastika	1,41 t
Električna energija	3260 MJ
Plin prirodni	10 kg
Dodatni produkt-čađa/koks	0,11 t

Podacima iz Tablice 8 izračunati su produkti pirolize za 1 t miješanog plastičnog otpada te energija potrebna za provođenje procesa. Dobivene vrijednosti korištene su u daljnjem proračunu.

Tablica 9. Produkti pirolize jedne tone miješanog plastičnog otpada

MATERIJSKI PRODUKTI	
pirolitičko ulje	0,709219858 t
Čađa/koks	0,078014184 t
dimi plinovi	0,212765957 t
ENERGIJA POTREBNA ZA PROCES	
Električna energija	2312,056738 MJ
Prirodni plin	7,092198582 kgCH ₄

Uložena energija u proces pirolize uključuje energiju transporta i sortiranja, energiju električne energije i energiju nastalu izgaranjem prirodnog plina. Uložena energija izražena je u MJ po toni plastičnog otpada.

Tablica 10. Energija uložena u proces pirolize

ULOŽENA ENERGIJA			
Energija za sortiranje i transport [MJ/t]	Električna energija [MJ/t]	Prirodni plin [MJ/t]	Ukupna uložena energija [MJ/t]
290	2.312,06	354,61	2.956,67

Kao produkt pirolize nastaju koks i pirolitičko ulje koji se koriste kao goriva. Zbroj njihovih vrijednosti daje ukupnu dobivenu energiju. Ukupna neto energija procesa je pozitivna što ukazuje da je procesom pirolize dobiveno više energije nego što je uloženo u njega te da je proces energetski isplativ. Dobivena energija izražena je u MJ po toni plastičnog otpada.

Tablica 11. Energija dobivena procesom pirolize

DOBIVENA ENERGIJA			
Energija pirolitičkog ulja [MJ/t]	Energija koksa [MJ/t]	Ukupna dobivena energija [MJ/t]	Neto energija [MJ/t]
27.660	2.028	29.688	26.731

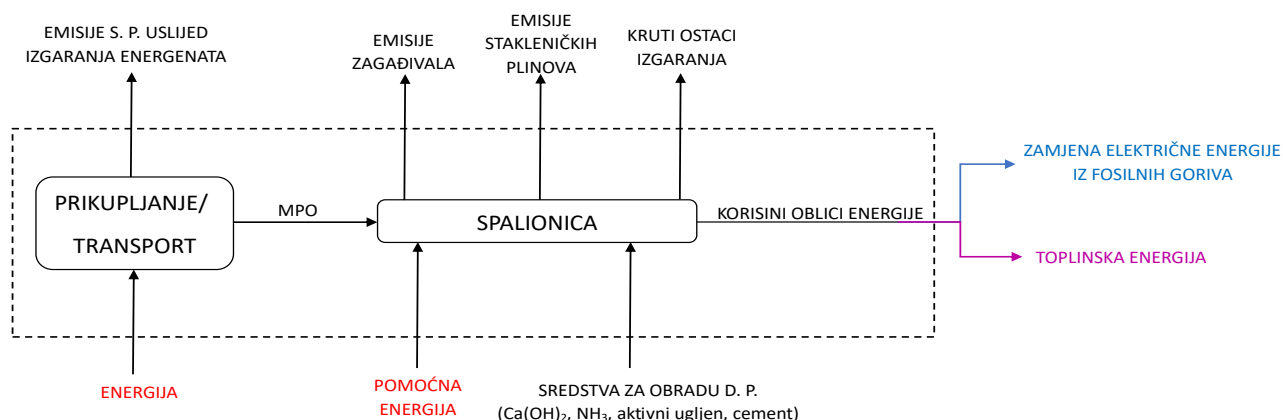
Vrijednosti emisija od proizvodnje električne energije i emisija nastalih izgaranjem prirodnog plina predstavljaju emisijski izvor. Iako se pirolizom dobivaju koks i pirolitičko ulje te se njihovo izgaranje gleda kao ponor emisija, one zamjenjuju naftne derivate koji prema pretpostavci izgaranjem emitiraju jednake količine ekvivalenta CO₂. Zato se te vrijednosti poništavaju i ne ulaze u proračun emisija. Također, emisijama treba pridodati i one dimnih plinova nastalih u procesu pirolize, kao i emisije nastalih uslijed sagorijevanja energenta u transportu i sortiranju. Emisije električne energije računane su pomoću specifičnog faktora emisije CO₂ po ukupno proizvedenoj električnoj energiji koji iznosi 0,181 kg/kWh [41].

Tablica 12. Emisijski faktori energenata u procesu pirolize

Električna energija [kgCO ₂ eq/t]	Prirodni plin [kgCO ₂ eq/t]	Dimni plinovi [kgCO ₂ eq/t]	Pirolitičko ulje [kgCO ₂ eq/t]	Koks [kgCO ₂ eq/t]	Transport i sortiranje [kgCO ₂ eq/t]	Neto emisije CO ₂ [kgCO ₂ eq/t]
116	20	507,09	-1.950,35	-243,14	92,01	735

4.4. Spaljivanje

Prikupljanje i transport otpadne plastike do spalionice obuhvaćaju granice sustava obrade otpadne plastike spaljivanjem. Granice sustava prelazi energija uložena te ona dobivena izgaranjem plastičnog otpada. Iz sustava izlaze emisije stakleničkih plinova svedene na CO₂ ekvivalent i emisije zagađivala (NO_x, CO, ukupna prašina, TOC, HCl, HF, SO₂).



Slika 9. Shema granica sustava obrade otpadne plastike spaljivanjem

Spaljivanjem plastičnog otpada dobiva se električna energija. Plastika je vrlo dobar materijal za spaljivanje jer je u njoj sadržana energetska vrijednost nafte iz koje je proizvedena.

Množenjem donje ogrjevne vrijednosti i stupanja iskorištenja postrojenja za proizvodnju

električne energije (19%) dobiva se vrijednost proizvedene električne energije. Proizvedena energija je u kWh, no radi lakšeg računanja s ostalim energijskim doprinosima konvertirana je u MJ. U procesu spaljivanja energija se troši na transport [28]. Razlika dobivene i uložene energije predstavlja ukupnu energiju dobivenu u procesu spaljivanja.

Tablica 13. Uložena i dobivena energija u procesu spaljivanja

Vrsta polimera	Donja ogrjevna vrijednost ^[8] [MJ/kg]	Proizvedena energija [MJ/kg]	Energija potrošena na transport ^[28] [MJ/kg]	Ukupna energija [MJ/kg]
HDPE	45	8,6	-0,3165	8,23
LDPE	45	8,6	-0,3165	8,23
PET	22	4,2	-0,3165	3,86
PP	46	8,7	-0,3165	8,42
PS	41	7,8	-0,3165	7,47
PVC	18	3,4	-0,3165	3,10
Ostale plastike	28	5,4	-0,3165	5,04
Folija	43	8,2	-0,3165	7,85
nečistoće	2,5	0,5	-0,3165	0,16

Emisije CO₂ fosilnog podrijetla i emisije N₂O koje nastaju izgaranjem plastičnog otpada svode se na ekvivalent ugljikovog dioksida. Vrijednost od 0,05 kilograma po toni otpada, emisija dušikova oksida je pretpostavljena, a potencijal globalnog zatopljenja dušikovog oksida iznosi 310 [8]. Osim emisijskih izvora koji su posljedica izgaranja, izvorima se pridružuju i emisije nastale uslijed transporta. Kao emisijski ponor gledaju se emisije izbjegnute radi proizvodnje električne energije iz plastike, te je specifični faktor emisije CO₂ po ukupno proizvedenoj električnoj energiji 0,181 kg/kWh [41]. Zbog preglednijeg prikaza vrijednosti u Tablici 14 prikazane su emisije nastale izgaranjem otpadne plastike, a u Tablici 15 one zbrojene i prikazane u stupcu emisije nastale su izgaranjem. Neto emisije CO₂ predstavljaju zbroj svih emisijskih ponora i izvora uslijed procesa spaljivanja.

Tablica 14. Emisije nastale izgaranjem otpadne plastike

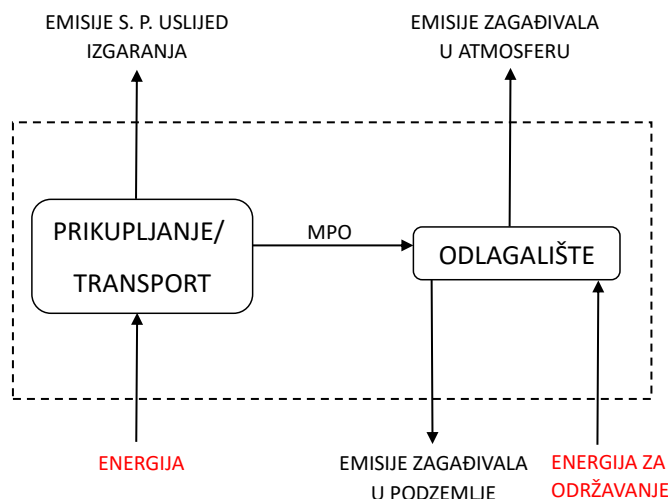
Vrsta polimera	Udio ugljika u polimeru ^[8] [%]	Emisije CO ₂ nastale izgaranjem fosilnog ugljika [kgCO ₂ eq/t]	Emisije uslijed stvaranja N ₂ O [kgCO ₂ eq/t]
HDPE	86%	3.153	16
LDPE	86%	3.153	16
PET	63%	2.310	16
PP	86%	3.153	16
PS	92%	3.373	16
PVC	38%	1.393	16
Ostale plastike	75%	2.750	16
Folija	86%	3.153	16
nečistoće	27%	990	16

Tablica 15. Emitirane i izbjegnute emisije procesom spaljivanja

Vrsta otpada	Emisije izbjegnute proizvodnjom el. e. [kgCO ₂ eq/t]	Emisije nastale izgaranjem [kgCO ₂ eq/t]	Emisije uslijed transporta [kgCO ₂ eq/t]	Neto emisije CO ₂ [kgCO ₂ eq/t]
HDPE	-430	3.169	36,67	2.776
LDPE	-430	3.169	36,67	2.776
PET	-210	2.326	36,67	2.152
PP	-439	3.169	36,67	2.766
PS	-392	3.389	36,67	3.034
PVC	-172	1.409	36,67	1.274
Ostale plastike	-269	2.766	36,67	2.533
Folija	-411	3.169	36,67	2.795
Nečistoće	-24	1.006	36,67	1.018

4.5. Odlaganje

Granice sustava obrade otpadne plastike odlaganjem uključuju prikupljanje, transport i odlaganje plastičnog otpada. Odlaganjem plastike ne emitiraju se staklenički plinovi, no zauzima se velika zemljana površina i odbacuje se vrijedna sirovina.



Slika 10. Shema granica sustava obrade otpadne plastike odlaganjem

U postupku odlaganja otpada energija se iskorištava jedino pri transportu. Za to je uzeta vrijednost od 0,8 mega džula po prijeđenom kilometru i toni otpada. [29] Ako se pretpostavi da prosječni put prijeđen od točke prikupljanja otpada do odlagališta iznosi 10 km, onda se za odlaganje troši 8 MJ/t.

Odlaganjem plastike ne emitiraju se plinovi. Jedine emisije nastaju uslijed prijevoza otpada na odlagalište i one iznose 10 kgCO₂eq/t otpada. [28]

4.6. Rezultati provedenih proračuna

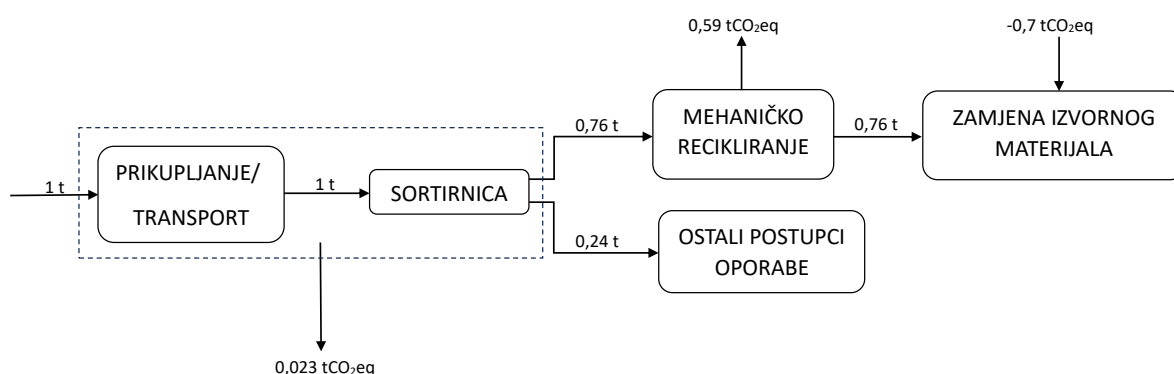
Korištenjem podataka iz prethodnih poglavlja dobivene su vrijednosti emisijskih izvora i ponora te uložene i dobivene energije pri obradi mase otpadne plastike. Za svaki je postupak obrade prikazana shema toka mase jedne tone miješanog plastičnog otpada.

4.6.1. Mehaničko recikliranje

Iz ukupne prikupljene mase otpadne plastike predviđeno je da se recikliraju HDPE, LDPE, PET, PP, PS i PVC. Iako se i ostali polimeri mogu reciklirati, njihov je udio u plastičnom otpadu premalen da bi se isplatio postupak sortiranja i recikliranja.

4.6.1.1. Recikliranje srednje učinkovitosti

Od 1 t prikupljenog miješanog plastičnog otpada 76%, radi vrste materijala, pogodno je za mehaničko recikliranje i proizvodnju 0,76 t reciklata. Također postoji i tok mase ugljikovog dioksida. Mehaničkim recikliranjem i sortiranjem emitirano je ukupno 0,6 tCO₂eq, a izbjegavanjem je procesa proizvodnje uštedeno 0,7 tCO₂eq.



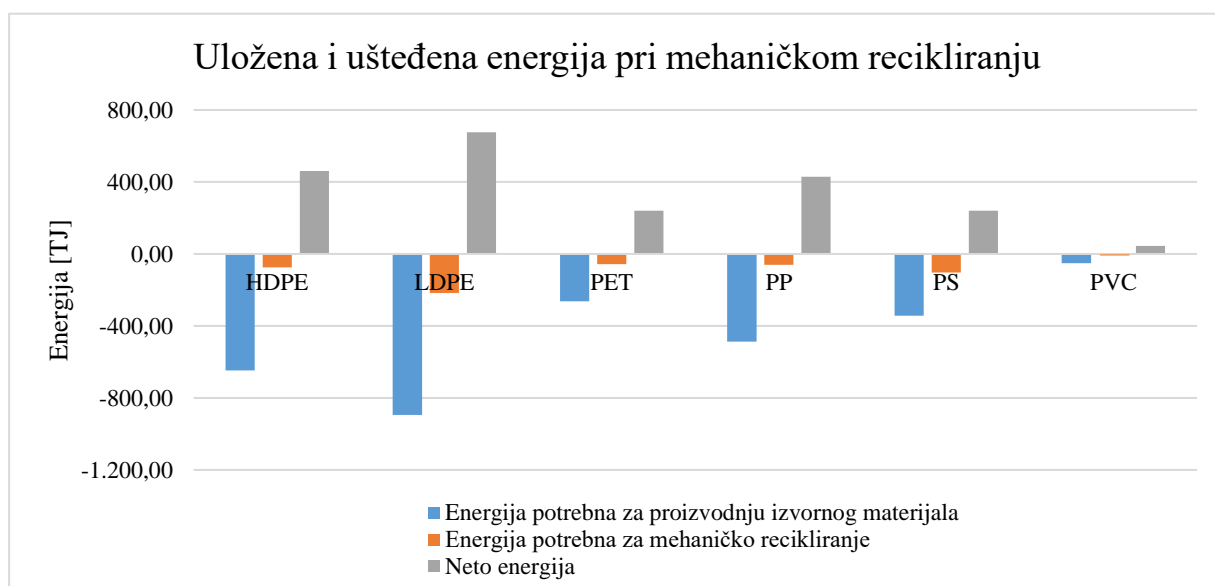
Slika 11. Shema toka mase u procesu obrade otpadne plastike mehaničkim recikliranjem pri sortiranju srednje učinkovitosti

Rezultati proračuna prikazani su u Tablici 16. Pri reciklaži 36.266.022 t otpadne plastike koja uključuje HDPE, LDPE, PET, PP, PS i PVC, uštedeno je 2.092.240.254 MJ energije i 45,13 ktCO₂eq.

Tablica 16. Rezultati proračuna

Vrsta polimera	Masa polimera [kg]	Neto energija [MJ]	Emisijski ponor [ktCO ₂ eq]
HDPE	8.589.321	461.332.431	-9,87
LDPE	11.452.428	676.723.971	-11,13
PET	4.294.661	239.599.109	-9,41
PP	6.680.583	428.225.370	-7,91
PS	4.294.661	240.835.972	-5,33
PVC	954.369	45.523.401	-1,48
Suma	36.266.022	2.092.240.254	-45,13

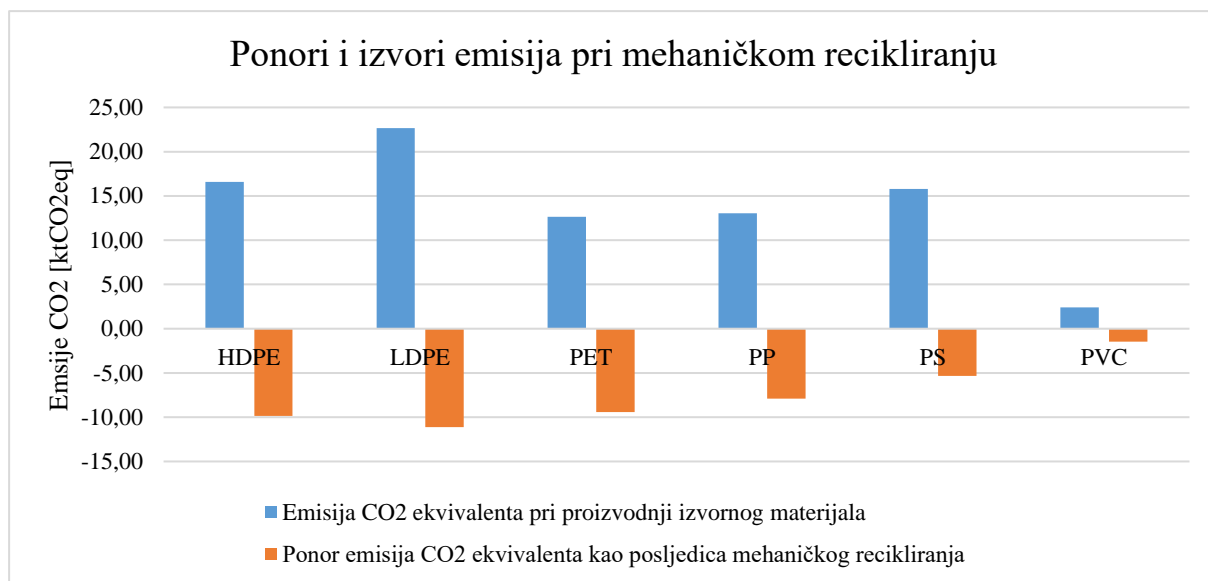
Na Grafu 3 prikazan je tablični dijagram u kojem su uspoređene vrijednosti energije uložene u proizvodnju novog materijala, energije potrebne za mehaničko recikliranje i konačne neto energije za svaki pojedini polimer. Neto energija prikazuje razliku između energija uložениh u proizvodnju izvornog materijala i recyklata, odnosno ona prikazuje energetska uštedu koja se ostvaruje korištenjem recykliranog umjesto izvornog materijala.



Graf 3. Tablični dijagram usporedbe uložene i uštedjene energije pri mehaničkom recikliranju

Na Grafu 4 prikazan je tablični dijagram u kojem su uspoređene vrijednosti emisija pri proizvodnji izvornog polimera (emisijски izvori) i emisijских ponora koji nastaju kao rezultat

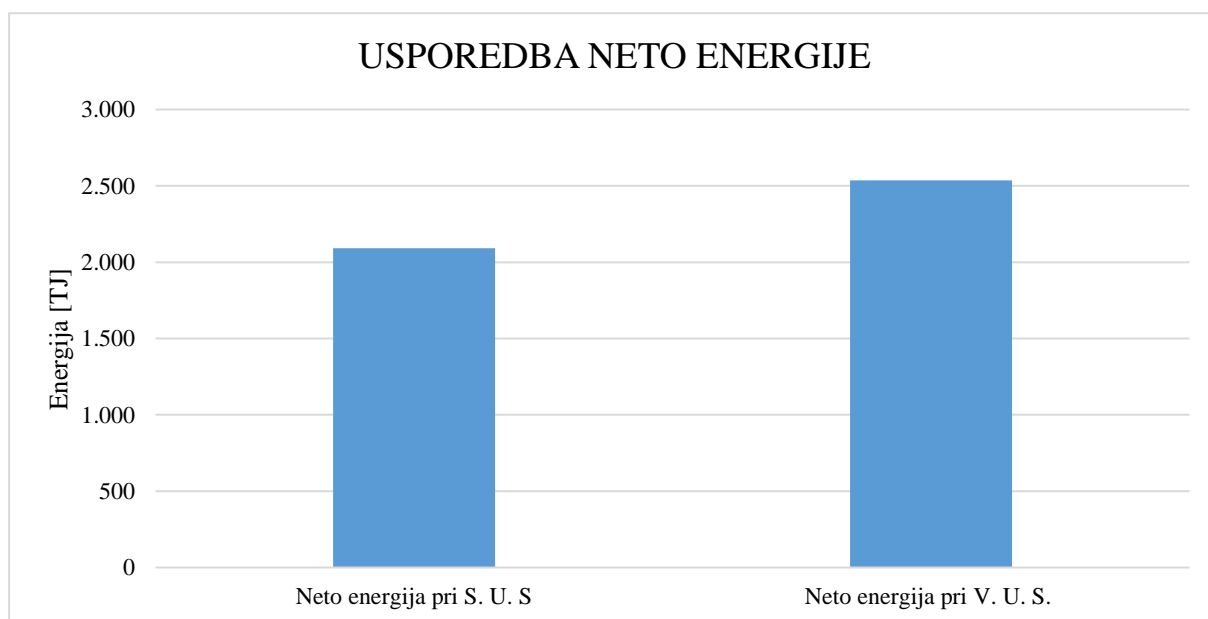
recikliranja. Emisijski ponori emisije su stakleničkih plinova koje nisu emitirane zbog zamjene izvornog materijala reciklatom.



Graf 4. Tablični dijagram usporedbe emisijskih ponora i izvora uslijed recikliranja

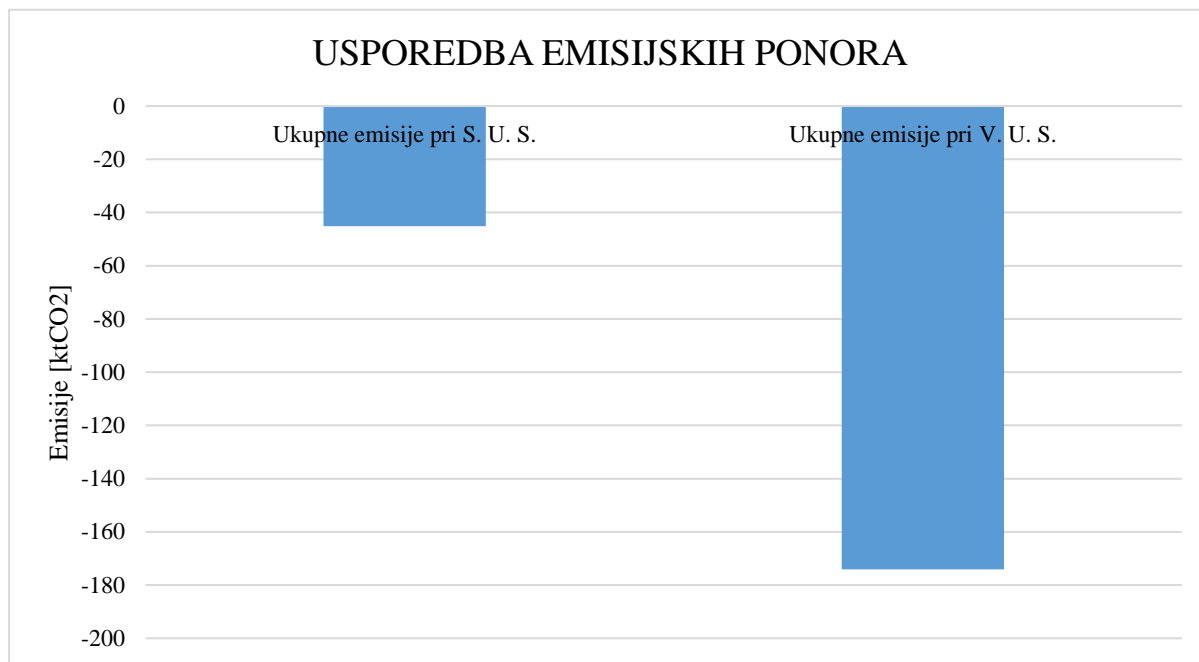
4.6.1.2. Recikliranje pri sortiranju visoke učinkovitosti

Rezultati provedenog proračuna za recikliranje otpadne plastike pri sortiranju visoke učinkovitosti pokazuje da neto, odnosno uštedena energija za ukupnu masu od 36.266 t iznosi 2.536.088.845 MJ. Što je 21,21% posto više od energije uštedene mehaničkim recikliranjem pri sortiranju srednje učinkovitosti. Ta je razlika vidljiva u Grafu 5.



Graf 5. Prikaz razlike neto energije mehaničkog recikliranja pri srednjeučinskom i visokoučinskom sortiranju

Kao što je već spomenuto, emisijski je ponor veličina izbjegnutih emisija uslijed zamjene izvorne sirovine reciklatom. Emisijski ponor koji je nastao kao produkt mehaničkog recikliranja pri visokučinskom sortiranju 36.266 t otpadne plastike, iznosi -175.300.773 kgCO₂. Sortiranjem visoke učinkovitosti emisijski se ponor uvećava za 288,45% u odnosu na onaj pri sortiranju srednje učinkovitosti.



Graf 6. Prikaz razlike ukupnih emisija mehaničkog recikliranja pri srednjeučinskom i visokučinskom sortiranju

4.6.1.3. Recikliranje aluminija i željeza

Budući da se plastični i metalni otpada zajedno prikupljaju, sortiranjem u sortirnici izdvajaju se materijali aluminija i željeza koji se također upućuju na daljnju obradu. Ti su materijali izrazito pogodni za recikliranje. Iz Tablici 1 može se iščitati da masa aluminija u odvojeno prikupljenom otpadu iznosi 477,18 t, a masa željeza 2.863,11 t. Te će mase biti korištene u daljnjem proračunu.

Aluminij se dobiva iz boksita, a željezo iz željezne rude (magnetita, hematita). Te se rude tretiraju raznim postupcima da bi se dobile sirovine aluminija i željeza. Ove sirovine zatim nalaze primjenu u raznim industrijama za proizvodnju različitih proizvoda. Cijeli proces proizvodnje zahtijeva značajna energetska ulaganja koja rezultiraju emisijama stakleničkih plinova u atmosferu. Recikliranjem tih materijala izbjegava se proces rudarenja i dobivanja sirovine iz rude, čime se postiže velika energetska, a time i emisijska ušteda. U Tablici 17

prikazane su vrijednosti energije koju je potrebno uložiti u cijeli proces dobivanja izvornog materijala i energije koju je potrebno uložiti za proizvodnju reciklata. Energija koja je izbjegnuta radi zamjene izvornih materijala reciklatom, predstavlja energetska uštedu koja se ostvaruje recikliranjem i naziva se neto energija. Za masu aluminija i željeza od 3.340,29 t neto energija iznosi 163,67 TJ.

Tablica 17. Energija potrebna za proizvodnju izvornog materijala i reciklata

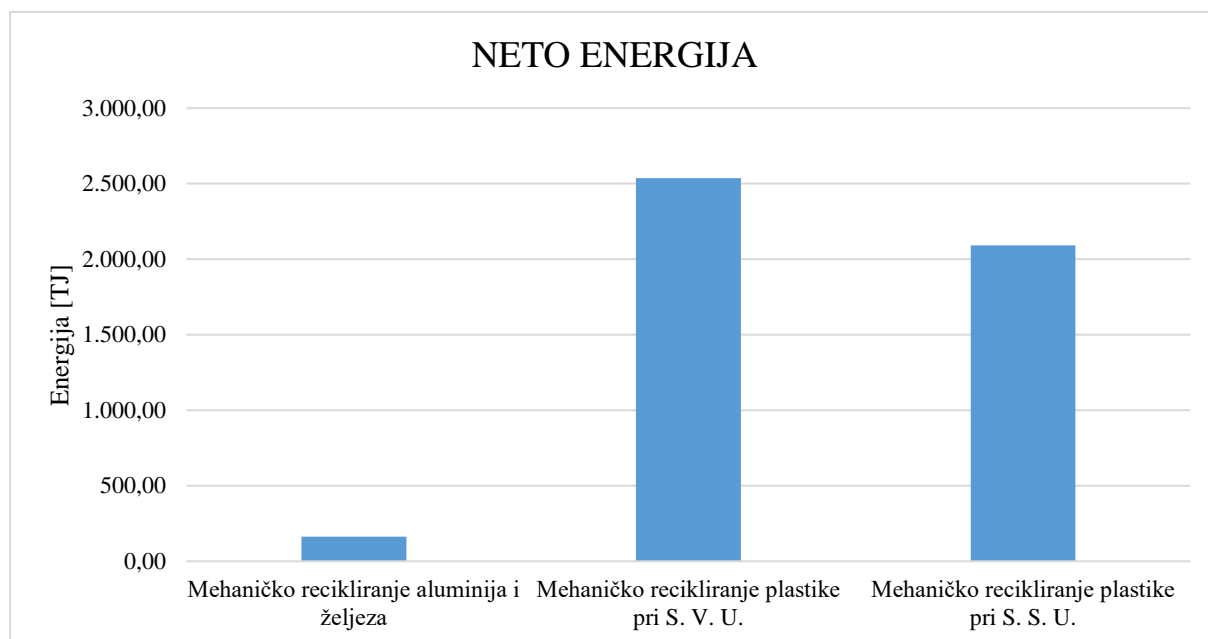
PROIZVODNJA IZVORNOG MATERIJALA			
Vrsta materijala	Energija uložena u proizvodnju ^[28] [MJ/t]	Energija uložena u transport ^[28] [MJ/t]	Ukupna energija pri proizvodnji [TJ]
ALUMINIJ	225.075,00	7.543,00	111,00
ŽELJEZO	33.318,00	4.853,00	109,29
PROIZVODNJA RECIKLATA			
Vrsta materijala	Energija uložena u recikliranje ^[28] Energija uložena u recikliranje ^[28] [MJ/t]	Energija uložena u transport ^[28] [MJ/t]	Ukupna energija pri recikliranju [TJ]
ALUMINIJ	17.503,38	1.065,61	8,86
ŽELJEZO	12.428,56	4.251,86	47,76
NETO ENERGIJA: 163,67 TJ			

U Tablici 18 prikazane su vrijednosti emisija ekvivalenta CO₂ uslijed proizvodnje novog materijala i recikliranja. Recikliranjem se emitira manje emisija nego pri proizvodnji, tako da se zamjenom izvornog materijala reciklatom postiže emisijski ponor. Za masu aluminija od 477,18 t i željeza od 2.863,11 emisijski ponor iznosi -12,18 ktCO₂.

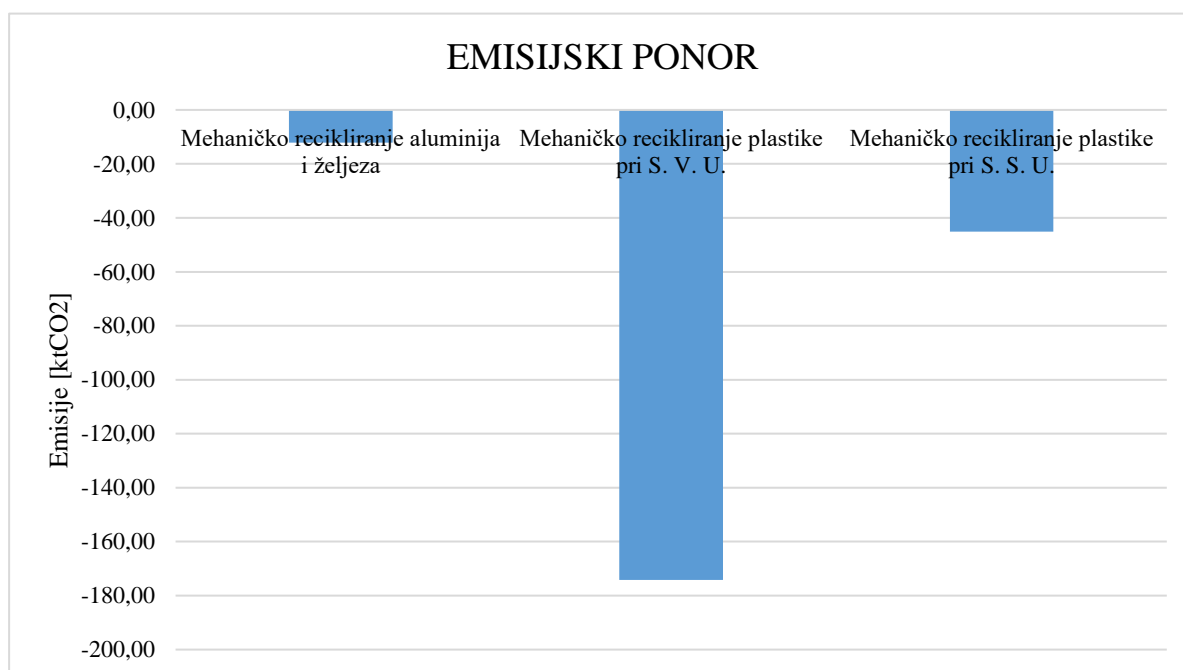
Tablica 18. Emisije ekvivalenta CO₂ nastale uslijed proizvodnje izvornog materijala i reciklata

PROIZVODNJA IZVORNOG MATERIJALA			
Vrsta materijala	Emisije CO ₂ pri proizvodnji ^[28] [kgCO ₂ eq/t]	Emisije CO ₂ pri transportu ^[28] [kgCO ₂ eq/t]	Ukupne emisije pri proizvodnji [ktCO ₂]
ALUMINIJ	15.070,00	550,00	7,45
ŽELJEZO	3.336,67	330,00	10,50
PROIZVODNJA RECIKLATA			
Vrsta materijala	Emisije CO ₂ pri recikliranju ^[28] [kgCO ₂ eq/t]	Emisije CO ₂ pri transportu ^[28] [kgCO ₂ eq/t]	Ukupne emisije pri recikliranju [ktCO ₂]
ALUMINIJ	1.026,67	73,33	0,52
ŽELJEZO	1.540,00	293,33	5,25
EMISIJSKI PONOR: -12,18 ktCO₂			

Kada bi se ukupna masa odvojeno prikupljenog otpada reciklirala, postigla bi se neto energija od 2.255,91 TJ pri srednjeučinkovitom sortiranju i 2.699,76 TJ pri visokoučinkovitom sortiranju. Emisijski ponor za srednjeučinkovito sortiranje iznosio bi -57,31 ktCO₂, a za visokoučinkovito -186,34 ktCO₂. Na Grafovima 7 i 8 usporedno su prikazane neto energije i emisijski ponori postupak mehaničkog recikliranja mase odvojeno prikupljenog otpada.



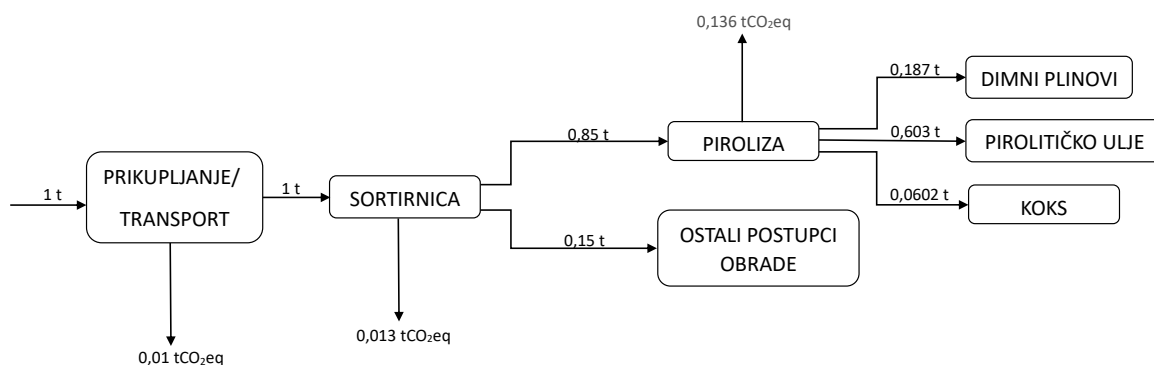
Graf 7. Usporedni prikaz neto energija pri mehaničkom recikliranju metala, mehaničkom recikliranju plastike pri srednjeučinkovitom i visokoučinkovitom sortiranju



Graf 8. Usporedni prikaz emisijskih ponora pri mehaničkom recikliranju metala, mehaničkom recikliranju plastike pri srednjeučinkovitom i visokoučinkovitom sortiranju

4.6.2. Piroliza

Prikupljanjem i sortiranjem jedne tone miješanog plastičnog otpada dobiva se 0,85 t sirovine koja je pogodna za pirolizu. Konačni produkti cijelog procesa su 0,187 t dimnih plinova, 0,603 t pirolitičkog ulja i 0,0602 t koksa. Za provedbu svakog od postupaka potrebno je uložiti energiju koja je pohranjena u gorivima čijim izgaranjem nastaju emisije CO₂.



Slika 12. Shema toka mase uslijed obrade plastičnog otpada postupkom pirolize

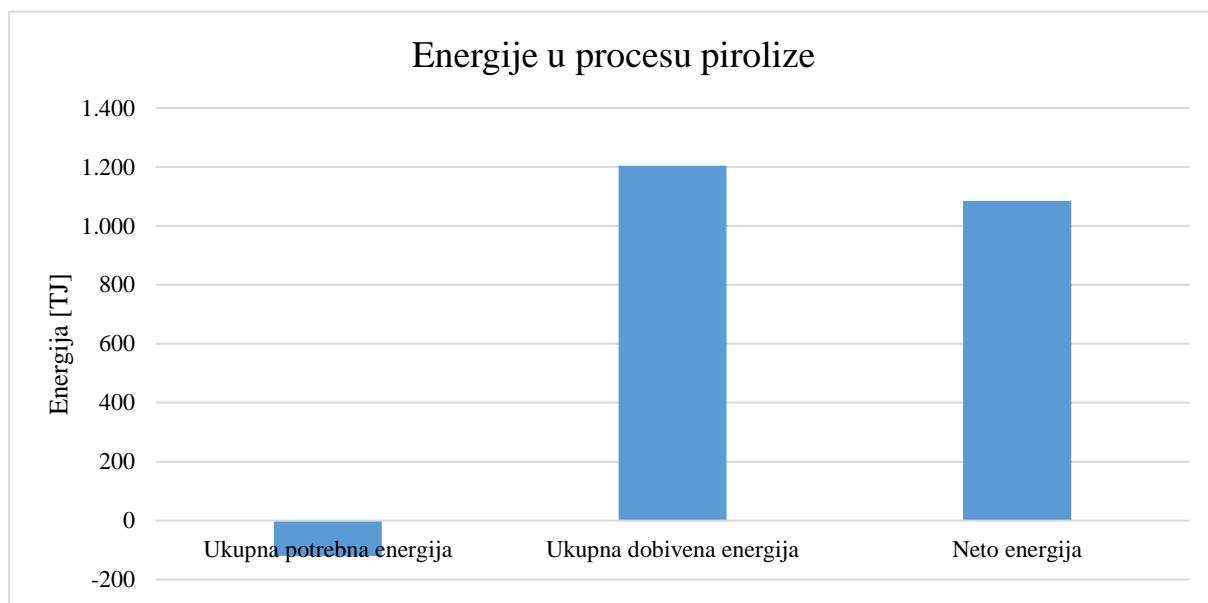
Iz ukupne prikupljene mase otpadne plastike predviđeno je da se u pirolitičkom reaktoru obrađuju HDPE, LDPE, PET, PP, PS, folije i čestice ostalih polimera uz iznimku PVC-a. Konačni rezultati proračuna iz poglavlja 4.2 prikazani su u Tablici 19. Neto energija zbroj je energija potrebnih za održavanje procesa pirolize i energija koje se dobivaju procesom pirolize u obliku pirolitičkog ulja i koksa. Zbroj svih izvora i ponora u procesu rezultira emisijskim izvorom.

Tablica 19. Rezultati proračuna

Vrsta polimera	Masa [kg]	Neto energija [MJ]	Emisijski izvor [ktCO ₂ eq]
HDPE	8.589.321	229.603.515	6,3119
LDPE	11.452.428	306.138.021	8,4159
PET	4.294.661	114.801.758	3,1560
PP	6.680.583	178.580.512	4,9093
PS	4.294.661	114.801.758	3,1560
Ostali polimeri	2.863.107	76.534.505	2,1040
Folija	2.385.923	63.778.754	1,7533

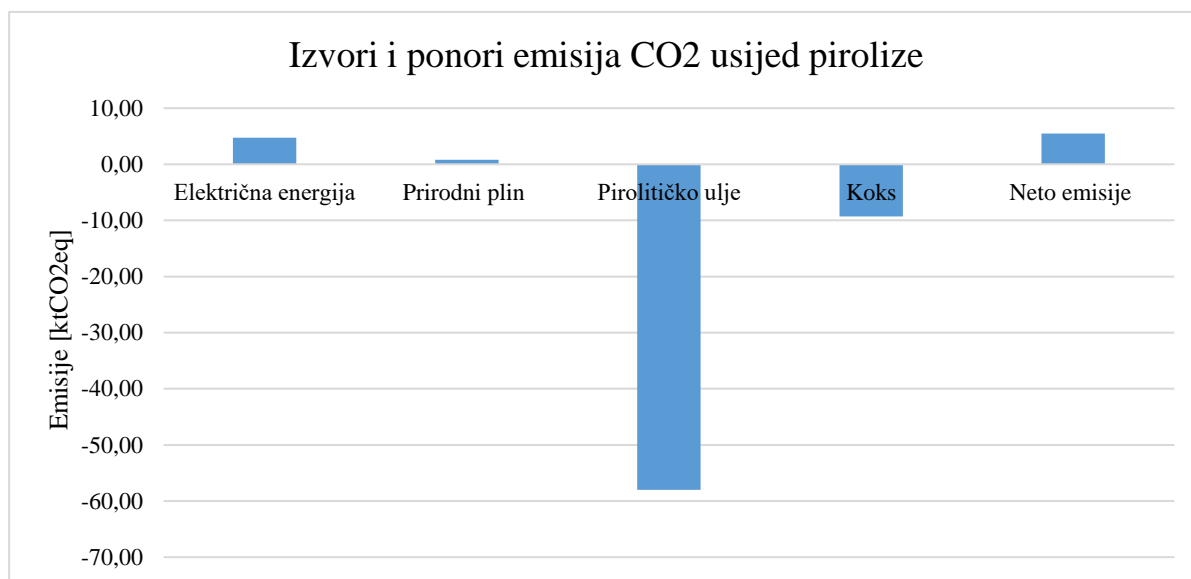
SUMA	40.560.683	1.084.238.823	29,8062
-------------	------------	---------------	---------

Na Grafu 9 pomoću stupčastog grafa prikazane su vrijednosti uložene i dobivene energije. Energija koju je potrebno uložiti u sustav električna je energija, energija iz prirodnog plina i energija za transport i sortiranje. Dobivena je energija ona sadržana u pirolitičkom ulju i koksu.



Graf 9. Grafički prikaz energija u procesu pirolize

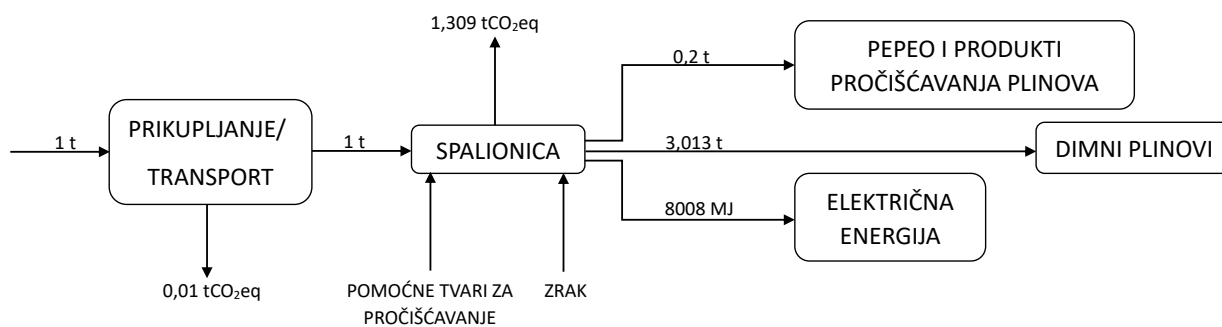
Idući Graf 10 prikazuje emisijske izvore i ponore uslijed procesa pirolize. Iako se izgaranjem pirolitičkog ulja i koksa emitiraju staklenički plinovi, oni se smatraju izbjegnutima jer zamjenjuju naftne derivate. No, budući da su emisije naftnih derivata iste onima pirolitičkih produkata, one se međusobno poništavaju. Zbroj emisija, zbog proizvodnje potrebne električne energije i emisija nastalih izgaranjem prirodnog plina, daje ukupnu, odnosno neto emisiju.



Graf 10. Grafički prikaz izvora i ponora emisija CO2 usljed pirolize

4.6.3. Spaljivanje

Sva prikupljena masa plastičnog otpada ulazi u spalionicu. Od jedne tone ulazne sirovine nastat će 0,2 t pepela, 3,013 t dimnih plinova i 8008 MJ električne energije. Spaljivanjem nastaju i emisije CO₂ usljed izgaranja dodatnih energenata koje je potrebno uložiti za pokretanje sustava, a također nastaju emisije usljed izgaranja energenata pri transportu.



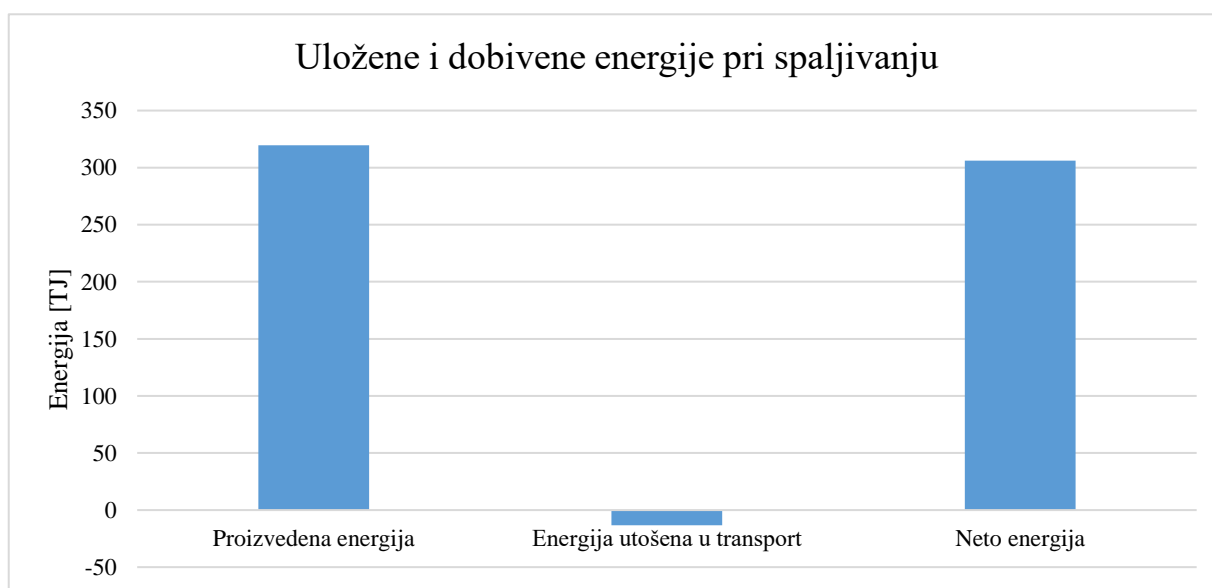
Slika 13. Shema toka mase usljed obrade plastičnog otpada postupkom spaljivanja

U Tablici 20 prikazani su rezultati proračuna ukupne dobivene energije i emitiranih emisija u procesu spaljivanja. Prikazane su i vrijednosti proizvedene električne energije spaljivanjem svake vrste polimera.

Tablica 20. Rezultati proračuna

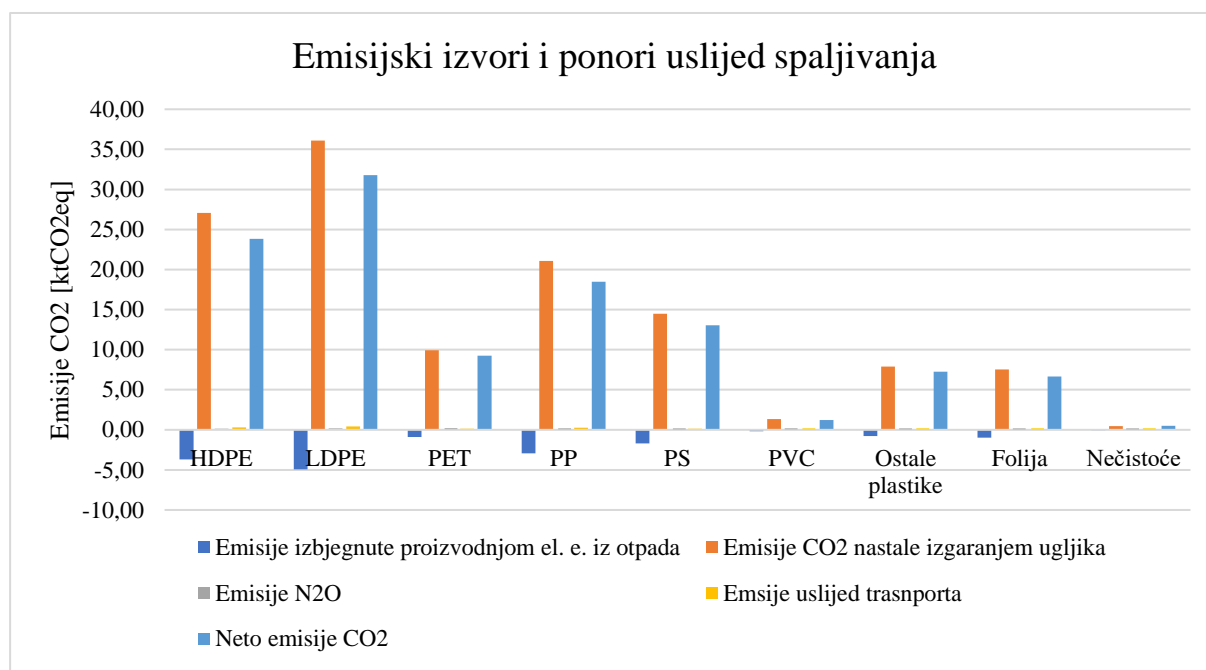
Vrsta polimera	Masa [kg]	Proizvedena električne energija [kWh]	Neto energija [MJ]	Emisijski izvor [ktCO ₂ eq]
HDPE	8.589.321	20.399.637	70.720.174	23,8
LDPE	11.452.428	27.199.517	94.293.566	31,8
PET	4.294.661	4.986.578	16.592.421	9,2
PP	6.680.583	16.218.971	56.273.891	18,5
PS	4.294.661	9.293.168	32.096.145	13,0
PVC	954.369	906.651	2.961.884	1,2
Ostali polimeri	2.863.107	4,261,182	14.434.082	7,3
Folija	2.385.923	5.414.719	18.737.842	6,7
nečistoće	477.185	62.962	75.634	0,5
SUMA	41.992.236	88.743.384	306.185.640	112

Neto energija zbroj je utrošene i dobivene energije. Pri spaljivanju energija se troši na transport otpada, a dobiva se njegovim spaljivanjem. Veličine tih procesa prikazane su na Grafu 11 u TJ.



Graf 11. Graf prikaza vrijednosti uložene i dobivene energije pri spaljivanju

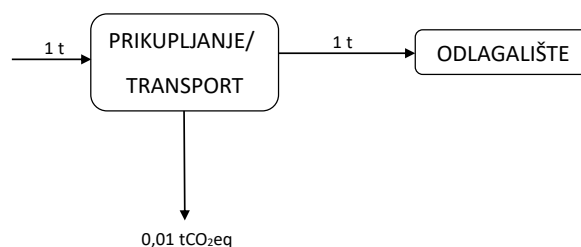
Spaljivanjem se uslijed izgaranja oslobađaju molekule fosilnog ugljika koje stvaraju molekule CO₂. Oslobađa se i N₂O koji se svodi na ekvivalent ugljikovog dioksida. No, proizvodnjom električne energije iz otpada, smanjuje se potreba za električnom energijom iz fosilnih goriva, a pri tome se izbjegnute emisije smatraju emisijskim ponorom. Na Grafu 12 prikazane su vrijednosti emisijskih ponora, izvora i neto emisija za svaki pojedini polimer tijekom procesa spaljivanja.



Graf 12. Graf prikaza emisijskih izvora i ponora za svaki polimer uslijed spaljivanja

4.6.4. Odlaganje

Prikupljanjem jedne tone plastičnog otpada, u slučaju odlaganja, odlaže se 100% prikupljene mase. Do emisija stakleničkih plinova može doći jedino uslijed zapaljenja odlagališta, što nije rijetka pojava.



Slika 14. Shema toka mase uslijed obrade otpadne plastike odlaganjem

Kao što je već navedeno u proračunu, jedini energetska utrošak pri odlaganju gorivo je potrošeno na prijevoz otpada. U obzir se uzimaju staklenički plinovi nastali izgaranjem tog goriva. U tablici su prikazane vrijednosti utrošene energije i emitiranih emisija za svaki pojedini polimer.

Tablica 21. Rezultati proračuna

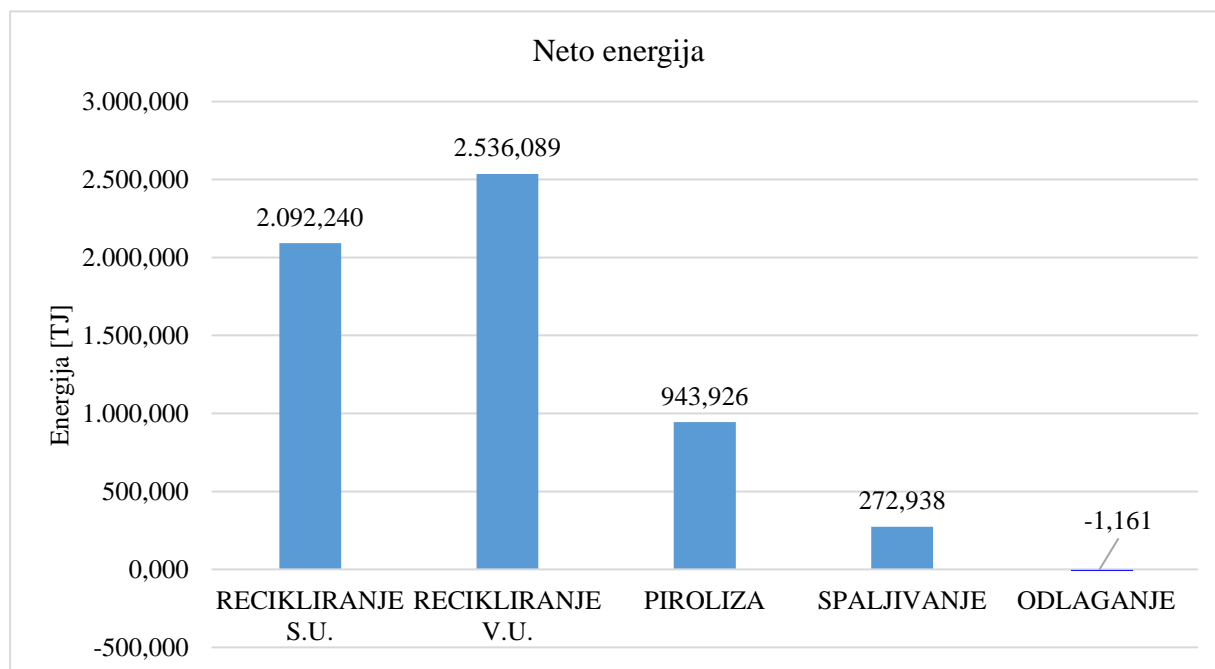
Vrsta polimera	Masa [kg/god]	Neto energija [MJ]	Emisijski izvor [ktCO ₂ eq]
HDPE	8.589.321	-274.858	0,0859
LDPE	11.452.428	-366.478	0,1145
PET	4.294.661	-137.429	0,0429
PP	6.680.583	-213.779	0,0668
PS	4.294.661	-137.429	0,0429
PVC	954.369	-30.540	0,0095
Ostali polimeri	2.863.107	-91.619	0,0286
Folija	2.385.923	-76.350	0,0239
Al	477.185	-15.270	0,0048
Fe	2.863.107	-91.619	0,0286
Suma	47.718.450	-1.526.990,4	0,477185

5. RASPRAVA

Dobiveni rezultati proračunatih potencijala usporedno su prikazani na Grafovima 13 i 14. Iz njih se jasno se vidi da je mehaničko recikliranje obje vrste učinkovitosti sortiranja, energetski i emisijski najbolji postupak.

Neto energija mehaničkog recikliranja temelji se na pretpostavci da se izvorni materijal zamjenjuje reciklatom, drugim riječima, mehaničkim se recikliranjem za razliku od ostalih postupaka energija ne dobiva, već se štedi na mjestu proizvodnje novog proizvoda. Proveden je proračun mehaničkog recikliranja uslijed dva sustava sortiranja koja se razlikuju prema učinkovitosti. Visokoučinski sustav zbog kvalitetnog odvajanja na izvoru nastanka otpada zahtijeva manje energije uložene u mehaničke postupke sortiranja, pranja i sušenja. Srednjeučinski sustav zbog nesavršenosti u procesu prikupljanja otpada zahtijeva opsežniji postupak sortiranja i pripreme materijala za recikliranje. No, bez obzira na učinkovitost sustava, mehaničko recikliranje evidentno je energetski najučinkovitije.

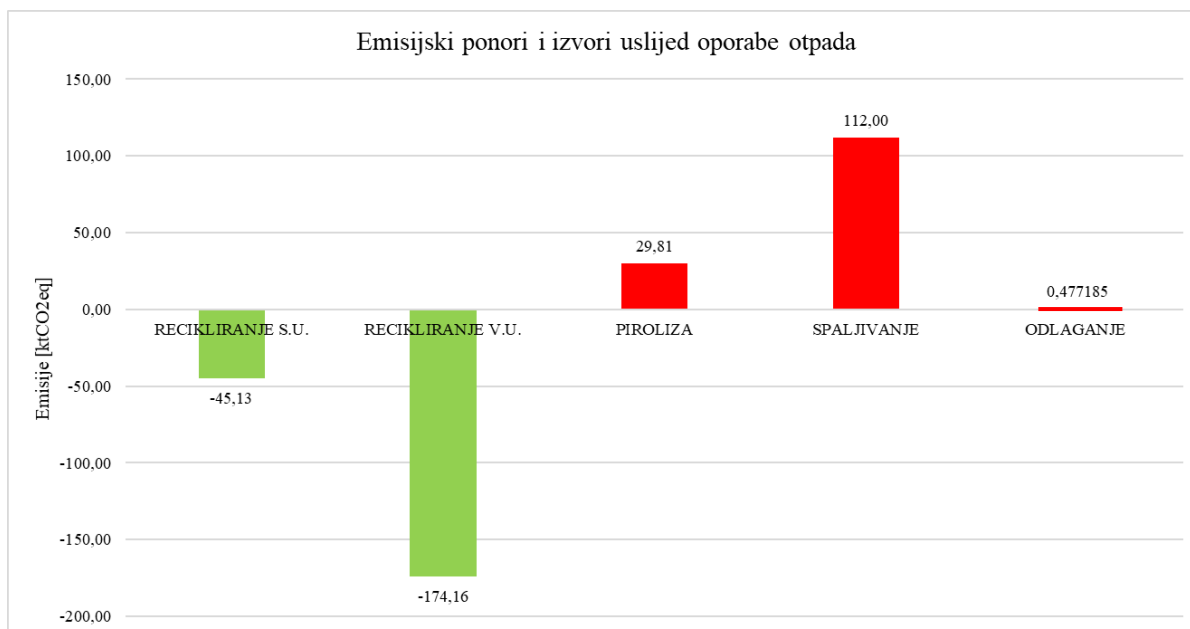
Pirolizom se dobiva pirolitičko ulje i koks koji zamjenjuju fosilna goriva, a spaljivanjem se dobiva električna energija. Odlaganje otpadne plastike je postupak od razmatranih u kojem se energija samo troši.



Graf 13. Grafički prikaz energetskog potencijala plastike za svaki postupak obrade

Recikliranje je jedini postupak obrade otpadne plastike u kojemu nema pozitivnih emisija stakleničkih plinova, štoviše recikliranjem plastike dobiva se emisijski ponor. Cilj je Europske

Unije do 2030. smanjiti emisije stakleničkih plinova za 55% u odnosu na razinu iz 1990. godine, a mehaničko recikliranje plastike jedan je od načina na koji EU može smanjiti emisije stakleničkih plinova. Samo na razini Grada Zagreba, pravilnim odvajanjem i sortiranjem, mogla bi biti ostvarena minimalna ušteda od 45 ktCO₂eq. Naravno, emisije su povezane s potrošnjom energije, stoga učinkovitiji sustav sortiranja rezultira većim emisijskim ponorom, odnosno većim količinama izbjegnutih emisija. Emisije stakleničkih plinova iz procesa pirolize znatno su manje u odnosu na one pri procesu spaljivanja. Isto tako, proizvodnja korisne energije tri puta je viša pirolizom nego što je to slučaj kod spaljivanja uz konverziju u električnu energiju. Važna je i činjenica da su korisni oblici energije kod pirolize sadržani u proizvedenom koksu i ulju koji se mogu i čuvati i transportirati. Iako su vrijednosti emisija pri odlaganju vrlo male, ono i dalje ostaje najnepovoljniji postupak obrade. Odlaganjem se rješavanje problema plastičnog otpada u stvari odlaže i stvara opasnost njegovog naknadnog unosa u okoliš.



Graf 14. Grafički prikaz emisijskog potencijala plastike za svaki postupak obrade

Do sada prikazani rezultati odnose se na sto posto prikupljene otpadne plastike obrađene na jedan od četiri opisana postupka. Kako bi se realističnije predočili dobiveni rezultati potencijala plastike, promijenjeni su udjeli mase otpadne plastike koji se podvrgavaju jednom od procesa obrade. Budući da se postupak mehaničkog recikliranja pokazao najisplativijim i da Europska Unija zagovara njegovo davanje prednosti u odnosu na druge postupke gospodarenja otpadom, mehaničko će se recikliranje usporediti s pirolizom, spaljivanjem i odlaganjem. Masa plastičnog otpada raspodijelit će se među tim postupcima, počevši od najpovoljnijeg scenarija u kojem se 80% mase reciklira, dok se preostalih 20% podvrgava nekom drugom postupku. Sve

do scenarija u kojem je recikliranje zastupljeno s dvadeset posto, dok se osamdeset posto podvrgava drugom postupku. Sortiranje srednje učinkovitosti u praksi je najzastupljenije te će se zato u razmatranju sagledati mehaničko recikliranje pri srednjeučinskom sortiranju.

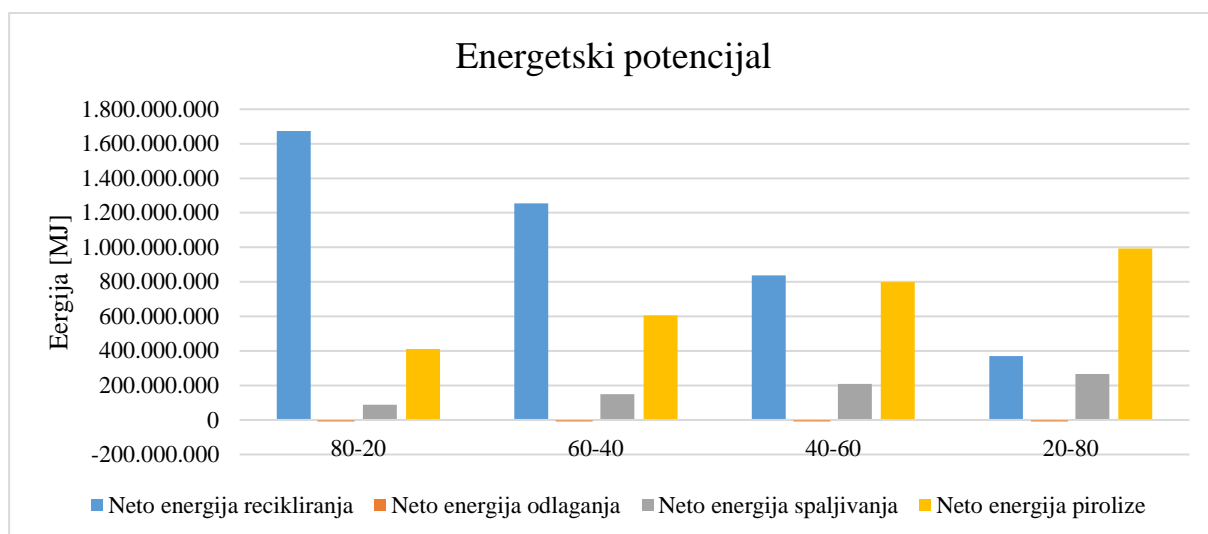
Rezultati ove analize prikazani su u Grafovima 15 i 16 te su opisani u daljnjem tekstu.

U praksi će plastika koja nije reciklirana najčešće završiti na odlagalištu. Emisijski potencijal odlaganja je dobar zbog toga što su emisije male, no gubi na značenju zbog izrazito niskog energetskeg potencijala. Neisplativost odlaganja najdrastičnija je u slučaju „20% mehaničko recikliranje – 80% odlaganje“ gdje se uspoređujući ga sa slučajem „80% mehaničko recikliranje – 20% odlaganje“ jasno vidi odbačena energija. Ovaj je scenarij bitan kako bi se pokazali što stvarniji gubitci koji nastaju kao posljedica odlaganja otpadne plastike.

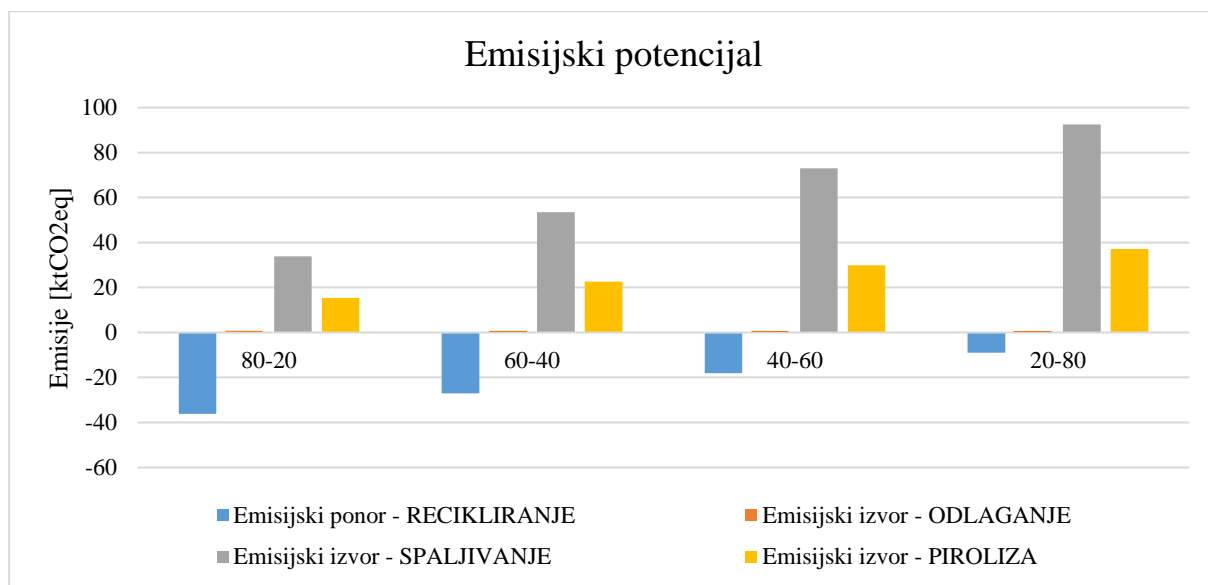
Povećanjem udjela spaljivane otpadne plastike dobivena energija nikako ne može dostići neto energiju recikliranja, čak ni u najnepovoljnijem slučaju kada se spaljuje 80% otpada. Emisije su povećanjem udjela spaljivanja sve veće, a emisijski ponori pri recikliranju postaju nedovoljni da bi pokrili emisije spaljivanja. Spaljivanje se zbog svojih niskih energetskeg prinosa i visokih emisija stakleničkih plinova pokazao kao vrlo nepovoljan postupak obrade kako otpadne plastike, tako i ostalog otpada.

Piroliza, kao postupak kemijskog recikliranja, najbolja je zamjena mehaničkom recikliranju. No, njezin energetskeg i emisijskeg potencijal znatno su manji od onih mehaničkog recikliranja. Piroliza je jedini postupak koji u slučaju kada obrađuje 80% mase otpadne plastike, proizvodi više energije od one koja se uštedi recikliranjem svega 20% otpadne plastike. Emisije stakleničkih plinova u slučaju „20% mehaničko recikliranje - 80% piroliza“ manje su za više od pedeset posto onih emitiranih u slučaju „20% mehaničko recikliranje – 80% spaljivanje“. Visoki se udio recikliranja može postići isključivo kvalitetnim odvajanjem otpada u kućanstvima i kasnijim sortiranjem na što čistije frakcije.

Na Grafovima 15 i 16 prikazane su vrijednosti energetskeg i emisijskeg potencijala za opisane scenarije.



Graf 15. Energetski potencijal obrade plastičnog otpada



Graf 16. Emisijski potencijal obrade plastičnog otpada

Vrijedilo bi još jednom napomenuti kako se vrijednosti mehaničkog recikliranja u Grafovima 15 i 16 odnose na mehaničko recikliranje pri sortiranju srednje učinkovitosti. Iako je taj način sortiranja u Europi i svijetu zastupljeniji, to ne znači da bi u slučaju Grada Zagreba trebalo provesti istu praksu. Naime, realističan je sustav onaj kojeg društvo postavi i prihvati. Vodeći se time na temelju primjera iz Europe trebalo bi izbjeći propuste i napraviti učinkovitiji sustav. Učinkovitiji sustav sortiranja započinje kvalitetnijim sustavom odvajanja plastičnog otpada u kućanstvu. Odvojeni plastični otpad trebao bi biti čist od organskih tvari. To podrazumijeva da se prije bacanja plastika opere i osuši, npr. iskorištena posuda za vrhnje ispere se vodom te se ostavi sušiti na zraku. Takvim čišćenjem plastike izbjegava se da onečišćeni materijal zagadi

ostatak otpada s kojim dođe u kontakt te se uvelike smanjuje potreba za pranjem i sušenjem u sortirnici. Proizvode koji sadrže plastiku trebalo bi dizajnirati tako da su reciklabilni te u slučaju da su izrađeni od više različitih materijala (najčešće polimer i papir/karton/aluminij) da ih je moguće kvalitetno razdvojiti na reciklabilne materijale. U čistom odvojenom otpadu ne bi se smjeli naći ostatci papira i kartona. Također, veliki je energetska trošak odvajanje metala iz otpadne plastike. Upravo zato, odvajanjem plastičnog od metalnog otpada još u kućanstvu postizive su zamjetne energetske i emisijske uštede. Također bi u napredni sustav odvajanja kućnog otpada bilo korisno uvrstiti odvojeno sakupljanje plastičnih folija i krutih plastika. To uvelike skraćuje i pojednostavljuje ne samo postupak sortiranja, već i recikliranja.

Jedan dobar primjer gospodarenja otpadom nalazi se u Tablici 22. Cilj je kružnog gospodarenja otpadom maksimalno iskorištenje već postojeće sirovine u vidu proizvodnje reciklata ili kada to nije moguće, energenata i energije. Pri izradi plana gospodarenja otpadom na umu treba imati koje su sirovine najpogodnije za recikliranje i koje nije preporučljivo obraditi određenim postupcima. Tako je iz primjera u Tablici 22 PVC isključen za slučaj postupka pirolize. Najvišu važnost trebati dati mehaničkom recikliranju. Kako bi se njime postigle što veće energetske i emisijske uštede bitan je visokoučinkoviti sustav sortiranja čije će vrijednosti biti uzete u prikazivanju energetskog i emisijskog potencijala dobrog gospodarenja otpadom.

Tablica 22. Udjeli postupaka obrade

Vrsta otpada	MEHANIČKO RECILKIRANJE	PIROLIZA	SPALJIVANJE	ODLAGANJE
HDPE	80%	15%	4%	1%
LDPE				
PET				
PP				
PS				
PVC	0%	16%		
Ostali polimeri	0%	90%	9%	1%
Folija				
Nečistoće				

U Tablici 23 prikazane su vrijednosti neto energija za svaki proces u kojem je obrađen udio plastične mase prema podacima iz Tablice 22. Energetski dobitak prikazan u obliku ukupne

neto energije, ovim sustavom gospodarenja otpadom, veći je i od slučaja kada bi se sto posto reciklabilne mase recikliralo pri sortiranju srednjeg učinka. Iz toga se jasno da zaključiti da visoka učinkovitost sustava sortiranja ključna za postizanje što većih energetske dobitaka.

Tablica 23. Ukupna energija dobivena dobrim gospodarenjem otpadom

Neto energija recikliranja [MJ]	Neto energija pirolize [MJ]	Neto energija spaljivanja [MJ]	Neto energija odlaganja [MJ]	Ukupna neto energija sustava [MJ]
2.028.871.076	336.751.823	13.909.803	-4.695	2.379.528.007

Analogno analizi energetske dobitaka, može se provesti i analiza ukupnog emisijskog ponora. U sustavu gospodarenja otpadom, energetski ponor moguće je postići jedino uslijed recikliranja, odnosno zamjenom izvornog materijala reciklatom. Iako goriva dobivena pirolizom zamjenjuju ona fosilnog podrijetla, njihove su emisijske vrijednosti slične te je ponor teško postiziv. Smanjenje emisija stakleničkih plinova leži u recikliranju. U gospodarenju plastičnim otpadom nemoguće je smanjiti emisije stakleničkih plinova bez davanja prioriteta postupku recikliranja. Budući da plinovi nastaju kao produkt izgaranja goriva, tako i izbjegavanje njihovog korištenja rezultira manjim emisijama. To je dobro vidljivo u emisijskom ponoru koji je nastao pri recikliranju uslijed sortiranja visoke učinkovitosti. Sortiranjem visoke učinkovitosti izbjegavaju se mnogi energetski, a samim time i emisijama opterećeni procesi koji pri zamjeni izvornog materijala reciklatom imaju značajnu vrijednost, što je vidljivo u Tablici 24.

Tablica 24. Ukupne emisije izbjegnute gospodarenjem otpadom

Neto emisija recikliranja [ktCO ₂ eq]	Neto emisija pirolize [ktCO ₂ eq]	Neto emisija spaljivanja [ktCO ₂ eq]	Neto emisija odlaganja [ktCO ₂ eq]	Ukupni emisijski ponor [ktCO ₂ eq]
-139,329	9,257	5,200	0,006	-124,865

6. ZAKLJUČAK

Kružno gospodarstvo zahtijeva način gospodarenja otpadom u kojem se što duže zadržava vrijednost proizvoda, materijala i resursa, a stvaranje se otpada svodi na najmanju moguću mjeru. U svrhu doprinosa kružnom gospodarstvu Europske Unije, Republika Hrvatska mora najmanje 55% mase komunalnog otpada obraditi recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu do 2025. godine. Budući da se u komunalnom otpadu nalazi preko 20% plastike, njezino je recikliranje nužno za postizanje navedenih ciljeva.

Plastika je vrijedna sirovina koja posjeduje značajnu energetska vrijednost. Njena proizvodnja, međutim, zahtijeva značajne količine energije, što čini važnim sagledavanje ekonomske i ekološke strane ovog materijala. Kroz procese crpljenja sirovina, proizvodnje i transporta, plastika postaje energetski intenzivan materijal. Proizvodnja plastike, obično iz naftnih derivata, zahtijeva velike količine energije, uključujući i procese petrokemijske prerade. Osim toga, transportiranje gotovih proizvoda također doprinosi ukupnom energetskom trošku povezanom s plastikom. Ovi faktori ukazuju na to da plastika ima značajan ekološki otisak i doprinosi emisijama stakleničkih plinova.

Ponovna upotreba plastike je najprioritetniji postupak u obrade otpada. Taj postupak zahtjeva integrirani pristup koji uključuje odgovorno postupanje s potrošnim materijalom, poticanje inovacija u dizajnu proizvoda koji omogućavaju lakšu ponovnu upotrebu, te obrazovanje šire javnosti o važnosti očuvanja resursa.

Recikliranjem, umjesto da se proizvodi potpuno novi materijal, proizvodi se reciklat čime se smanjuje potreba za energijom potrebnom za proizvodnju izvorne plastike iz sirovina, čime se izbjegavaju i emisije stakleničkih plinova koje bi nastale tim procesom. Za kvalitetno kako recikliranje tako i općenito gospodarenje otpadnom plastikom potrebno je postaviti visoko učinkoviti sustava prikupljanja i sortiranja plastičnog otpada. Visoko učinkoviti sustav podrazumijeva prikupljanje što čišće sirovine kojoj je potrebna što manja dodatna obrada. Mehanički recikliranjem pri sortiranju srednje učinkovitosti ostvaruje se uštedena neto energija u iznosu od 2.092,24 TJ i emisijski ponor od -45,13 ktCO₂eq, dok se mehaničkim recikliranjem pri sortiranju visoke učinkovitosti postiže energetska ušteda, odnosno neto energija u iznosu 2.536,09 TJ i emisijski ponor od -175,3 ktCO₂eq. Usporedbom ovih brojeva jasno se uviđa vrijednost što učinkovitijeg sustava prikupljanja i sortiranja.

Pirolizom se kao postupkom kemijskog recikliranja otpadne plastike postiže 1.084,24 TJ neto energije i 29,81 ktCO₂eq koje predstavljaju emisijski izvor. Dobiveni rezultati znatno su lošiji

od onih postignutih mehaničkim recikliranjem. Slijedna analiza rezultata neto energije i emisijskih izvora uslijed postupaka spaljivanja i odlaganja pokazuje kako su inferiorni te ih je nužno izbjegavati.

Stoga je mehaničko recikliranje plastike pri sortiranju visoke učinkovitosti ključni način za smanjenje potrošnje energije, smanjenje emisija stakleničkih plinova i očuvanje važnih sirovina. Edukacija o važnosti recikliranja plastike te podrška i sudjelovanje u sustavima recikliranja omogućavaju bolje iskorištavanje materijalne i energetske vrijednosti plastike, istovremeno čuvajući okoliš i vrijedne resurse za buduće generacije.

LITERATURA

- [1] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Strategija niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, NN 63/2021, Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2021_06_63_1205.html
- [2] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Odluka o donošenju Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2023. – 2028. godine, Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_07_84_1334.html
- [3] Europska komisija, Waste Framework Directive, Dostupno na: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en (pristupljeno 15. prosinac 2023.)
- [4] Boromisa A. M., Tko će i kako provoditi europski zeleni plan?, Friedrich-Ebert-Stiftung, listopad 2020., Dostupno na: https://irmo.hr/wp-content/uploads/2020/11/Analiza_EUROPSKI-ZELENI-PLAN.pdf
- [5] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Izvješće o komunalnom otpadu u 2022., Zagreb, srpanj 2023.
- [6] Holding centar, Plastična i metalna ambalaža, Dostupno na: <https://www.cistoca.hr/usluge/odvojeno-skupljanje-otpada/plasticna-i-metalna-ambalaza/1497> (pristupljeno 2. siječnja 2024.)
- [7] Plastični proizvodi za jednokratnu uporabu – borba protiv utjecaja na okoliš, Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/summary/single-use-plastics-fighting-the-impact-on-the-environment.html> (pristupljeno 11. studenog 2023.)
- [8] Europska komisija, Waste management options and climate change, siječanj 2001.
- [9] Internetska stranica: 8 Billion Trees.com, 2023 Plastic Carbon Footprint: Official Emissions Numbers, Dostupno na: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/plastic-carbon-footprint/> (pristupljeno 29. prosinca 2023.)
- [10] Anuar Sharuddin S. D., Abnisa F. [...] Aroua M. K., A review on pyrolysis of plastic wastes, Energy Conversion and Management, Volume 115, 1 May 2016, Pages 308-326, ISSN 0196-8904 Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- [11] Gandhi N., Farfaras N., Wang N-H. L., Chen W-T., Life Cycle Assessment of Recycling High-Density Polyethylene Plastic Waste, Journal of Renewable Materials, 2021., Dostupno na: <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.015529>

- [12] Ragaert K., Delva L., Van Geem K., Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, *Waste Management*, Volume 69, November 2017, Pages 24-58 2017., Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [13] WRAP, Household plastic film packaging review, 7. prosinca 2016., Dostupno na: <https://wrap.org.uk/resources/guide/collection-and-sorting-household-plastic-film-packaging>
- [14] Jon S. Wilson , *Sensor Technology Handbook*, Newnes, 2005., Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7729-5.X5040-X>
- [15] Lamtai A., Elkoun S., Robert M., Mighri F., Diez C., Mechanical Recycling of Thermoplastics: A Review of Key Issues, *Waste*, 2023., 1(4), 860-883, Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/waste1040050>
- [16] G. A. Gasparian, H. Lucht, Indium gallium arsenide NIR photodiode array spectroscopy - Part II: Plastic waste sorting applications of a multiplexed NIR spectrometer, *Spectroscopy*, travanj 2000., 15(4):14-17, Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/292709672_Indium_gallium_arsenide_NIR_photodiode_array_spectroscopy_-_Part_II_Plastic_waste_sorting_applications_of_a_multiplexed_NIR_spectrometer
- [17] Elaborat zaštite okoliša, Zagreb, listopad 2019., Dostupno na: https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Opuo/22_10_2019_Elaborat_Sortiranje_otpada_Bjelovar.pdf
- [18] TWI Global, What is mechanical recycling?, Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-mechanical-recycling> (pristupljeno 5. siječnja 2024.)
- [19] Delva L., Van Kets K., Kuzmanović M., Demets R., Hubo S., Mys N, De Meester S., Mechanical recycling of polymers for dummies, Sveučilište u Gentu, Belgija, Dostupno na: <https://www.ugent.be/ea/match/cpmt/en/research/topics/circular-plastics/mechanicalrecyclingfordummiesv2.pdf>
- [20] Dobrović S., Kolegij ekološka zaštita - nastavni materijali, 2022.
- [21] Schneider D. R., Kolegija energetska uporaba otpada i otpadnih materijala - nastavni materijali, 2022.
- [22] Plastics Europe, Chemical recycling and the role of mass balance, Dostupno na: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/chemical-recycling-mass-balance-explained/> (pristupljeno 10. prosinca 2023.)

- [23] Hrnjak-Murčić Z., *Gospodarenje polimernim otpadom*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2016. Dostupno na: <https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/Skripta-Gospodarenje-polimernim-otpadom-Murgic.pdf>
- [24] Ragaert K., Delva L., Van Geem K., Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, *Waste Management*, Volume 69, November 2017, Pages 24-58 2017., Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [25] Biakhmetov B., Dostiyarov A., Ok Y. S., You S. , A review on catalytic pyrolysis of municipal plastic waste, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2023., 12(6), e495., Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/wene.495>
- [26] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720380141?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=83f4fb0f2887248e
- [27] Solis M., Silveira S., Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment, *Waste Management*, 2020., 105, 128-138, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>
- [28] United States Environmental Protection Agency, Solid waste management and greenhouse gases: A life-cycle assessment of emissions and sinks, *Resour. Recycl.*, 2006.
- [29] Larsen A. W., Vrgoč M., Christensen T. H., Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2009., Dostupno na: <https://doi.org/10.1177/0734242X08097636>
- [30] Astrup T., Fruergaard T., Christensen T. H., Recycling of plastic: accounting of greenhouse gases and global warming contributions, Volume 27, Issue 8, 2009., Dostupno na: <https://doi.org/10.1177/0734242X09345868>
- [31] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, Metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada, Zagreb, listopad 2015, Dostupno na: https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/specificni-dokumenti/publikacije/knjige/Metodologija_za_odredivanje_sastava_i_kolicina_komunalnog_otpada.pdf
- [32] The Association of Plastic Recyclers, Virgin vs. Recycled Plastic Life Cycle Assessment Energy Profile and Life Cycle Assessment Environmental Burdens, ožujak 2020., Dostupno na: <https://plasticsrecycling.org/images/library/APR-Recycled-vs-Virgin-May2020.pdf>

- [33] Plastics Europe, Eco-profiles of the European Plastics Industry, 2005., Dostupno na: https://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/ldpe_311147f4-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf
- [34] Marczak H., Energy Inputs on the Production of Plastic Products, Journal of Ecological Engineering, vol. 23, 2022., no. 9, pp. 146-156., Dostupno na: <https://doi.org/10.12911/22998993/151815>
- [35] Ulises R., Gracida-Alvarez, Xu H., Benavides P.T., Wang M., Hawkins T.R., Circular Economy Sustainability Analysis Framework for Plastics: Application for Poly(ethylene Terephthalate) (PET), ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023., 11 (2), 514-524, Dostupno na: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.2c04626>
- [36] VYCOM, Internetska stranca dostupna na: <https://www.vycomplastics.com/3-benefits-of-recycled-pvc-equal-endless-opportunities/>
- [37] European environment agency, Greenhouse gas emissions and natural capital implications of plastics (including biobased plastics), 2021.
- [38] Alsabri A., Tahir F., Al-Ghamdi S. G., Life-Cycle Assessment of Polypropylene Production in the Gulf Cooperation Council (GCC) Region, 2021., Polymers, 13(21), Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/polym13213793>
- [39] Turner D. A., Williams I. D., Kemp, S., Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. Resources, Conservation and Recycling, 2015., 105, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.026>
- [40] Jeswani H., Krüger C., Russ M., Horlacher M., Antony F., Hann S., Azapagic A., Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery, Science of The Total Environment, 2021., 769, 144483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720380141#f0005>
- [41] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Energija u Hrvatskoj 2022., 2023.