

Određivanje toplinske vrijednosti goriva iz otpada

Gorišek, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:302927>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Petra Gorišek

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Kandidatkinja **Petra Gorišek**

Predala je izrađen diplomski rad dana: 18. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

Prof. dr. sc. Igor Sutlović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

Doc. dr. sc. Anita Šalić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo diplomski rad i odobrilo obranu diplomskog
rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Diplomski ispit održat će se dana: 23. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Petra Gorišek

Određivanje toplinske vrijednosti goriva iz otpada

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Igor Sutlović

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Igor Sutlović

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

Zagreb, rujan 2024.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Igor Sutlović, na stručnom vodstvu i savjetovanju prilikom izrade ovoga rada.

Također, zahvaljujem mojoj obitelji i partneru na podršci i strpljenju koje su mi pružali tijekom cijelog studiranja.

Jedno veliko hvala prijateljima i kolegama na nesebičnim savjetima i motivaciji prilikom studiranja.

SAŽETAK

S porastom svjetske populacije dolazi do porasta količine nastalog otpada. Stoga se javlja globalni problem zbrinjavanja otpada. Uz zakone o izdvajanju materijala za recikliranje iz otpada, mnogobrojna reciklažna dvorišta i razne usluge prikupljanja otpada i dalje postoji problem sa odlaganjem i zbrinjavanjem miješanog komunalnog otpada. Jedno od mogućih rješenja je proizvodnja goriva iz otpada, GIO. Prema podacima iz 2018. godine, u svijetu postoji oko 1180 postrojenja za energetske oporabu otpada.

Gorivo iz otpada obuhvaća sav otpad koji se koristi u energetske svrhe, no bez standardizacije i klasifikacije takvo gorivo ne predstavlja pouzdan izvor energije. Stoga je razvijen sustav standarda koji precizno definiraju goriva iz otpada. Tako definirana goriva nazivaju se SRF (engl. Solid Recovered Fuel). Standardizacija zahtjeva poznavanje donje toplinske vrijednosti goriva (H_d), te udio opasnih elemenata poput klora i žive. Na temelju tih vrijednosti izrađene su klase goriva. Uspostavom ovakve standardizacije omogućen je razvoj novih tehnologija energetske oporabe otpada, što dovodi do smanjenja volumena otpada na odlagalištima i smanjenju utjecaja na okoliš.

Ključne riječi : GIO, donja toplinska vrijednost (H_d), gornja toplinska vrijednost (H_g), otpad, standardizacija otpada

SUMMARY

As the global population increases, the amount of generated waste also rises, leading to a significant global waste management problem. Despite regulations on the separation of recyclable materials, numerous recycling facilities, and various waste collection services, the issue of disposing of mixed municipal waste persists. One potential solution is the production of Refuse Derived Fuel (RDF). According to 2018 data, there are approximately 1,180 waste-to-energy facilities worldwide.

Refuse Derived Fuel encompasses all waste used for energy purposes; however, without proper standardization and classification, such fuel does not provide a reliable energy source. Consequently, a system of standards has been developed to precisely define waste-derived fuels. These standardized fuels are known as Solid Recovered Fuel (SRF). The standardization process requires knowledge of the lower heating value (LHV) of the fuel, as well as the concentration of hazardous elements such as chlorine and mercury. Based on these parameters, fuel classes have been established. The implementation of such standardization has enabled the development of new waste-to-energy technologies, leading to a reduction in the volume of waste disposed of in landfills and a decrease in environmental impact.

Keywords: RDF, lower heating value (LHV), higher heating value (HHV), waste, waste standardization

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1.UVOD | 1 |
| 2.TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1. Podjela otpada | 2 |
| 2.2. Europska regulativa | 4 |
| 2.3 Gospodarenje otpadom | 4 |
| 2.4. Mehaničko-biološka obrada otpada | 7 |
| 2.5.Termička obrada otpada | 8 |
| 2.6. Gorivo iz otpada | 11 |
| 3. RAČUNSKI DIO I REZULTATI | 15 |
| 4. RASPRAVA | 26 |
| 5. ZAKLJUČAK | 29 |
| 6. POPIS SIMBOLA | 30 |
| 7. LITERATURA | 31 |
| 8. ŽIVOTOPIS | 33 |

1.UVOD

Otpad je jedan od velikih izazova današnjice. Stvaranje novog otpada je neizbježno iz dana u dan, stoga je potrebno pronaći adekvatan način kako najbolje iskoristiti nastali otpad u skladu sa ekološkim i energetske normama. Ubrzano gospodarstvo i ekonomija uz porast svjetskog stanovništva dovodi do problema prikupljanja, odlaganja i zbrinjavanja nastalog otpada.

Najveći volumen otpada dolazi iz industrije, potom iz ugostiteljstva pa iz kućanstva. Kao pojedinci možemo utjecati ponajviše na otpad iz kućanstava, odnosno miješani komunalni otpad. U zadnjih 10-ak godina sve više zemalja EU uvodi obavezno odvajanje otpada u kućanstvu; izdvaja se papir, plastika i metal, biootpad, te povratna ambalaža poput staklenih i plastičnih boca te limenka. Miješani komunalni otpad nastao u kućanstvu odvodi se u centre za gospodarenje otpadom.

Postupak obrade komunalnog otpada u centrima za gospodarenje otpadom (CGO) orijentiran je uglavnom na mehaničku, a ne na biološku obradu, te će u konačnici rezultat takve vrste obrade otpada biti gorivo iz otpada (GIO). Stoga se postavlja pitanje gdje će GIO u konačnici završiti. Puno centara za gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj proizvodi puno više GIO od stvarnih potreba svih cementara. Kako se radi o materijalima koji imaju određenu kalorijsku vrijednost i iskoristivi su za energetske uporabu, u budućnosti nam preostaju samo dvije opcije, a to su izvoz GIO ili izgradnja adekvatnih postrojenja za energetske uporabu otpada.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Podjela otpada

Otpad je svaka tvar ili predmet koju posjednik odbacuje, namjerava ili mora odbaciti [1] Ovisno o mjestu nastanka i svojstvima otpad se klasificira u nekoliko skupina. Prema mjestu nastanka otpad dijelimo na:

- 1) Komunalni otpad- onaj koji je nastao u kućanstvima, te otpad iz proizvodne i /ili uslužne djelatnosti koji je po svojim svojstvima i sastavu sličan otpadu iz kućanstva
- 2) Proizvodni otpad- otpad koji nastaje u proizvodnim procesima u industriji, obrtu i drugim procesima, a po sastavu i svojstvima se razlikuje od komunalnog otpada

Prema agregatnom stanju, otpad dijelimo na :

- 1) Čvrsti otpad
- 2) Tekući otpad
- 3) Plinoviti otpad

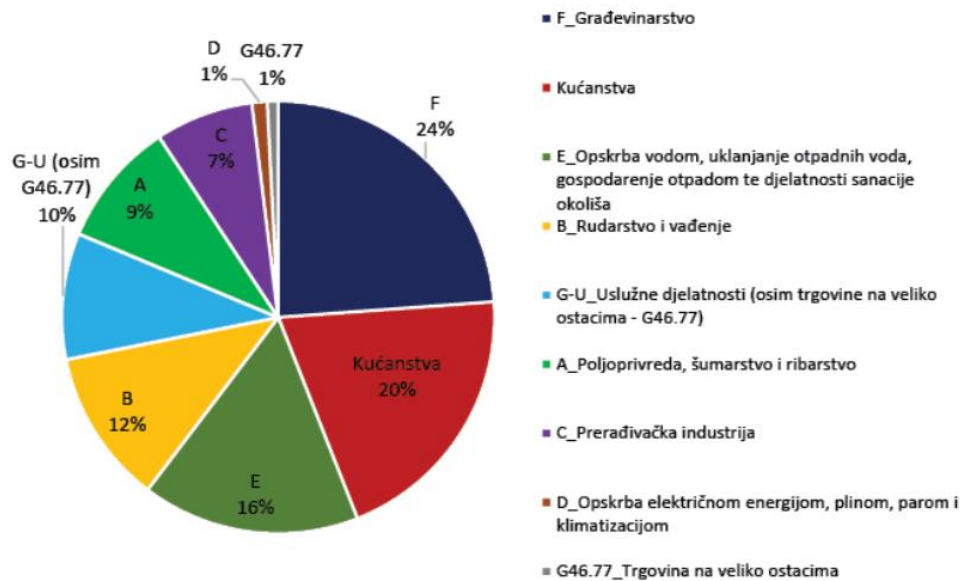
Prema svojstvima otpad dijelimo u tri kategorije:

- 1) Opasni otpad- onaj otpad koji sadrži barem jedno od svojstava koja su utvrđena *Listom opasnog otpada iz Uredbe o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpad* [2]
- 2) Neopasni otpad- otpad koji nema ni jedno svojstvo koje bi ga činilo opasnim
- 3) Inertni otpad- otpad koji ne podliježe značajnijim fizikalnim, kemijskim ili biološkim promjenama [3]

Mnogi čimbenici utječu na količini, sastav i svojstva stvorenog otpada. Primjerice industrijski razvijene države stvaraju veću količinu proizvodnog otpada, ali samim time im se nameće problem skladištenja i zbrinjavanja takve vrste otpada. Također, više milijunske države generiraju velike količine komunalnog otpada, no većina zemalja ima razvijen sustav gospodarenja otpada i veliku stopu recikliranja čime se smanjuje otpad iz kućanstava koji se mora odložiti na odlagališta. Ekonomski najrazvijenije zemlje stvaraju otprilike 0,8 – 2,2 kg otpada po stanovniku dnevno te 0,3 – 0,8 tona otpada godišnje, dok zemlje u razvoju stvaraju 0,3 – 1,0 kg otpada po stanovniku dnevno, te 0,1 – 0,36 tona otpada po stanovniku godišnje.

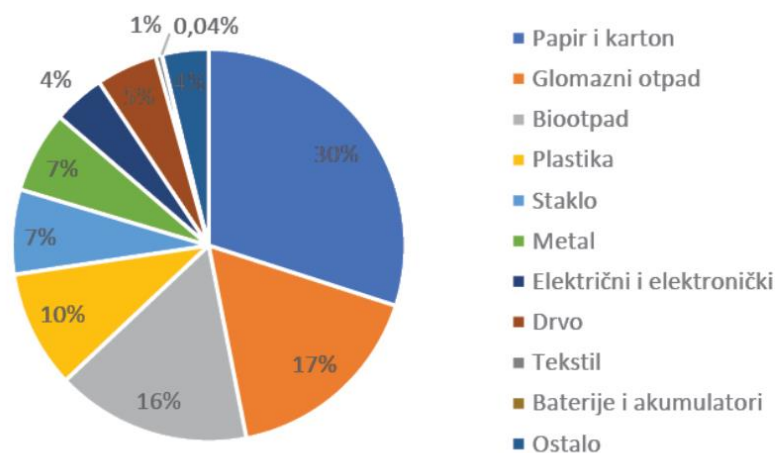
U Republici Hrvatskoj očekuje se blagi rast količina komunalnog otpada do 2030. godine. S trenutnih cca 1.700.000 t/god, u 2030. godini predviđa se proizvodnja oko 2.000.000 tona komunalnog otpada. Također, prema projekcijama 2030. godine od ukupne će količine komunalnog otpada polovica biti odvojena na mjestu nastanka i predana na daljnju reciklažu i uporabu, dok će se ostatak obraditi u centrima za gospodarenje otpadom.

Procjena godišnje količine otpada za Republiku Hrvatsku prikazana je slikom 1.



Slika 1. Godišnja količina nastalog otpada u Republici Hrvatskoj u 2020. godini [4]

Vidljivo sa slike 1. da najveći udio u nastalom otpada dolazi iz sektora građevinarstva, zatim iz kućanstva, potom slijedi opskrba vodom i otpadne vode, rudarstvo, uslužne djelatnosti, poljoprivreda, prerađivačka industrija i trgovina.



Slika 2. Odvojeno sakupljeni komunalni otpad u 2021., po vrstama

Prema podacima zabilježenim u 2021. godini i slici 2. ukupna količina odvojeno sakupljenog komunalnog otpada iznosila je 761 683 tone, od toga najveći dio otpada na papir i karton, 30%, slijedi izdvajanje glomaznog otpada, 17%, biootpada 16%, plastike 10% te ostalog odvojivog otpada. Ukoliko usporedimo podatke iz 2015. godine [5] kada je udio biorazgradivog otpada u miješanom komunalnom otpadu iznosila visokih 65%, a u 2021. godini iznosi 16%, zaključuje se da je svijest građana o razdvajanju otpada u kućanstvu porasla, da su građani postali svjesni da od biootpada može nastati vrijedan kompost koji se ponovno vraća u prirodu te doprinosi oplemenjivanju poljoprivrednih polja. Veliki problem u miješanom komunalnom otpadu je plastika. Procijenjeni prosječni udio plastike u miješanom komunalnom otpadu je 16%. Ujedno gledano, upravo ova plastika u miješanom komunalnom otpadu predstavlja iznimno bitan energetski potencijal prilikom proizvodnje goriva iz otpada.

Ukupna stopa odvojenog otpada u 2021. iznosila je 43%. [3] Iako postoji prostor za informativno-obrazovne aktivnosti, svijest građana se kroz godine promijenila u pozitivnom smjeru, u smjeru razdvajanja, recikliranja i razvoja.

2.2. Europska regulativa

Prilikom ulaska u Europsku uniju Republika Hrvatska se obvezala na preuzimanje i provođenje europske pravne stečevine. Time je u sektoru gospodarenja otpadom preuzeto niz obveza poput zatvaranja i saniranja postojećih neuređenih odlagališta otpada u odgovarajućim rokovima, smanjenja količina odloženog otpada i udjela odloženog biorazgradivog komunalnog otpada, obrade otpada prije njegova odlaganja, izgradnje infrastrukture za odvojeno sakupljanje i obradu otpada, osiguravanja odvojenog sakupljanja iskoristivog komunalnog otpada i dr. Navedene obveze, odnosno ciljevi propisani su *Zakonom o održivom gospodarenju otpadom* (NN 94/13). [6]

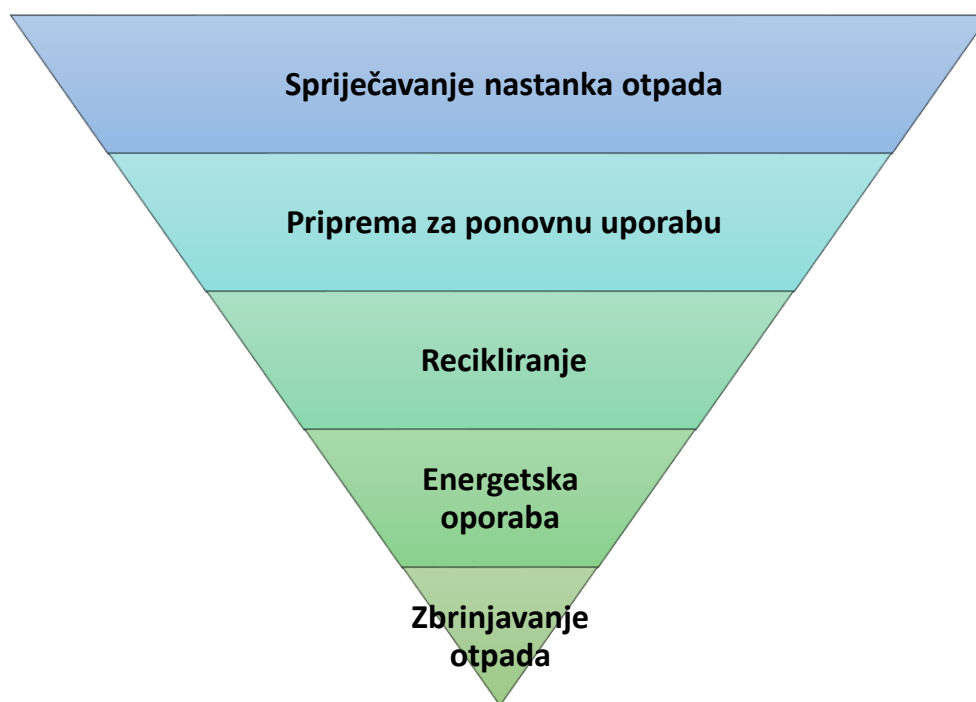
2.3 Gospodarenje otpadom

Gospodarenje otpadom znači skupljanje, prijevoz, uporabu i zbrinjavanje otpada, uključujući nadzor nad tim postupcima i naknadno održavanje lokacija zbrinjavanja, a obuhvaća i radnje koje poduzimaju trgovci ili posrednik. [1]

Prema *Zakon o održivom gospodarenju otpadom* [4] utvrđene su mjere za sprječavanje ili smanjenja štetnog djelovanja otpada na ljudsko zdravlje i okoliš. Odredbe utvrđuju sustav

gospodarenja otpadom uključujući red prvenstva gospodarenja, načela, ciljeve, programske dokumente, nadležnosti i obaveze u gospodarenju otpadom.

Red prvenstva gospodarenja otpadom koristi u sprječavanju nastanka otpada. Prilikom primjene reda prvenstva u razmatranje se mora uzeti rješenja koja potiču najbolji ishod za okoliš i ljudsko zdravlje. Potom, načela zaštite okoliša, odnosno primjena načela predostrožnosti i održivosti, tehničku izvedivost i ekonomsku održivost.



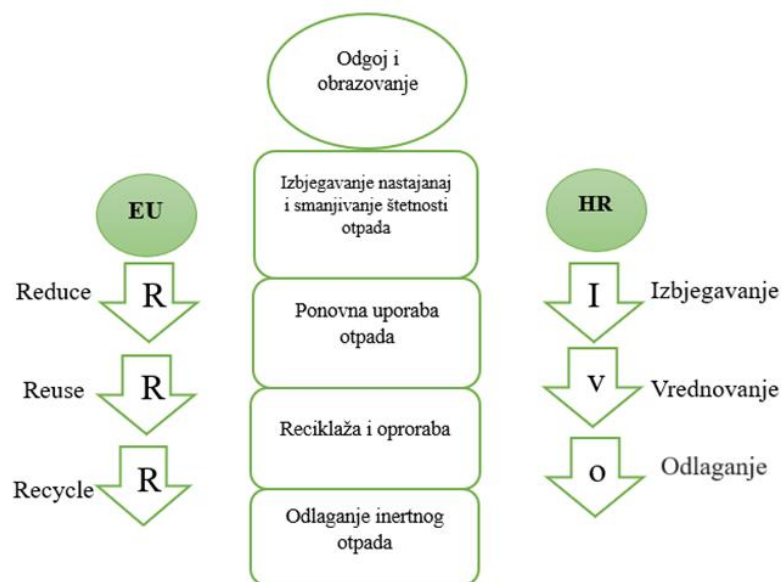
Slika 3. Red prvenstva gospodarenja otpadom

Ukoliko se ne može spriječiti nastanak otpada, po redu prvenstva razmatra se opcija ponovne uporabe otpada. Za primjer, ukoliko je u kućanstvu nastao stakleni otpad u obliku praznih staklenih teglica ili boca, ono ne mora postati otpad već može koristiti kao vaza za cvijeće, posuda za sitne premete poput kovanica. Ako je ista ta staklena ambalaža oštećena, popucala ili dotrajala tada se, prema redu prvenstva, ona odvaja u kontejner za staklo te u daljnjoj obradi reciklira. Neki predmeti koji se ne mogu ponovno uporabiti ili reciklirati, a po svom sastavu su energijski bogati, mogu se energetske uporabiti na predviđenim mjestima. U konačnici otpad koji se ne može ponovno uporabiti, reciklirati ili energetske uporabiti mora se zbrinuti na

odlagalištu otpada u skladu s pravilnikom o zbrinjavanju otpada kako bi bilo što manje opterećenje za okoliš.

U Republici Hrvatskoj u 2021. godini djelatnost gospodarenja otpadom izvršavalo je 462 tvrtke, od čega 79 tvrtki obavljalo je uslugu gospodarenja opasnim otpadom, dok je gospodarenje neopasnim i komunalnim otpadom provodilo 438 tvrtki. Neke tvrtke posjeduju dozvolu za zbrinjavanjem obje vrste otpada [6]

Cilj koncepta gospodarenja otpadom je smanjivanje količine otpada koje će se trajno odložiti i koji će biti inertan kako bi što manje ugrožavao okoliš, klimu i ljudsko zdravlje, a prikazan je slikom 4.



Slika 4. Koncept gospodarenja otpadom [7]

Cijeli koncept gospodarenja otpadom temelji se na načelu 3R- naziv dolazi od engleskih riječi *reduce, reuse, recycle*, a ponegdje se još može pronaći i 4.R koje označava *recovery*. Njihov poredak je iznimno važan iz razloga što je najpoželjnija opcija redukcija odnosno smanjenje i sprječavanje nastanka otpada. Druga po redu je ponovna upotreba, te kao treća opcija je recikliranje. Recikliranje se od ponovne uporabe razlikuje po tome što se recikliranje zasniva na izdvajanju materijala iz otpada i njegovom ponovnom korištenju, točnije nema izravne primjene. Kao četvrta opcija ističe se regeneracija, odnosno postupak toplinske, kemijske ili fizikalne pretvorbe materijala kako bi se ponovno proizveo materijal ili energija.

Prema *Strategiji gospodarenja otpadom Republike Hrvatske* koncept gospodarenja otpadom svodi se na tri osnovne faze pod skraćenicom IVO; Izbjegavanje nastanka otpada, Vrednovanje, Odlaganje. Izbjegavanje nastanka otpada rezultira maksimalnim smanjenjem količine i opasnih svojstava neizbježnog otpada na mjestu nastanka. Vrednovanje je uporaba neizbježnog otpada, odnosno iskorištavanje materijalnih i energetskih svojstava otpada. Te u konačnici odlaganje ostatnog otpada na uređena kontrolirana odlagališta. [7]

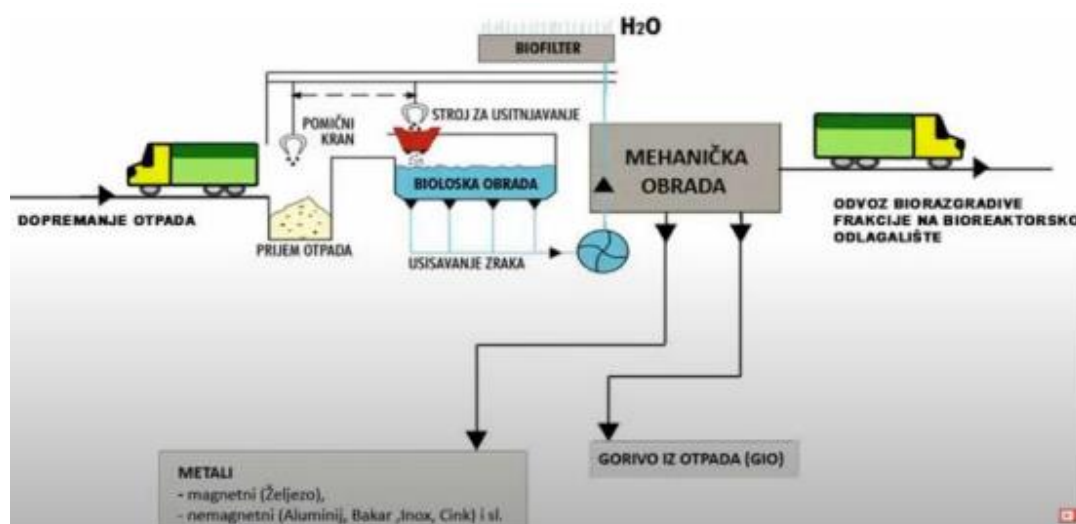
2.4. Mehaničko-biološka obrada otpada

Tehnologija mehaničko-biološke obrade otpada obuhvaća dva ključna procesa – mehaničku i biološku obradu otpada. Mehanička obrada otpada se odnosi na postupke usitnjavanje i peletizacija, drobljenje i mljevenje te prosijavanje, ali i druge metode mehaničke separacije otpadnog materijala primjerice separacija metala uslijed djelovanja elektromagnetskih sila. Biološka obrada otpada sastoji se od postupaka bio-sušenja, bio-stabilizacije te aerobne (kompostiranja) ili anaerobne razgradnje.

Uvođenjem obrade otpada MBO se zadovoljava Direktiva EU-a o otpadu. [8]

Glavni ciljevi MBO obrade otpada su :

- povećanje količine obnovljivih sirovina izdvojenih iz otpada (izdvajanje materijala: staklo, metal, plastika, papir)
- proizvodnja komposta
- proizvodnja goriva iz otpada (GIO)
- proizvodnja bio-stabiliziranog materijala za odlaganje



Slika 5. Mehaničko biološka obrada otpada [9]

Kao produkti mehaničko biološke obrade otpada nastaju kompost, bioplina te gorivo iz otpada, a u proizvodnji bioplina koriste se MBO postrojenja koja za biološku obradu koriste anaerobnu digestiju (AD). Bioplina je mješavina metana, ugljikovog dioksida i ostalih nusproduktnih plinova, a nastaje kao izlazni produkt procesa anaerobne digestije (AD). Bioplina se obrađuje da bi se mogao koristiti u energetske svrhe, kao gorivo u toplanama ili u generatorima za proizvodnju električne energije.

Od svih MBO procesa za proizvodnju goriva iz otpada najčešće se koristi proces bio-sušenja. Gorivo niže kvalitete, obično se dobiva iz krupnijeg otpada, koji se uklanja iz materijala prije ulaska u fazu biološke obrade. Zato ova frakcija osim što ima bitno manju kalorijsku vrijednost, nije potpuno bio-stabilizirana i ako mora biti odložena, predstavlja značajnu razinu udjela za odlaganje. Proizvodnja GIO iz neopasnog otpada je rastuća industrija u Europi i koristiti se kao: gorivo za energane, cementne peći, za druge izvore energije (npr. industrijski kotlovi, peći za spaljivanje otpada), za uređaje za posebne namijene, zajedno s ugljenom u elektranama, u naprednoj toplinskoj tehnologiji (piroliza i rasplinjavanje). [9]

2.5. Termička obrada otpada

Termički postupci obrade otpada su oni postupci koji uporabljaju toplinu pod nužnim i propisanim uvjetima. Provode se s ciljem mijenjanja kemijskih, fizikalnih, odnosno bioloških svojstava, a mogu biti: spaljivanje, piroliza, isparavanje, sterilizacija, destilacija, sinteriranje, žarenje, taljenje, zataljivanje u staklo i slični postupci.

Velika prednost kod termičke obrade otpada je smanjenje volumena otpada koji bi se odložio na odlagalište, te se uništavaju ili izdvajaju potencijalno opasne tvari iz otpada. Primjenom termičke obrade otpada moguće je proizvesti, a potom i iskoristiti energetska vrijednost otpada za proizvodnju toplinske i/ili električne energije. Takva postrojenja u kojima se vrši energetska uporaba otpada nazivaju „energane na otpad“ (ENO). Termičkom obradom otpada u cementarama ili termoelektranama smanjuje se količina odloženog otpada čime se smanjuje emisija stakleničkog plina metana (CH_4) do koje bi došlo njegovim odlaganjem. Također, postrojenja koja spaljuju otpad time koriste manje količine fosilnog goriva za rad, čime dodatno pridonose smanjenju stakleničkih plinova u atmosferi.

Glavni ciljevi termičke obrade otpada:

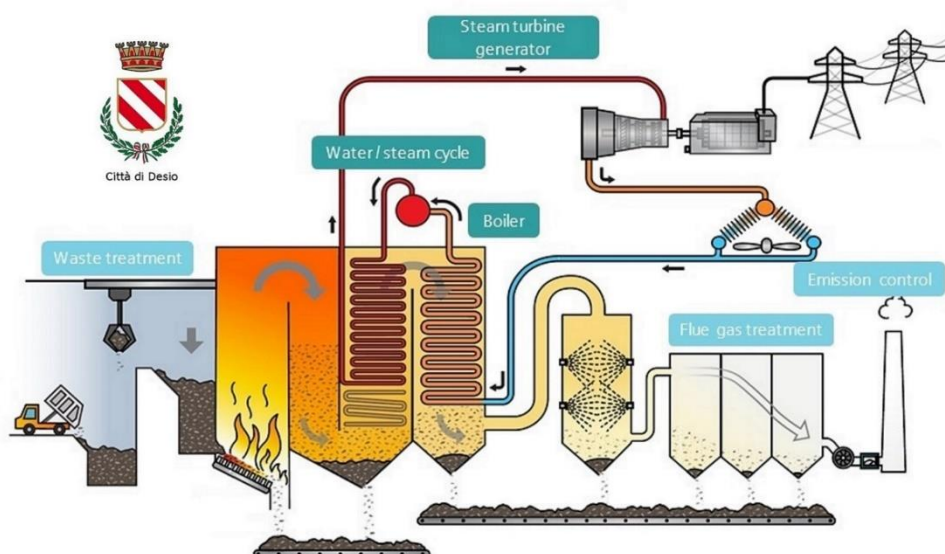
- smanjivanje volumena otpada
- iskorištavanje energije iz otpada
- uništavanje organskih štetnih tvari iz otpada

Svako postrojenje za termičku obradu otpada mora sadržavati:

- prihvata otpada
- izgaranje otpada
- energetska vrednovanje
- obradu dimnih plinova
- nadzor emisije plinova i kapljevina
- obradu i zbrinjavanje ostataka

Najčešće korišteni postupci termičke obrade otpada su spaljivanje, piroliza, rasplinjavanje i plazma.

Prema definicijama iz članka 4. *Zakona o gospodarenju otpadom* : „Spaljivanje otpada postupak je uporabe odnosno zbrinjavanja otpada u kojem se spaljuje otpad sa ili bez uporabe topline proizvedene izgaranjem, što uključuje oksidacijsko spaljivanje otpada i druge termičke procese, poput pirolize, rasplinjavanja ili plazma procesa, sve dok se produkti tih obrada nakon toga spaljuju.“ [10] Ulazni proizvodi u procesu spaljivanja su gorive komponente iz otpada, a produkti sagorijevanja su dimni plinovi i pepeo.



Slika 6. Shematski prikaz spalionice

Procesom rasplinjavanja kao procesa zbrinjavanja otpada kao produkt dobiva se plin, koji je po svom sastavu smjesa CO, CO₂, CH₄ i H₂. Uz nastali sintezni plin nastaje i čvrsti ostatak koje se koristi kao biougljen ili gorivo. Nastali sintezni plinovi mogu se sagorijevanjem koristiti za proizvodnju topline i električne energije. Sam proces rasplinjavanja definira se kao kemijski proces pretvorbe neke čvrste ili tekuće tvari, primjerice biomase, u plin. Postupak je kombinacija postupaka djelomične pirolize i djelomičnog izgaranje u odvojenim stupnjevima termičke prerade.[11]

Fizikalno-kemijski proces razgradnje organske tvari u kojem se dovođenjem topline izvana bez prisustva kisika provodi otplinjavanje naziva se piroliza. Rasplinjavanje i piroliza slični su procesi. Glavne razlike su što se piroliza odvija bez prisustva kisika, dok rasplinjavanje zahtjeva određenu količinu kisika. Piroliza zahtjeva niže temperature, između 300 i 700 °C, a rasplinjavanje zahtjeva visoke temperature od 800 do 1200 °C. Pirolizom se uz plinovite komponente i pepeo dobiva i tekući produkt- bio-ulje, dok se rasplinjavanjem dobiva plinoviti produkt, a kod izgaranja nastaje velika količina pepela. Sintezni plin nastao rasplinjavanjem ima široku primjenu u proizvodnji energije i kemikalija, dok se produkti pirolize koriste za proizvodnju goriva iz otpada i biougljena.[12]

Termičkom obradom otpada nastaju dvije vrste ostatnog otpada; onaj koji nastaje pri samom izgaranju (šljaka) i onaj otpad nastao prilikom pročišćavanja dimnih plinova, točnije procesna otpadna voda. Nastala šljaka najčešće se ponovno koristi u proizvodnji asfalta.

Prilikom izgaranja otpada u komorama nastaju dimni plinovi koji sadržavaju štetne tvari, najčešće plinove NO_x, CO, NH₃, SO₂, HCl, HF, Cd, lebdeće čestice i hlapive organske spojeve. [13] Kako bi se uklonila navedena onečišćenja u ispušni sustav projektiraju se sustavi za pročišćavanje dimnih plinova. Najčešće korišteni i vrlo pouzdani sustavi kao glavnu komponentu za ispiranje koriste vodu. Stoga pročišćavanje možemo podijeliti na suho čišćenje, suho-mokro čišćenje i mokro čišćenje. [11]

2.6. Gorivo iz otpada

Gorivo iz otpada, GIO ili RDF (engl. refuse-derived fuel), jedan od produkata MBO otpada, ima prednost u odnosu na miješani čvrsti komunalni otpad u smislu kvalitete i ujednačenosti, stoga je pogodniji za spaljivanje. GIO dobiven nakon procesa u MBO postrojenjima ima veću kalorijsku vrijednost, veći sadržaj zapaljivih frakcija i manje vlage od miješanog komunalnog otpada (mKO). To su ujedno i pokazatelji da GIO bolje izgara od mKO. [14]

Često se višestupanjske obrade primjenjuju za poboljšanje kvalitete goriva. RDF i SRF (kruto obnovljeno gorivo proizvedeno iz neopasnog otpada u skladu s propisima, engl. solid recovered fuel), su proizvodi sa povećanim kalorijskim vrijednostima, smanjenim udjelom vlage, homogenije, sa smanjenim sadržaj magentnih i nemagnetnih metala.

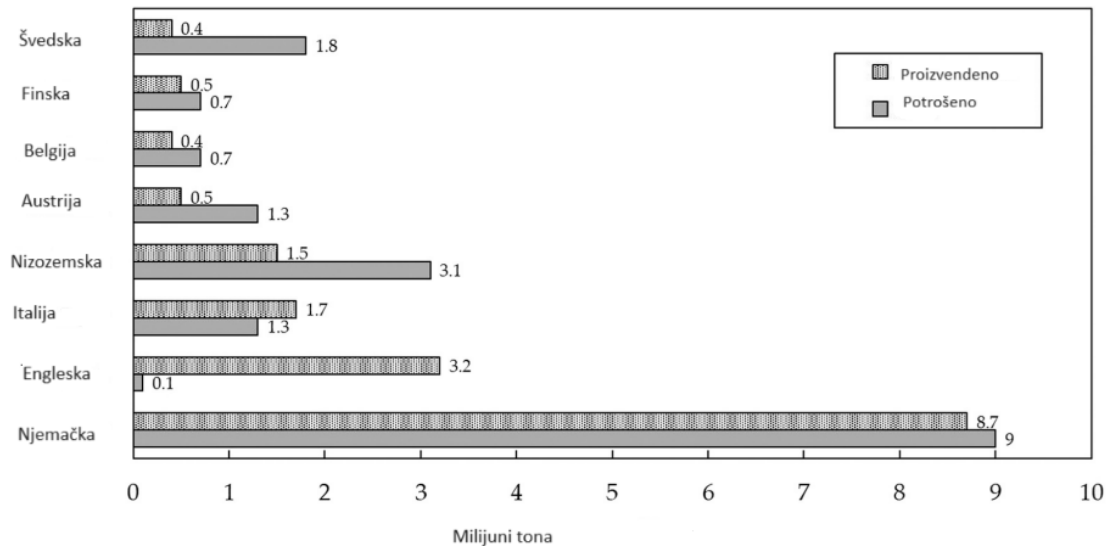
SRF je oblik goriva kojem je kvaliteta poznata, definirana prema standardnoj proceduri te je ono proizvedeno iz RDF-a. Klasifikacija SRF-a prema tri važne karakteristike goriva: donja toplinska vrijednost (H_d), sadržaj klora i sadržaj žive, prikazana je tablicom 1. [15]

Tablica 1. Klasifikacija goriva iz otpada prema HRN EN 15359:2012

| Kategorija klasifikacije | Statistička mjera | Jedinica | Klase | | | | |
|------------------------------------|--------------------|----------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Neto ogrjevna vrijednost (H_d) | Srednja vrijednost | MJ/kg | ≥ 25 | ≥ 20 | ≥ 15 | ≥ 10 | ≥ 3 |
| Klor (Cl) | Srednja vrijednost | % u masi | ≤ 0.2 | ≤ 0.6 | ≤ 1 | ≤ 1.5 | ≤ 3 |
| Živa (Hg) | Srednja vrijednost | mg/MJ | ≤ 0.02 | ≤ 0.03 | ≤ 0.05 | ≤ 0.1 | ≤ 0.15 |

Kako bi se gorivo klasificiralo klasom 1 ono mora sadržavati velik udio plastičnog otpada, više od 90% sastava mora biti neki oblik plastike, dok ostalo čini papir i kartom, organski otpad, tekstil i slično. Prosječni sastav goriva 4. klase čini visok udio organskog otpada, oko 25%, zatim karton i papir, tekstil i ostali inertni otpad, a plastika sačinjava samo 3% otpada. Takav otpad nije bogat energetskim komponentama te se smatra kao gorivo niže kvalitete, dok je gorivo klase 1, gorivo više kvalitete.

Slikom 9. prikazana je usporedba proizvodnje i potrošnje GIO u odabranim Europskim državama. Njemačka, kao vodeća Europska gospodarska sila, ima najveću količinu proizvodnje i korištenja GIO. Engleska proizvodi trideset puta više od količine koju koristi i ima najveću stopu izvoza GIO na druga tržišta u svijetu. Nizozemska i Austrija koriste više goriva iz otpada od vlastitih proizvodnih količina.[16]



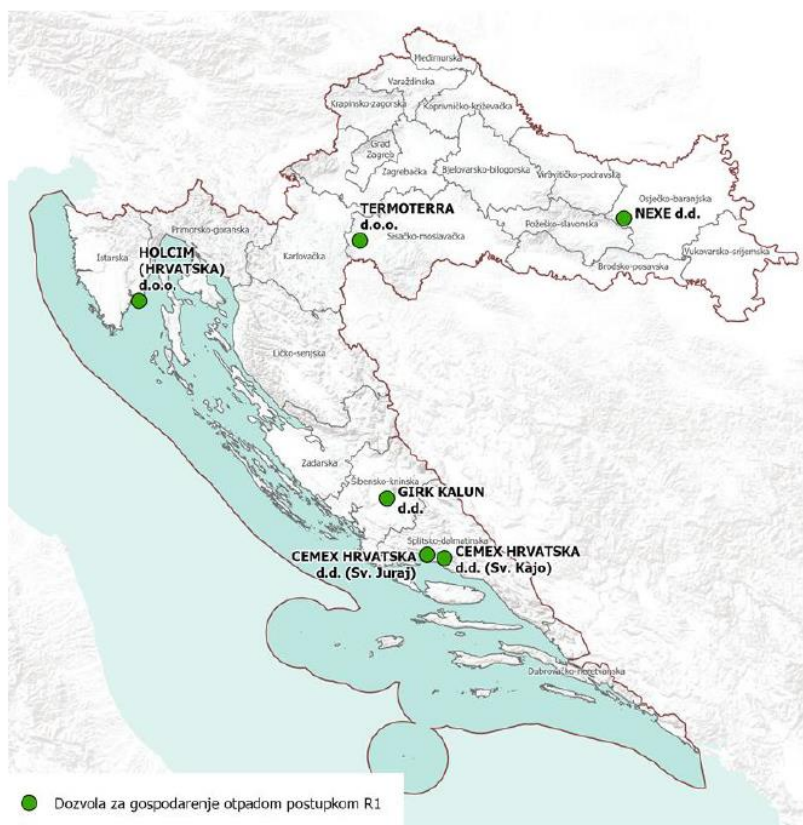
Slika 9. Usporedba količina RDF-a proizvedenih i korištenih u nekim europskim zemljama [16]

Europske zemlje, poput Austrije, Češke, Njemačke i Poljske, prema svojim kapacitetima i mogućnostima mogle bi oko 60% ukupnog iznosa toplinske energije dobivati korištenjem alternativnih goriva poput goriva iz otpada. U usporedbi s vodećim zemljama u Europi, Hrvatska ima nisku stopu proizvodnje i potrošnje GIO.

Najčešći način potrošnje GIO je putem spaljivanja u cementnim pećima kao sekundarno gorivo s ciljem smanjenja korištenja fosilnih goriva. U jednoj od faza proizvodnje cementa potrebno je doseći temperaturu od oko 1500 °C. U plameniku rotacijske peći mogu se koristiti različita goriva, ali ona moraju imati velik udio ugljena kako bi se stalno održavala dovoljno visoka temperatura u zoni grijanja. Korištenje goriva iz otpada u cementnim pećima i predkalcinatorima predstavlja dobro rješenje za proizvođače otpada, koji trebaju naći odgovarajuće krajnje odredište za proizvedenu sirovinu, kao i za proizvođače cementa, koji žele postići dobru ekonomičnost proizvodnje, optimalnu raspodjelu energije u proizvodnji i smanjen utjecaj na okoliš. [17]

Moguća mjesta ubacivanja otpada za suhe peći su:

1. Glavni plamenik na izlaznom kraju rotacijske peći,
2. Ulazni otvor na prijelaznoj komori na ulaznom kraju rotacijske peći (za grublje gorivo),
3. Poseban plamenik u usponskom kanalu između ulaza u peć i predkalcinatora,
4. Ulazni otvor u predkalcinatoru (za grublje gorivo),
5. Poseban plamenik predkalcinatora.



Slika 10. Pregled lokacija postrojenja koja imaju dozvolu za gospodarenje otpadom za postupak R1 u 2020. godini

U Republici Hrvatskoj evidentirano je ukupno 41 energetska oporabitelj koji, sukladno Zakonu o gospodarenju otpadom (ZGO), nisu obvezni ishoditi dozvolu za energetska oporabu. Uz njih, postoji još pet tvrtki koje posjeduju dozvolu za gospodarenje otpadom postupkom R1, koji uključuje korištenje otpada uglavnom kao goriva ili za dobivanje energije na drugi način. U 2020. godini nijedna tvrtka nije imala dozvolu za spaljivanje otpada. Većina energetske oporabe otpada odvija se u postrojenjima izvan teritorija Republike Hrvatske.

Podzakonski propisi definiraju postupke oporabe otpada za koje nije potrebno ishoditi dozvolu za gospodarenje otpadom, uključujući način izvođenja tih postupaka, vrste otpada te količine otpada koje se mogu obrađivati.

Pregled lokacija postrojenja s dozvolama za gospodarenje otpadom postupkom R1 (suspaljivanje) u 2020. godini prikazan je na slici 33. Ukupni kapacitet svih postrojenja s ishodenom dozvolom za gospodarenje otpadom postupkom R1 (suspaljivanje) na području Republike Hrvatske iznosi 395.480 tona godišnje.[18]

Poznavanje kalorijskih, kemijskih, bioloških i mehaničkih svojstava goriva iz otpada koristi se za procjenu svojstava izgaranja goriva iz otpada i određivanje njegove prikladnosti za industrijsku primjenu. Ogrjevna vrijednost i osnovna analiza predstavljaju ključne preduvjete za procjenu termičke obrade goriva i njegove učinkovitosti. Ogrjevna vrijednost označava količinu oslobođene topline pri potpunom izgaranju goriva (pri standardnim uvjetima). Osnovna analiza pruža podatke o udjelu vlage, hlapljivih tvari, fiksnog ugljika i pepela u gorivu. Detaljna analiza određuje sadržaj ključnih elemenata poput ugljika (C), vodika (H), kisika (O), sumpora (S) i dušika (N), uz pepeo i vlagu. Ova analiza omogućuje izračunavanje stehiometrijske potrebe za kisikom tijekom izgaranja goriva, kao i količine proizvedenih dimnih plinova, što je ključno za pravilno dimenzioniranje procesne opreme.

Fizičke karakteristike goriva iz otpada variraju ovisno o podrijetlu otpada, a budući da je GIO mješavina različitih vrsta otpada, nije jednostavno predvidjeti ta svojstva. Kemijski sastav takve vrste goriva, također značajno utječe na učinkovitost zajedničkog spaljivanja. Na primjer, kemijski sastav određuje sastav dimnih plinova i utječe na temperaturne profile, što direktno utječe na zapaljivost goriva. Varijabilnost kemijskog sastava i heterogene karakteristike goriva iz otpada čini izazov za točno određivanje operativnih uvjeta potrebnih za optimalnu uporabu u industrijskim procesima.[19]

3. RAČUNSKI DIO I REZULTATI

U 2022. godini nastalo je 1 844 382 tona komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj, što je povećanje od 4% u odnosu na prethodnu 2021. godinu. Takvo povećanje ponajviše je rezultat razvoja turizma, a zatim i gospodarstva. Ako uzmemo u obzir broj stanovnika u državi prema podacima iz popisa stanovništva 2021.godine, dobiva se količina otpada po stanovniku od 474 kg. Iako je stopa odvojeno skupljenog komunalnog otpada (sve vrste osim miješanog komunalnog otpada) iznosila 46% za 2022. godinu, odnosno 844.387 t otpada se razvrstalo u nekom obliku, stopa odloženog komunalnog otpada za 2022. godinu iznosila je 56%. [20]

U usporedbi sa zemljama zapadne Europe, primjerice Francuskom, koja proizvede 537 kg otpada po stanovniku godišnje te njihova stopa recikliranja iznosi 42,7%, a stopa odloženog otpada za 2020. godinu iznosila je 18,1%, može se zaključiti da se u Hrvatskoj i dalje velika količina otpada odlaže na odlagališta. [21]

Miješani komunalni otpad obrađuje se na županijskim centrima za gospodarenje otpadom, te kao proizvod obrade nastaje stabilizirana biorazgradiva frakcija komunalnog otpada koja se potom zbrinjava na odlagalištima neopasnog otpada, te nastaje gorivo iz otpada koje može biti u obliku SRF, odnosno standardizirano čvrsto gorivo(engl. solid recovered fuel) ili bioplin proizveden obradom biorazgradive frakcije otpada u anaerobnim uvjetima.[22]

Kako bi se odredila fizikalno-kemijska svojstva komunalnog otpada mora se izračunati udio pojedinih komponenti u otpadu, koji će služiti za procjenu ogrjevnosti dobivenog GIO na temelju podatak o masenom udjelu te elementarnom sastavu komponenata otpada [22, 23]

Tablica 2. Fizikalno-kemijska svojstva komponenti otpada [23]

| Sastav | udio,% | | | | | | | |
|-----------------|--------|------|------|------|-----|-------|-------|----------|
| | C | H | O | N | S | VLAGA | PEPEO | NEGORIVO |
| Guma | 82,0 | 10,1 | 0,5 | 0,0 | 1,9 | 1,9 | 36,4 | 9,9 |
| Papir | 45,2 | 5,9 | 44,3 | 0,4 | 0,2 | 10,5 | 7,6 | 1,4 |
| Karton | 45,8 | 6,2 | 44,9 | 0,2 | 0,2 | 10,9 | 6,1 | 5,0 |
| Staklo | 0,5 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 98,0 |
| Tvrda plastika | 78,7 | 11,3 | 5,3 | 0,6 | 0,3 | 8,7 | 2,2 | 2,0 |
| Metal | 4,5 | 0,6 | 4,3 | 0,1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 95,0 |
| Drvo | 47,2 | 6,2 | 44,4 | 0,5 | 0,2 | 13,8 | 1,3 | 0,6 |
| Kuhinjski otpad | 45,5 | 6,6 | 32,3 | 2,8 | 0,3 | 70,2 | 7,3 | 5,0 |
| Tekstil | 47,6 | 6,2 | 31,3 | 2,8 | 0,3 | 12,8 | 5,2 | 6,5 |
| Biootpad | 45,0 | 5,6 | 37,7 | 1,5 | 0,2 | 53,9 | 9,6 | 0,5 |
| Inertni otpad | 26,3 | 3,0 | 2,0 | 0,5 | 0,2 | 8,0 | 68,0 | 0,0 |
| Tetrapak | 59,2 | 9,3 | 30,1 | 0,1 | 0,1 | 3,5 | 1,2 | 0,0 |
| Koža i kosti | 60,0 | 8,0 | 11,6 | 10,0 | 0,4 | 10,0 | 10,0 | 9,0 |
| Meka plastika | 77,4 | 12,9 | 1,8 | 0,1 | 0,1 | 19,1 | 8,8 | 2,0 |

Fizikalno-kemijska svojstva određenih sastavnica komunalnog otpada prikazana tablicom 2 koriste se prilikom računanja gornje i donje toplinske vrijednosti goriva te potom kako bi se gorivo klasificiralo u razrede ovisno o njegovoj jačini.

Procijenjeni sastav miješanog komunalnog otpada izrađen je 2015. godine kroz projekt „Izrada jedinstvene metodologije za analize sastava komunalnog otpada, određivanje prosječnog sastava komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj i projekcija količina komunalnog otpada“. [24] Tablicom 3. prikazan je sastav miješanog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj. Kao što je vidljivo iz podataka, najveći udio miješanog komunalnog otpada čini otpad od hrane (30,9 %), a zatim miješani papir i karton (23,19 %), te plastika (22,87 %). Ostale frakcije poput tekstila, gume, stakla, tvrdog drva i metala su zastupljeni u relativno malim količinama, u rasponu od 0,22 % za gumu do 3,7 % za staklo. Osim toga, udio vrtnog otpada bio je relativno visok (5,7 %) što doprinosi vlažnosti otpada .

Tablica 3. Udio pojedinih komponenti miješanog komunalnog otpada u Hrvatskoj [5]

| Komponente miješanog komunalnog otpada | Udio, % |
|--|---------|
| Kuhinjski otpad | 30,90 |
| Papir i karton | 23,19 |
| Plastika | 22,87 |
| Vrtni otpad | 5,68 |
| Tekstil | 3,71 |
| Staklo | 3,70 |
| Metali | 2,07 |
| Drvo | 0,98 |
| Koža i kosti | 0,45 |
| Guma | 0,22 |
| Ostali otpad | 6,25 |

Energetska vrijednost miješanog komunalnog otpada uvelike ovisi o sastavu i udjelu sastavnica bogatih ugljikom, kao što je plastika, papir i karton. Uzimajući u obzir fizikalno-kemijska svojstva pojedinih komponenti mKO prikazanih tablicom 1, te njihov udio u mKO, računa se iznos gornje i donje toplinske vrijednosti.

Za izračun gornje toplinske vrijednosti miješanog komunalnog otpada mogu se koristiti razne linearne jednadžbe ovisno o kemijskom sastavu komponenti otpada. U računu gornje toplinske vrijednosti miješanog komunalnog otpada korištena je modificirana Dulongova empirijska jednadžba: [25]

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N \quad (1)$$

Primjenom jednadžbe (1) za gornju toplinsku vrijednost računa se vrijednost za svaku komponentu miješanog komunalnog otpada s poznatim fizikalno-kemijskim svojstvima sastavnica otpada prikazano tablicom 2.

Nakon što je poznata vrijednost H_g svake komponente otpada, ukupan iznos gornje toplinske vrijednosti otpada računa se prema zbirnoj jednadžbi :

$$H_{g \text{ ukupno}}(\text{kJkg}^{-1}) = \sum w_i * H_{gi} \quad (2)$$

Primjer računa za sastavnice miješanog komunalnog otpada:

Kuhinjski otpad:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,455 + 1419 * \left(0,066 - \frac{1}{8} * 0,323 \right) + 93 * 0,003 + 23 * 0,005$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 190,62$$

Papir i karton:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,452 + 1419 * \left(0,059 - \frac{1}{8} * 0,443 \right) + 93 * 0,002 + 23 * 0,004$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 157,75$$

Plastika:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,774 + 1419 * \left(0,129 - \frac{1}{8} * 0,018 \right) + 93 * 0,001 + 23 * 0,001$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 440,81$$

Vrtni otpad:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,450 + 1419 * \left(0,056 - \frac{1}{8} * 0,377 \right) + 93 * 0,002 + 23 * 0,015$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 164,78$$

Tekstil:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O\right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,476 + 1419 * \left(0,062 - \frac{1}{8} * 0,323\right) + 93 * 0,003 + 23 * 0,028$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 193,80$$

Staklo:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O\right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,005 + 1419 * \left(0,001 - \frac{1}{8} * 0,004\right) + 93 * 0,000 + 23 * 0,001$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 2,42$$

Metali:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O\right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,045 + 1419 * \left(0,006 - \frac{1}{8} * 0,043\right) + 93 * 0,000 + 23 * 0,001$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 16,08$$

Drvo:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O\right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,472 + 1419 * \left(0,062 - \frac{1}{8} * 0,444\right) + 93 * 0,002 + 23 * 0,005$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 168,59$$

Koža i kosti:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O\right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,600 + 1419 * \left(0,080 - \frac{1}{8} * 0,116\right) + 93 * 0,004 + 23 * 0,100$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 297,82$$

Guma:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,820 + 1419 * \left(0,101 - \frac{1}{8} * 0,005 \right) + 93 * 0,019 + 23 * 0,000$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 420,54$$

Ostali otpad:

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{1}{8} * O \right) + 93 * S + 23 * N$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 337 * 0,263 + 1419 * \left(0,030 - \frac{1}{8} * 0,020 \right) + 93 * 0,002 + 23 * 0,005$$

$$H_g(\text{kJkg}^{-1}) = 127,96$$

Ukupan iznos gornje toplinske vrijednosti otpada:

$$H_{g \text{ ukupno}}(\text{kJkg}^{-1}) = \sum w_i * H_{gi}$$

$$\begin{aligned} H_{g \text{ ukupno}}(\text{kJkg}^{-1}) &= 0,3090 * 190,62 + 0,2319 * 157,75 + 0,2287 * 440,81 \\ &+ 0,0568 * 164,78 + 0,0371 * 193,80 + 0,0370 * 2,42 \\ &+ 0,0207 * 16,08 + 0,0098 * 168,59 + 0,0045 * 297,82 \\ &+ 0,0022 * 420,54 + 0,625 * 127,96 \end{aligned}$$

$$H_{g \text{ ukupno}}(\text{kJkg}^{-1}) = \mathbf{225,18}$$

Za izračun donje toplinske vrijednosti miješanog komunalnog otpada koriste se razne jednadžbe ovisno o sastavu otpada. Prema prikazanom sastavu miješanog komunalnog otpada u tablici 3. biti će primjenjivane sljedeće jednadžbe :

$$H_d(\text{kJkg}^{-1}) = [23 * (F + 3,6 * Pa) + 160 * (Pl + Ru)] * 2,326 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_d(\text{kcalkg}^{-1}) &= 6,0 * F + 22,1 * Pa + 28,1 * Pl + 12,7 * Wo + 24,6 * Te \\ &+ 57,4 * Ru + 17,2 * O \end{aligned} \quad (4)$$

$$H_d(\text{kcalkg}^{-1}) = (45,2 * F + 47,3 * Pa + 58,6 * Pl + 32,4 * Wo + 38,6 * Te + 62,3 * Ru + 50,1 * O) * \left(\frac{100-W}{100}\right) - 6W \quad (5)$$

$$H_d(\text{kcalkg}^{-1}) = (39,04 * Pa + 101,47 * Pl + 38,47 * F) * \left(\frac{100-W}{100}\right) - 6W \quad (6)$$

Gdje oznake F, Pa, Pl, Ru, Wo, Te, O, W predstavljaju masene udjele komponenata kuhinjskog otpada (F), papira (Pa), plastike (Pl), gume (Ru), drva (Wo), tekstila (Te), ostalog otpada (O) i vlage (W). [26] [27]

Ukupan iznos donje toplinske vrijednosti otpada prikazan je tablicom 4.

Tablica 4. Vrijednosti H_d (kJkg^{-1}) miješanog komunalnog otpada Republike Hrvatske

| Jednadžba | H_d (kJkg^{-1}) |
|-----------|------------------------------|
| (3) | 147,13 |
| (4) | 65,50 |
| (5) | 176,45 |
| (6) | 178,97 |

Miješani komunalni otpad prikazanog sastava ima ukupno gornju toplinsku vrijednost od $225,18 \text{ kJkg}^{-1}$, dok se donja toplinska vrijednost razlikuje ovisno o sastavu goriva iz otpada i jednadžbi kojom se računa. U jednadžbi (5) i (6), donja toplinska vrijednost goriva računata je na suhu tvar, stoga je u račun potrebno uvrstiti udio vlage koji za miješani komunalni otpad prikazanog sastava iznosi oko 20 %.

Za primjer je analizirano kućanstvo grada Zagreba koje u prosjeku proizvede 3 kg otpada dnevno, odnosno u periodu od 21 dan, 3 tjedna, proizvede 63 kg miješanog komunalnog otpada. U tako skupljenom miješanom komunalnom otpadu pronalazi se plastika, otpad od hrane, kozmetika, biootpad, papir, razni oblici kartona, tetrapaci, aluminijska folija, plastika od mliječnih proizvoda i slično.

Ako uzmemo u obzir da se novinski papir, PET ambalaža, ambalaža od detergenata, veći dio biootpada odvaja u zasebne spremnike, tada sastav i količinu miješanog komunalnog otpada možemo prikazati tablicom 4. U računu za donju i gornju toplinsku vrijednost korištene su jednadžbe (2) - (6).

Tablica 5. Prosječan sastav miješanog komunalnog otpada u kućanstvu

| Sastav | Masa otpada, kg | | w/% |
|------------------------------|-----------------|-------------|---------------|
| | 21 dan | 1 dan | |
| Kuhinjski otpad | 8,40 | 0,40 | 13,33 |
| Papir i karton | 7,14 | 0,34 | 11,33 |
| Plastika | 29,40 | 1,40 | 46,67 |
| Vrtni otpad | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Tekstil | 2,10 | 0,10 | 3,33 |
| Staklo | 0,84 | 0,04 | 1,33 |
| Metali | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Drvo | 3,99 | 0,19 | 6,33 |
| Koža i kosti | 8,40 | 0,40 | 13,33 |
| Guma | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Ostali otpad | 2,10 | 0,10 | 3,33 |
| Ukupno, kg | 63,00 | 3,00 | 100,00 |
| $H_g(\text{kJkg}^{-1}), (2)$ | | | 312,15 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (3)$ | | | 203,88 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (4)$ | | | 78,74 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (5)$ | | | 178,94 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (6)$ | | | 232,06 |

Prosječan sastav otpada iz kućanstva sadrži veliku količinu plastike, ona zauzima 46% ukupnog sastava otpada. Također, veliki udio ima i kuhinjski otpad te papir i karton. Iz tablice 2. vidljivo je da plastika, kao i karton ima velik udio ugljika (C) što doprinosi toplinskoj vrijednosti pojedinih komponenata miješanog komunalnog otpada.

Udio određene sastavnice otpada pomnožen sa njegovom toplinskom vrijednosti određuje iznos donje (H_d) i gornje (H_g) toplinske vrijednosti prikazano tablicom 5. Iznos vrijednosti H_d je u rasponu od 78,74 do 232,06 kJkg^{-1} ovisno o tome računa li se na vlažnu (3), (4) ili suhu tvar (5), (6) , te o udjelu vlage u otpadu.

Tablicom 6. prikazane su vrijednosti sastava otpada ako se izdvoji gotovo sva plastika, uz pretpostavku da takav otpad sadrži velike količine kuhinjskog otpada koji ima visok udio vlage. Naime, zbog vlage će vrijednost gornje i donje toplinske granice biti niža u odnosu na početni sastav otpada za oko 100 kJkg^{-1} . Gorivo proizvedeno iz otpada ovakvog sastava energetski je siromašno što je vidljivo u niskim vrijednostima donje toplinske vrijednosti. Kao takvo potrebno je prilikom korištenja dodati udio visoko energetskog otpada primjerice plastičnog kako bi se povećala energetska vrijednost i ostvarila bolja iskoristivost.

Tablica 6. Sastav miješanog komunalnog otpada sa smanjenim udjelom plastike

| Sastav | Masa otpada, kg | | w/% |
|------------------------------|-----------------|-------|--------|
| | 21 dan | 1 dan | |
| Kuhinjski otpad | 31,50 | 1,50 | 50,00 |
| Papir i karton | 17,43 | 0,83 | 27,67 |
| Plastika | 3,57 | 0,17 | 5,67 |
| Vrtni otpad | 1,05 | 0,05 | 1,67 |
| Tekstil | 4,20 | 0,20 | 6,67 |
| Staklo | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Metali | 0,11 | 0,01 | 0,17 |
| Drvo | 2,31 | 0,11 | 3,67 |
| Koža i kosti | 2,10 | 0,10 | 3,33 |
| Guma | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Ostali otpad | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Ukupno, kg | 63,00 | 3,00 | 100,00 |
| $H_g(\text{kJkg}^{-1}), (2)$ | | | 198,44 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (3)$ | | | 103,36 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (4)$ | | | 55,00 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (5)$ | | | 175,98 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (6)$ | | | 144,97 |

Tablica 7. prikazuje optimalan sastav otpada za spaljivanje. Takav otpad bogat je plastičnom ambalažom i kartonom. Ove sastavnice sadrže visoki udio ugljika u svom sastavu te time pridonose kalorijskoj vrijednosti otpada. Kao takav, otpad daje visoku energetska vrijednost te je pogodan za spaljivanje. Gornja toplinska vrijednost miješanog komunalnog otpada ovakvog sastava iznosi $423,43 \text{ kJkg}^{-1}$ što je za oko 100 kJkg^{-1} više u odnosu na vrijednost početnog sastava otpada, a donja toplinska vrijednost iznosi između $137,30 \text{ kJkg}^{-1}$ i $360,15 \text{ kJkg}^{-1}$ ovisno o primjenjivanoj jednadžbi.

Tablica 7. Sastav miješanog komunalnog otpada sa povećanim udjelom energetski bogatih sastavnica (plastika, papir, guma)

| Sastav | Masa otpada, kg | | w/% |
|------------------------------|-----------------|-------------|---------------|
| | 21 dan | 1 dan | |
| Kuhinjski otpad | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Papir i karton | 2,10 | 0,10 | 3,33 |
| Plastika | 48,93 | 2,33 | 77,67 |
| Vrtni otpad | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Tekstil | 0,42 | 0,02 | 0,67 |
| Staklo | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Metali | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Drvo | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Koža i kosti | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Guma | 10,92 | 0,52 | 17,33 |
| Ostali otpad | 0,21 | 0,01 | 0,33 |
| Ukupno, kg | 63,00 | 3,00 | 100,00 |
| $H_g(\text{kJkg}^{-1}), (2)$ | | | 423,43 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (3)$ | | | 360,15 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (4)$ | | | 137,30 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (5)$ | | | 240,03 |
| $H_d(\text{kJkg}^{-1}), (6)$ | | | 329,14 |

Sastav miješanog komunalnog otpada u gradu Zagrebu, ali i u Republici Hrvatskoj daleko je od idealnog, onog sastava koji bi pružao najviše dobivene energije njegovim spaljivanjem. Miješani komunalni otpad u Hrvatskoj sastoji se ponajviše od ostataka hrane, plastike i papira, koji je sličan sastavu miješanog komunalnog otpada u Europskoj Uniji. Francuska godišnje proizvede 537 kg otpada po glavi stanovnika, što je oko 60 kg otpada više nego u Hrvatskoj. Količina miješanog komunalnog otpada Francuske za 2021. godinu iznosi 22 859 544 t. Biootpad, u koji je uvršten otpad iz kućanstva i vrtni otpad, čini 46% ukupnog udjela u miješanom komunalnom otpadu. Potom slijedi papir i karton sa oko 15%, dok je na trećem mjestu plastika sa 10%. Točan sastav i udio u miješanom komunalnom otpadu za Francusku prikazan je u tablici 8. [21]

Tablica 8. Sastav miješanog komunalnog otpada Republike Francuske

| Komponente miješanog komunalnog otpada | Udio, % |
|--|---------|
| Biootpad | 46,98 |
| Papir i karton | 14,67 |
| Plastika | 10,86 |
| Tekstil | 3,44 |
| Staklo | 13,31 |
| Metali | 5,07 |
| Drvo | 5,64 |

Za izračun gornje i donje toplinske vrijednosti mKO Francuske sastava prikazanog tablicom 8. korištene su ranije navedene jednadžbe (2) za H_g , te jednadžbe (3) - (6) za H_d . Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. H_g i H_d vrijednosti miješanog komunalnog otpada Francuske

| Jednadžbe | H_g, H_d (kJkg^{-1}) |
|-----------|-----------------------------------|
| (2) | 177,88 |
| (3) | 93,80 |
| (4) | 44,69 |
| (5) | 152,79 |
| (6) | 140,17 |

4. RASPRAVA

Značajne komponente miješanog komunalnog otpada su ostaci od hrane i biootpad, plastika, papir i karton, metal, staklo, guma, koža i kosti te drvo. Otpad prikupljen kao mješoviti komunalni otpad može se tretirati mehanički, biološki ili kemijski kako bi se izdvojili vrijedni materijali. Iako se zasebno prikupljanje organskih, zapaljivih i drugih vrsta otpada nameće javnosti, učinkovitost prikupljanja otpada ne može uvijek biti zajamčena. Primjerice, ako se organski otpad miješa sa drugim vrstama otpada tada nije moguće učinkovito provesti anaerobnu digestiju, već bi se moguće rješenje zbrinjavanja takvog otpada bila mehaničko-biološka obrada (MBO). Ovom metodom obrade bi se odvojila biorazgradiva frakcija otpada i materijali za uporabu. Biorazgradiva frakcija tako bi mogla biti stabilizirana anaerobnom digestijom ili kompostiranjem. Primjenom MBO postrojenja nastaje više izlaznih proizvoda: gorivo iz otpada s relativno visokom kalorijskom vrijednosti, mokra organska frakcija koja se usmjerava na biološki tretman obrade, metali i reciklabilni materijali.

Gorivo iz otpada predstavlja produkt najviše vrijednosti dobiven obradom miješanog komunalnog otpada. Ovisno o potrebama tržišta moguće je proizvoditi gorivo različite kvalitete odnosno klase, te je moguće proizvoditi točnu količinu goriva koje zahtjeva tržište. Ukoliko se proizvede više goriva nego što zahtjeva tržište to gorivo tada stoji skladišteno, mijenja mu se sastav i pada mu toplinska vrijednost zbog povećanja udjela vlage. Najčešće se proizvodi gorivo iz otpad klase 1 i klase 4 prema tablici 1. GIO klase 1, više klase, procijenjenog sastava od oko 95% plastike vrlo je kvalitetno, energetski bogato gorivo i lako ga je plasirati na tržište. Dok, je gorivo niže kvalitete, klase 3, 4 ili 5 ono koje ima nedovoljno visok udio plastike, oko 3%, papir i karton zauzimaju oko 40% ovakvog otpada, a organski otpad zauzima 25%. Gorivo iz otpada ovakvog sastava sadržava visoki udio vlage i nizak udio komponenti bogatih ugljikom, što u konačnici utječe na gornju i donju toplinsku vrijednost goriva.

Izazov današnjice u svim zemljama EU, pa tako i u Republici Hrvatskoj i Republici Francuskoj je problem obrade miješanog komunalnog otpada. Obje zemlje suočavaju se s visokim udjelom biorazgradivih komponenti, poput kuhinjskog i vrtnog otpada. U Republici Hrvatskoj kuhinjski otpad čini 30,90% ukupnog mKO, dok je postotak u Francuskoj za biootpad još veći i iznosi 46,98 %. Ova činjenica predstavlja značajan izazov za termičku obradu otpada, poput spaljivanja, zbog visokog sadržaja vlage i niske toplinske vrijednosti.

MKO Francuske ima udio plastike od 10,86 %, što iznosi upola manji od udjela plastike u mKO Hrvatske koji iznosi 22,87 % . Iako Hrvatska primjenjuje mehaničko-biološku obradu

(MBO) kako bi izdvojila biorazgradive komponente, proizvodnja visokokvalitetnog GIO-a je ograničena.

Prilikom klasifikacije goriva iz otpada najvažnije je poznavanje donje toplinske vrijednosti, udjela klora i udjela žive. Donja toplinska vrijednost ukazuje na energetska učinkovitost otpada, udio klora predstavlja faktor zaštite postrojenja od korozije, a udio žive faktor zaštite okoliša. Donja toplinska vrijednost u miješanog komunalnog otpada Hrvatske varira ovisno o primjenjivanoj jednadžbi. H_d vrijednost primjenom jednadžbe (3) iznosi $147,13 \text{ kJkg}^{-1}$, jednadžbe (4) $65,50 \text{ kJkg}^{-1}$, jednadžbe (5) $176,45 \text{ kJkg}^{-1}$ i jednadžbe (6) $178,97 \text{ kJkg}^{-1}$. Vrijednosti dobivene izrazima (5) i (6) izražene su na suhu tvar, odnosno prilikom izračuna oduzeta je vrijednost udjela vlage u otpadu. Usporedbom vrijednosti dobivenih jednadžbama (3) i (6), u koje su uključene samo visokoenergetske komponente, uočava se porast donje toplinske vrijednosti goriva za 20 %. Ovakav porast posljedica je uklanjanja vlage sušenjem otpada. Također, usporedbom vrijednosti dobivenih jednadžbama (4) i (5), u koje su uvršteni udjeli za sve komponente otpada, vidljiv je porast donje toplinske vrijednosti goriva. Tako vrijednost H_d dobivena jednadžbom (5) je viša za 100 kJkg^{-1} od vrijednosti dobivene jednadžbom (4) zbog ranije uklonjene vlage iz otpada. Stoga, može se zaključiti da ukoliko se želi proizvesti gorivo iz otpada viših energetske klase potrebno je miješani komunalni otpad predobraditi sušenjem.

Pomoću prikazane klasifikacije prema HRN EN 15359:2012 u tablici 1., miješani komunalni otpad iz Hrvatske ne pripada niti najnižoj klasi. Neto ogrjevna vrijednost (H_d) goriva iz otpada najniže klase 5 iznosi $\geq 3 \text{ MJ/kg}$, dok je donja toplinska vrijednost mKO Hrvatske u prosjeku 140 kJkg^{-1} .

Vidljivo je da miješani komunalni otpad ima jako nisku donju toplinsku vrijednost, odnosno da proizvedeno gorivo nije kvalitetno, nema visoku toplinsku moć da proizvede dovoljno energije tokom spaljivanja. Analiziran miješani komunalni otpada Francuske nije bogat komponentama visoke toplinske vrijednosti. H_d vrijednost za Francusku iznosi u prosjeku 107 kJkg^{-1} . Ako se usporede vrijednosti H_d ovih dviju država zaključuje se da i gorivo iz otpada proizvedeno iz miješanog komunalnog otpada Francuske ima nižu donju toplinsku vrijednost, te kao takvo nije pogodno za korištenje kao samostalno gorivo, već je potrebno pomiješati sa klasičnim fosilnim gorivima koja se koriste u industriji ili ga obogatiti dodatkom plastičnog, visokoenergetskog otpada.

Primjenom samo goriva iz otpada niskih klasa nije prihvatljivo za cementare koje koriste GIO kao sekundarno gorivo. Kako bi gorivo iz otpada imalo idealnu vrijednost potrebno je da se svrstava u klasu 1 ili klasu 2. Donja toplinska vrijednost goriva klase 1 iznosi $H_d \geq 25$ MJ/kg, a klase 2 $H_d \geq 20$ MJ/kg. Francuska, kako bi poboljšala konačna svojstva GIO-a u svoj miješani otpad dodaje znatne količine plastičnog otpada, bogatog ugljikom, te izdvajaju otpad bogat vlagom. Tako stvoreno gorivo iz otpada ima puno veću energetska moć i kao takvo se koristi u cementarama kao sekundarno gorivo. Na ovaj način većina razvijenih zemalja Europske Unije sanira problem sa velikom količinom stvorenog otpada. Ovaj proces gdje se GIO koristi kao sekundarno gorivo naziva se suspaljivanje, te se uz pomoć njega dobiva velika količina potrebne energije, dok je s druge strane gledano ekološki prihvatljivije jer se ovim procesima koristi manja količina fosilnih goriva te se smanjuje količina otpada koji bi se odložio na odlagališta. Međutim, javlja se problem prilikom distribucije GIO u industriju zbog malene potražnje. Naime, mnogo industrija koje bi mogle koristiti GIO kao sekundarno ili primarno gorivo morale bi unaprijediti postojeća postrojenja što iziskuje veliku količinu vremena i novca.

5. ZAKLJUČAK

Prilikom proizvodnje i uporabe goriva iz otpada potrebno je sagledati ekonomski, društveni i tehnički održiv segment kako bi sustav privukao krajnje korisnike te bio isplativ.

Cementare su pogodno odredište za gorivo iz otpada zbog visokotemperaturnih i energetske intenzivnih procesa koji se odvijaju u tim sustavima. Suspaljivanje u cementnim pećima i predkalcinatorima omogućuje učinkovito iskorištavanje materijalne i energetske vrijednosti otpada, čime se štede prirodni resursi smanjenjem uporabe sirovih materijala.

Glavni izazovi koji usporavaju uporabu goriva iz otpada kao kvalitetnog sekundarnog goriva u cementnim pećima uključuju veću veličinu čestica, veći sadržaj vlage, povećan sadržaj klora te varijacije u kvaliteti i sastavu. Ovi čimbenici smanjuju učinkovitost pretvorbe čestica GIO-a, produžuju proces sušenja i povećavaju potrebu za volumenskim protokom plina. Povećani sadržaj klora može izazvati koroziju, dok veliki inertni komadi, poput stakla i metala, mogu uzrokovati habanje opreme. Proizvođači cementa moraju posvetiti posebnu pažnju u održavanju stabilnosti postrojenja za spaljivanje goriva iz otpada.

Heterogenost čestica GIO-a može se smanjiti primjenom odgovarajućih sustava predobrade i osiguravanjem povoljnih uvjeta skladištenja koji neće s vremenom umanjiti svojstva goriva. Ključno je poboljšati infrastrukturne kapacitete za karakterizaciju goriva te provoditi opsežno i učestalo uzorkovanje prije, tijekom i nakon uporabe u procesu proizvodnje cementa kako bi se bolje razumjele varijacije u kvaliteti goriva iz otpada.

U Republici Hrvatskoj potrebno je unaprijediti postojeću cementnu industriju sa novim tehnologijama uz čiju bi se pomoć moglo koristiti gorivo iz otpada kao kvalitetno sekundarno gorivo. Međutim, potrebno je proizvoditi i kvalitetnije gorivo iz otpada, jer trenutno proizvedeno GIO ne ulazi u klasifikaciju koja je potrebna za visokoenergetsko gorivo i time ne konkurira na tržištu. Kontrolom sastava mKO pridonijelo bi se i kvaliteti GIO koje bi se tada moglo koristiti kao sekundarno gorivo, bez potrebe za miješanjem sa drugim otpadom ili velikom količinom fosilnog goriva.

6. POPIS SIMBOLA

mKO - miješani komunalni otpad

MBO - mehaničko-biološka obrada

GIO - gorivo iz otpada

RDF - refuse-derived fuel

SRF - solid recovered fuel

HRN EN - hrvatska norma europska norma

RH - Republika Hrvatska

H_d - donja toplinska vrijednost, kJ/kg

H_g -gornja toplinska vrijednost, kJ/kg

7. LITERATURA

- [1] Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva
- [2] Narodne novine, Uredba o kategorijama , vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada, Narodne novine d.d., Zagreb, 2004.
- [3] <https://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje-otpadom/1345> (pristup: 01.09.2024)
- [4] Narodne novine, Odluka o donošenju Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2023. – 2028. godine, Narodne novine d.d., Zagreb, 2023.
- [5] Metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada, Zagreb, listopad 2015
- [6] Narodne novine, *Zakon o održivom gospodarenju otpadom*, Narodne novine d.d., Zagreb, 2013.
- [7] Narodne novine, Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske, Narodne novine d.d., Zagreb, 2005
- [8] <https://rcco.hr/postrojenje-za-mehanicko-biolosku-obradu-otpada/> (pristup: 01.09.2024)
- [9] <https://zerowasteurope.eu/2011/09/mechanical-biological-treatment-mbt-zero-waste/> (pristup: 01.09.2024.)
- [10] Narodne novine, Zakon o gospodarenju otpadom, NN 84/2021-1554, Narodne Novine d.d., Zagreb, 2021.
- [11] Šljivac, Stojkov, Markanović, Topić, Janković, Hnatko, „Energetska učinkovitost rasplinjavanja drvene biomase u proizvodnji električne energije“
- [12] Požar, H., Osnove Energetike 1, 1992. str. 3-10., 47-64., 271-310
- [13] IPZ Uniprojekt TERRA d.o.o. Studija o utjecaju zahvata na okoliš - Energana na neopasni otpad i biomasu Sisak. Rev. 6. Zagreb; 2021
- [14] Montejo, C., et al., 2011. Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants. Appl. Therm. Eng. 31 (13), 2135–2140.
- [15] ISO, ISO 21640 Solid recovered fuels — Specifications and classes ISO, Switzerland, 2021

- [16] De Caebel, B., Michel, M.L.B., 2018. Use of SRF and RDF in Europe: Literature Review and Administrative Situations Encountered in the Field, M.L.B. B. De Caebel, F. Michel Editor. RDC ENVIRONMENT
- [17] Pollutants, SotS.Co.P.O., Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices Relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: Cement Kilns Firing Hazardous Waste. Expert Group on Best Available Techniques and Best Environmental Practices, United Nations Environment Programme, 2007
- [18] Narodne novine, Odluka o donošenju Izmjena Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. – 2022. Godine, Narodne novine d.d. , Zagreb, 2021.
- [19] Velis, C.A., et al., 2010. Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical—biological treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 40 (12), 979–1105.
- [20] Izvješće o komunalnom otpadu za 2022. godinu, 351-02/23-99/15, Zagreb, srpanj 2023.
- [21] Europska agencija za zaštitu okoliša, Early warning assessment related to the 2025 targets for municipal waste and packaging waste, June 2022, Francuska
- [22] Kruta oporabljena goriva – Specifikacije i klase, HRN EN 15359:2012, HZN Glasilo 2/2012.
- [23] G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, *Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [24] P. T. Williams, *Waste Treatment and Disposal*, Wiley, 2006.
- [25] A. Khuriati, W.S. Budi, M. Nur, I. Istadi, G. Suwoto, Modeling of heating value of municipal solid waste based on ultimate analysis using multiple stepwise regression linear in semarang ,1819-6608 , Ožujak, 2017.
- [26] Lin, X., Wang, F., Chi, Y., Huang, Q., Yan, J., A simple method for predicting the lower heating value of municipal solid waste in China based on wet physical composition, *Waste management*, 36, 24-32, 2015
- [27] Chang, Y. F., Lin, C. J., Chyan, J. M., Chen, I. M., & Chang, J. E. (2007). Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 85(4), 891–899.

8. ŽIVOTOPIS

Petra Gorišek [REDACTED] Osnovnu školu završila je u Samoboru, nakon čega upisuje Opću gimnaziju A. G. Matoš Samobor. Maturirala je 2017. godine, te iste godine upisuje preddiplomski studij na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Diplomski studij upisuje 2022. godine na FKIT-u, smjer Kemijsko inženjerstvo u zaštiti okoliša. Tijekom školovanja aktivno se bavila karateom, a interes o novim tehnologijama potvrđuje sudjelovanjem na online radionici Sveučilišta o umjetnoj inteligenciji.