Energetsko iskorištavanje otpada

Đurđević, Dinko

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:126079

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Dinko Đurđević

ENERGETSKO ISKORIŠTAVANJE OTPADA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr.sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr.sc. Veljko Filipan
izv.prof. dr.sc. Igor Sutlović
izv. prof. dr.sc. Vladimir Dananić

Zagreb, lipanj 2015.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr .sc. Veljku Filipanu na pomoći pri odabiru teme i pruženoj stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

SAŽETAK

Porastom životnog standarda, modernizacijom, širenjem društva i povećanjem kupovne moći stanovništva stvaraju se sve veće količine otpada koje je potrebno zbrinuti, a njihovo odlaganje na odlagalištima postaje sve opasnije i sve manje ekonomično. Velika količina otpada koja se odlaže u blizini većih naselja i gradova ima negativan utjecaj na zdravlje ljudi i kvalitetu života u tim mjestima.

Problem otpada nije samo u njegovom zbrinjavanju već se radi o nizu elemenata kao što su sakupljanje i prijevoz, vrednovanje i ponovna uporaba otpada. Danas se razvijaju razne metode zbrinjavanja, oporabe, recikliranja i obrade otpada kako bi se smanjilo opterećenje na prepunim odlagalištima.

Otpad se može iskoristiti na mnogo načina – od razvrstavanja na izvoru i oporabe, spaljivanja kao i iskorištavanja bioplina za energetske svrhe i/ili goriva iz otpada.

Energetsko iskorištavanje otpada svakako predstavlja kvalitetno rješenje kojim se istovremeno može riješiti problem količine otpada na odlagalištima i potreba za alternativnim izvorom energije.

U ovom radu prikazani su načini obrade otpada te postupak dobivanja i količina energije koja se može dobiti iz miješanog komunalnog otpada.

Ključne riječi: otpad, energija, odlagališta otpada, obrada i iskorištavanje otpada

SUMMARY

Nowadays, with the increase of living standard and modernization, expansion of population and increase in purchase power of society, there are large amounts of waste generated which needs to be handled and disposed on landfills. Landfilling of mentioned waste is becoming more dangerous and more expensive. More important, large amount of waste that is landfilled near large towns and cities have negative consequences on human health and life quality in those places.

The problem of waste is not only in its management but it consists of several elements – collecting of waste and its transportation, evaluation and utilization of waste. Because of those problems, scientists and engineers are working on a development of various methods of disposal, recovery, recycling and treatment of waste in order to reduce the pressure on overflowing landfills.

Waste can be used in many ways: sorting at the source of generation and recovery of materials, reuse of waste, incineration for energy utilization (electrical and thermal energy generation), usage of biogas for energy generation and/or refuse-derived fuel.

Energy utilization of waste presents a good solution for solving some of the waste problems – for instance, the problem of generating too much waste on overflowing landfills and the need for alternative energy sources.

In this paper, the treatment methods are shown and explained as well as the process of obtaining energy which can be extracted from mixed municipal solid waste.

Keywords: waste, energy, landfills, treatment and utilization of waste

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. TEORIJSKI DIO 2
2.1. PODJELA OTPADA 2
2.2. KOMUNALNI OTPAD 3
2.3. GOSPODARENJE OTPADOM 4
2.4. METODE OBRADE OTPADA 8
2.4.1. TERMIČKA OBRADA OTPADA 8
2.4.1.1. IZGARANJE 11
2.4.1.2. RASPLINJAVANJE 13
2.4.1.3. PIROLIZA 15
2.4.2. FIZIKALNO – KEMIJSKA OBRADA OTPADA 19
2.4.3. MEHANIČKO - BIOLOŠKA OBRADA (MBO) OTPADA 20
2.4.3.1. AEROBNI MBO SUSTAVI 22
2.4.3.2. ANAEROBNI MBO SUSTAVI 24
2.4.3.3. PRIKAZ TEHNOLOGIJE MEHANIČKO-BIOLOŠKE OBRADE 29
2.5. EMISIJE CO_2 31
3. ENERGETSKA VRIJEDNOST OTPADA NA PRIMJERU ŽCGO „MARIŠĆINA“ 33
3.1. OSNOVNO O ŽCGO „MARIŠĆINA“ 33
3.2. MBO POSTROJENJE ZA OBRADU KOMUNALNOG OTPADA 40
3.2.1. FAZE OBRADE OTPADA 43
3.2.2. PRODUKTI OBRADE OTPADA ODABRANOM MBO TEHNOLOGIJOM 46
3.3. POTENCIJALNA ENERGIJA SADRŽANA U OTPADU 48
3.3.1. ENERGETSKA VRIJEDNOST ODLAGALIŠNOG PLINA 48
3.3.1.1. SASTAV OTPADA 48
3.3.1.2. ODREĐIVANJE KEMIJSKE FORMULE OTPADA 50
3.3.1.3. ODREĐIVANJE SASTAVA I KOLIČINE ODLAGALIŠNOG PLINA 52
3.3.2. ENERGETSKA VRIJEDNOST PRODUKATA DOBIVENIH U MBO POSTROJENJU 55
3.3.2.1. GORIVO IZ OTPADA 55
3.3.2.2. BIOPLIN S KONTROLIRANOG BIOREAKTORSKOG ODLAGALIŠTA 56
4. REZULTATI I RASPRAVA 58
5. ZAKLJUČAK 60
LITERATURA 62
ŽIVOTOPIS 65

1. UVOD

Otpad je jedan od ključnih problema moderne civilizacije i neizbježna posljedica čovjekova načina života. Modernizacijom društva stvaraju se sve veće količine otpada čime čovjek narušava prirodnu ravnotežu. Rješavanje problema otpada prepoznato je kao jedan od najvećih prioriteta smanjenja onečišćenja okoliša, a samim time i očuvanja zdravlja ljudi, biljnog i životinjskog svijeta.

Razvijene zemlje stoga su detaljno razradile zakonodavstvo, kao i strateške dokumente u kojima se daju jasne smjernice u pogledu učinkovitoga gospodarenja otpadom. Primjer takvog zakona je *Direktiva o otpadu* Europske unije [1] koja definira legalni okvir gospodarenja otpadom u EU. Osnovni stavovi su gotovo svugdje identični: proizvoditi što manje otpada, što više ponovno uporabljivati otpad, odnosno reciklirati, razvijati i primjenjivati nove tehnologije oporabe, materijalne i energetske, te u konačnici ostatak zbrinuti na ekološki prihvatljiv način.

Međutim, u praksi je to dugotrajan proces koji zahtijeva prvenstveno promjenu pojedinca, ali i društva u cjelini [2]. Kada se razmišlja i govori o problemima otpada, ono što se kao najjednostavniji korak može učiniti jest to da se otpad negdje odloži. U tom pogledu (ukoliko problem otpada svedemo na otpad iz kućanstva) rješenje je da otpad koji se istovari u kantu za smeće bude odvezen na određenu lokaciju gdje neće nikome smetati, po mogućnosti redovito i uz minimalni trošak. Gledano iz te perspektive, problem otpada bio bi riješen. To je svakako nužno, prvenstveno iz sanitarnih i higijenskih razloga, ali nije dovoljno. Problem, odnosno pitanje otpada treba promatrati u puno širem kontekstu i u tom pogledu stvarni i pravi problemi otpada počinju upravo kad je otpad dovezen na određenu lokaciju.

Još je jedan aspekt problema otpada koji se nikako ne smije zanemariti, a to je njegova vrijednost. Otpad nije i ne mora postati smeće, ali se njegovim odbacivanjem i odlaganjem na odlagališta bespovratno gube dragocjeni materijali i potencijalna energija.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. PODJELA OTPADA

Dva su osnovna načina kvalificiranja otpada – po mjestu nastanka i po svojstvima.

Prema mjestu nastanka, otpad dijelimo na:

1) *Komunalni otpad* – otpad iz kućanstava, otpad iz proizvodne djelatnosti koji je po svojstvima i sastavu sličan komunalnom.
2) *Proizvodni otpad* – otpad koji nastaje u proizvodnom procesu, u industriji, obrtima ili drugim procesima. Po svojstvima i sastavu se razlikuje od komunalnog otpada.

Prema *svojstvima*, otpad dijelimo na:

1) *Opasni otpad* – otpad koji obavezno sadrži jedno ili više svojstava koja su utvrđena *Listom opasnog otpada* [3]
2) *Neopasni otpad* – otpad koji nema neko od svojstava koje otpad čini opasnim
3) *Inertni otpad* – otpad koji ne podliježe znatnim fizičkim, kemijskim ili biološkim promjenama. Nije topljiv, zapaljiv, biorazgradiv, niti reagira fizikalno ili kemijski.

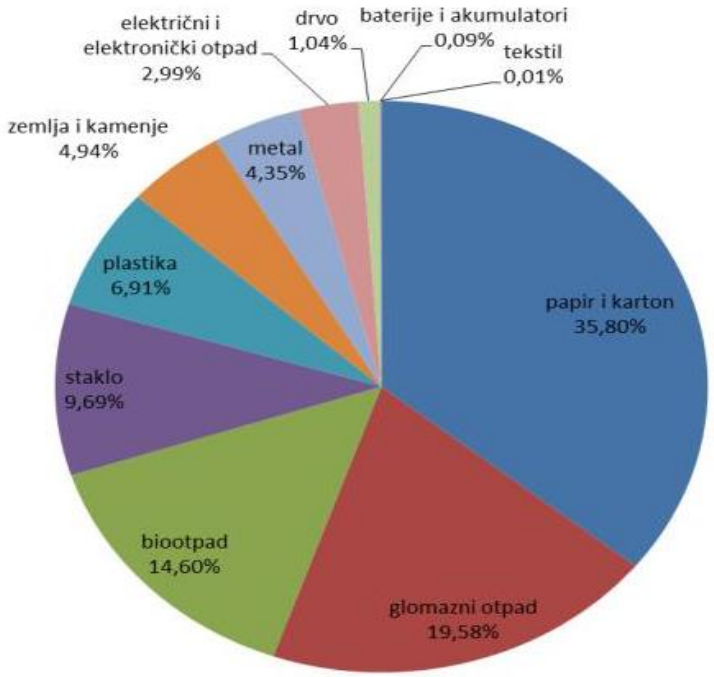
Dosadašnji načini prikupljanja podataka o količinama otpada dosta su nepouzdani i ne ocrtavaju stvarnu sliku stanja u Republici Hrvatskoj. Osnivanjem Agencije za zaštitu okoliša, 2002. gsodine, stvoren je temelj za razvoj informacijskog sustava u okolišu posebice kada je riječ o stvaranju pouzdanih i mjerodavnih baza podataka.

U RH se procjenjuje da nastaje ukupno 13,2 milijuna tona otpada na godinu. Navedena količina podijeljena je prema sljedećoj strukturi [2]:

- miješani komunalni otpad – 1,2 milijuna tona,
- građevinski otpad i otpad od rušenja – 2,6 milijuna tona,
- proizvodni i rudarski otpad – 1,6 milijuna tona,
- poljoprivredni i šumarsko-drvni otpad – 7,1 milijun tona,
- opasni otpad – 0,1 milijun tona,
- odvojeno sakupljeni otpad – 0,2 milijuna tona,
- drugi otpad – 0,4 milijuna tona.

2.2. KOMUNALNI OTPAD

Komunalni otpad je otpad iz kućanstva i otpad sličan otpadu iz kućanstva, a nastaje u gospodarstvu, ustanovama i uslužnim djelatnostima. Taj se otpad redovito prikuplja i zbrinjava u okviru komunalnih djelatnosti. Sastav komunalnog otpada prikupljenog odvojenim skupljanjem otpada prikazan je u Tablici 1. i Slici 1.:



Slika 1. Odvojeno sakupljeni otpad u 2012., po vrstama [4]

Tablica 1. Odvojeno sakupljeni otpad u 2012. [4]

Vrsta otpada	**Količina (t)**
Papir i karton	124 615
Glomazni otpad	68 173
Biootpad	50 806
Staklo	33 747
Plastika	24 046
Zemlja i kamenje	17 200
Metal	15 157
Električni i elektronički otpad	10 407
Drvo	3 610
Baterije i akumulatori	321
Ostalo	33 973
Ukupno	**382 078**

Teoretski se iz kućnog otpada može iskoristiti oko 80 % otpada [5]. Ostatak od oko 20 % čini sitni otpad (prašina), ali i neke potencijalno iskoristive otpadne tvari kao npr. tekstil, guma i drvo.

Količina i sastav komunalnog otpada po stanovniku ovise o ekonomskom razvoju društva. Razvijenije društvo ima više otpada po stanovniku. 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.

Komunalni otpad u Republici Hrvatskoj je po sastavu sličan otpadu iz drugih europskih gradova. Količina otpada u Hrvatskoj je u porastu, a očekuje se daljnji značajniji porast s obzirom na gospodarski razvoj, naročito u turizmu, te uslijed povećane potrošnje [6].

2.3. GOSPODARENJE OTPADOM

Prema *Zakonu o održivom gospodarenju otpadom* [7], gospodarenje otpadom je skup aktivnosti, odluka i mjera usmjerenih na:

- sprječavanje nastanka otpada, smanjivanje količine otpada i/ili njegovoga štetnog utjecaja na okoliš
- obavljanje skupljanja, prijevoza, oporabe, zbrinjavanja i drugih djelatnosti u vezi s otpadom, te nadzor nad obavljanjem tih djelatnosti,
- skrb za odlagališta koja su zatvorena.

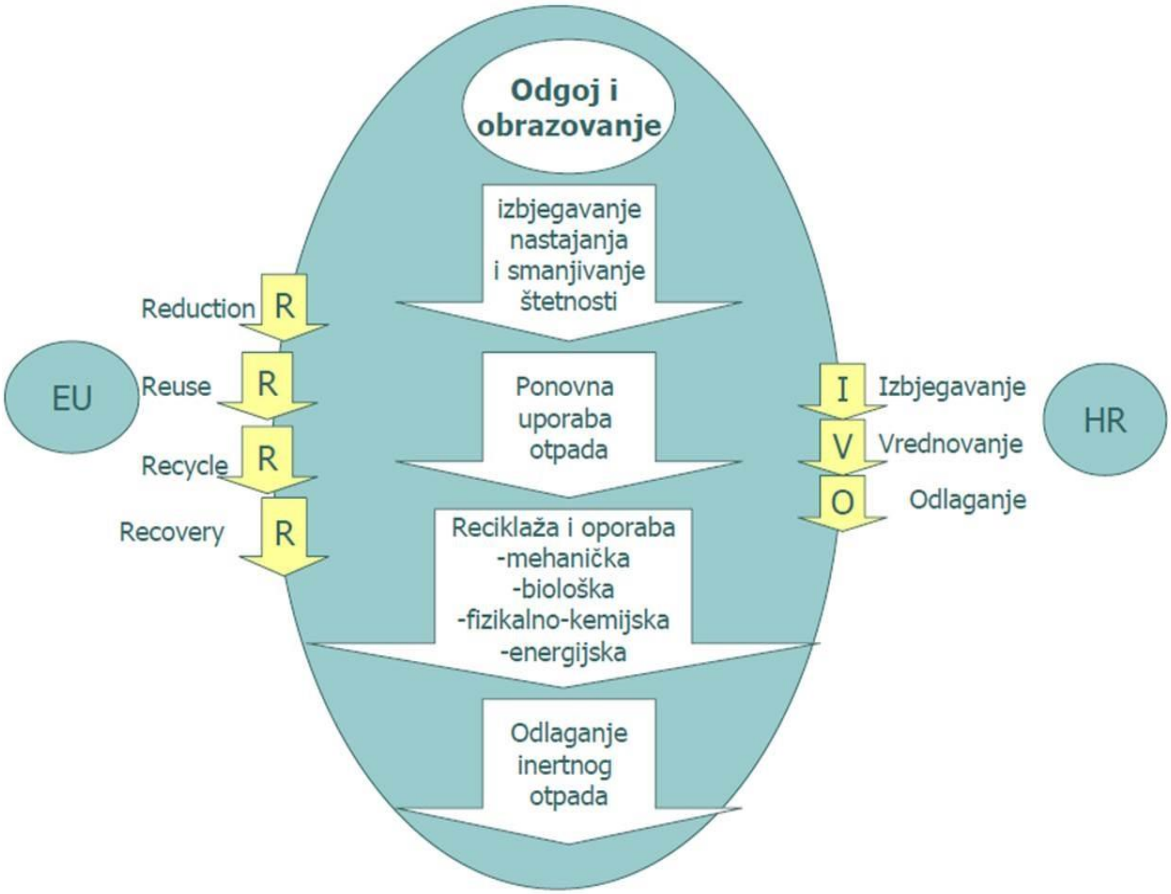
Gospodarenje otpadom mora se provoditi na način da se ne dovodi u opasnost ljudsko zdravlje i bez uporabe postupaka i/ili načina koji bi mogli štetiti okolišu, a posebno kako bi se izbjegao rizik onečišćenja: mora, voda, tla i zraka, pojava buke, neugodnih mirisa, ugrožavanje biljnog i životinjskog svijeta, štetan utjecaj na područja kulturno-povijesnih, estetskih i prirodnih vrijednosti te nastajanje eksplozije ili požara. Ono se temelji na uvažavanju načela zaštite okoliša, poštivanju načela međunarodnog prava zaštite okoliša te uvažavanju znanstvenih spoznaja i najbolje svjetske prakse.

Kako bi se riješio današnji pa tako i budući problem otpada, potrebno je uvesti i odgovorno provoditi cjelovito gospodarenje otpadom. Cjelovito gospodarenje otpadom obuhvaća sve aktivnosti, odluke i mjere za sprječavanje nastanka otpada, za smanjenje

količine otpada i njegova štetnog utjecaja na okoliš, kao i sve mjere postupanja s otpadom (prikupljanje, razvrstavanje, recikliranje, obrada i odlaganje samo inertnog i iskorištenog otpada).

Jedan od osnovnih strateških dokumenata kojim je definiran okvir djelovanja na području gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj je *Strategija gospodarenja otpadom* [6]. Polazne stavke za izradu ove strategije gospodarenja otpadom utemeljene su na analizama postojećeg stanja kojima je zaključeno da je upravo neodgovorno upravljanje otpadom najveći problem zaštite okoliša u RH. Ustanovljeno je da količina otpada stalno raste, a infrastruktura koja bi taj otpad trebala zbrinuti nije dovoljna.

U *Strategiji* je navedeno općeprihvaćeno načelo za sustavno i cjelovito gospodarenje otpadom, kao i prijenos tih načela na hrvatske standarde, što je prikazano na Slici 2.:



Slika 2. Koncept gospodarenja otpadom [6]

Riječ je o načelu 4R – čiji naziv dolazi od engleskih riječi: *reduction*, *reuse*, *recycle* i *recovery*. To podrazumijeva smanjenje i sprječavanje nastajanja otpada, njegovu ponovnu uporabu, zatim recikliranje te regeneraciju materijala i energije iz otpada.

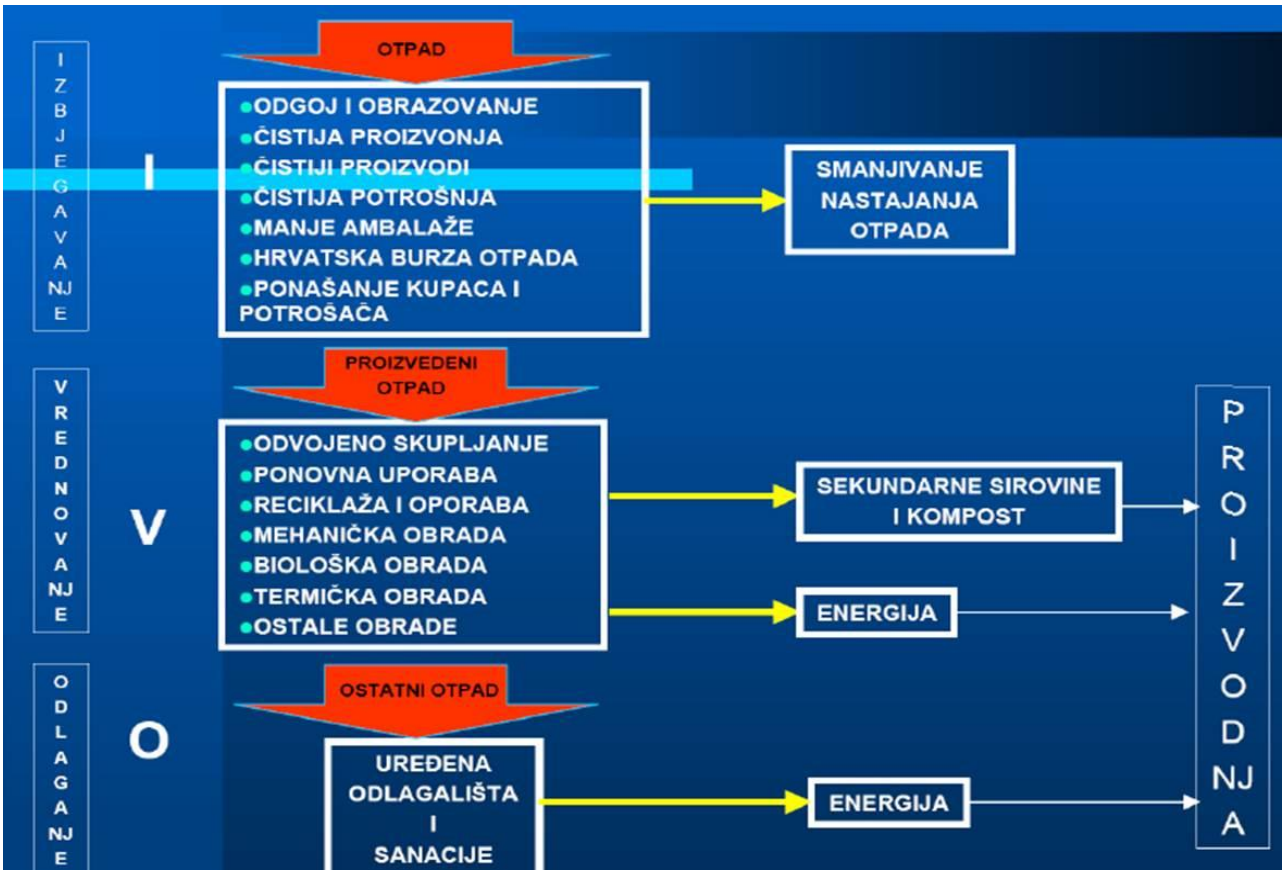
Prva i najpoželjnija opcija je redukcija odnosno smanjenje i sprječavanje onečišćenja (engl. *reduction*). To je ujedno najizravnija i najdjelotvornija opcija jer ako otpad ne nastaje, ne nastaju ni problemi kontrole otpada.

Druga po redu opcija u hijerarhiji upravljanja otpadom je ponovna upotreba otpada (engl. *reuse*). Ako otpad nužno nastaje, treba ga ponvno upotrijebiti u najvećoj mogućoj mjeri. Zasniva se na njegovoj izravnoj ponovnoj upotrebi, kao upotrijebljenog proizvoda.

Treća opcija po redu je recikliranje (engl. *recycle*). Od prethodne metode se razlikuje po tome što se zasniva na izdvajanju materijala iz otpada i njegovom ponovnom korištenju, što znači da nema izravne primjene. Možemo reći da se recikliranjem ostvaruje kruženje materijala od proizvoda preko upotrijebljenog proizvoda (odnosno otpada) pa preko sekundarne sirovine ponovno do proizvoda. Recikliranje doprinosi očuvanju neobnovljivih izvora sirovine i energije.

Četvrta opcija u hijerarhiji gospodarenja otpadom je regeneracija (engl. *recovery*). To je postupak koji se zasniva na toplinskoj, kemijskoj ili fizikalnoj pretvorbi materijala kako bi se ponovno proizveo materijal ili energija. Regeneracija se primjenjuje samo na onu količinu otpada koju nije moguće smanjiti, ponovno upotrijebiti ili reciklirati.

Hijerarhija gospodarenja otpadom bazira se na 4R konceptu, a u *Strategiji* je usvojen tzv. IVO koncept koji obuhvaća izbjegavanje nastajanja otpada, njegovo vrednovanje i odlaganje. Na Slici 3. shematski je prikazan IVO koncept gospodarenja otpadom te mjere koje su predviđene *Strategijom gospodarenja otpadom* u svrhu ostvarivanja zadanih ciljeva. Prema shemi može se vidjeti da su odgoj i obrazovanje osnovni preduvjeti funkcioniranja sustavnog i cjelovitog gospodarenja otpadom. No, također je važno zbrinuti i iskoristiti već nastali otpad.



Slika 3. Shema IVO koncepta gospodarenja otpadom [6]

2.4. METODE OBRADE OTPADA

2.4.1. TERMIČKA OBRADA OTPADA

Termička obrada otpada su postupci spaljivanja, suspaljivanja i drugi postupci obrade otpada kojima se promjenom temperature otpada postiže promjena strukture i svojstva otpada [7]. Termičkom obradom otpada smanjuje se volumen otpada te se izdvajaju ili uništavaju potencijalno opasne tvari iz otpada. Uz to, termičkom obradom moguće je iskoristiti energetsku vrijednost otpada za proizvodnju toplinske i/ili električne energije. Tada se takva postrojenja u kojima se vrši energetska oporaba otpada nazivaju „energane na otpad“ (ENO). Prema određenim literaturnim podacima godišnji energetski potencijal komunalnog otpada u Hrvatskoj procjenjuje se na 12 PJ (uz prosječnu ogrjevnu moć od 7,5 MJ/kg) što predstavlja 2,8 % ukupne godišnje potrošnje energije [8].

Kao glavni ciljevi termičke obrade otpada mogu se navesti sljedeći ciljevi:

- smanjenje udjela organskih tvari u otpadu,
- uništavanje organskih štetnih tvari,
- izdvajanje anorganskih tvari,
- smanjenje mase i volumena otpada,
- iskorištenje energije pohranjene u otpadu.

Posebnim je propisom [7] definirano da se prilikom termičke obrade komunalnog otpada uvijek mora iskorištavati energija pohranjena u otpadu, tj. zabranjeno je samo spaljivanje bez energetske oporabe. Čisti postupak spaljivanja, bez posebnog iskorištenja dobivene topline, smije se primjenjivati samo kod zbrinjavanja posebnih vrsta i zbrinjavanja opasnog otpada.

Spalionice otpada moraju biti u skladu s najvišim standardima glede učinkovitosti zbrinjavanja otpada, smanjenja emisija u okoliš i kvalitete ostataka. Uvjeti za početak rada, pogonski uvjeti, uvjeti za prekid rada, način ulazne kontrole otpada, kvalifikacija zaposlenika, način zaštite zraka, tla i vode te gospodarenje ostacima u procesima termičke obrade otpada propisani su *Pravilnikom o načinima i uvjetima termičke obrade otpada* [9].

Ostatni otpad nastao termičkom obradom može se podijeliti u dvije kategorije:

- otpad koji nastaje pri samoj termičkoj obradi otpada;
- otpad koji nastaje čišćenjem dimnih plinova, uključujući i otpadne vode iz procesa čišćenja.

Otpad nastao pri samom izgaranju (šljaka) obično se iskorištava kao materijal u niskogradnji (npr. u proizvodnji asfalta). Otpad nastao čišćenjem (lebdeći pepeo) ili pranjem dimnih plinova dodatno se obrađuje i stabilizira nakon čega se odlaže na odlagališta ili odvozi na odlagališta opasnog otpada.

Postupci termičke obrade, poglavito u urbaniziranim – gusto naseljenim sredinama, omogućuju istovremeno neutraliziranje štetnih svojstava i njegovo energetsko iskorištavanje [10]. Postoje različite tehničke mogućnosti termičke obrade otpada, od kojih je izgaranje otpada dosada najviše korišteno.

Termička obrada otpada može se koristiti za sljedeće vrste otpada [11]:

- miješani komunalni otpad – otpad iz kućanstava i domaćinstava te komercijalni i industrijski otpad sličan otpadu iz kućanstva
- prethodno obrađeni komunalni ili drugi otpad – otpad koji je prethodno obrađen (selektivno prikupljen, tretiran ili obrađen na određen način tako da mu se karakteristike razlikuju od miješanog komunalnog otpada)
- opasni otpad – otpad koji obavezno sadrži jedno ili više svojstava koja su utvrđena *Listom opasnog otpada* [3]
- mulj izdvojen iz komunalnog odvodnog sustava – u nekim postrojenjima mulj se obrađuje posebno od otpada, dok je u drugim postrojenjima takva vrsta otpada pomiješana sa ostalim otpadom (npr. komunalnim otpadom)
- medicinski otpad – ovakva vrsta otpada se uglavnom zbrinjava na mjestu nastanka (npr. mala postrojenja za spaljivanje izgrađena u blizini bolnica za potrebe bolnica).

Trenutno u Republici Hrvatskoj ne postoji niti jedno postrojenje za energetsku oporabu komunalnog otpada (ne računajući dva plinska motora na deponijski plin na odlagalištu Jakuševec). Situacija u Europskoj uniji je sasvim drugačija. U Europi postoji duga tradicija spaljivanja otpada, a time i veliko iskustvo koje znatno olakšava i ubrzava proces izgradnje postrojenja i njihovo puštanje u pogon. Opseg spaljivanja otpada u zemljama članicama EU znatno varira, od 0 do 62 % (Tablica 2.):

Tablica 2. Broj i kapacitet spalionica u EU [12]

Zemlja	Ukupni broj energana na otpad	Obrađeni otpad kt/god
Austrija	13	1 466
Belgija	16	1 734
Danska	29	2 020
Finska	3	557
Francuska	129	11 710
Irska	1	107
Italija	53	4 586
Luksemburg	1	120
Njemačka	72	17 996
Portugal	3	1 053
Španjolska	11	2 253
Švedska	32	2 111
Nizozemska	11	3 216
Velika Britanija	24	3 722
Poljska	1	115
Češka	3	493
Mađarska	1	411
Slovenija	1	10
Slovačka	2	184
Ukupno	**406**	**53 864**

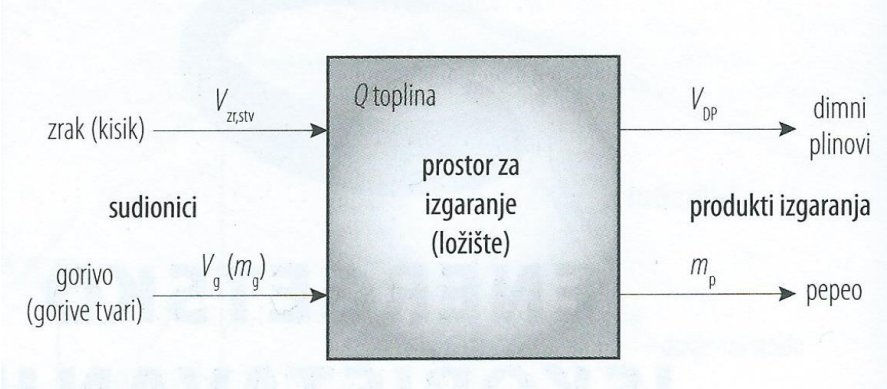
2.4.1.1. IZGARANJE

Izgaranje (engl. *combustion*) je proces potpune termičke degradacije tvari s dovoljnom količinom kisika u svrhu potpune oksidacije goriva. Općenite karakteristike izgaranja otpadnih materijala su sljedeće:

- višak zraka je potreban da bi se osiguralo potpuno izgaranje;
- maksimalne temperature u procesu su obično iznad 1000 °C;
- gorivo u potpunosti oksidira u ugljikov dioksid i vodenu paru, ostavljajući samo mali dio ugljika u pepelu (manje od 3 % masenog udjela pepela).

Čitav proces pretvara gotovo cijelu kemijsku energiju sadržanu u gorivu u toplinsku energiju, ne ostavljajući nikakvu nekonvertiranu kemijsku energiju u dimnim plinovima, dok u pepelu ostaje vrlo mali udio nekonvertirane kemijske energije [13].

U proces izgaranja s jedne strane ulaze sudionici: goriva tvar i kisik iz zraka, dok s druge strane iz njega izlaze produkti izgaranja: dimni plinovi (plinovi izgaranja) i pepeo koji čine neizgoreni dijelovi goriva, a cijeli se taj proces odvija u prostoru koji se naziva ložište, kao što je prikazano na Slici 4.:



Slika 4. Pojednostavljeni prikaz tehničkog ložišta [14]

Potpuno izgaranje je ono kod kojeg svi izgorivi sastojci goriva (ugljik, vodik i sumpor) potpuno oksidiraju u ugljični dioksid, vodu i sumporni dioksid [14]:

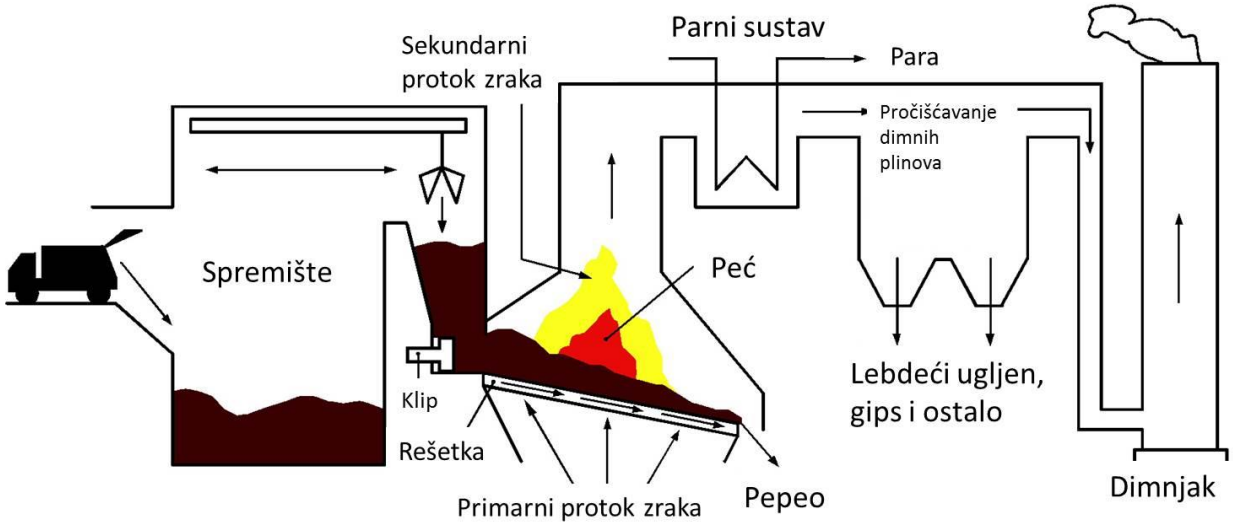
$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$H + ½\ O_2 \rightarrow H_2O$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

No, postoji i nepotpuno izgaranje, kod kojeg izgorivi sastojci samo djelomično oksidiraju u CO_2, H_2O i SO_2 pa produkti izgaranja sadržavaju još gorivih sastojaka, pri čemu je najčešći ugljikov monoksid (CO) koji može dodatno oksidirati u ugljikov dioksid (CO_2). Do nepotpunog izgaranja dolazi kada je količina zraka za izgaranje manja od potrebne, ali također i kada je količina zraka u ložištu dovoljna, ali ga zbog loše cirkulacije nema u svim njegovim dijelovima. Nepotpuno izgaranje se nastoji izbjeći jer se pri tome dobiva manje toplinske energije nego kod potpunog izgaranja.

U svijetu stalno raste broj postrojenja za termičku obradu otpada izgaranjem i upravo se ta tehnologija najviše koristi u razvijenim državama.



Slika 5. Shema postrojenja za izgaranje komunalnog otpada [15]

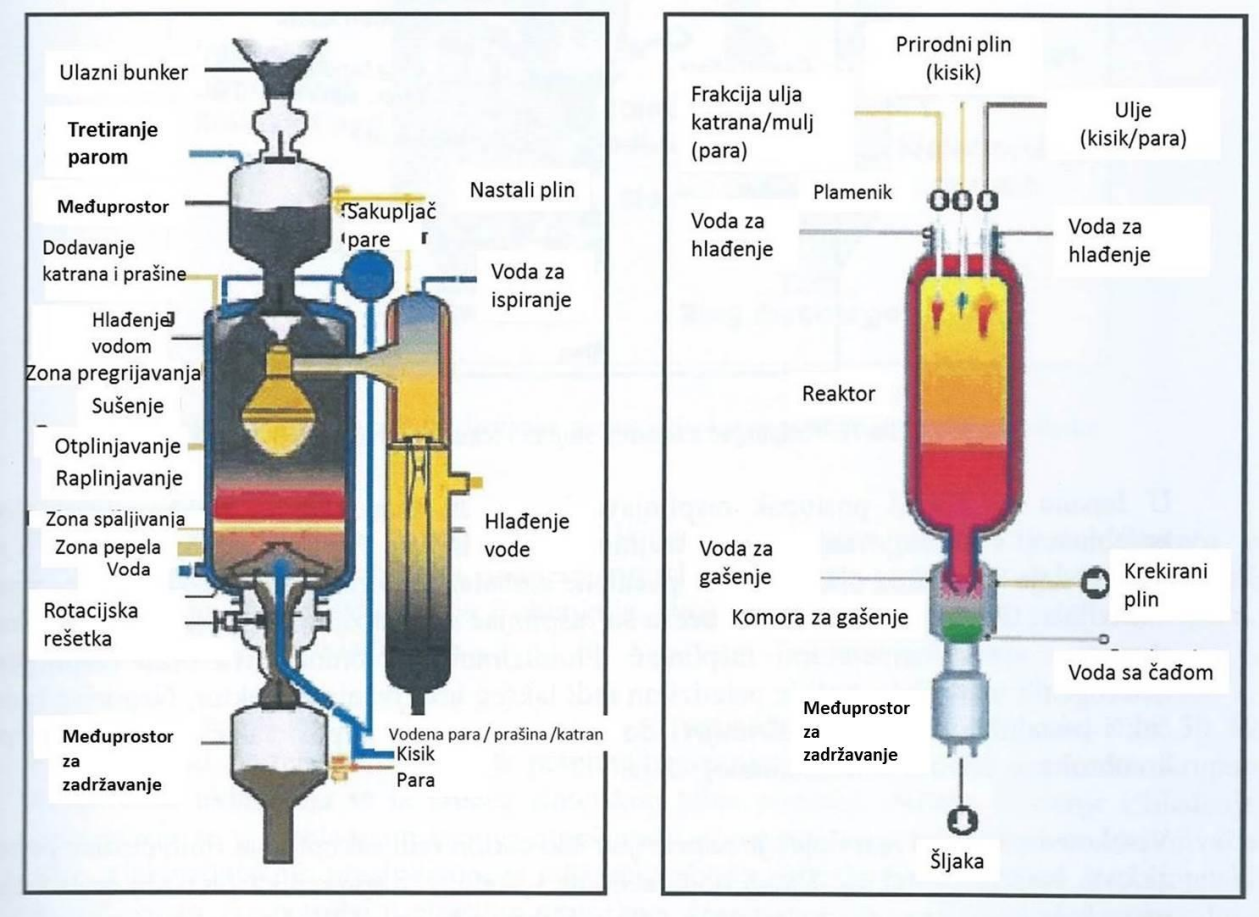
2.4.1.2. RASPLINJAVANJE

Rasplinjavanje (engl. *gasification*) je postupak parcijalne termičke degradacije tvari u prisustvu kisika, ali s nedovoljnom količinom kisika da bi gorivo u potpunosti oksidiralo, tj. proces se odvija u podstehiometrijskim uvjetima [16]. Opće karakteristike rasplinjavanja otpada su sljedeće:

- plin poput zraka, kisika ili vodene pare koristi se kao izvor kisika i/ili služi kao plin-nosioc za uklanjanje produkata reakcije s mjesta reakcije;
- proces se odvija pri prosječnim temperaturama obično iznad 750 °C;
- produkti su plin (glavne gorive tvari su metan, vodik i ugljikov monoksid) i kruti ostatak (koji se sastoji od negorivog materijala i male količine ugljika);
- tipična neto ogrjevna vrijednost plina dobivenog rasplinjavanjem, uz korištenje kisika, je 10 - 15 MJ/m^3, dok je s korištenjem zraka kao oksidansa 4 - 10 MJ/m^3. (Radi usporedbe, neto ogrjevna moć prirodnog plina kreće se između 34 i 38 MJ/m^3.)

Tehnologija rasplinjavanja ima potencijal za inovativno korištenje produkta – sintetskog plina (*syngas*), za razliku od neposrednog izgaranja radi proizvodnje topline. Primjeri takvog korištenja su izgaranje sintetskog plina u plinskim motorima i plinskim turbinama, zamjena fosilnih goriva u ložištima energana i termoelektrana ili upotreba kao sirovina za proizvodnju kemikalija i tekućih goriva.

Postrojenja za rasplinjavanje rade na više različitih principa, ovisno o ulaznoj vrsti otpada te želji za izlaznim produktima. Na Slici 6. su prikazane dvije vrste rasplinjača:

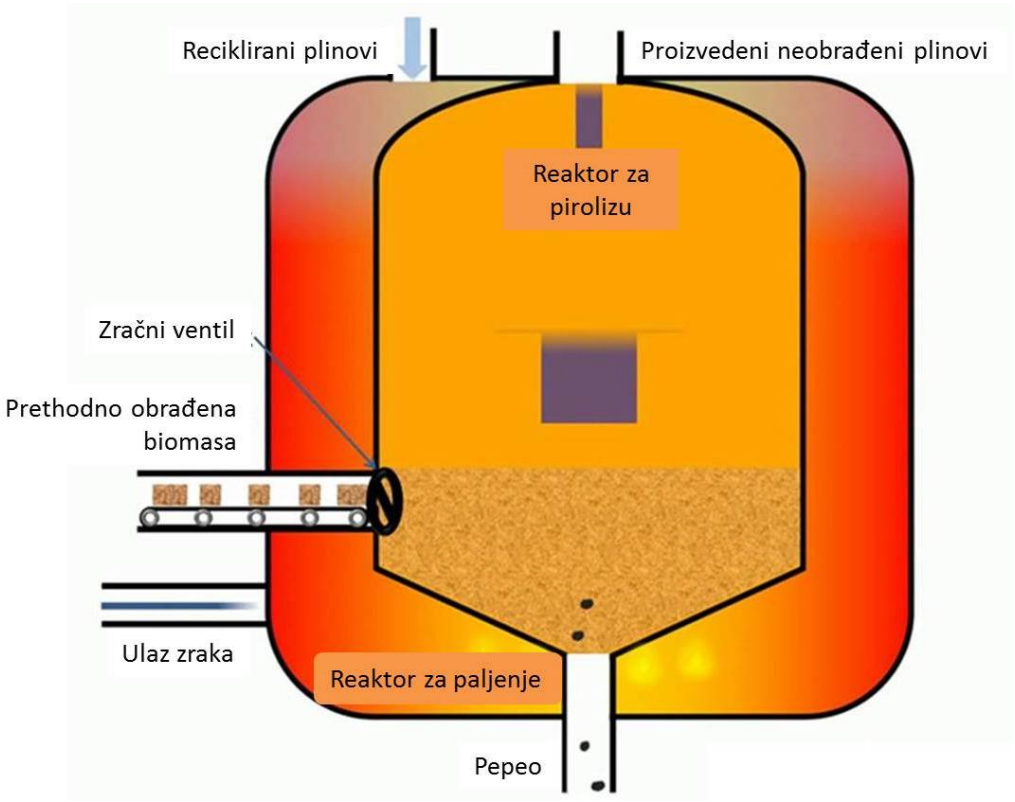


Slika 6. Primjeri postrojenja za rasplinjavanje: a) rasplinjač s fiksnim slojem i b) rasplinjač s istrostrujnim tokom [17]

2.4.1.3. PIROLIZA

Piroliza (otplinjavanje, engl. *pyrolysis*) je brza termička degradacija tvari bez prisustva kisika, koja rezultira tekućim, plinovitim i krutim produktima [18]. Općenite karakteristike pirolize otpadnih materijala su sljedeće:

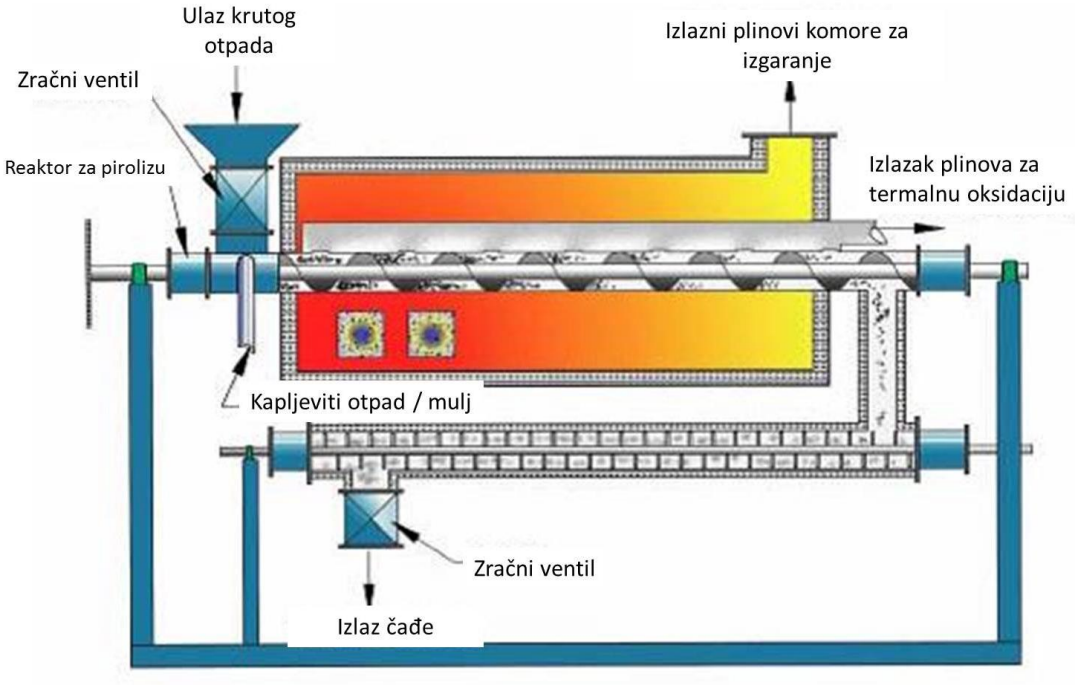
- nije prisutan kisik (ili ga ima vrlo malo), osim kisika prisutnog u gorivu;
- temperature u procesu su relativno niske, 300 - 800 °C;
- produkti su sintetski plin (glavne gorive tvari su ugljikov monoksid, vodik, metan te viši ugljikovodici, uključujući katran, parafine i ulja) i kruti ostatak (koji se sastoji od negorivog materijala i znatne količine ugljika);
- općenito nepostojanje oksidacije, kao i nedostatak dodatnog plina za razrjeđivanje, znači da će neto ogrjevna moć sintetskog plina dobivenog pirolizom biti veća od onog iz procesa rasplinjavanja. Tipična neto ogrjevna moć plina iz pirolize je 10 - 20 MJ/m^3 [7];
- ukupan proces općenito pretvara manje kemijske energije goriva u toplinsku energiju nego što je to slučaj kod rasplinjavanja.



Slika 7. Princip reakcije pirolize

Piroliza se općenito odvija na nižim temperaturama nego što je to slučaj kod izgaranja i rasplinjavanja. Rezultat je manje isplinjenog ugljika i određenih drugih onečišćivača u plinu, poput teških metala i prekursora za stvaranje dioksina. To znači da će dimni plinovi zahtijevati manje čišćenja da bi se postigle propisane granične vrijednosti emisija. Bilo koji onečišćivač koji nije isplinjen bit će zadržan u krutim ostacima koji se trebaju zbrinuti na ekološki prihvatljiv način.

Ukoliko čađa prolazi visokotemperaturni proces rasplinjavanja ili izgaranja, prednosti smanjenja emisije stakleničkih plinova kod niskotemperaturnog procesa se gube. Kruti ostatak iz procesa pirolize može sadržavati do 40 % ugljika što predstavlja značajan udio ulazne energije otpada. Iskorištavanje te energije iz čađe je zbog toga važno za energetsku učinkovitost.



Slika 8. Primjer piroličkog postrojenja (postrojenje s grijanom cijevi tvrtke Bowen) [10]

Tehnologije rasplinjavanja i pirolize za termičku obradu koriste se tek nekoliko desetaka godina i uglavnom su se primjenjivale za pojedine vrste otpada, odnosno za manje kapacitete nego što je to slučaj kod tehnologije izgaranja.

Sustavi zasnovani na pirolizi i rasplinjavanju, osim osnovnog cilja koji je isti kao i kod izgaranja na rešetki (tj. efikasne obrade otpada), imaju i dodatne ciljeve:

- konverzija određenih frakcija otpada u procesni plin (sintetski plin);
- smanjenje zahtjeva za čišćenjem dimnih plinova zbog smanjenja volumena dimnih plinova.

I rasplinjavanje i piroliza se razlikuju od izgaranja po tome što se mogu koristiti za oporabu kemijske vrijednosti otpada (osim energetske). U nekim slučajevima se dobiveni kemijski produkti mogu koristiti kao sirovina za druge procese. Međutim, kada se procesi zasnovani na pirolizi, rasplinjavanju i izgaranju primjene na otpad, često se kombiniraju kao dijelovi integriranog procesa i tada služe da bi se energetska vrijednost otpada u potpunosti iskoristila.

Kalorijska vrijednost otpada

Energane na tehnologijama rasplinjavanja i pirolize općenito preferiraju više kalorijske vrijednosti ulaznog goriva iz kojeg je onda moguće proizvesti gorivi (sintetski) plin više ogrjevne vrijednosti. Za razliku od njih, konvencionalni sustavi zasnovani na tehnologiji izgaranja na rešetki ne mogu prihvaćati otpad vrlo visoke ogrjevne moći bez posebnih modifikacija.

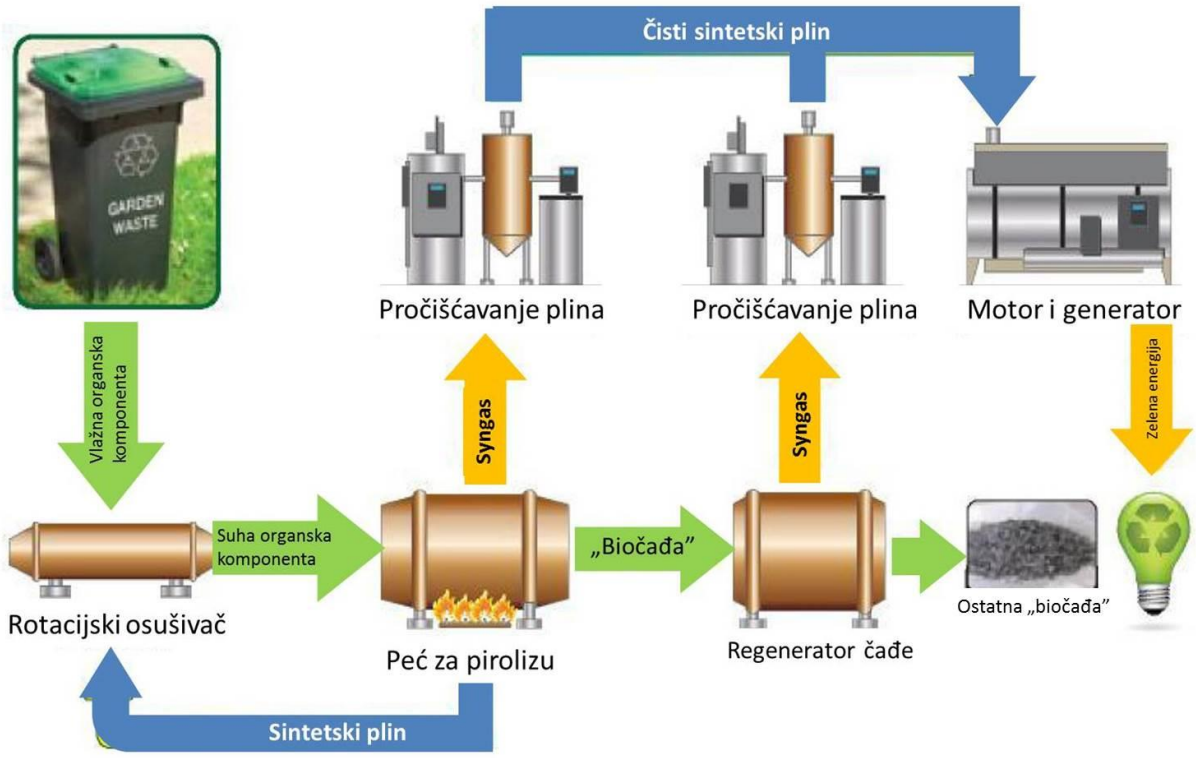
Upotreba sintetskog plina

Moguće primjene proizvedenog sintetskog plina naposljetku se mogu sumirati kao:

1) Direktno izgaranje neobrađenog sintetskog plina u sekundarnoj komori nakon koje slijedi oporaba topline u generatoru pare. Čišćenje dimnih plinova obavlja se prije njihovog ispuštanja u atmosferu;
2) Čišćenje i hlađenje sintetskog plina radi korištenja u plinskom motoru ili plinskoj turbini. Potreba za naknadnim čišćenjem dimnih plinova nakon izlaska iz plinskog motora ili turbine ovisit će o učinkovitosti prethodnog čišćenja sintetskog plina te graničnoj vrijednosti emisija pojedine države;
3) Upotreba čistog ili neobrađenog sintetskog plina u drugim procesima izgaranja gdje supstituira fosilna goriva u termoelektranama, kogeneracijskim postrojenjima ili industrijskim procesima (npr. cementare);
4) Upotreba sintetskog plina kao kemijske sirovine za proizvodnju goriva za transport [10].

Mogućnost kogeneracije, u okvirima cjelovitog sustava gospodarenja energijom, obuhvaća vrednovanje deponijskog plina kod uređenih suvremenih deponija, bioplina kod anaerobne hladne obrade otpada (anaerobna obrada otpada pri kojoj su prisutni psihrofilni mikroorganizmi, tj. mikroorganizmi koji djeluju na temperaturama do 20 °C) [19] i termičku

obradu otpada pomoću različitih postupaka otplinjavanja, rasplinjavanja, izgaranja i različitih kombinacija tih postupaka. Proizvodnja energije iz otpada u svijetu nije rijetkost – tako se u Švedskoj otpad energetski iskorištava u 21 postrojenju, čime se godišnje zbrinjava 1,7 milijuna tona otpada (oko polovice ukupne količine komunalnog otpada) [20].



Slika 9. Primjer pojednostavljene sheme postrojenja koje radi na sistemu pirolize sa biološkim otpadom kao ulaznom komponentom [21]

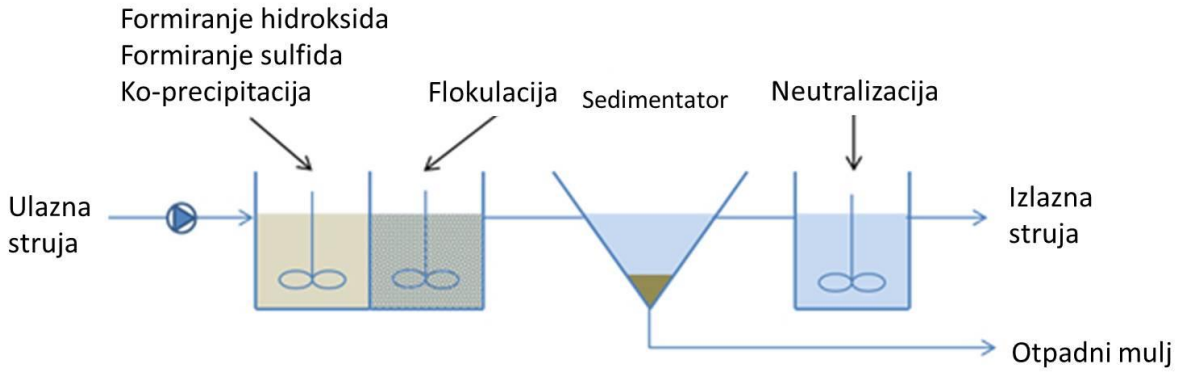
2.4.2. FIZIKALNO – KEMIJSKA OBRADA OTPADA

Postupci fizikalno–kemijske obrade otpada vrlo su raznoliki i namijenjeni za obradu takvih vrsta otpada kojima se ne mogu naći zajedničke karakteristike. Cilj obrade je promijeniti svojstva otpada, kako bi se osiguralo što je manje moguće djelovanje na okoliš.

Fizikalni postupci sastoje se od: taloženja, prosijavanja, centrifugiranja, ispiranja, flotacije, magnetske separacije, isparavanja, destilacije i dr. Kemijski su postupci oksidacija, redukcija, neutralizacija, hidroliza, flokulacija i dr.

Ova vrsta obrade otpada se uglavnom koristi za tretiranje otpadnih voda (onečišćene kiselinama, lužinama, metalima, solima i/ili muljevima), ali i za obradu organskih materijala, poput vode koja se koristi za ispiranje postrojenja, čišćenje otpada i sl. Takve vode mogu sadržavati različite industrijske materijale koji imaju potencijal za ponovno korištenje [22].

Razlikujemo nekoliko vrsta procesa: solventna ekstrakcija, dekantiranje, desorpcija, membranski procesi, UV radijacija, oksidacija, precipitacija, ionska izmjena i sl. [2] [23].



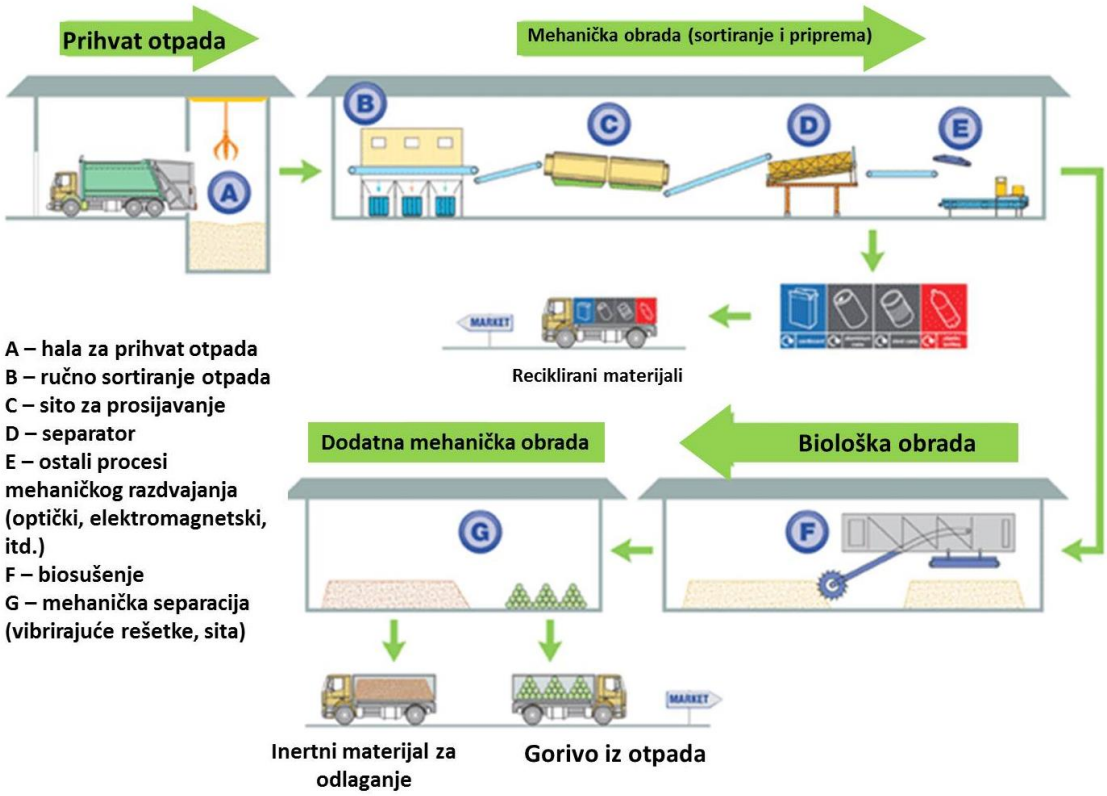
Slika 10. Primjer fizikalno-kemijske obrade otpadnih voda [24]

2.4.3. MEHANIČKO - BIOLOŠKA OBRADA (MBO) OTPADA

Koncept mehaničko-biološke obrade otpada razvio se u EU kao posljedica težnje smanjenja utjecaja odlaganja neobrađenog biorazgradivog otpada na okoliš, odnosno kao jedna o mogućnosti zadovoljenja EU direktive za odlaganje otpada kojom je propisano da se pet godina nakon njena usvajanja, količina biorazgradivog organskog otpada, npr. sadržanog u komunalnom ostatnom otpadu, mora smanjiti za 25 težinskih postotaka u usporedbi sa stanjem referentne godine. Nakon 8 godina smanjenje mora biti 50 težinskih postotaka, a 15 godina poslije stupanja EU direktive na snagu, smanjenje treba biti veće od 65 težinskih postotaka [1]. Osim obrade biorazgradivog otpada procesima automatskog odvajanja omogućuje se oporaba korisnih sekundarnih sirovina iz otpada.

MBO tehnologija obuhvaća dva ključna procesa: mehaničku i biološku obradu otpada (shema na Slici 11.), pri čemu se različiti elementi svakog od procesa mogu konfigurirati na različite načine kako bi se dobio širok raspon specifičnih ciljeva:

- maksimiziranje količine obnovljivih sirovina;
- proizvodnja visoko kvalitetnog goriva iz otpada definiranih svojstava;
- proizvodnja biostabiliziranog materijala za odlaganje;
- proizvodnja bioplina za proizvodnju topline i/ili električne energije [10].



Slika 11. Shema procesa mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada [25]

Na tržištu postoji velik broj MBO tehnologija s različitim kombinacijama elemenata za mehaničku i biološku obradu, što omogućuje odabir postrojenja za specifičnu namjenu.

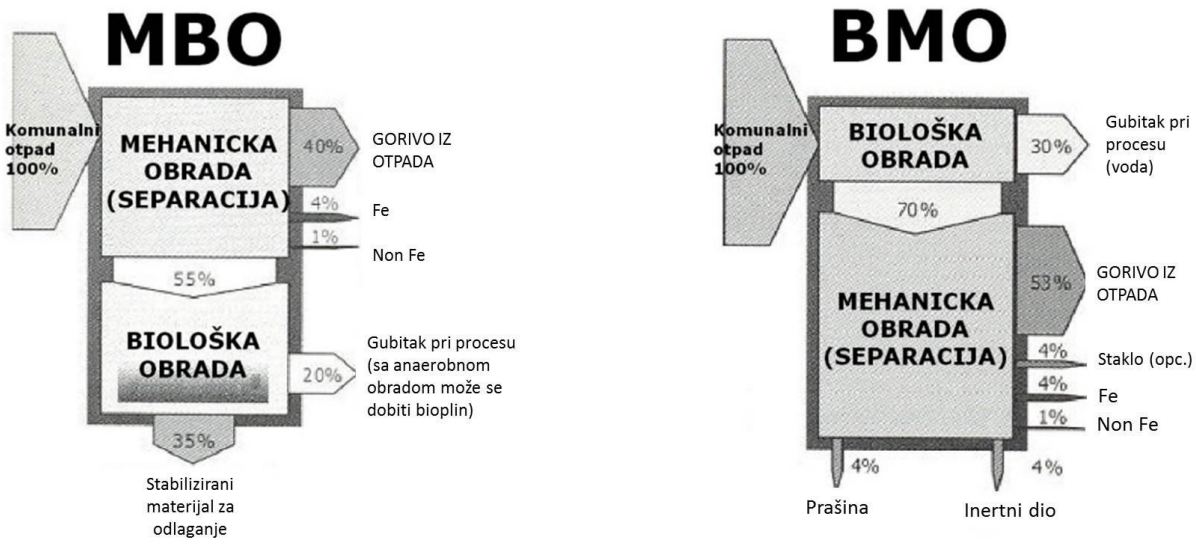
Osim izdvajanja pojedinih korisnih materijala koji se nalaze u komunalnom otpadu, otpad prolazi postupak mehaničke pripreme (usitnjavanje i peletizacija, drobljenje i mljevenje, prosijavanje i druge metode mehaničke separacije, separacija uslijed djelovanja elektromagnetskih sila) prije same biološke obrade. Biološka obrada (bio-sušenje, biostabilizacija, kompostiranje, anaerobna digestija) provodi se aerobno ili anaerobno, uključujući i kombiniranu primjenu jedne i druge metode [2].

Ova vrsta obrade otpada koristi se za obradu otpada sa visokom biološkom komponentom (muljevi iz otpadnih voda, kuhinjski otpad, otpad iz poljoprivrede i sl.). Kako bi se poboljšao postupak biološke obrade otpada (pomoću procesa anaerobne digestije), ovakav otpad je potrebno mehanički obraditi, tj. potrebno je izvući materijale poput plastike, metala i većih komponenti kako bi ih se tretiralo posebnim postupcima za daljnju upotrebu [22].

2.4.3.1. AEROBNI MBO SUSTAVI

MBO sustavi s aerobnom biološkom obradom pojavljuju se u dvije osnovne izvedbe koje se, s obzirom na redoslijed obrade, mogu podijeliti na:

- MBO procese – u kojima se otpad najprije obrađuje mehaničkim, pa tek onda biološkim procesom
- BMO procese – u kojima se otpad najprije obrađuje biološkim, a zatim mehaničkim procesom.



Slika 11. Dva osnovna tehnološka principa mehaničko-biološke obrade [26]

U aerobnim MBO sustavima najprije se iz otpada izdvoje materijali za oporabu i gorivi dio, a nakon toga se biorazgradivi dio obrađuje aerobno, pri čemu kao glavni produkti nastaju biostabilizirani materijal, odnosno kompost.

Kvaliteta komposta, a samim time i mogućnost njegove primjene, ovisna je o kakvoći otpada na ulazu u postrojenje.

Iskustva pokazuju da gorivo iz otpada dobiveno ovim načinom obrade sadrži relativno velik udio vlage te ga je, ovisno o postrojenju koje ga preuzima, potrebno u određenim slučajevima dodatno sušiti koristeći vanjske izvore energije [10].

U aerobnim BMO sustavima otpad se, nakon pripreme, prvo odvodi na aerobnu obradu tijekom koje se za sušenje otpada koristi energija koja nastaje njegovom biorazgradnjom. Nakon biološke obrade otpad se uvodi u proces mehaničke obrade. Mehaničkom obradom izdvajaju se materijali za oporabu i gorivo iz otpada. Takav način biološke obrade omogućuje

kvalitetniju mehaničku separaciju, što ima za posljedicu dobivanje kvalitetnijeg goriva iz otpada i bolje izdvajanje materijala za oporabu. Obradom nastaje i biostabilat koji se, po potrebi, može dodatno obraditi prije konačnog odlaganja.

Aerobnim sustavima želi se postići smanjenje biološke aktivnosti otpada prije odlaganja na odlagalište [27].

Na ishod aerobne razgradnja utječu sljedeći parametri:

1) temperatura – psihrofilno (15 - 20 ˚C), mezofilno (25 - 35 ˚C) ili termofilno (50 - 60 ˚C) područje razgradnje
2) vlaga – za mikrobiološki proces nužna je voda
3) kisik – ako je sadržaj kisika manji od 10% volumnih, razgradnja se prekida
4) C/N omjer – ugljik (C) je nužan za energiju procesa dok je dušik (N) nužan za hranu mikroorganizama u procesu
5) pH – optimalni uvjeti su pri vrijednostima između 6 i 8
6) biokemijski sastav – struktura tvari utječe na kontaktnu površinu na kojoj se zadržavaju mikroorganizmi te na zadržavanje vlage i kisika



Slika 12. Kompostiranje je primjer aerobne razgradnje otpada

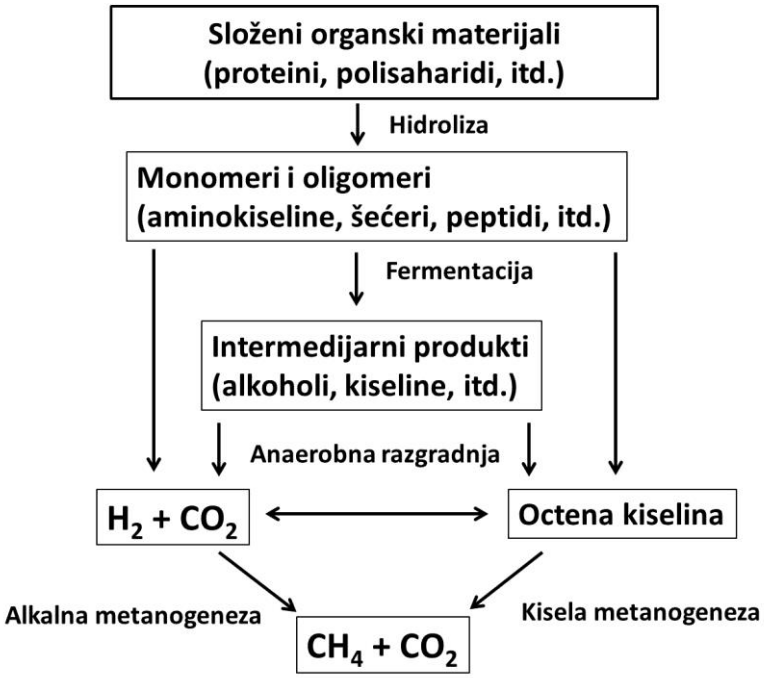
2.4.3.2. ANAEROBNI MBO SUSTAVI

U anaerobnim MBO sustavima nakon izdvajanja tvari koje je moguće reciklirati i goriva iz otpada, biorazgradivi se dio otpada podvrgava anaerobnoj digestiji u reaktoru, pri čemu kao glavni produkt nastaje bioplin.

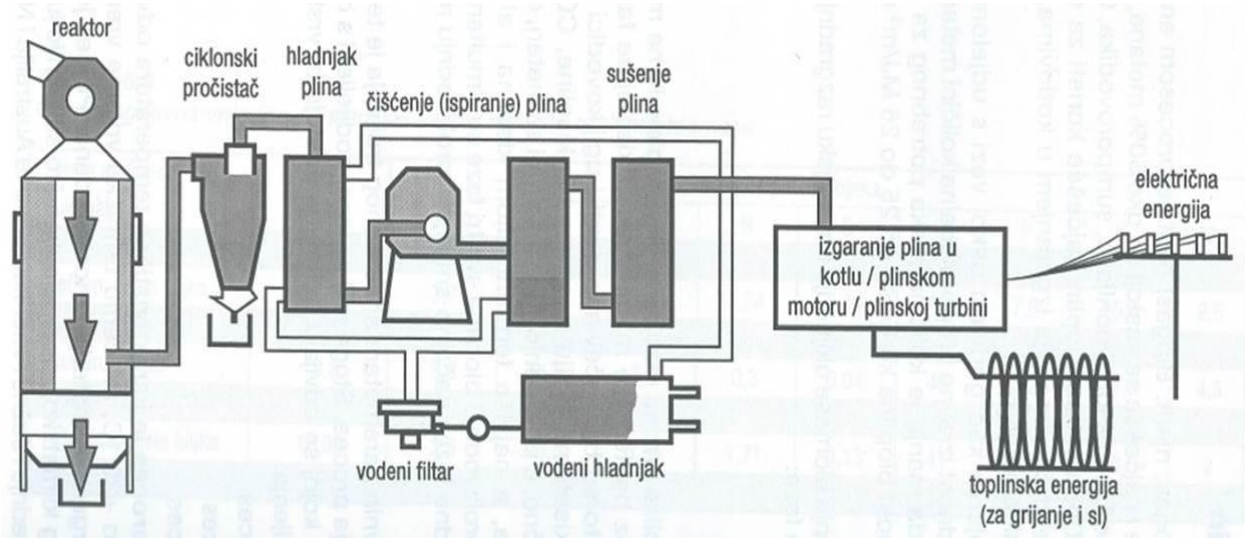
Anaerobna digestija je proces u kojem mikroorganizmi razgrađuju biorazgradive tvari bez prisustva kisika. Proces se koristi za obradu muljeva iz otpadnih voda i razgradnju industrijskog i poljoprivrednog otpada jer omogućava smanjenje volumena i mase materijala. Uz to je potrebno naglasiti da se mineralima bogati ostaci i tekućine nakon procesa mogu koristiti kao gnojivo na poljoprivrednim površinama [28].

Anaerobna digestija biološke komponente otpada uključuje bakterijsku razgradnju, a odvija se u tri osnovne faze (prikazano na Slici 13.):

- faza hidrolize (enzimi razbijaju velike molekule na manje)
- acidogeneza (složene molekuke cijepaju se s bakterijama u kiselom mediju na organske kiseline, CO_2, vodik i amonijak)
- metanogeneza (proizvodi se metan – djelomično iz CO_2 i vodika, najviše fermentacijom kiselina i alkohola) [29].



Slika 13. Stupnjevita razgradnja organskog materijala do bioplina [30]



Slika 14. Pojednostavljena shema sustava za dobivanje i primjenu bioplina [31]

Komercijalne izvedbe procesa anaerobne digestije mogu biti postavljene kao suhi ili mokri, odnosno kao jedno- ili dvostupanjski proces. Sekundarni produkti takve obrade su inertni dio, otpadna voda i digestat koji se dalje aerobno obrađuje prije konačnog odlaganja.

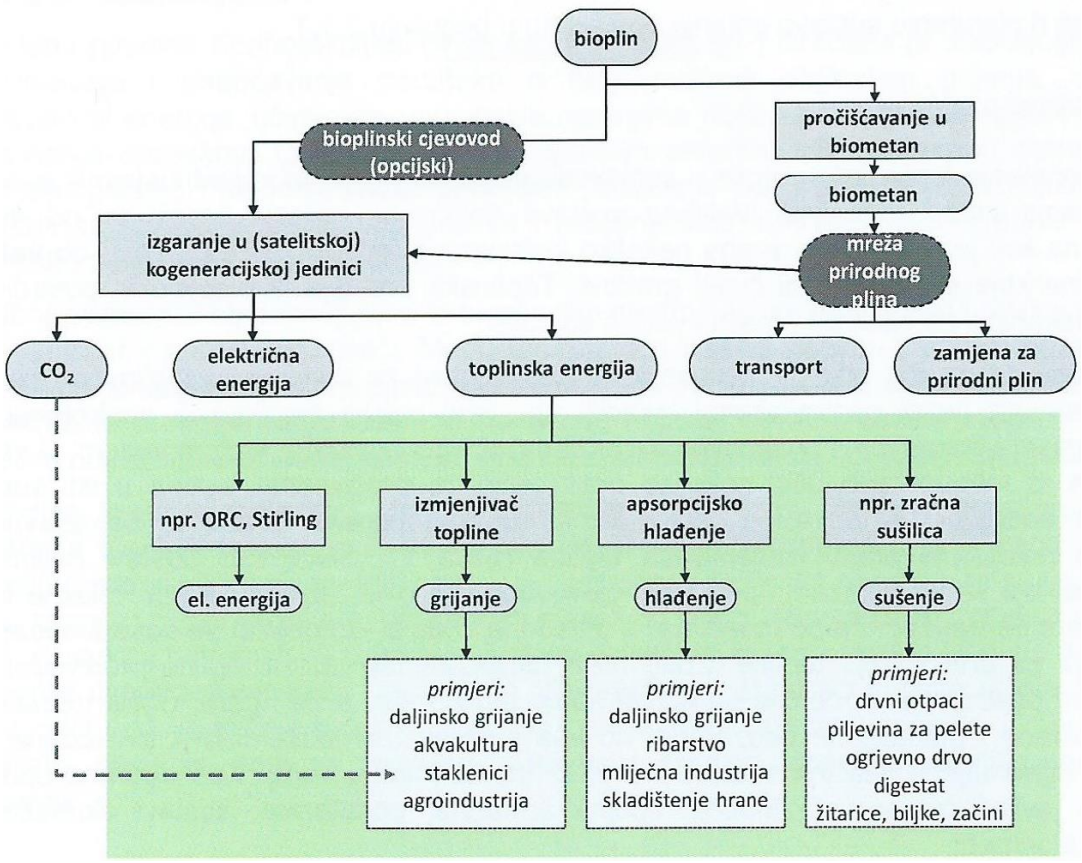
Bioplin

Pojam bioplin se odnosi na plin bez mirisa koji nastaje procesom anaerobne digestije pomoću rada mikroorganizama [31]. Prosječan sastav bioplina je: 50 - 70 % metana (CH_4), 30 - 50 % ugljikovog dioksida (CO_2) te tragova ostalih plinova, ovisno o sastavu izvora [21].

Njegova su svojstva kao goriva usko povezana s udjelom metana. Ogrjevna vrijednost je izravno proporcionalna količini metana, a zbog količine ugljikovog dioksida koja se u njemu nalazi, potrebna je manja količina zraka potrebnog za izgaranje. Energetska vrijednost bioplina varira između 4,5 i 8,5 kWh/Nm^3, ovisno o relativnim koncentracijama metana, ugljikovog dioksida i ostalih prisutnih plinova [32].

Kod tehnološkog procesa proizvodnje bioplina treba postići visok stupanj razgradnje organskog materijala te zadovoljavajuću kvalitetu i prinos, pri čemu treba voditi računa o nizu čimbenika: obliku i vrsti materijala, tlaku u reaktoru, vremenu anaerobne digestije, anaerobnom okruženju, temperaturnom režimu itd.

Glavni proizvod postrojenja za proizvodnju i korištenje bioplina je električna energija kojom se obično napaja elektroenergetska mreža. U drugim slučajevima je moguće koristiti bioplin kao što je prikazano na Slici 17.:



Slika 17. Pojednostavljeni dijagram toka korištenja bioplina [33]

Bioplin proizveden anaerobnom digestijom može biti proizveden u malim ili velikim postrojenjima i prema tome biti korišten u svrhu zadovoljavanja potreba za plinom, no taj plin mora biti prethodno pročišćen posebnim procesima [34]. Bioplin se može pročišćavati na tri načina: kondicioniranjem bioplina, desumporizacijom i sušenjem [35]:

1) kondicioniranje bioplina – koncentracija metana potrebna da se bioplin može plasirati u distribucijski sustav plina mora biti najmanje 95 % te se zbog toga koristi nekoliko različitih metoda za uklanjanje ugljikovog dioksida (CO_2) iz bioplina. Najpoznatije metode su apsorpcijski proces (otapanje u vodi i pomoću organskih otapala) i adsorpcijski proces (adsorpcija pod tlakom).

2) desumporizacija – proces odstranjivanja sumporovodika (H_2S) iz bioplina. Metode za desumporizaciju su brojne, a proces može biti kemijski ili biološki te se može odvijati unutar ili izvan reaktora.

3) sušenje – kako bi se oprema za konverziju energije zaštitila od habanja i eventualnog oštećenja, mora se iz proizvedenog bioplina ukloniti voda. Dio vodene pare može se kondenzirati hlađenjem bioplina (voda se kondenzira na stijenkama nagnutih cijevi i može se sakupiti u kondenzacijskom separatoru na najnižoj točki cjevovoda). Druga mogućnost je hlađenje plina u električnim hladnjacima za plin na temperaturama ispod 10 °C koje omogućuju odstranjivanje vlage.

U Europskoj uniji posluje 450 postrojenja za energetsku oporabu koje imaju godišnji kapacitet od oko 80 milijuna tona otpada, pri čemu nastaje bioplin. U tim se postrojenjima u 2012. godini obradilo 24 % komunalnog otpada pri čemu je nastao bioplin koji se može iskoristiti na više načina.

Nakon procesa pročišćavanja i kompresije, bioplin, odnosno biometan se može koristiti i kao gorivo za vozila. Biometan se kao pogonsko gorivo već koristi u Švedskoj, Njemačkoj i Švicarskoj. Broj privatnih vozila, vozila u javnom prometu i kamiona koji koriste plinsko gorivo je u značajnom porastu. Biometan se u vozilima može koristiti na isti način kao i prirodni plin. Sve je veći broj europskih gradova koji zamjenjuju gradske autobuse na dizelsko gorivo s onima koji koriste biometan.

Uporaba biometana kao goriva u vozilima je vrlo korisna jer bioplin ima nižu emisiju stakleničkih plinova od prirodnog plina, pa tako i svih fosilnih goriva te zbog toga ima puno manji potencijal za onečišćenje okoliša, naspram fosilnih goriva, što se može vidjeti iz Tablice 3. :

Tablica 3. Usporedba emisija u zrak iz vozila [36]

g/kg	CO	HC	NO_x	CO_2	Čestice
Dizel	0,20	0,40	9,73	1053	0,100
Prirodni plin	0,40	0,60	1,10	524	0,022
Bioplin	0,08	0,35	5,44	223	0,015

Pročišćeni bioplin nakon što je komprimiran na razinu tlaka plinske mreže može se plasirati i distribuirati sustavom plinske mreže. Postrojenja za proizvodnju bioplina koji se plasira u mrežu postoje u Švedskoj, Austriji, Nizozemskoj, Švicarskoj i Francuskoj. Glavno ograničenje plasmana biometana u mrežu su visoki troškovi dorade bioplina i povezivanje na mrežu. Plasiranje u plinsku mrežu ograničeno je na lokacije postrojenja koja proizvode biometan zadovoljavajuće kvalitete i na postrojenja za doradu, koja moraju bit smještena u blizini plinske mreže [35].

Još jedan od načina upotrebe bioplina je proizvodnja čistog metana i CO_2 iz bioplina, kao alternativa proizvodnji ovih spojeva iz fosilnih goriva. Čisti CO_2 koristi se u porizvodnji polikarbonata, suhog leda ili za površinsku obradu (pjeskarenje s ugljikovim dioksidom). CO_2 iz bioplina je moguće koristiti i u poljoprivredi kao gnojivo u stakleničkoj proizvodnji, s time da se mora voditi računa o emisijama sumpora [35].

2.4.3.3. PRIKAZ TEHNOLOGIJE MEHANIČKO-BIOLOŠKE OBRADE

Koja će od tehnologija mehaničko-biološke obrade otpada biti izabrana ovisi o faktorima kao što su:

- upotrebljivost i funkcionalnost;
- bilanca između ulaznih količina otpada i zahtjeva tržišta (koja količina materijala se može primiti u postrojenje u odnosu na ukupnu količinu tvari koja se proizvodi u MBO postrojenju);
- ekonomski faktor;
- zakonska regulativa;
- zahtjevi tržišta (potražnja za izlaznim produktima koji nastaju - npr. materijali za oporabu, kruto gorivo, bioplin i sl.).

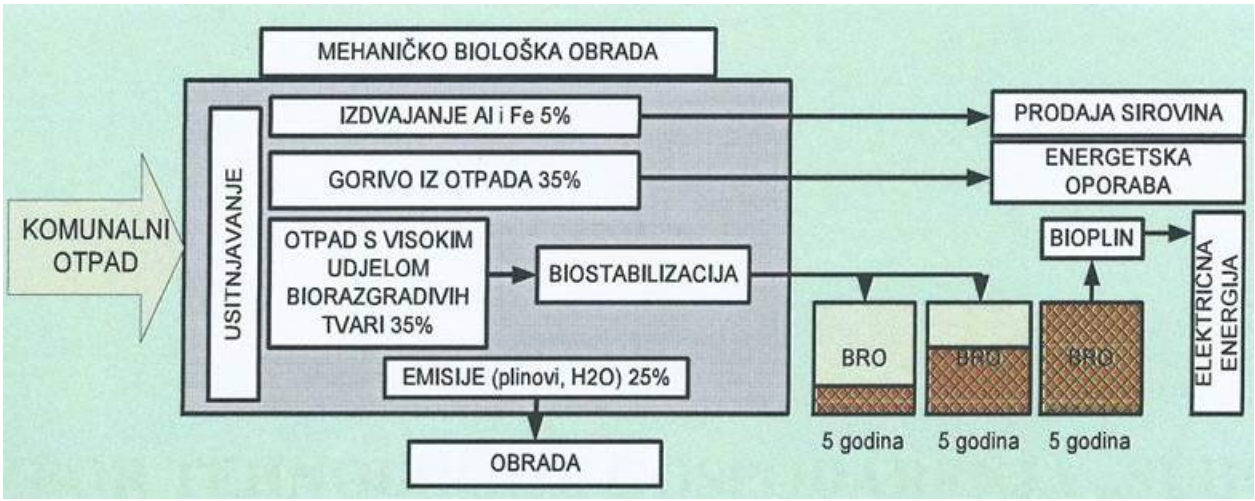
Kao najčešće planirana tehnologija obrade komunalnog otpada, predložena u nacrtima županijskih planova gospodarenja otpadom u *Planu gospodarenja otpadom Republike Hrvatske* [37], koristi se anaerobna MBO tehnologija s bioreaktorskim odlagalištem, gdje bi se gorivo iz otpada izdvajalo u fazi mehaničke obrade, kao što je prikazano na slici 16.

Najprije se dovezeni komunalni otpad mehanički obrađuje pri čemu se izdvajaju korisni materijali poput materijala koji se mogu reciklirati (npr. staklo, metal), odnosno kao sekundarne sirovine prodavati na tržištu (npr. Fe, Al) što iznosi otprilike 5 % ukupnog otpada.

Visokokalorična (tj. lakogoriva) frakcija otpada (oko 35 %) se koristi za proizvodnju goriva iz otpada (GIO ili RDF, eng. *Refuse Derived Fuel*) koje se može koristiti kao primarno gorivo u energanama na otpad ili kao sekundarno gorivo u tvornicama cementa, termoelektranama na ugljen i industrijskim pećima. Korištenje GIO u industriji s intenzivnom potrošnjom energije i u energetici vrlo je atraktivna mjera sa stajališta zamjene neobnovljivih fosilnih goriva, smanjenja emisija stakleničkih plinova te smanjenja količine otpada koji završava na odlagalištima. U GIO je energija puno koncentriranija (ogrjevna vrijednost može biti oko 15 MJ/kg otpada) nego u nerazvrstanom komunalnom otpadu. GIO se dobiva sortiranjem i preradom krutog dijela komunalnog otpada, pri čemu ga je ponekad potrebno obogatiti u gorivoj komponenti (npr. papir, karton, plastika, tekstil).

Organski ostatak se dalje biološkim procesima obrađuje u stabilni produkt. Taj metanogeni (biorazgradivi) dio otpada (oko 35 %) se prvo suši i djelomično stabilizira, a zatim odlaže u tzv. bioreaktorska odlagališta. Kada se jedno bioreaktorsko odlagalište napuni

i pokrije brtvenim slojem, ono se ciljano aktivira dodatkom vode. Razgradnja otpada započinje te se izgrađenom infrastrukturom prikuplja proizvedeni plin. Prosječno razdoblje iskorištavanja bioplina je oko 5 godina, nakon čega je organska tvar iz otpada u potpunosti razgrađena i ostaje na odlagalištu. Bioplin se može koristiti u plinskim motorima za proizvodnju električne (i toplinske) energije ili se može predavati u plinsku mrežu gdje će se miješati s prirodnim plinom. Krajnji rezultat je potpuno energetsko iskorištenje otpada i značajno smanjenje potrebnih površina za konačno odlaganje [10].



Slika 16. MBO s bioreaktorskim odlagalištem [32]

2.5. EMISIJE CO_2

Iskorištavanjem fosilnih goriva kao što su lignit, mrki ugljen, sirova nafta ili prirodni plin dolazi do oksidacije ugljika pohranjenog milijunima godina u Zemljinoj kori, pri čemu se izgaranjem oslobađa energija, a u atmosferu ispušta ugljikov dioksid (CO_2). Povećanje koncentracije CO_2 u atmosferi uzrokuje globalno zatopljenje, budući da je CO_2 jedan od stakleničkih plinova.

Emisija CO_2 uzrokovana izgaranjem fosilnih goriva izravno je povezana s udjelom ugljika u njima i može se jednostavno odrediti jednadžbama izgaranja, odnosno dobiti iz energetskih vrijednosti goriva (npr. gornje ili donje ogrjevne vrijednosti) [31].

Međutim, promatra li se čitav energijski lanac, od pridobivanja prirodnog oblika energije, preko transporta i njegove primjene za korištenje te energije potrebne za izradu i transport opreme i materijala za izgradnju postrojenja za transformaciju i njihova zbrinjavanja nakon korištenja (*neizravna* emisija) dolazi se do pojma *ukupne* emisije (ili *kumulativne* emisije). *Izravna* (pretvorba prirodnog oblika energije u iskoristljiviji oblik), neizravna i ukupna emisija klimatski štetnih plinova iz elektrana prikazana je u Tablici 4.

Kao što je vidljivo iz Tablice 4., svaki izvor ima svoje emisije CO_2 u atmosferu (vidljivo na temelju ukupnih emisija u atmosferu). Izgaranjem bioplina dobivenog anaerobnom digestijom otpada također se oslobađa CO_2, no razlika u odnosu na fosilna goriva je u tome što je CO_2 iz bioplina nedugo prije oslobađanja bio apsorbiran iz atmosfere fotosintetskom aktivnošću biljaka. Korištenjem bioplina proces ugljika zatvoren je u kratkom vremenu (od jedne do nekoliko godina).

Tablica 4. Ukupna emisija klimatski štetnih plinova iz elektrana (CO_2 - ekvivalent) – izvor: VEÖ – Journal 3/2004 [37]

Tip elektrana	Izravna emisija, gram/kWh	Neizravna emisija, gram/kWh	Ukupna emisija, gram/kWh
Velike hidroelektrane	3,5 - 40	10 - 20	13,5 – 55
Male hidroelektrane	3,5 - 35	15 – 20	18,5 - 55
Vjetroelektrana 600 kW	0	40	40
Vjetroelektrana 1,5 MW	0	50	50
Elektrana na biomasu 700 kW	13	50	63
Elektrana na biomasu 11,5 MW	18	45	63
Velika fotonaponska elektrana	0	180	180
Mala fotonaponska elektrana	0	220	220
Konvencionalne termoelektrane na plin	340	80	420
Konvencionalne termoelektrane na kameni ugljen	820	100	920

Korištenjem bioplina se supstituira potrošnja fosilnih goriva za proizvodnju energije i pogonskog goriva te se na taj način znatno smanjuje emisija CO_2, CH_4 i N_2O, što pridonosi ublažavanju pojave globalnog zatopljenja [38].

3. ENERGETSKA VRIJEDNOST OTPADA NA PRIMJERU ŽCGO „MARIŠĆINA“

3.1. OSNOVNO O ŽCGO „MARIŠĆINA“

Primorsko-goranska županija rasprostire se na 8.000 km², od čega kopno zauzima 45 % površine. U 536 naselja, koliko ih ima na području Županije, živi 306.000 stanovnika. Ovu jedinicu regionalne samouprave čini 14 gradova i 22 općine, a Grad Rijeka sa svojih 145.000 stanovnika predstavlja upravno-administrativno, poslovno, gospodarsko, sveučilišno, kulturno i sportsko središte.

Koncept održivog razvitka ključna je odrednica razvoja Primorsko-goranske županije te je njegovoj provedbi u području postupanja s otpadom posvećena posebna pažnja. Novi integralni sustav gospodarenja otpadom usvojen je prihvaćanjem studije "Sustav gospodarenja otpadom u kvarnerskom i istarskom području" koja je izrađena još 1996. godine u okviru METAP programa (The Mediterranean Environmental Technical Assistance Program – Mediteranski program okolišne tehničke podrške) Europske investicijske banke iz Luksemburga.

Iz studije proizlazi da će integralni sustav gospodarenja otpadom u županiji činiti tri osnovne cjeline:

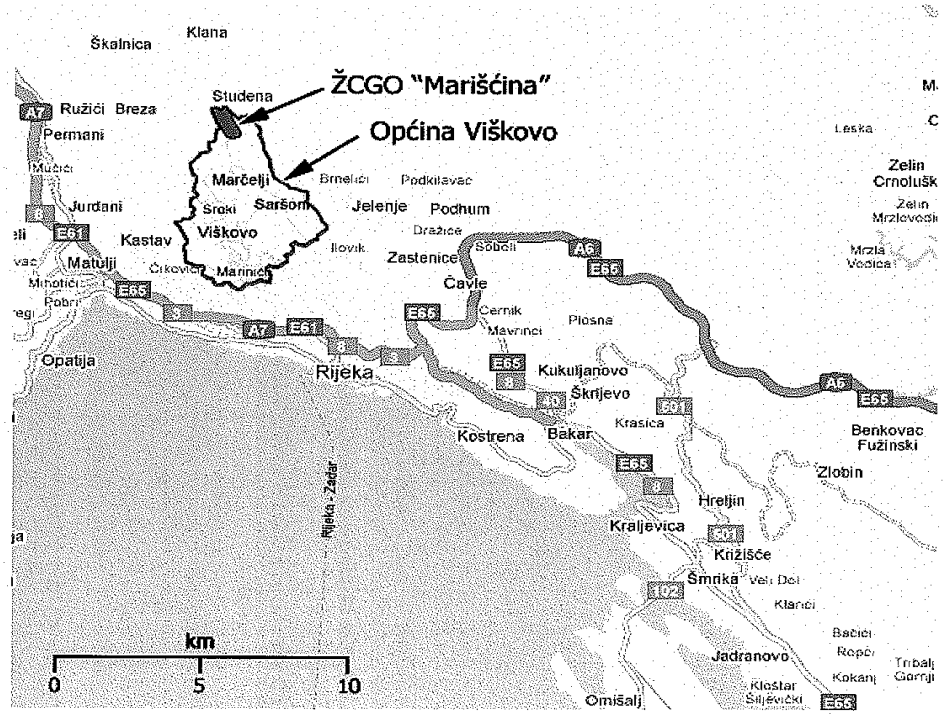
1) prikupljanje i odvajanje otpada iz domaćinstava na mjestu njegova nastanka,
2) pretovarne stanice i reciklažna dvorišta koji služe za privremeno skladištenje otpada,
3) prihvat, obrada i trajno odlaganje otpada u okviru ŽCGO „Marišćina“.

Uspostava cjelovitog sustava postupanja s komunalnim i neopasnim proizvodnim otpadom podrazumijeva izgradnju triju osnovnih elemenata:

1) radne zone i odlagališnog prostora na lokaciji Marišćina,
2) postrojenja za mehaničko-biološku obradu nesortiranog komunalnog otpada,
3) pet pretovarnih stanica na području Županije (Cres, Krk, Rab, Novi Vinodolski i Delnice) koje se istovremeno moraju staviti u funkciju.

Takav pristup potpuno je u skladu sa *Strategijom gospodarenja otpadom Republike Hrvatske* [6] koja nalaže da se u roku od pet godina ustroje regionalni sustavi, saniraju i zatvore sva postojeća legalna odlagališta, a u slučaju Primorsko-goranske županije posebno je važna činjenica da ubuduće na otocima neće biti dopušteno trajno odlaganje otpada bilo koje vrste.

Lokacija Marišćina se nalazi na sjevernom dijelu općine Viškovo te se proteže u smjeru jugoistok - sjeverozapad. Predmetna lokacija ima površinu oko 42,5 hektara i nalazi se na nadmorskoj visini između 463 i 515m.



Slika 18. Lokacija ŽCGO Marišćina

U obuhvatu ŽCGO „Marišćina“ izgrađeno je:

- odlagalište otpada gdje bi se odlagao otpad s područja Grada Rijeke te cijele Primorsko-goranske županije,
- reciklažno dvorište u okviru kojeg je hala za privremeno skladištenje opasne komponente komunalnog otpada (prethodno izdvojene i/ili izdvojene na ŽCGO-u),
- uređaj za obradu otpadnih voda,
- postrojenje za prikupljanje i obradu odlagališnog plina te proizvodnju električne energije iz odlagališnog plina,
- postrojenje za mehaničko-biološku obradu otpada s pripadajućim filtrima za obradu otpadnog zraka te
- popratne građevine (poput upravne zgrade, servisnog centra, čuvarske kućice, itd.).

ŽCGO „Marišćina“ prostire se na površini od 42,5 hektara obuhvaćajući (prikazano na Slikama 19. do 21.):

1) radnu zonu (5,5 ha)
2) odlagališni prostor (21 ha)
3) interne i vanjsku prometnicu (2,4 ha)
4) vatrozaštitni pojas (2,1 ha)
5) zaštitnu zonu širine 50 m (11,5 ha).

a sastoji se od:

- radne zone na tri platoa predviđene za prihvat i obradu otpada s pripadajućim objektima (Slika 22. i 23.),
- bioreaktorskog deponija za trajno odlaganje neiskoristivog dijela otpada,
- sustava praćenja utjecaja tijekom tehnološkog vijeka i najmanje 10 godina po zatvaranju (ambijentalni zrak, buka, podzemlje i podzemne vode).

U sklopu ŽCGO „Marišćina“ zaprima se komunalni miješani otpad i obrađeni neopasni proizvodni otpad iz Primorsko-goranske županije.



Slika 19. Shema ŽCGO „Marišćina“



Slika 20. Prikaz ŽCGO „Marišćina“ iz zraka



Slika 21. Prikaz odlagališnog prostora na ŽCGO „Marišćina“



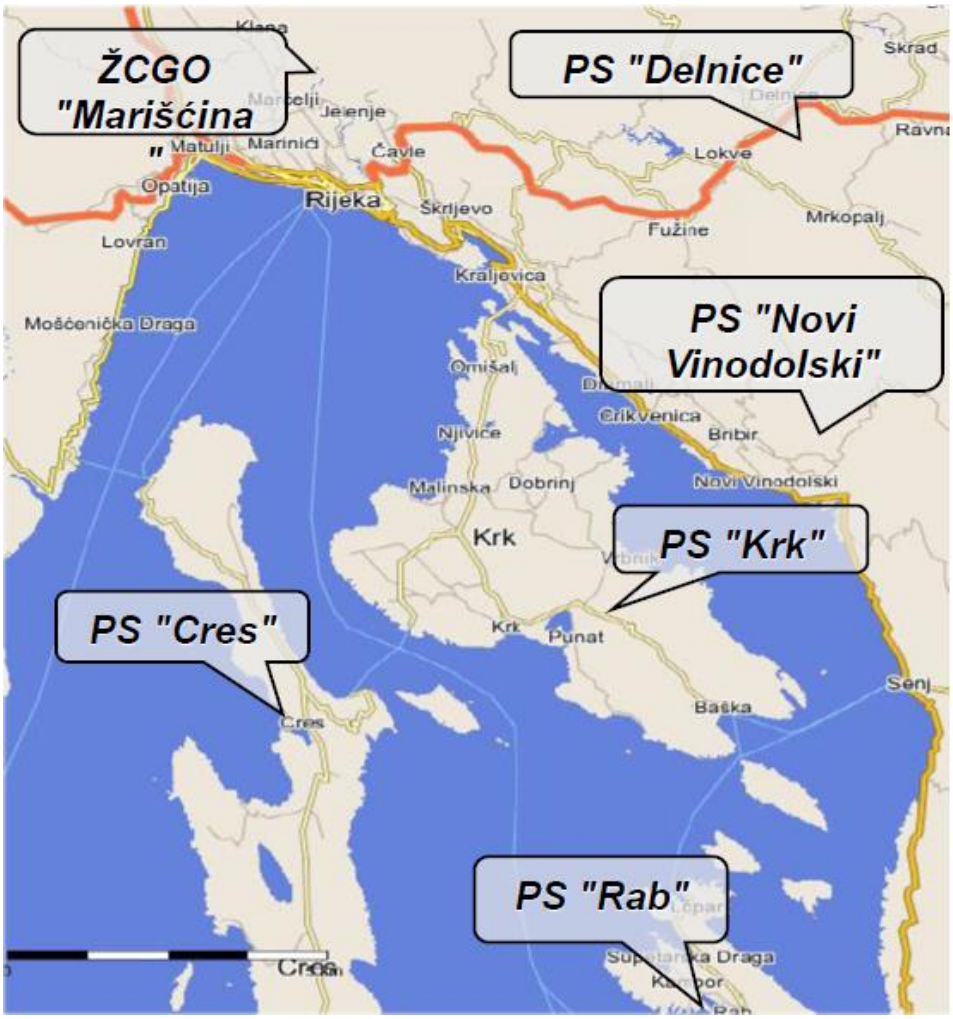
Slika 22. Prikaz radne zone za prihvat otpada



Slika 23. Prikaz postrojenja za mehaničko-biološku obradu (zgrada u pozadini) i postrojenja za obradu otpadnih voda

Županijskim centrom zbrinjava se otpad Primorsko-goranske županije (priobalje, otoci, Gorski kotar). Otpad se trenutno sakuplja na 10 legalnih odlagališta, a na odlagališta se odlaže otprilike 300 tona otpada dnevno, tj. 100 000 tona otpada godišnje.

Otpad lokalnih odlagališta otpada prevozi se do pretovarnih stanica, prikazanih na Slici 24. (objekti za prihvat i privremeno odlaganje nesortiranog komunalnog otpada s naseljenog gravitirajućeg područja te pretovar iz vozila za sakupljanje u specijalne poluprikolice, kao na Slici 25., radi odvoza na konačnu obradu i trajno odlaganje) te potom do glavnog odlagališta na Viškovu gdje se obrađuje i zbrinjava u sklopu ŽCGO „Marišćina“.



Slika 24. Prikaz pretovarnih stanica u Primorsko-goranskoj županiji



Slika 25. Utovar otpada u poluprikolicu s potisnom pločom

3.2. MBO POSTROJENJE ZA OBRADU KOMUNALNOG OTPADA

Prema *Strategiji gospodarenja otpadom RH* [4], županijski centri su dužni unutar centra ukomponirati određenu metodu obrade otpada. Centri mogu sadržavati opću infrastrukturu i zgrade (kolna vaga, registracija otpada, uredi i ostali objekti za osoblje, radionice za održavanje), reciklažno dvorište za prihvat odvojenih frakcija i otpada koje donose pojedinačni proizvođači otpada (pravni subjekti, kućanstva), uređaje za predobradu, odvajanje sekundarnih sirovina i recikliranje, kompostiranje, termičku obradu otpada, mehaničko-biološku obradu, korištenje bioplina za proizvodnju energije, odlagalište itd. U slučaju lokacije Marišćina korištena je mehaničko-biološka obrada (MBO) otpada kao način obrade dovezenog otpada.

Nakon usporedbe različitih tipova (koncepata) MBO otpada, kao najprihvatljiviji tip odabrano je MBO postrojenje sa biosušenjem, izdvajanjem gorivih komponenata i obradom ostatne biorazgradive frakcije u odlagalištima. Razlozi za odabir ovog koncepta su:

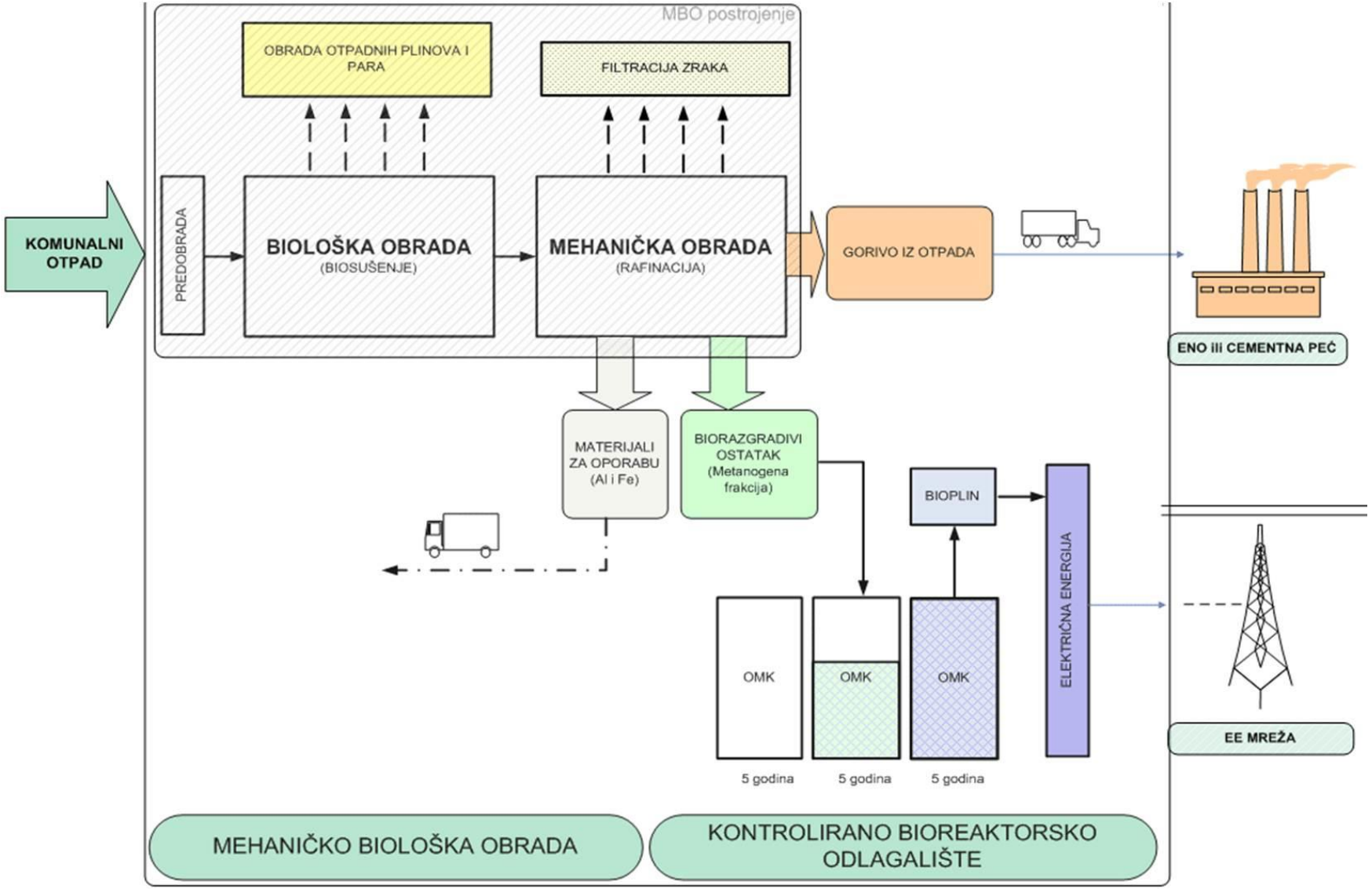
- dobivanje kvalitetnog zamjenskog goriva visoke energetske vrijednosti koje je pogodno za upotrebu u cementarama i ostalim industrijskim pećima;
- proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije – odlagališnog plina;
- relativno prihvatljiv iznos početne investicije u postrojenje;
- prihvatljiva cijena obrade komunalnog otpada.

Nakon obrade komunalnog otpada u MBO postrojenju odabrane tehnologije, kao produkti obrade dobivaju se:

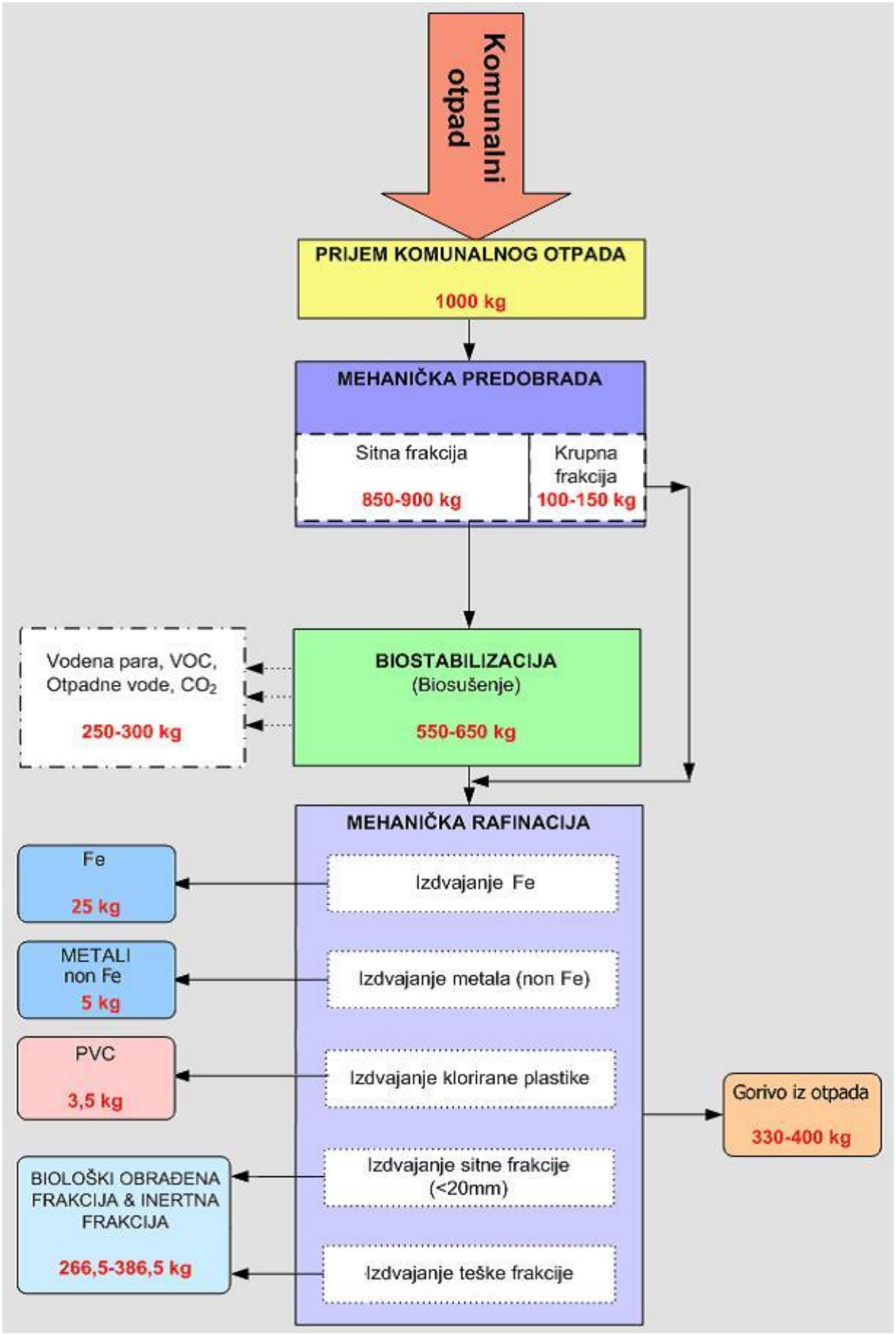
- gorivo iz otpada (GIO);
- korisni materijali za daljnju oporabu;
- biološki obrađena frakcija pogodna za proizvodnju bioplina.

Gorivo iz otpada odvozi se iz kruga Županijskog centra za gospodarenje otpadom Marišćina na energetsko iskorištavanje, korisni materijali na postupak materijalne oporabe, a biološki obrađena frakcija na odlaganje unutar županijskog centra u kontrolirano bioreaktorsko odlagalište, pri čemu se proizvodi bioplin i zatim električna energija (Slika 25.)

Masena bilanca procesa obrade komunalnog otpada u MBO postrojenju ŽGCO „Marišćina“ prikazana je na Slici 26.



Slika 25. Shematski prikaz koncepta obrade komunalnog otpada u ŽCGO „Marišćina“



Slika 26. Masena bilanca MBO postrojenja u ŽCGO „Marišćina“

3.2.1. FAZE OBRADE OTPADA

Dovezeni otpad se obrađuje u 3 faze:

1) Primarna mehanička obrada

   Iz prihvatne jame komunalni se otpad odnosi prema dijelu postrojenja za predobradu gdje se razdvaja na dvije frakcije:

   – krupna frakcija (10-15 % ukupne mase otpada) dimenzija većih od 200 mm

   – sitna frakcija (pretežno biorazgradivi dio komunalnog otpada, 85-90 %) dimenzija manjih od 200 mm



Slika 27. Prikaz automatski upravljanog krana za prijenos otpada do dijela postrojenja za predobradu otpada



Slika 28. Prikaz primarnog usitnjivača otpada

2) Biološka obrada – biosušenje

Nakon mehaničke predobrade, sitnija frakcija otpada premješta se u dio postrojenja za biološku obradu u kojem se, naslagana u gomile, obrađuje 12 - 15 dana. Propuhivanjem zraka kroz naslagani otpad pospješuje se aerobna mikrobiološka razgradnja organskih tvari u otpadu – biosušenje.



Slika 29. Prikaz cijevi za upuhivanje zraka za biosušenje

3) Mehanička rafinacija – proizvodnja goriva iz otpada

Nakon procesa biosušenja otpad se odvodi u dio postrojenja za daljnju mehaničku obradu (rafinaciju) gdje se pomoću niza uređaja iz njega izdvajaju različite frakcije kao što su GIO, metali, plastika, teška frakcija i metanogena frakcija pogodna za proizvodnju bioplina.



Slika 30. Prikaz uređaja za mehaničku obradu otpada (lijevo – magnetski separator, desno – separator lake i teže frakcije otpada)

3.2.2. PRODUKTI OBRADE OTPADA ODABRANOM MBO TEHNOLOGIJOM

Biosušeni komunalni otpad moguće je razdvojiti u dvije glavne frakcije: 1) gorivo iz otpada i 2) biološki obrađenu frakciju.

1) Goriva (gorivo iz otpada, GIO) frakcija je vrlo visoke kvalitete i odvozi se u energanu na otpad (pogodan i za industriju cementa ili u drugim energetsko intenzivnim industrijama). GIO može imati različite karakteristike, što je prikazano u Tablicama 7. i 8.:

Tablica 7. Prikaz karakteristika visokokvalitetnog goriva iz otpada

Parametar	Garantirana vrijednost	Jedinica mjere
Minimalna količina	≥ 30	% od ukupne mase ulaznog miješanog komunalnog otpada
Veličina čestica	$\leq 25 \times 25 \times 0{,}2$	mm
Donja ogrjevna vrijednost	≥ 18.000	kJ/kg
Sadržaj vlage	< 15	% od ukupne mase ulaznog miješanog komunalnog otpada

Tablica 8. Prikaz karakteristika goriva iz otpada niže i srednje kvalitete

Parametar	Garantirana vrijednost	Jedinica mjere
Minimalna količina	≥ 45	% od ukupne mase ulaznog miješanog komunalnog otpada
Veličina čestica	$\leq 100 \times 100 \times 10$	mm
Donja ogrjevna vrijednost	≥ 11.000	kJ/kg
Sadržaj vlage	< 25	% od ukupne mase ulaznog miješanog komunalnog otpada

Obrada provedena opisanom tehnologijom omogućuje ostvarenje prosječne ogrjevne moći goriva od 16.000 kJ/kg, uz zadovoljenje kriterija u cementnoj industriji (navedeni u Tablici 9.).

Tablica 9. Svojstva proizvedenog goriva iz otpada, minimalni zahtjevi

Parametar	Jedinica mjere	Granična vrijednost
Vlažnost	% pp-1	15
Donja ogrijevna vrijednost	KJ kg-1	16.000
Cl	% pp-1	0,9
S	% pp-1	0,6
Pepeo	% pp-1	20
Pb	mg kg-1 ST	200
Cr	mg kg-1 ST	100
Cu	mg kg-1 ST	300
Mn	mg kg-1 ST	400
Ni	mg kg-1 ST	40
As	mg kg-1 ST	9
Cd+Hg	mg kg-1 ST	7

2) Biološki obrađena frakcija pogodna je za proizvodnju bioplina, a sastoji se od anorganskih materijala i težih organskih materijala te određenim udjelom od metanogena, kao: papir, karton, drvo, vuna, koža, pamuk itd. Nakon što se unutar kontroliranog bioreaktorskog odlagališta sakupi dovoljna količina biološki obrađene teške frakcije, ono se zatvara i dodavanjem vode pokreće proces razgradnje otpada i proizvodnje bioplina, koji se kontinuirano iskorištava u plinskim motorima za proizvodnju električne energije.

3.3. POTENCIJALNA ENERGIJA SADRŽANA U OTPADU

3.3.1. ENERGETSKA VRIJEDNOST ODLAGALIŠNOG PLINA

Analiza otpada jedan je od najvažnijih koraka u procesu njegovog zbrinjavanja. Informacija o ulaznom sastavu otpada je ključna za izračun količine energije koju je moguće potencijalno dobiti.

Razgradnja ovisi o sastavu ulaznog otpada, ali je vrlo teško definirati i odrediti postotak i sastav ugljikohidrata, lipida i proteina u heterogenom otpadu, kao što je to slučaj sa komunalnim otpadom. No, moguće je odrediti sastav otpada na molekularnoj razini te će potencijalna energija u ovom radu biti izračunata pomoću sastava elemenata u otpadu.

3.3.1.1. SASTAV OTPADA

Podaci o sastavu otpada navedeni u tablici 5. dobiveni su analizom fizikalnih i kemijskih svojstava komunalnog otpada prikupljenog na odlagalištu otpada Marišćina te ostalim odlagalištima u Primorsko-goranskoj županiji, tijekom 2012. godine.
Također su prikazani podaci o količini suhe tvari u otpadu te količini komunalnog otpada.

Tablica 5. Analiza sastava otpada, količine otpada i elemenata na odlagalištima otpada

odlagalište otpada	sastav otpada (udio u otpadu, %)					količina suhe tvari (%)	masa otpada na odlagalištu (tona)	količine elemenata (mol)				
	kisik, O	ugljik, C	vodik, H	dušik, N	sumpor, S			kisik, O	ugljik, C	vodik, H	dušik, N	sumpor, S
uzorak Novi Vinodolski (Duplja)	32,11	39,70	4,70	0,77	0,25	30,50	11682,45	2,0069	3,3056	4,6535	0,0550	0,0078
uzorak otok Krk (Treskavac)	36,30	39,30	5,00	1,30	0,23	64,50	14743,08	2,2688	3,2723	4,9505	0,0928	0,0072
uzorak Čavle	34,51	39,40	6,80	1,01	0,25	48,10	1026,43	2,1569	3,2806	6,7327	0,0721	0,0078
uzorak turizam	29,89	38,60	4,79	0,95	0,20	27,90	12641,00	1,8681	3,2140	4,7426	0,0678	0,0062
uzorak otok Cres	37,60	40,60	6,40	0,86	0,30	59,40	4730,85	2,3500	3,3805	6,3366	0,0614	0,0094
uzorak Marišćina	34,08	39,52	5,54	0,98	0,27	46,10	114643,11	2,1300	3,2906	5,4851	0,0700	0,0084

3.3.1.2. ODREĐIVANJE KEMIJSKE FORMULE OTPADA

U ovom radu korištena je Buswell-ova formula (1) pomoću koje je, uz podatke o sastavu otpada, moguće odrediti sastav dobivenog odlagališnog plina prikupljenog na odlagalištu iz komunalnog otpada [39]:

$$\mathbf{C_cH_hO_oN_nS_s} + \frac{1}{4} \times (4c - h - 2o + 3n + 2s)\,\mathbf{H2O} \rightarrow \frac{1}{8} \times (4c - h + 2o + 3n + 2s)\,\mathbf{CO2} + \frac{1}{8} \times (4c + h - 2o - 3n - 2s)\mathbf{CH4} + \mathbf{n}\ \mathbf{NH_3} + s\ \mathbf{H_2S} \quad (1)$$

U uzorku od 100 g otpada, udjeli u otpadu predstavljaju mase svakog elementa u uzorku otpada.

Na temelju dobivene mase elemenata, može se izračunati količine svakog elementa u uzorku komunalnog otpada pomoću formule za množinu, tj. količinu tvari [40]:

$$\text{n (količina elementa)} = \frac{\text{m (masa elementa)}}{\text{M (molarna masa elementa)}} \quad (2)$$

Primjenom formule (2), za svaki element dobiju se količine elemenata u uzorku otpada od 100 g, prikazano u Tablici 5.

Pomoću količina otpada, elementi se stavljaju u omjer:

$$N(C) : N(H) : N(O) : N(N) : N(S) = n(C) : n(H) : n(O) : n(N) : n(S) \quad (3)$$

te dijeleći sa elementom najmanje količine (u svakom slučaju je riječ o sumporu, S) dobiju se empirijske formule otpada koje su navedene u tablici 6.

Tablica 6. Računski dobivene kemijske formule otpada

odlagalište otpada	**kemijska formula otpada**
uzorak Novi Vinodolski (Duplja)	$C_{423,91}H_{596,76}O_{257,36}N_{7,05}S$
uzorak otok Krk (Treskavac)	$C_{456,13}H_{690,06}O_{316,24}N_{12,93}S$
uzorak Čavle	$C_{420,70}H_{863,40}O_{276,60}N_{19,24}S$
uzorak turizam	$C_{515,20}H_{760,23}O_{299,46}N_{10,87}S$
uzorak otok Cres	$C_{361,26}H_{677,17}O_{251,14}N_{6,56}S$
uzorak Marišćina	$C_{390,73}H_{651,31}O_{252,92}N_{8,31}S$

3.3.1.3. ODREĐIVANJE SASTAVA I KOLIČINE ODLAGALIŠNOG PLINA

Nakon što je dobivena kemijska formula otpada, pomoću jednadžbe (1) izračunaju se količine pojedinih komponenata u kemijskoj reakciji. U slučaju ŽCGO „Marišćina“, kemijska reakcija imala bi sljedeći oblik:

$$\boldsymbol{C_{390,73}H_{651,31}O_{252,92}N_{8,31}S} + 108{,}17\ \boldsymbol{H_2O} \rightarrow \underline{\mathbf{180{,}54}}\ \boldsymbol{CO_2} + \underline{\mathbf{210{,}18}}\ \boldsymbol{CH_4} + 8{,}31\ \boldsymbol{NH_3} + 1\ \boldsymbol{H_2S}$$

Pomoću količina za CO_2 i CH_4, proizlazi da bi sakupljeni bioplin imao sljedeći približni sastav:

➔ $\frac{180{,}54}{180{,}54+210{,}18}$ x 100 % = 46,21 % CO_2

➔ $\frac{210{,}18}{180{,}54+210{,}18}$ x 100 % = 53,79 % CH_4

U 114.643,11 tona komunalnog otpada ima 52.850,47 tona suhe tvari (dobiveno na temelju podatka o 46,1 % suhe tvari u otpadu). Kako je prije napomenuto da se u otpadu ugljik nalazi u količini od 39,52 % proizlazi da u komunalnom otpadu ukupno ima 20.886,51 tona ugljika.

Ako je biorazgradivost ugljika 70 % [40] [41], tada je:

$$\text{masa C koja reagira} = \frac{20.886{,}51\ \text{tona} \times 70\ \%}{100\ \%} = 14.620{,}56\ \text{tona ugljika}$$

Masu metana koja se nalazi u bioplinu dobije se kao umnožak mase ugljika, C, koja reagira s postotkom ugljika koji je vezan za metan u bioplinu:

masa C vezana za CH_4 u bioplinu = (14.620,56 tona C × 53,79 %) / (100 %) = 7.864,81 tona C

i dalje:

$$n(CH_4) = n(C) \qquad (4)$$

$$\frac{m(CH_4)}{M(CH_4)} = \frac{m(C)}{M(C)} \rightarrow m(CH_4) = \frac{m(C) \times M(CH_4)}{M(C)} \qquad (5)$$

gdje je:

- m (C) = masa ugljika vezana za CH_4 u bioplinu = 7.865,81 tona C
- M (CH_4) = molarna masa metana = 16 $gmol^{-1}$
- M (C) = molarna masa ugljika = 12 $gmol^{-1}$

Iz jednadžbe (5) izlazi da je masa metana u bioplinu jednaka 10.486,42 tona metana.

Kako bismo dobivenu masu metana pretvorili u volumen, iskoristit ćemo činjenicu da pri standardnim uvjetima 1 mol plina iznosi 22,4 L plina [39].
Pomoću jednadžbe (2) dobivamo da je:

$$1\ g\ CH_4 = 1{,}4\ L\ CH_4$$

te je prema tome

$$10.486{,}42\ t\ CH_4 = 10.486{,}42 \times 10^6\ g\ CH_4 = 14.680.982.124\ L\ CH_4 = \underline{\mathbf{14.680.982{,}12\ m^3\ CH_4}}$$

Prema literaturnim podacima vrijedi sljedeći podatak [42] [43]:

$$1\ m^3\ CH_4 = 10\ kWh,$$

što znači da bi se u metanu bila sadržana energija od **146.809.821,2 kWh**, tj. **146.809,8 MWh**.

Kogeneracijska proizvodnja toplinske i električne energije smatra se vrlo učinkovitim načinom korištenja bioplina. Prije korištenja u kogeneracijskim postrojenjima bioplin se suši i kondicionira. Većina plinskih motora ima ograničenja s obzirom na sadržaj sumporovodika, halogenih ugljikohidrata i siloksana koji se nalaze u neobrađenom bioplinu. Stupanj iskoristivosti modernih kogeneracijskih generatora je do 90 %, pri čemu proizvodnja električne energije iznosi 35, a toplinske 55 % [35].
U skladu sa tim podacima, u ovom slučaju dobili bismo:

$$\frac{146.809.821{,}2 \times 35}{100} = \mathbf{51.383.437{,}42\ kWh_e}$$

te

$$\frac{146.809.821{,}2 \times 55}{100} = \mathbf{80.745.401{,}66\ kWh_t}$$

Iskorištavanje proizvedene toplinske energije važan je parametar za energetsku i ekonomsku učinkovitost bioplinskog postrojenja. Proizvedena toplinska energija se djelomično koristi za grijanje reaktora, a otprilike dvije trećine ukupno proizvedene energije može se koristiti za druge potrebe. U Njemačkoj su mnoga bioplinska postrojenja ranijih generacija izgrađena isključivo za proizvodnju električne energije, dok se toplinska energija uopće nije iskorištavala. Danas je iskorištavanje i toplinske energije obavezno iz ekonomskih razloga jer zbog porasta cijene za mnoga postrojenja prodaja samo električne energije nije dovoljna za ekonomsku održivost. Stoga radi što veće učinkovitosti postrojenja i ostvarivanja održive profitabilnosti, na tržište treba plasirati obje vrste energije [35].

Na žalost, u blizini ŽCGO „Marišćina“ nema adekvatnog konzuma toplinske energije pa bi se mogla proizvoditi samo električna energija koja bi se prodavala u mrežu, dok se toplina nastala u mogućem kogeneracijskom postrojenju ne bi iskorištavala. Sa učinkovitošću kogeneracijskog postrojenja od 35 % za električnu energiju, dolazi do velikih gubitaka sa otpuštanjem topline u atmosferu, što nije ekonomski povoljno.

Navedena količina energije dobila bi se kad bi se sav otpad dovezen na odlagalište Marišćina odlagao te iz njega iscrpljivao odlagališni plin. No, u skladu sa *Strategijom gospodarenja otpadom RH* [4], u županijskim centrima se trebaju nalaziti i postrojenja za obradu otpada, odnosno u slučaju „Marišćine“, MBO postrojenje.

3.3.2. ENERGETSKA VRIJEDNOST PRODUKATA DOBIVENIH U MBO POSTROJENJU

3.3.2.1. GORIVO IZ OTPADA

Kako je već navedeno, ogrjevna vrijednost GIO dobivenog u MBO postrojenju na odlagalištu otpada „Marišćina“ iznosi 16.000 kJ/kg.

Ako bi se pretpostavilo da iz 1000 kg komunalnog otpada na prijemu u postrojenje, 330 kg izlazi kao gorivo iz otpada, može se zaključiti da je udio GIO nakon MBO 33 %. Ako se to primijeni na ukupan otpad koji na godišnjoj razini dolazi u postrojenje (podatak iz Tablice 5.), tada je dobivena količina goriva iz otpada jednaka:

$$\frac{114.643{,}11 \text{ x } 33}{100} = 37.832{,}23 \text{ tona goriva iz otpada}$$

Pomnoži li se tu količinu goriva iz otpada sa njegovom ogrjevnom vrijednošću dobije se:

$$37.832{,}23 \text{ tona x } 1000 \text{ kg x } 16.000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 6{,}05 \text{ x } 10^{11} \text{ kJ energije}$$

Iskoristi li se podatak da je 1 J = 1 Ws = 1/3.600 Wh [33], tada se dobiva:

$$\frac{6{,}05 \text{ x } 10^{11}\text{kJ x } 1000 \text{ J}}{3.600 \text{ Wh}} = 1{,}68 \text{ x } 10^{11}\text{Wh} = 168.055.555{,}6 \text{ kWh}$$

Gornjim izračunom dobiveno je da je energetska vrijednost goriva iz otpada dobivenog iz MBO postrojenja na godišnjoj razini **168.055.555,6 kWh**, tj. **168.055,555 MWh** energije.

Energetska vrijednost goriva iz otpada može se iskoristiti u industrijskim pećima cementara ili kao gorivo u termoelektrana umjesto fosilnih izvora energije.

3.3.2.2. BIOPLIN S KONTROLIRANOG BIOREAKTORSKOG ODLAGALIŠTA

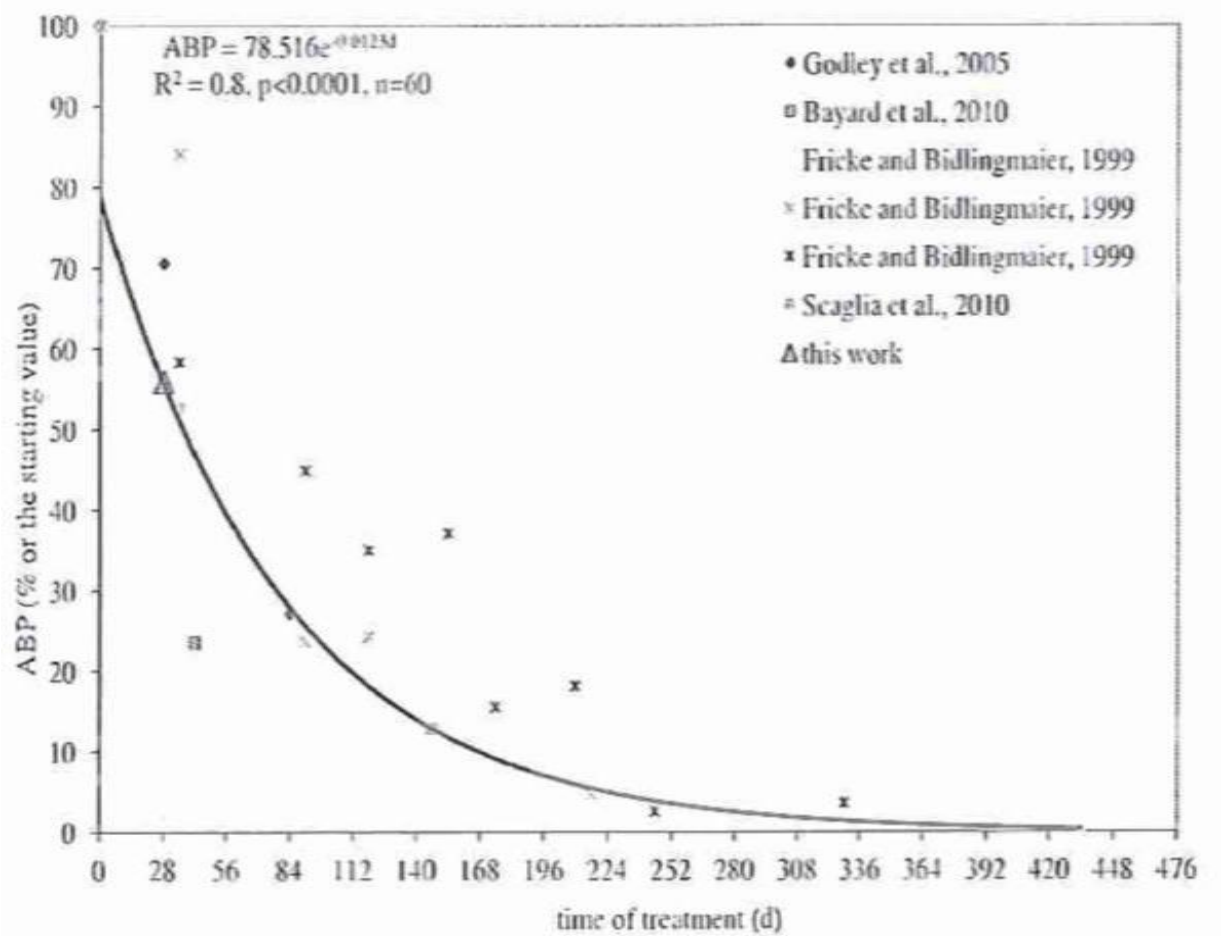
Uz GIO, u mehaničko-biološkoj obradi komunalnog otpada kao sekundarni produkt dobivamo i biološku frakciju koja sadrži određen energetski potencijal. Taj energetski potencijal moguće je iskoristiti odlaganjem biološke frakcije na bioreaktorska odlagališta na kojima bi nastajao bioplin koji je moguće upotrijebiti u svrhu stvaranja električne energije.

U ŽCGO „Marišćina“ predviđena je izgradnja energane na bioplin koji nastaje na kontroliranom bioreaktorskom odlagalištu. Na taj način bi se iskoristila ostatna biološka frakcija koja je još reaktivna nakon procesa mehaničko-biološke obrade. Sastav te frakcije je međutim nepoznat pa se ne može procijeniti količina bioplina. No, iz razgovora s odgovornim osobama ŽCGO „Marišćina“, poznato je da se u centru očekuje električna snaga postrojenja na bioplin od oko 500 kW (uz godišnji rad od 8000 h) iz čega se može izračunati količina električne energije koja bi bila dobivena iz sirovog (neobrađenog) bioplina sa bioreaktorskog odlagališta:

$$500\ \text{kW} \times 8000\ \text{h/god} = \mathbf{4.000.000\ kWh_e/god} = \mathbf{4\ MWh_e/god}$$

No, kako se za vrijeme anaerobne digestije otpada na bioreaktorskom odlagalištu biološki potencijal materijala za odlaganje smanjuje, tako se smanjuje i bioplinski potencijal, tj. količina bioplina koja bi mogla nastati na odlagalištu.

Na Slici 31., moguće je vidjeti pad bioplinskog potencijala (ABP, engl. *Anaerobic Biogasification Potential*), tj. količine bioplina koja bi nastala anaerobnom digestijom na bioreaktorskom odlagalištu ovisno o vremenu prethodne aerobne biološke obrade otpada:



Slika 31. Prikaz preostalog bioplinskog potencijala nastalog anaerobnom digestijom (početni uzorak imao bi ABP = 100 %) [44]

Iz Slike 31. može se uočiti da je za vrijeme obrade od 12 do 15 dana (primjenjivano u ŽCGO „Marišćina“) optimalno jer vrijednost ABP-a iznosi oko 66 % od ukupnog bioplinskog potencijala.

4. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom su radu izračunate teorijske vrijednosti izlaznih produkata energetskog iskorištavanja otpada na temelju podataka analize fizikalnog i kemijskog sastava komunalnog otpada u Županijskom centru za gospodarenje otpadom „Marišćina“.

U prvom slučaju određivana je teorijska energetska vrijednost odlagališnog plina nastalog anaerobnom razgradnjom otpada koji bi se sav odlagao. Otpad se pritom ne bi tretirao nikakvom metodom obrade već bi se direktno slao na odlagalište otpada, u kojem bi se pomoću cijevi sakupljao nastali odlagališni plin. Pomoću Buswell-ove formule određen je sastav nastalog plina, na temelju podataka o sastavu, količini komunalnog otpada i količine suhe tvari koja se u njemu nalazi. Pomoću literaturnih podataka i pretpostavki dobivena je potencijalna energija bioplina od 146.809.821,2 kWh, tj. 146.809,8 MWh.

Ukoliko bi se dobiveni bioplin iskorištavao u kogeneracijskom postrojenju sa učinkovitošću od 35 % [35] tada bi bilo moguće dobiti 51.383.437,42 kWh, tj. 51.383,4 MWh električne energije koja bi se mogla prodavati u mrežu. Zbog udaljenosti ŽCGO „Marišćina“ od okolnih naselja, potencijalno dobivena toplinska energija iz kogeneracijskog postrojenja ne bi se mogla primjenjivati te bi ovakav slučaj predstavljao ekonomski neisplativu opciju.

U drugom slučaju određivana je energetska vrijednost goriva iz otpada koje se dobije kao produkt mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada, također iz ŽCGO „Marišćina“. Mehaničko-biološkom obradom otpada dobiva se više izlaznih produkata – mehanički izdvojene materijale je moguće odmah oporabiti, gorivo iz otpada se koristi kao alternativni izvor goriva u drugim procesima (npr. cementare) ili kao sekundarna sirovina, a biološka komponenta se šalje na daljnje iskorištavanje (proizvodnja bioplina pomoću anaerobne digestije na kontroliranom bioreaktorskom odlagalištu).

Pomoću podatka o količini GIO kao produkta mehaničko-biološke obrade otpada te njegove ogrjevne vrijednosti, izračunata je energetska vrijednost istog te ona iznosi 168.055.555,6 kWh, tj. 168.055,555MWh. Energetska vrijednost goriva iz otpada može se iskoristiti u industrijskim pećima cementara ili u ložištima termoelektrana kao zamjena za fosilna goriva.

Biološka frakcija odložena na kontrolirano bioreaktorsko odlagalište ima određen energetski potencijal za koji je predviđeno iskorištavanje pomoću energane na bioplin

prosječne snage 500 kW. Uz rad od 8000 h godišnje, potencijalna električna energija dobivena ovim načinom iznosila bi 4.000.000 kWh/god, tj. 4.000 MWh/god.

Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da je potencijalna energija iz goriva iz otpada, dobivenog pomoću mehaničko-biološke obrade otpada veća nego kada bismo isti otpad odlagali na odlagalište i zatrpavali te iz njega uzimali odlagališni plin.

Gorivo iz otpada ima veći energetski potencijal zbog prethodne mehaničke i biološke obrade, nego što je to slučaj kod proizvedenog odlagališnog plina. Ukoliko bismo otpad samo odložili na odlagalište došlo bi do toga da dio ugljika koji se nalazi u otpadu postane inertan zbog reakcija koje se odvijaju na odlagalištu te kao rezultat dobivamo nižu teorijsku energiju odlagališnog plina. Kod mehaničko-biološke obrade se ugljik u otpadu iskorištava u većoj mjeri, iako je i u ovom procesu prisutan određeni gubitak zbog biološkog procesa sušenja i prethodne mehaničke obrade. Također, sekundarnom obradom (mehaničkom rafinacijom) komunalnog otpada želi se već predobrađenom, biosušenom otpadu dodatnim tretmanom poboljšati svojstva i karakteristike te ga na taj način pripremiti za daljnju upotrebu kao sekundarnu sirovinu ili kao alternativno gorivo iz otpada. Na taj način pripremljeno alternativno gorivo može imati kaloričnu vrijednost od 16 do 18 MJ/kg, te se može upotrijebiti kao gorivo u termoelektranama, cementarama i sl.

5. ZAKLJUČAK

Suvremene tehnike jamče potpuno iskorištenje otpada, ali samo uz uvjet razumnog i odgovornog postupanja s otpadom. Na taj način će se osigurati veliki pozitivni ekološki prinosi, a ujedno smanjiti troškovi postupanja s otpadom.

Postoji više različitih metoda obrade otpada od kojih je mehaničko-biološka obrada otpada jedna od suvremenijih i boljih te jednostavnijih za primjenu. MBO (eng. Mechanical Biological Treatment - MBT) koncept zbrinjavanja otpada razvio se u Njemačkoj kao posljedica težnje da se reducira količina biorazgradivog otpada koji je do tada odlagan na odlagalištima te da se sustavom automatskog razdvajanja omogući povrat korisnih sirovina iz otpada. Ubrzo se MBO tehnologija proširila i na ostale europske zemlje Austriju, Italiju, Švicarsku, Francusku, Veliku Britaniju i druge.

Postrojenja koja se služe mehaničko biološkom metodom obrade otpada temelje se na mehaničkoj obradi komunalnog otpada koji sadrži biološku komponentu, tj. bio-otpad (30 - 40 %). Biorazgradiva komponenta komunalnog otpada vrlo je reaktivna te ju je potrebno zbrinuti i obraditi na adekvatan način kako ne bi došlo do ispuštanja nastalih plinova u atmosferu i gubitka potencijalne energije.

Kako je Hrvatska još u začetku razvoja proizvodnje i korištenja bioplina nastalog na odlagalištima otpada te same primjene mehaničko-biološke obrade otpada, u ovom radu prikazan je teoretski potencijal dobivanja energije iz otpada na primjeru Županijskog centra za gospodarenje otpadom Marišćina u Primorsko-goranskoj županiji, koji predstavlja prvi projekt takve vrste u Republici Hrvatskoj.

Na temelju dobivenih rezultata može se vidjeti da u Primorsko-goranskoj županiji postoji velik energetski potencijal za iskorištavanje otpada, naročito u slučaju mehaničko-biološke obrade. Jedinstveni županijski centar sa mehaničko-biološkim načinom obrade otpada riješava probleme zbrinjavanja otpada Županiji te omogućava energetsko iskorištavanje otpada i uporabu sekundarnih produkata obrade otpada. Istovremeno bi se troškovi jedinica lokalne samouprave trebali smanjiti zbog rješavanja vlastitih problema s odlagalištima.

Takav integralni sustav gospodarenja otpadom Primorsko-goranske županije u potpunosti je usklađen sa *Strategijom* i *Planom gospodarenja otpadom Republike Hrvatske* i visokim standardima koje propisuje Europska unija. Izgradnjom ŽCGO-a „Marišćina“

također se omogućava brz i kvalitetan pristup sanaciji postojećeg stanja te se energetski oporabljuje otpad i dobiva korisna energija iz njega, kao i sekundarni produkt koji se može primijeniti kao gorivo u cementarama, termoelektranama i sl. Na taj način se rješava problem gospodarenja otpadom za 300.000 stanovnika za nekoliko narednih generacija.

Na nacionalnoj razini, izgradnjom županijskih centara za gospodarenje otpadom i energetskim iskorištavanjem otpada, Hrvatska bi riješila probleme nezbrinutih odlagališta otpada te istovremeno iskoristila potencijal za energetsku oporabu otpada. Također u obzir treba uzeti i niz različitih društveno-gospodarskih posljedica koje s time dolaze, kao što su povećanje zaposlenosti (tj. otvaranje novih i zadržavanje postojećih radnih mjesta) te povećanje lokalne i regionalne gospodarske aktivnosti. Iako na nacionalnoj razini pokazuju mali potencijal za ostvarenje ciljeva energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije, županijski centri mogu pomoći u ostvarenju drugih izazova poput onih iz Protokola iz Kyota i Nitratne direktive te općenitog rješavanja problema otpada na regionalnoj/lokalnoj razini i istovremeno time utjecati na energetsku bilancu.

LITERATURA

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives
2. Kalambura, S., Krička, T., Kalambura, D., *Gospodarenje otpadom*, Zagreb, Veleučilište Velika Gorica, 2012.
3. Narodne novine, *Uredba o kategorijama , vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada*, Narodne novine d.d., Zagreb, 2004.
4. Agencija za zaštitu okoliša, *Izvješće o komunalnom otpadu za 2012. godinu*, Zagreb, 2014.
5. Milanović Z., Radović S., Vučić V., *Otpad nije smeće*, Gospodarstvo i okoliš, 2003.
6. Narodne novine, *Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske*, Narodne novine d.d., Zagreb, 2005.
7. Narodne novine, *Zakon o održivom gospodarenju otpadom*, Narodne novine d.d., Zagreb, 2013.
8. Stanić, Z., Čerškov M., *Analiza mogućnosti ekološkog zbrinjavanja otpada u termoelektranama*, 8. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom, Zagreb, 2004.
9. Narodne novine, *Pravilnik o načinima i uvjetima termičke obrade otpada*, Narodne novine d.d., Zagreb, 2007.
10. Bogdan Ž., *Analiza tehnologija za energetsko iskorištavanje krutog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
11. Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration, 2006.
12. Sora M.J., *Incineration overcapacity and waste shipping in Europe: the end of the proximity principle?*, Global Alliance for Incinerator Alternatives, Fundacio Ent, 2013.
13. Ruth L.A., *Energy from municipal solid waste: A comparison with coal combustion technology*, Progress in Energy and Combustion Science, **24**(1998.), str. 545-564.
14. Labudović B., *Osnovne primjene biomase*, Energetika Marketing, Zagreb, 2012.
15. Leskens M., Van Kessel L.B.M., Van den Hof P.M.J., Bosgra O.H., *Model predictive control of municipal solid waste plants*, International Workshop on Assessment & Future Directions of NMPC, Pavia, Italy, 2005.

16. Cheng, J., *Biomass to Renewable Energy Processes*, FL:CRC Press, Boca Raton, 2010.
17. Draft of a German Report for the creation of a BREF-document „waste incineration“, UBA, Umweltbundesamt, 2001.
18. Yang H, Yan R, Chen H, Zheng C, Lee D.H., Liang D.T., *In-depth investigation of biomass pyrolysis based on the three major components: hemicellulose, cellulose and lignin*, Energy & Fuels, **20** (2006.) str. 388-393.
19. Lettinga G., Rebac S. i Zeeman G., *Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment, Trends in Biotechnology*, **19** (2001.), str. 363-370.
20. Šljivac D., Šimić Z., *Obnovljivi izvori energije s osvrtom na gospodarenje*, Grafika, Osijek, 2008.
21. Sembiring K.C., Rinaldi N., Simanungkalit S.P., *Bio-oil from Fast Pyrolysis of Empty Fruit Bunch at Various Temperature*, Energy Procedia, **65** (2015.), str. 162-169.
22. http://pacificpyrolysis.com/technology.html (pristup 9. lipnja 2015.)
23. Raghab S.M., Abd El Meguid A.M., Hegazi H.A., *Treatment of leachate from municipal solid waste landfill*, Housing and Building National Research Center, **9** (2013.), str. 187-192.
24. http://www.trevi-env.com/en/technique_metal_removal.php (pristup 03. lipnja 2015.)
25. http://www.ubbessex.co.uk/technology/ (pristup 10. lipnja 2015.)
26. Kovačević V., *Mehaničko-biološka obrada kao moguće rješenje zbrinjavanja komunalnog otpada Republike Srbije*, Strategic Waste Management Planning in SEE, Middle east and Mediterranean Region, 2009.
27. Di Maria F., Postrioti L., Micale C., Sordi A., Marconi M., *Energy recovery from low temperature heat produced during aerobic biological treatment*, Energy Procedia, **45** (2014.), str. 81-90.
28. Curry N., Pillay P., *Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment*, Renewable Energy, **41** (2012.), str. 200-209.
29. C.E. Manyi-Loh, Mamphweli S.N., Meyer E.L., Okoh A.I., Makaka G., Simon M., *Microbial Anaerobic Digestion (Bio-Digesters) as an Approach to the Decontamination of Animal Wastes in Pollution Control and the Generation of Renewable Energy*, Int. J. Environ. Res. Public Health,**10** (2013.) str. 4390-4417.
30. Schnürer A., Jarvis Å., *Microbiological Handbook for Biogas Plants*, Swedish Waste Management U2009:03, Swedish Gas Centre Report 207, 2010.

31. Labudović B., *Obnovljivi izvori energije*, Energetika Marketing, Zagreb, 2002.
32. Eriksson O., *Environmental Technology Assessment of Natural Gas Compared to Biogas*, Natural Gas, Primoz Potocnik (Ed.), InTech, 2010.
33. Rutz D., Mergner R., Janssen R., *Održivo korištenje toplinske energije iz bioplinskih postrojenja*, WIP Renewable Energies, Njemačka, 2012.
34. Kumar S., *Biogas*, Intech, Rijeka, 2012.
35. Al Seadi T., Rutz D., Prassl H., Köttner M, Finsterwalder T., Volk S., Jansse R., *Priručnik za bioplin (Biogass for Eastern Europe)*, Intelligent Energy, Njemačka, 2008.
36. Vijay V.K., Chandra R., Subbarao M.V., Kapdi S.S., *Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from biomass for rural automotive applications*, The 2nd Joint International Conference on „Sustainable Energy and Environment“, 2006.
37. Narodne novine, *Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. do 2015.godine*, Narodne novine d.d., Zagreb, 2007.
38. Kalea M., *Obnovljivi izvori energije – energetski pogled*, Kiklos, Zagreb, 2014.
39. Wukovits W., Drljo A., Hilby E., Frield A., *Integration of Biohydrogen Production with Heat and Power Generation from Biomass Residues*, Chemical Engineering Transactions, **35** (2013), str. 1003-1008.
40. Filipović I., Lipanović S., *Opća i anorganska kemija, 1. dio*, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
41. Akinshina N., Daisuke N., Toderich K., Azizov A., Yasui H., *Anaerobic Degradation of Halophyte Biomass for Biogas Production*, Journal of Arid Land Studies, **22** (2012.), str. 227-230.
42. Rajaram V., Siddiqui F.Z., Khan M.E., *From Landfill Gas to Energy, Technologies and Challenges*, CRC Press, Nizozemska, 2012.
43. Kigozi R., Aboyade A., Muzenda E., *Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock,* Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engg., **1** (2014), str.107-114.
44. Scaglia, B., Salati S., Di Gregorio A., Carrera A., Tambone F., Adani, F., *Short Mechanical Biological treatment of municipal solid waste allows landfill impact reduction saving waste energy content*, Bioresource Technology, **143** (2013.), str. 131-138.

ŽIVOTOPIS

Dinko Đurđević rođen je 8. studenog 1991. godine u Zagrebu. Osnovnu školu pohađao je u Zagrebu (1998.-2006.). 2006. godine upisuje Prvu gimnaziju, opći smjer u Zagrebu. Iste godine postaje prvak Hrvatske u badmintonu. 2010. godine maturira i upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Ekoinženjerstvo u Zagrebu. 2013. završava preddiplomski studij Ekoinženjerstvo te dobiva titulu Bakalaureus ekoinženjerstva (Ekoinženjer).

Govori engleski, njemački jezik i francuski jezik.