

Kriteriji vrednovanja goriva iz otpada

Donđivić, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:149:813493>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Hrvoje Donđivić

Kriteriji vrednovanja goriva iz otpada

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: **prof. dr. sc. Igor Sutlović**

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Igor Sutlović, FKIT

prof. dr. sc. Veljko Filipan, FKIT

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, FKIT

Zagreb, rujan 2019.

Srdačno se zahvaljujem prof. dr. sc. Igoru Sutloviću na stručnim savjetima i vodstvu tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se partnerici, obitelji i kolegama na bezuvjetnoj podršci tijekom svih godina studiranja.

Hrvoje

SADRŽAJ

Sažetak.....	1
Abstract.....	2
1. UVOD.....	3
2. TEORIJSKI DIO	4
2.1. Otpad kao energent.....	4
2.2. Kruto oporabljeno gorivo.....	4
2.2.1 Standardi za kruto oporabljeno gorivo	5
2.2.1.1. Sustav kontrole kvalitete	5
2.2.1.2. Sigurnost	5
2.2.1.3. Specifikacija i klasifikacija	7
2.2.1.4. Određivanje udjela biomase.....	8
2.2.1.5. Metode za uzorkovanje.....	9
2.2.2. Europsko zakonodavstvo	9
2.3. Mehaničko – biološka obrada kao proizvođač goriva iz otpada	11
3. PRIMJERI IZ PRAKSE.....	15
3.1. Ujedinjeno Kraljevstvo	15
3.1.1. Uvod u istraživane modele.....	15
3.1.2. Izračun kalorijske vrijednosti korištenih goriva.....	16
3.1.3. Opis istraživanja	18
3.1.4. Rezultati modeliranja.....	20
3.2. Austrija	25
3.3 Grčka	31
3.4. Republika Hrvatska	33
3.3.1. Proizvodnja i iskorištavanje SRF-a	34
4. ZAKLJUČAK	36
5. LITERATURA.....	37

Sažetak

Problem gospodarenja otpadom, u novije vrijeme, od rastućeg je značaja. Svjetsko i europsko zakonodavstvo sve se više okreće ka održivom pristupu strogo se držeći sad već uvriježene hijerarhije gospodarenja otpadom. Jedno od rješenja problema sve veće generacije otpada nalazimo u energetskej uporabi otpada. Prema podacima iz 2018. godine, u svijetu postoji otprilike 1180 postrojenja za energetske uporabu otpada. Većina postrojenja nalazi se u Europi, Sjevernoj Americi te istočnoj Aziji. Pod gorivo iz otpada, u literaturi poznato kao RDF, podrazumijevao se sav otpad koji se koristi u energetske svrhe. Međutim, bez ikakve standardizacije i klasifikacije, otpad u takvom obliku nije predstavljao zadovoljavajući izvor energije. U svrhu rješavanja tog problema razvijeni su standardi kako bi se takvo gorivo jednoznačno opisalo i reguliralo. Goriva koja su proizvedena prema zahtjevima europskog standarda za gorivo iz otpada, nazvana su 'Kruta uporabljena goriva', u literaturi poznata pod kraticom SRF. Uspostavljanjem odgovarajuće standardizacije stvorena je podloga za razvoj moderne tehnologije energetske uporabe otpada koja za rezultat ima generaciju energije i redukciju volumena otpada koji se odlaze na odlagalištima.

Ključne riječi: GIO, kruto uporabljeno gorivo, gorivo iz otpada, energetske uporaba

Abstract

The management of waste, in recent times, is of growing importance. The world and European legislation is increasingly turning towards a sustainable approach by strictly following the now-rooted hierarchy of waste management. One of the solutions to the problem of the growing generation of waste is the energy recovery. According to the 2018 data, there are approximately 1180 energy recovery facilities in the world. Most of the plants are located in Europe, North America and East Asia. Refuse derived fuel, in the literature known as RDF, implies all waste used for energy purposes. However, without any standardization and classification, fuel from waste in such a form did not constitute a satisfactory source of energy. In order to address this problem, standards have been developed to uniquely describe and regulate such fuel. Fuels produced according to the requirements of the European fuel Standard from the waste, are called ' Solid Recovered Fuels ', in the literature known under the abbreviation SRF. The establishment of appropriate standardization creates a basis for the development of modern energy recovery technology which results in both generation of energy and a reduction in the volume of waste that is landfilled.

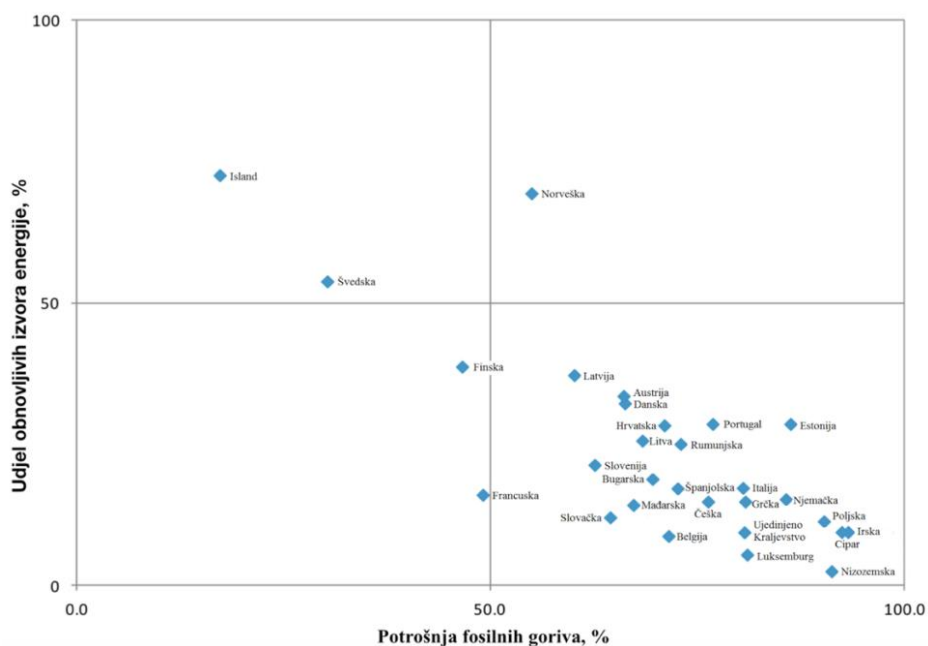
Keywords: SRF, RDF, solid recovered fuel, fuel from waste, energy recovery

1. UVOD

Količina svakodnevno generiranog krutog komunalnog otpada ubrzano raste kao posljedica sve većeg rasta populacije i s tim neizbježne urbanizacije. Predviđanja su da će količina generiranog krutog komunalnog otpada porasti sa sadašnjih 3.5 milijuna tona godišnje na 6.1 milijun tona godišnje do 2025. godine [1].

Europsko zakonodavstvo jasno je po pitanju hijerarhije upravljanja otpadom. Na prvom mjestu je prevencija nastanka otpada, zatim smanjenje nastanka, ponovna uporaba, materijalna uporaba, odnosno reciklaža, energetska uporaba, te na zadnjem mjestu odlaganje na odlagalištima. U Europi, prema podacima iz 2013. godine, na 481 kg otpada generiranog po glavi stanovnika, recikliralo se 130 kg, 122 kg se spalilo, a 147 kg se odložilo na odlagališta [2]. Takvi podaci nisu prihvatljivi i ukazuju na probleme vezane za upravljanje otpadom. Kao jedno od mogućih rješenja tog problema, sve se češće predlaže iskorištavanje otpada kao energenta, odnosno tehnologija «otpad u energiju», (engl. waste to energy).

Kod većine europskih zemalja, fosilna goriva još su uvijek zastupljena u velikoj mjeri. Kod njih 24 od ukupno 29, fosilna goriva predstavljaju više od 60% izvora energije [3]. U 2009., kod otprilike 25% zemalja električna energija proizvodila se isključivo iskorištavanjem ugljena [4]. Na svjetskoj razini situacija je slična. Potrošnja energije dobivene iz obnovljivih izvora je svega 19.3%, dok je potrošnja energije dobivene iz fosilnih goriva na visokih 78.4% [5]. Implementacijom novih tehnologija među kojima je i korištenje otpada kao energenta, uz smanjenje potrošnje fosilnih energenata, donekle bi se riješio i problem zbrinjavanja sve veće generacije otpada.



Slika 1. Prikaz udjela fosilnih goriva i obnovljivih izvora energije u europskim zemljama

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Otpad kao energent

Kao energent može se koristiti svaki otpad koji ima određenu kalorijsku vrijednost. To je široki spektar krutog i tekućeg otpada iz kućanstva i ugostiteljstva, mulj iz uređaja za pročišćavanje voda, otpadno drvo, visoko-kalorijske frakcije zaostale nakon mehaničko-fizikalne ili mehaničko-biološke obrade, otpad iz klaonica, otpad iz autoindustrije te otpad iz prehrambene industrije. U literaturi takvo gorivo poznato je kao 'Gorivo iz otpada' ili skraćeno GIO (engl. Refuse Derived Fuel, RDF). Gorivo iz otpada se u velikoj mjeri sastoji od zapaljivih materijala kao što su biološki otpad, plastika, papir i drvo. Staklo i drugi nezapaljivi materijali nastoje se ukloniti prije procesa usitnjavanja. Jedinstvena definicija takvog energenta na žalost još uvijek ne postoji, kao ni jedinstvena specifikacija i karakterizacija. Sastav se uglavnom definira prema potrebama naručitelja i varira od industrije do industrije. Kao takvo, gorivo iz otpada se uglavnom koristi u cementnoj industriji, pogonima za proizvodnju električne energije, kao gorivo za zagrijavanje vode za grijanje kućanstava te kao dopunski energent u drugim postrojenjima na klasična fosilna goriva. Međutim, takvi energenti ne predstavljaju zadovoljavajuće rješenje bez odgovarajuće standardizacije. Energenti proizvedeni bez kontrole odgovarajućeg standarda često ne zadovoljavaju okolišne zahtjeve kao ni one za sastav sirovine. To predstavlja rizik kako za zdravlje proizvođača i krajnjih korisnika, tako i za opremu koja takav energent koristi. Posljednjih godina, CEN/TC343, odnosno tehnički odbor 343 europskog odbora za standardizaciju radio je na postavljanju standarda za gorivo izvedeno iz otpada. Takva goriva, koja su proizvedena prema zahtjevima standarda, nazvana su 'Kruta oporabljena goriva' (engl. Solid recovered fuels, SRF).

2.2. Kruto oporabljeno gorivo

Korištenjem tehnika kontrole kvalitete te proizvodnjom prema zahtjevima standarda, proizvođač garantira stabilnost, sigurnost i uporabljivost proizvedenog goriva. Zahtjevi za klasifikaciju krutog oporabljenog goriva opisani su u standardu EN15359. Proizvodnjom prema tom standardu, kruta oporabljena goriva jasno su odvojena od ostalih goriva izvedenih iz otpada. To je ujedno i glavna razlika između 'goriva iz otpada' poznatijeg kao RDF i 'krutog oporabljenog goriva' poznatijeg kao SRF. Kruto oporabljeno gorivo je ciljano proizvedeno kao energent koji udovoljava zahtjevima odgovarajućeg standarda dok je RDF uglavnom otpad koji je zaostao nakon procesa obrade otpada i ne podliježe odgovarajućem standardu. Uzimajući navedene postavke u obzir, Europsko udruženje za goriva oporabljena iz neopasnog otpada (engl. European association for recovered fuel from solid non-hazardous waste, ERFO), dalo je sljedeću definiciju krutog oporabljenog goriva: «Kruto oporabljeno gorivo je gorivo izvedeno iz neopasnog otpada, proizvedeno u skladu sa zahtjevima europskih standarda za kruta oporabljena goriva, točnije u skladu s EN15359.» [6].

2.2.1 Standardi za kruto oporabljeno gorivo

Sve države članice europske unije, ukoliko žele gorivo iz otpada nazvati krutim oporabljenim gorivom, dužne su usvojiti ili zamijeniti postojeće standarde onima izrađenima od strane tehničkog odbora 343.

Navedeni standardi obuhvaćaju sljedeće stavke:

- sustav kontrole kvalitete
- sigurnost
- specifikacija i klasifikacija
- određivanje udjela biomase
- uzorkovanje i obrada uzorka
- kemijsko ispitivanje
- fizikalno ispitivanje

2.2.1.1. Sustav kontrole kvalitete

Cilj standarda EN15358 je razvoj i uspostava sustava kontrole kvalitete za proizvodnju krutog oporabljenog goriva koji za zadatak ima kontinuirano poboljšanje procesa te udovoljavanje zahtjevima navedenog standarda [6]. Također, ovaj standard je osnova za uspostavljanje sustava kontrole kvalitete za organizaciju koja prije nije imala uveden takav sustav. Naglasak ovog standarda je na definiranju dokumentacije koja će se koristiti za interne procese te za komunikaciju relevantnih informacija svim sudionicima s ciljem dostignuća kvalitete propisane ostalim standardima. Ovaj standard regulira i podrijetlo i svojstva ulazne sirovine.

2.2.1.2. Sigurnost

Rizici vezani uz rukvanje krutim oporabljenim gorivom opisani su u tehničkom izvješću CEN/TR 15441. U izvješću je navedeno da zaposlenici mogu biti izloženi raznim biološkim agensima, kemijskim supstancama i drugim tvarima kao što su teški metali i lebdeće čestice. Također, kao jedan od rizika navedena je opasnost od požara. U tablici 1. navedeni su zdravstveni rizici povezani sa različitim stadijima životnog ciklusa krutog oporabljenog goriva.

Tablica 1. Povezanost zdravstvenih rizika sa stadijima životnog ciklusa goriva

Stadij	Biološki agensi	Prašina/Fina prašina	Alergene kemikalije	VOC	Rizik od požara
<i>Proizvodnja</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>
<i>Skladištenje</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>
<i>Rukovanje</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>moguće</i>
<i>Trgovanje</i>	<i>moguće</i>	<i>moguće</i>	<i>moguće</i>	<i>moguće</i>	<i>moguće</i>
<i>Uzorkovanje</i>	<i>da</i>	<i>moguće</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>moguće</i>
<i>Analiza</i>	<i>da</i>	<i>moguće</i>	<i>da</i>	<i>da</i>	<i>moguće</i>

Biološki agensi uključuju mikroorganizme kao što su bakterije, gljive (kvasce i plijesni), viruse, genetski modificirane mikroorganizme, stanične kulture te endoparazite koji mogu uzrokovati infekciju, alergiju ili otrovanje [23]. Kako različiti produkti mikrobnog metaboliza i razgradnje također mogu uzrokovati reakcije kod ljudi, takve tvari također se smatraju biološkim agensima. Primjer takvih tvari su miktoksini te endotoksini.

Prašina, pogotovo fina prašina generira se prilikom rukovanja i mehaničke obrade materijala. Također, prašina služi kao apsorbirajuća tvar za razne kemijske supstance kao što su teški metali i organski spojevi te mikroorganizme. Fina prašina veličine manje od 10 mirometara je posebno opasna jer ljudski dišni sustav ne može zaustaviti toliko sitne čestice. Općenito vrijedi, što su čestice manje, dublje penetriraju u pluća. Kronična oboljenja kao što su kardiovaskularne bolesti usko su vezana uz izlaganje finoj prašini [23].

Hlapljivi organski spojevi također se vežu uz rukovanje krutim oporabljenim gorivom. Terpeni i drugi hlapljivi organski spojevi prirodno se javljaju kod raspada organske tvari i česta su pojava u mehaničko – biološkim i drugim postrojenjima vezanim uz otpad[23].

Samo-zagrijavanje se javlja kad kruti organski materijal, bilo baliran bilo raspršen, reagira s kisikom. Uskladišteno kruto oporabljeno gorivo, posebno ono s visokim udjelom lako razgradljivog ugljika, može se biološki dalje razgrađivati što dovodi do proizvodnje plina, samozagrijavanja i, u konačnici, samozapaljenja [23].

Propisane primarne mjere za redukciju su [23]:

- odvajanje različitih procesa obrade (skladištenje, usitnjavanje, ...)
- usis bioaerosola i prašine na prijelazima procesa
- smanjenje visine pada s konvejera
- mjere za uklanjanje buke na izvoru

Propisane sekundarne mjere za redukciju rizika su [23]:

- tehničke mjere kao što su ugradnja ventilacije s filtracijom mikroorganizama u kabine i upravljačke komore, zatvoreni spremnici za razvrstane materijale
- organizacijske mjere kao što su smanjenje udjela ručnog sortiranja, češće čišćenje kabina i upravljačkih komora, redoviti servis ventilacijskog sustava, brzo procesuiranje otpada bez duljeg skladištenja
- osobne mjere kao što su prigodna zaštitna oprema i redoviti liječnički pregledi zaposlenika

2.2.1.3. Specifikacija i klasifikacija

Standard EN15359 predstavlja jezgru standardizacije krutog oporabljenog goriva. Taj standard zahtjeva specifikaciju kako tehničkih, tako i okolišnih parametara. Dokumenti o uzorkovanju, određivanju udjela biomase, kalorijskoj vrijednosti, određivanju vlage te udjelu pepela, neophodni su za implementaciju EN15359 standarda [6]. Implementacijom tog standarda, proizvođač može prikazati pouzdanu i standardiziranu informaciju o gorivu kojeg proizvodi. Također, proizvođač može kategorizirati proizvedeno gorivo prema šabloni za klasifikaciju krutog oporabljenog goriva. Ta kategorizacija ima za cilj olakšavanje komunikacije između proizvođača, kupca te drugih zainteresiranih skupina.

Klasifikacija uzima u obzir tri glavne kategorije: kalorijska vrijednost koja predstavlja ekonomski aspekt, udio klora koji predstavlja tehnički aspekt te udio žive koji predstavlja okolišni aspekt. Koristeći te tri glavne skupine olakšana je procjena sveukupne kvalitete goriva. Također, klasifikacija proizvedenog goriva prema navedenim kriterijima nije jednokratni proces. Sukladno zahtjevima standarda, kategorizacija se mora provoditi na 12-mjesečnoj bazi. Veličina uzorka također je propisana i jednaka je jednoj desetini proizvedene količine ukoliko je ukupna proizvodnja manja od 15 000 tona. U slučaju kad je proizvodnja veća, uzorak je fiksnih 1 500 tona [6].

Tablica 2. Klasifikacija goriva prema neto kalorijskog vrijednosti

Klasifikacijska karakteristika	Statistička metoda	Mjerna jedinica	Razredi				
			1	2	3	4	5
<i>Neto kalorijska vrijednost (NCV)</i>	<i>Mean</i>	<i>MJ/kg</i>	<i>>= 25</i>	<i>>=20</i>	<i>>=15</i>	<i>>=10</i>	<i>>=3</i>

Tablica 3. Klasifikacija goriva prema udjelu žive

Klasifikacijska karakteristika	Statistička metoda	Mjerna jedinica	Razredi				
			1	2	3	4	5
<i>Živa (Hg)</i>	<i>Median</i>	<i>mg/MJ</i>	<i><= 0.02</i>	<i><= 0.03</i>	<i><= 0.08</i>	<i><= 0.15</i>	<i><= 0.50</i>
	<i>80-i percentil</i>	<i>mg/MJ</i>	<i><=0.04</i>	<i><=0.06</i>	<i><=0.16</i>	<i><=0.30</i>	<i><=1.00</i>

Tablica 4. Klasifikacija goriva prema udjelu klora

Klasifikacijska karakteristika	Statistička metoda	Mjerna jedinica	Razredi				
			1	2	3	4	5
<i>Klor (Cl)</i>	<i>Mean</i>	<i>%</i>	<i><= 0.2</i>	<i><= 0.6</i>	<i><= 1.0</i>	<i><= 1.5</i>	<i><= 3</i>

2.2.1.4. Određivanje udjela biomase

Poznata je činjenica da kruto oporabljeno gorivo doprinosi smanjenju emisije stakleničkih plinova tako što, kad se koristi kao dopuna fosilnim gorivima, smanjuje uporabu istih i za posljedicu ima smanjenje emisije CO₂ u atmosferu. Međutim, kruto oporabljeno gorivo se ne sastoji isključivo od biomase, te je određivanje udjela iste dobro kako bi se vidio pravi doprinos smanjenju stakleničkih plinova.

Za određivanje udjela biomase, norma EN15440 opisuje tri metode.

- Metoda selektivnog otapanja bazirana na svojstvu biomase da se može otapati u sulfatnoj kiselini ili otopini vodikovog peroksida
- Metoda ručnog sortiranja koja je pogodna za uzorke s veličinom čestica > 10mm
- 14C metoda koja je pogodna za uzorke svih vrsta goriva

Metoda 14C, doduše, nije validirana za kruto oporabljeno gorivo. Međutim, određivanje sastava biomase ovom metodom je bazirano na dobro uspostavljenoj analitičkoj metodi određivanja starosti uzorcima koji sadrže ugljik. Problemi s prve dvije metode se javljaju kod udjela biomase manjih od 5% i većih od 95% gdje prisustvo neregularnih materijala može značajno poremetiti krajnji rezultat. Taj problem riješio bi se validiranjem 14C metode [6].

2.2.1.5. Metode za uzorkovanje

Kruto oporabljeno gorivo znatno se razlikuje od drugih vrsta goriva. Za razliku od ugljena, kruto oporabljeno gorivo je prilično heterogeno, bilo da govorimo o veličini i obliku čestica ili o njegovom sastavu. Stoga, i metode uzorkovanja će se znatno razlikovati.

CEN/TC343 razvio je nekoliko metoda za uzorkovanje tako specifičnog goriva [6].

- Metoda za uzorkovanje prema EN15442 prema kojoj veličina uzorka ne smije biti veća od 1500 tona. Također, uzorkovanje će se obavljati tako da postoji minimalno 24 manja uzorka, odnosno kombinirani uzorak će se sastojati od minimalno 24 manja uzorka.
- Metoda za pripravu laboratorijskog uzorka prema EN15443 koja opisuje metode pripreme laboratorijskog uzorka iz kombiniranog uzorka.
- Metoda za pripravu testnog uzorka iz laboratorijskog uzorka prema EN15413.

2.2.2. Europsko zakonodavstvo

Zaštita okoliša i očuvanje zdravlja prioriteta su nadležnih tijela europske unije. Glavni ciljevi koji se tiču zakonodavnog okvira EU s obzirom na otpad su sljedeći:

- Implementacija politike i mjera koje će dovesti do smanjenja količine komunalnog otpada u skladu s načelom prevencije.
- Postepeno smanjenje dopuštenih količina otpada koji se može odložiti na odlagalište, s naglaskom na biorazgradivi otpad koji sadrži visoko-kalorične frakcije.
- Implementacija strože regulative za spalionice otpada i druge tipove toplinskih postrojenja (cementna industrija, termoelektrane) gdje se koristi otpad kao pomoćni ili glavni energent.

Specifične mjere koje za cilj imaju redukciju količine otpada za odlaganje su odvajanje otpada na njegovom izvoru, mehanička i biološka obrada, proizvodnja krutog oporabljeno goriva, kompostiranje otpada te spaljivanje preostalog otpada kao zadnja mjera.

Europske direktive koje definiraju smjernice upravljanja otpadom su sljedeće:

- Direktiva 1993/31 EC
- Direktiva 2000/76 EC
- Direktiva 2001/77 EC

Direktiva 1993/31 EC kao glavni zahtjev postavlja redukciju biorazgradivog otpada i otpadnih guma koje se odlažu na odlagalištima [7].

Direktiva 2000/76 EC je direktiva koja se tiče toplinske obrade otpada. Definira procedure i dozvole te postavlja strože granice za korištenje krutog oporabljene goriva u toplinskim postrojenjima [7].

Direktiva 2001/77 EC se odnosi na obnovljive izvore energije. Ona promovira korištenje biomase i visoko-kaloričnih frakcija komunalnog otpada kao alternativu ugljenu, a s ciljem smanjenja emisije stakleničkih plinova [7].

Također, vrijedno je napomenuti da se recikliranje smatra kao bolji proces od spaljivanja ili mehaničke obrade jer recikliranje generira više vrijednosti kao i veće uštede resursa i energije. Nadalje, korištenje mehaničke obrade omogućuje bolje logističko upravljanje cijelim procesom od korištenja spaljivanja jer ne zahtijeva konstantno uvođenje sirovine i samim time omogućuje bolju kontrolu nad cijelim procesom. Kad uzmemo u obzir sve navedeno možemo zaključiti da je glavni prioritet europskog zakonodavstva na temu upravljanja otpadom prevencija nastanka otpada i redukcija biorazgradive komponente koja se odlaže na odlagalištima te ulaganje napora u reciklažne procese i, naposljetku, u procese energetske oporabe za to vrijedne komponente.

Promotrimo li, na primjer, Grčku, vidimo da postoji jasna poveznica s Europskom regulativom. Grčka je na temelju europske regulative donijela niz svojih zakona kojima uređuje proces upravljanja otpadom. Najvažniji od njih je «Nacionalni Plan za Obradu Krutog Otpada» [7].

Neke od stavki tog zakona direktna su implementacija europske regulative, kao na primjer:

- Stavka o postepenoj redukciji količine biorazgradivog otpada koje se odlaže na odlagalištima. Ona određuje smanjenje od 25% do 2010. godine, od 50% do 2013. godine te 65% do 2020. godine.
- Stavka o širenju, modernizaciji i optimizaciji procesa prikupljanja komunalnog otpada i procesa njegovog transporta s ciljem logističkih poboljšanja.
- Stavka o zatvaranju i sanaciji divljih odlagališta, kojih u Grčkoj ima velik broj.

2.3. Mehaničko – biološka obrada kao proizvođač goriva iz otpada

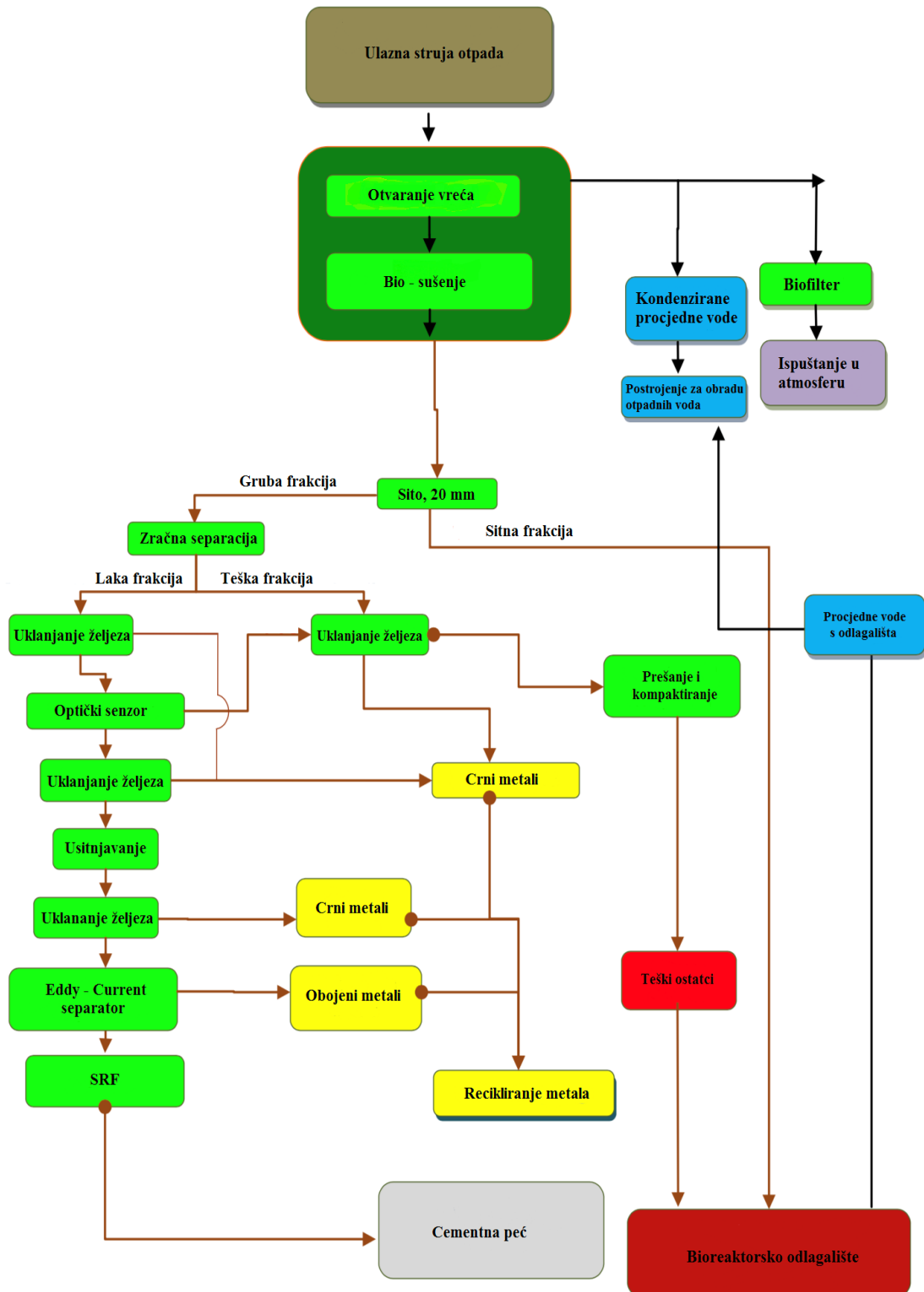
U Europi, mehaničko - biološka obrada otpada često je korištena tehnologija za obradu otpada. Njemačka, Austrija, Italija i Španjolska samo su neke od europskih država koje pokazuju sve veći interes za takav oblik obrade [10]. Uzmimo u razmatranje primjer mehaničko - biološke obrade otpada u jednoj od talijanskih pokrajina gdje se postiže visoki stupanj separacije otpada. Sav ambalažni otpad, kao i biootpad se prikuplja po takozvanom «sa strane kolnika» principu (engl. Kerbside scheme) čime se postiže da je sastav preostalog otpada jednak onom prikazanom u tablici 5. [11].

Tablica 5. Prosječni sastav preostalog otpada prikupljenog za obradu u proučavanom MBO postrojenju

Materijal	% mase
Papir i karton	18 ± 7
Plastika	35 ± 9
Ostatci hrane	4 ± 2.5
Metali	6 ± 3
Drvo i tekstil	11 ± 6
Ostali sitni otpad	26 ± 10

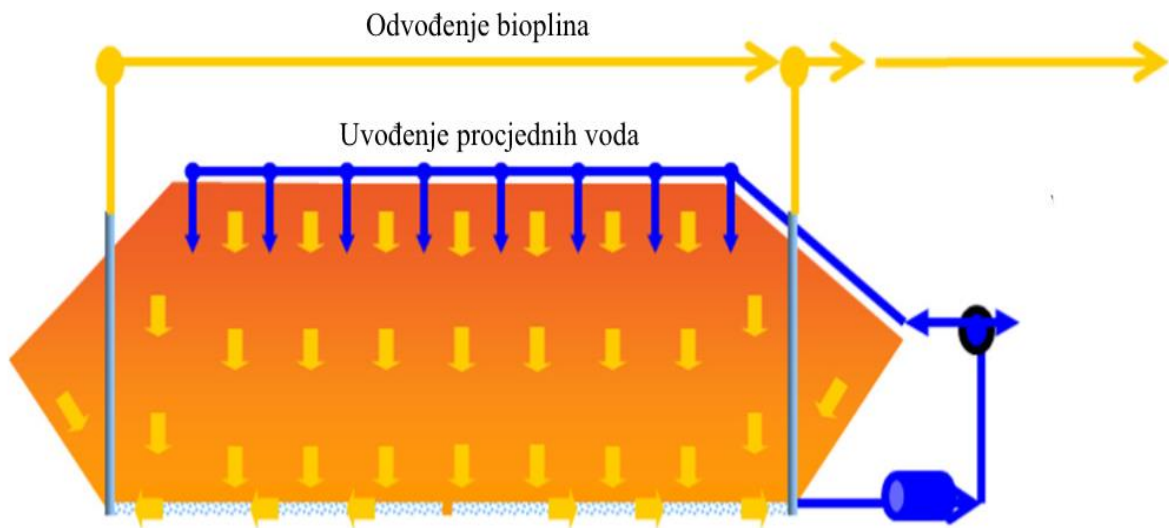
Preostali otpad sa svojim sastavom koji je opisan u tablici 5. ulazna je struja u mehaničko biološko postrojenje navedeno na početku poglavlja. Shema tog postrojenja prikazana je na slici 3.

Nakon uvođenja u postrojenje, cijela masa otpada podvrgnuta je procesu aerobnog bio-sušenja s aeracijom odozdo. Taj proces traje 12-15 dana pri čemu dolazi do prosječnog gubitka mase od 26% [11]. Izgubljena masa odnosi se uglavnom na vodu koja isparava zbog topline generirane biološkim procesima unutar mase otpada. Nadalje, određena količina biorazgradivog otpada, uglavnom ostaci hrane i ostali sitni otpad, od kojeg je 80% biorazgradiva frakcija, raspada se na CO₂ i vodenu paru. Biosušenjem nastala plinska struja je obrađena u biofilteru koji uglavnom služi za uklanjanje neugodnih mirisa. Bio-osušeni otpad se zatim podvrgava mehaničkoj obradi, koja za cilj ima dobivanje visoko kvalitetnog krutog oporabljene goriva za iskorištavanje u cementnoj peći. U ovom stadiju se uklanjaju crni i obojeni metali, kao i klorirana plastika (PVC) koja se uklanja pomoću optičkog senzora.



Slika 3. Shema proučavanog MBO postrojenja

Izdvojeni materijali i oni koji nisu pogodni za iskorištavanje kao kruto oporabljeno gorivo odlažu se na odlagalište koje se nalazi u sklopu MBO postrojenja i ujedno služi kao bioreaktor. Takvo odlagalište je potpuno zapečaćeno i posjeduje sustav recirkulacije procjednih voda kako bi se poboljšala proizvodnja bioplina. Sastoji se od pojedinačnih ćelija od 120 000 m³ i shematski je prikazano na slici 4 [11].



Slika 4. Shematski prikaz bioreaktorskog odlagališta

Važno je napomenuti da je odloženi otpad već prije, na ulazu u postrojenje i proces, podvrgnut aerobnoj razgradnji što znači da je takav otpad stabilniji i nije podložan prijevremenom raspadu, odnosno raspadu prije pečenja i aktivacije. Procjedne vode koje aktiviraju otpad unutar odlagališta recirkuliraju u obujmu od 10 do 70 m³ po danu ovisno o udjelu vode u materijalu.

Odvojeni metali odvoze se na reciklažu, dok se proizvedeno kruto oporabljeno gorivo koristi kao pomoćni energent u cementnim pećima. Prosječni sastav proizvedenog krutog oporabljelog goriva dan je u tablici 6 [11].

Tablica 6. Prosječni sastav krutog oporabljenog goriva proizvedenog u proučavanom MBO postrojenju

Parametar	Mjerna jedinica	Vrijednost
Vlaga	%	12.46 ± 2.94
Donja ogrjevna vrijednost	kJ / kg	19 985 ± 1436
Ugljik	% w / w	54 ± 2.2
Biogeni ugljik	% w / w	26 ± 3.7
Pepeo	% (suhe tvari)	14.13 ± 1.14
Arsen	mg / kg (suhe tvari)	<0.54
Kadmij + Živa	mg / kg (suhe tvari)	0.67 ± 0.14
Klor	% w / w	0.56 ± 0.11
Krom	mg / kg (suhe tvari)	53.45 ± 10.31
Bakar	mg / kg (suhe tvari)	12.00 ± 3.31
Mangan	mg / kg (suhe tvari)	115.2 ± 39.9
Nikal	mg / kg (suhe tvari)	15.03 ± 4.8
Olovo	mg / kg (suhe tvari)	9.92 ± 7.24
Sumpor	% w / w	0.17 ± 0.03

Rezultati su pokazali da je proizvedeno kruto gorivo i energetski i okolišno djelotvorna zamjena do tad korištenom naftnom koksu. Mogući nedostaci i više su nego kompenzirani postignutim uštedama što kruto oporabljeno gorivo čini vrijednim razmatranja za iskorištavanje u svojstvu glavnog ili dopunskog energenta [11].

Iako je primarni cilj mehaničko - biološke obrade minimiziranje utjecaja na okoliš povezanog s odlaganjem biorazgradivog otpada te stvaranje dodane vrijednosti kroz odvajanje materijala pogodnih za reciklažu, kao što su metali i staklo, MBO se sve češće koristi kao izvor sirovine za proizvodnju krutog oporabljenog goriva.

3. PRIMJERI IZ PRAKSE

3.1. Ujedinjeno Kraljevstvo

3.1.1. Uvod u istraživane modele

Ujedinjeno Kraljevstvo jedna je od zemalja koja ulaže sve veće napore u istraživanje mogućnosti korištenja krutog oporabljenog goriva kao energenta. U studiji iz 2009. godine modelirana su četiri slučaja gdje bi korištenje takvog goriva moglo donijeti znatna poboljšanja i uštede. Modelirani slučajevi bili su sljedeći:

1. Termoelektrana na ugljen velikog kapaciteta.
Generirana toplina koristi se za zagrijavanje vodene pare na 560 °C i 160 bara koja se zatim koristi za proizvodnju električne energije. U ovom slučaju istraživala su se moguća poboljšanja kad bi 10% generirane topline dolazilo iskorištavanjem krutog oporabljenog goriva.
2. Spalionica otpada kapaciteta 200 kilotona komunalnog otpada godišnje.
Ovakav sustav potencionalno dozvoljava proizvodnju topline i električne energije. U ovom slučaju istraživala su se moguća poboljšanja kad bi 10% mase komunalnog otpada bilo zamijenjeno krutim oporabljenim gorivom.
3. Spalionica biomase na drvenu sječku kapaciteta 200 kilotona godišnje.
Ovakav sustav potencijalno dozvoljava proizvodnju topline i električne energije. U ovom slučaju istraživala su se moguća poboljšanja kad bi se 20% mase drvene sječke zamijenilo krutim oporabljenim gorivom.
4. Cementna peć koja koristi 300 kilotona ugljena godišnje.
Ovakav sustav potencionalno dozvoljava proizvodnju isključivo topline. U ovom slučaju istraživala su se moguća poboljšanja kad bi se 20% mase ugljena zamijenilo krutim oporabljenim gorivom.

Sastav različitih vrsta goriva koji su korišteni u navedenim istraživanjima prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Sastav različitih vrsta goriva korištenih u navedenim slučajevima

Parametar	Jedinica	Kruto oporabljeno gorivo	Ugljen	Kruti komunalni otpad	Drvena sječka
C	% suhe tvari	47.1	74.9	34.88	49.1
H	% suhe tvari	7.1	4.6	4.65	6.0
N	% suhe tvari	0.7	1.6	1.02	0.6
S	% suhe tvari	0.24	1.1	0.15	0.06
Cl	% suhe tvari	0.6	0.30	1.02	0.02
O	% suhe tvari	29.4	7.3	23.11	42.1
Vlaga	% suhe tvari	15.0	7.1	31.2	10.9
Hlapljiva tvar	% suhe tvari	82.06	31.5	64.83	82.0
Pepeo	% suhe tvari	10.9	9.4	35.17	1.9

3.1.2. Izračun kalorijske vrijednosti korištenih goriva

Laboratorijski, kalorijska vrijednost krutih tvari određuje se u uređaju poznatom kao kalorijska bomba. Međutim, često se koriste i empirijski dobivene jednadžbe. Donju toplinsku vrijednost možemo izračunati preko sljedećeg empirijskog izraza [24]:

$$H_d = 34.8 \times C + 93.9 \times H + 10.46 \times S + 6.28 \times N - 10.8 \times O - 2.5 \times W \quad (1)$$

a izražava se u MJ / kg_{goriva}.

Za računanje gornje toplinske vrijednosti možemo se koristiti sljedećim empirijskim izrazom [24]:

$$H_g = H_d + 2.5 \times (9 \times H + W) \quad (2)$$

koji se također izražava mjernom jedinicom MJ / kg_{goriva}.

Uvrstimo li podatke iz tablice 7. u empirijske izraze (1) i (2), dobit ćemo sljedeće kalorijske vrijednosti:

Za kruto uporabljeno gorivo:

$$H_d = 34.8 \times 0.471 + 93.9 \times 0.071 + 10.46 \times 0.0024 + 6.28 \times 0.007 - 10.8 \times 0.294 - 2.5 \times 0.15$$

$$H_d = 19.576 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

$$H_g = 19.576 + 2.5 \times (9 \times 0.071 + 0.15)$$

$$H_g = 21.548 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

Za ugljen:

$$H_d = 34.8 \times 0.749 + 93.9 \times 0.046 + 10.46 \times 0.011 + 6.28 \times 0.016 - 10.8 \times 0.073 - 2.5 \times 0.071$$

$$H_d = 29.634 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

$$H_g = 29.634 + 2.5 \times (9 \times 0.046 + 0.071)$$

$$H_g = 39.846 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

Za kruti komunalni otpad:

$$H_d = 34.8 \times 0.349 + 93.9 \times 0.0465 + 10.46 \times 0.0015 + 6.28 \times 0.01 - 10.8 \times 0.231 - 2.5 \times 0.31$$

$$H_d = 13.320 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

$$H_g = 13.320 + 2.5 \times (9 \times 0.0465 + 0.31)$$

$$H_g = 15.141 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

Za drvenu sječku:

$$H_d = 34.8 \times 0.491 + 93.9 \times 0.06 + 10.46 \times 0.0006 + 6.28 \times 0.006 - 10.8 \times 0.421 - 2.5 \times 0.109$$

$$H_d = 17.945 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

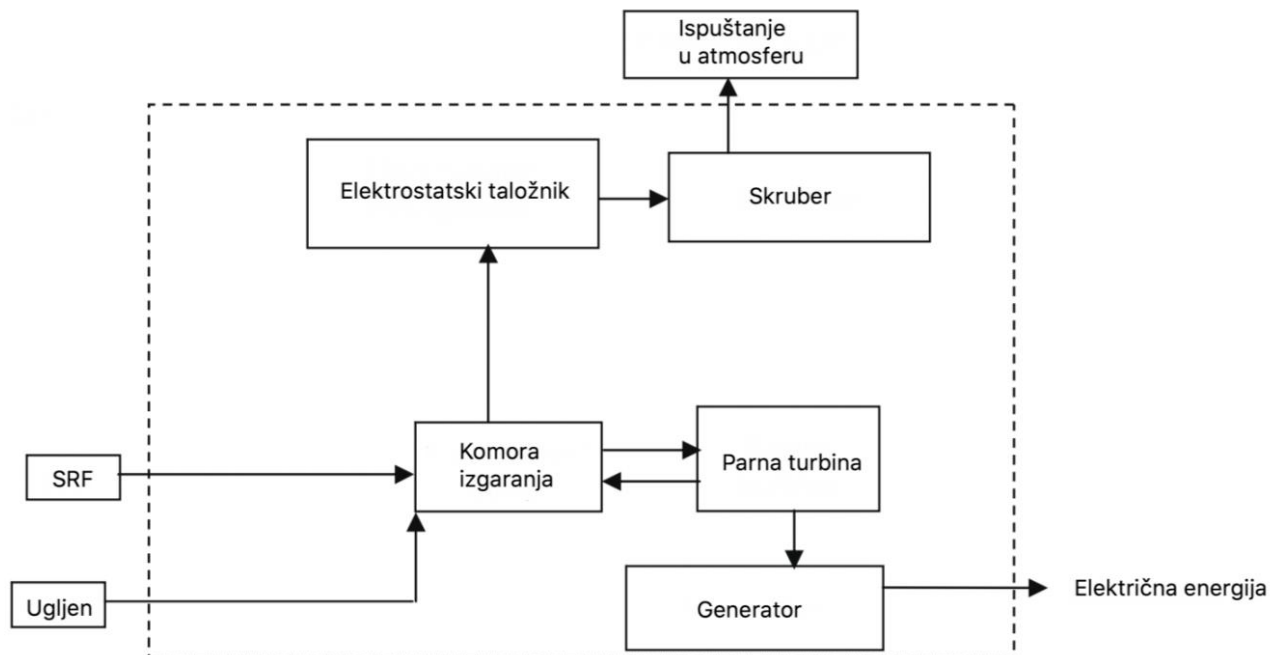
$$H_g = 17.945 + 2.5 \times (9 \times 0.06 + 0.109)$$

$$H_g = 19.567 \text{ MJ / kg}_{\text{goriva}}$$

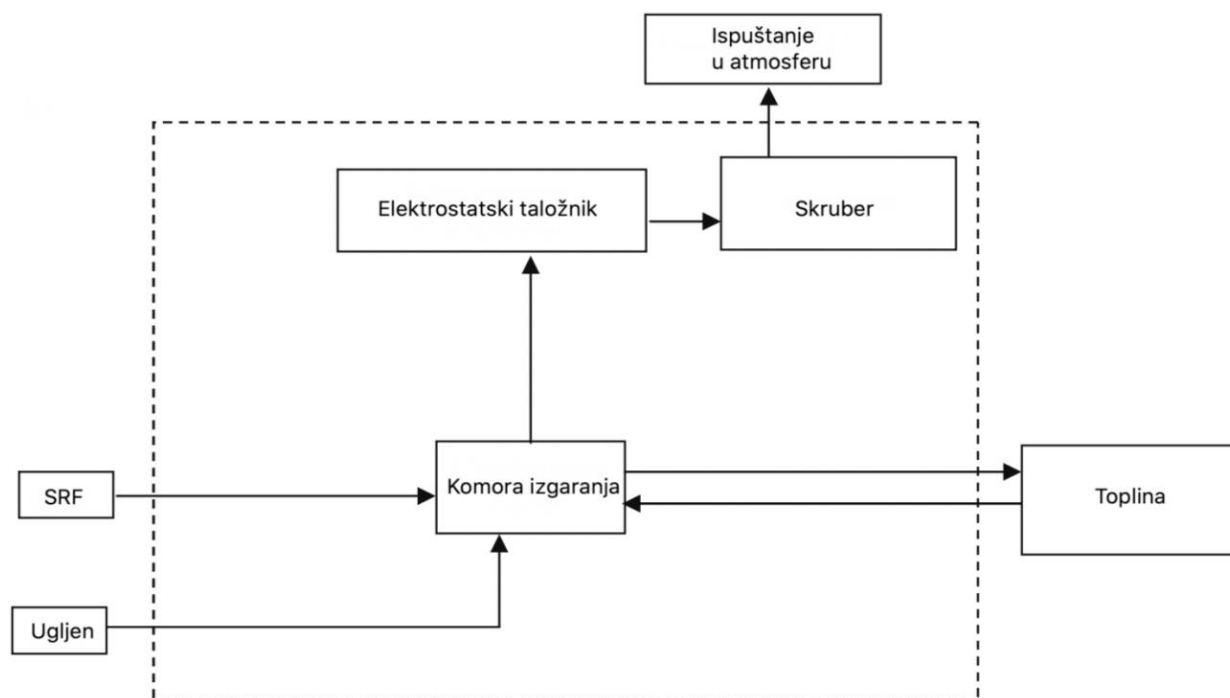
Usporedimo empirijskim jednadžbama izračunate donje kalorijske vrijednosti krutog oporabljene goriva sa klasifikacijom uvedenom od strane tehničkog odbora CEN/TR 343. Interval kalorijske vrijednosti treće kategorije goriva je od 15 do 20 MJ / kg_{goriva}. S donjom toplinskom vrijednosti od 19.576 MJ / kg_{goriva} u ovom istraživanju korišteno kruto oporabljeno gorivo klasificira se kao gorivo treće kategorije s obzirom na kalorijsku vrijednost. Prema udjelu klora, korišteno gorivo klasificira se kao gorivo druge kategorije.

3.1.3. Opis istraživanja

Nadalje, za modeliranje navedenih slučajeva iskorišten je već postojeći i ranije razvijeni model za bilancu tvari i energije u energetske sustavima [12]. Taj model sastoji se od serije modula koji opisuju različite stadije procesa te reakcije i interakcije unutar sustava. Međutim, kako se svaki modul ne koristi u svakom energetske sustavu, u ovom istraživanju iskorišteni su samo oni moduli koji odgovaraju proučavanim slučajevima. Shematski prikazi tih modula povezanih u energetske sustav prikazani su na slikama 5 i 6. Granice modela označene su isprekidanom linijom. Prema tome, troškovi transporta i prethodne obrade otpada i goriva nisu uključeni u model. Međutim, svaka daljnja obrada unutar postrojenja, kao što je na primjer dodatno sušenje materijala, uključena je u model. Važno je napomenuti da kruto oporabljeno gorivo nije potrebno dodatno sušiti jer ono samo po sebi već ima vrlo mali udio vlage [12].



Slika 5. Osnovni model prilagođen za dobivanje električne energije iz ugljena i SRF-a



Slika 6. Osnovni model prilagođen za dobivanje topline iz ugljena i SRF-a

Rezultati modela prikazani su kao količina generirane električne energije ili topline te kao različiti utjecaji na okoliš. Za svaki od četiri proučavana slučaja uspoređeni su rezultati dobiveni bez korištenja krutog oporabljeno goriva sa onima kad se kruto oporabljeno gorivo koristilo kao dodatni energent. Na slikama 7, 8, 9 i 10 prikazani su rezultati za svaki od slučajeva, a odnose se na količinu generirane električne energije i topline, utjecaj na acidifikacijski potencijal, utjecaj na globalno zatopljenje te utjecaj na nastanak zimskog smoga. Parametri koji su računati kako bi se procijenio utjecaj na okoliš su CO₂, HCl, NO_x, SO₂ i lebdeće čestice, odnosno prašina. Prema 'EI95' (engl. Eco-Indicator 95) metodologiji [12], formule za računanje okolišnih utjecaja korištenih u ovoj studiji su sljedeće:

$$\text{Potencijal za globalno zatopljenje} = \text{CO}_2 \text{ (kg / h)} + \text{N}_2\text{O (kg / h)} \times 270$$

$$\text{Acidifikacijski potencijal} = \text{NO}_x \text{ (kg / h)} \times 0.7 + \text{HCl (kg / h)} \times 0.88 + \text{SO}_2 \text{ (kg / h)}$$

$$\text{Potencijal za nastanak zimskog smoga} = \text{prašina (kg / h)} + \text{SO}_2 \text{ (kg / h)}$$

Stvaranje dioksina i furana nije uzeto u obzir jer je za svaki od slučajeva pretpostavljena minimalna temperatura izgaranja od 850°C, odnosno temperatura na kojoj ne dolazi do njihove formacije [12].

3.1.4. Rezultati modeliranja

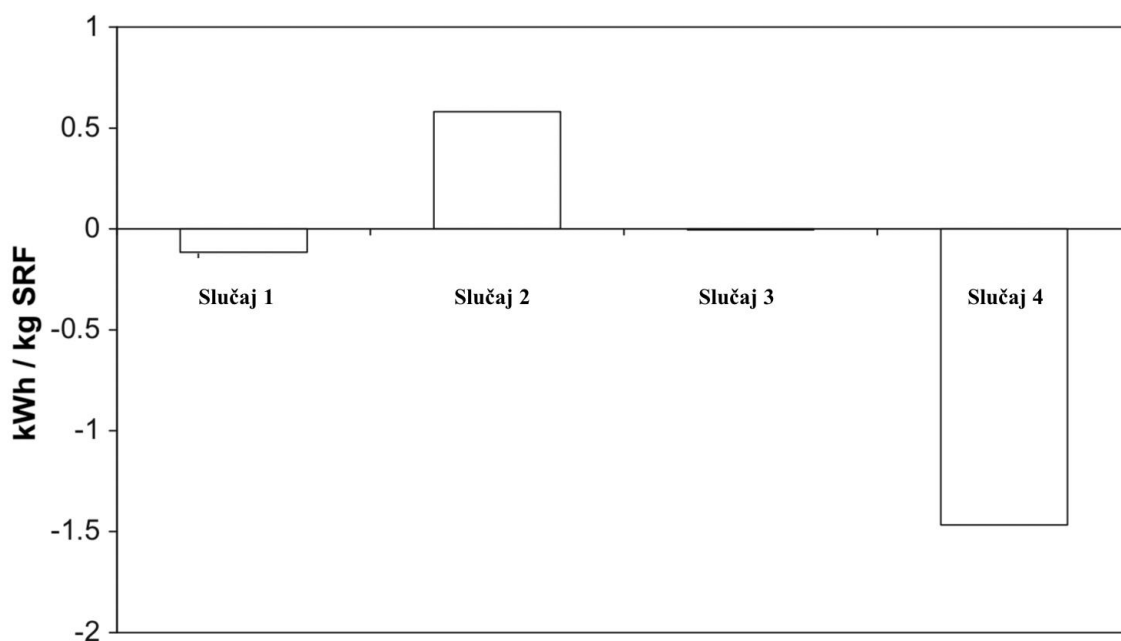
Kako je vidljivo sa slike 7., količina generirane električne energije i dostupne topline generalno je manja kad se kao dodatni energent koristi kruto oporabljeno gorivo. To nije slučaj samo kod spalionice komunalnog otpada, odnosno u slučaju 2. Kad se neki energent dodaje na bazi mase, vlaga i količina nastalog pepela bitni su jednako koliko i kalorijska vrijednost [12]. Kad više vlage ulazi u sustav, potrebno je više topline za njeno isparavanje što rezultira s manje topline raspoložive za daljnje korištenje [12].

Slična stvar je i s količinom nastalog pepela. Što više pepela nastaje, više topline je potrebno za njegovo zagrijavanje što rezultira toplinskim gubitcima. Kruto oporabljeno gorivo ima više vlage u svom sastavu i nastaje više pepela od ugljena i drvene sječke i posjeduje oko 30% manje kalorijske vrijednosti od ugljena i samo oko 9% više od drvene sječke [12]. To je objašnjenje zašto je u tim slučajevima generacija električne energije i topline manja kad se koristi i kruto oporabljeno gorivo. Nadalje, kako za razliku od komunalnog otpada, kruto oporabljeno gorivo ima manji udio vlage i nastaje manje pepela, te također ima i veću kalorijsku vrijednost, jasno je da će spalionica u kojoj se koristi i kruto oporabljeno gorivo generirati više električne energije i topline.

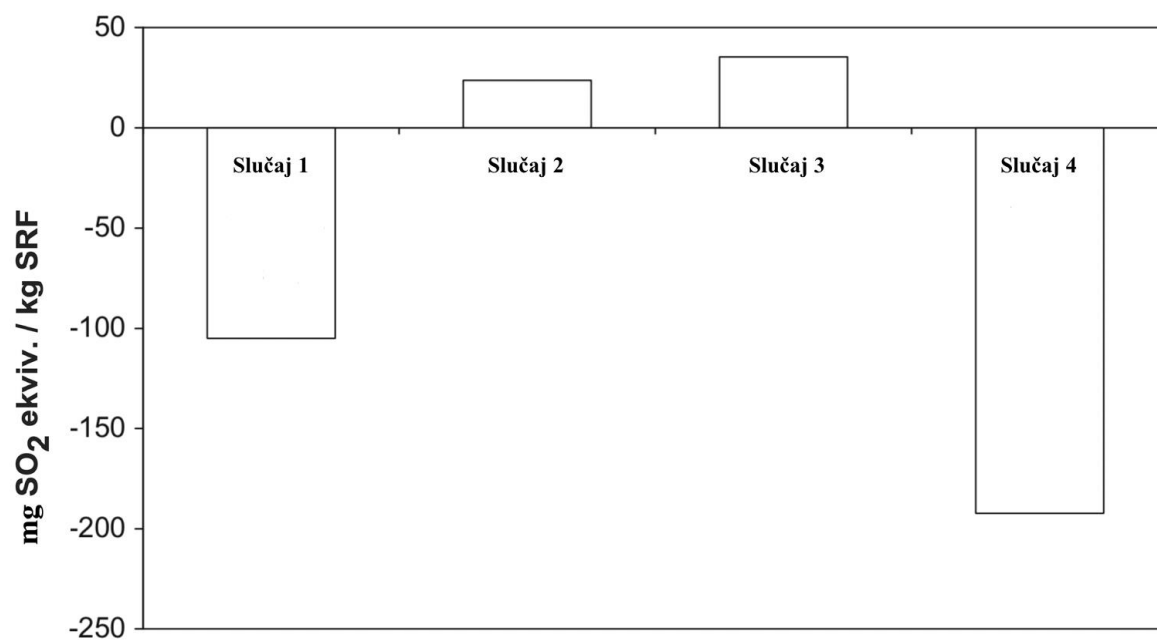
Utjecaj na globalno zatopljenje prikazan je na slici 9. i opisan je preko udjela ekvivalentnog ugljikovog dioksida u dimnim plinovima ispuštenim u atmosferu. Slika 9. prikazuje kako je korištenje krutog oporabljenog goriva u termoelektrani na ugljen i u cementnoj peći smanjilo količinu ispuštenog $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$ dok je u spalionicama komunalnog otpada i biomase na drvenu sječku tu vrijednost povećalo. To se može objasniti preko udjela i podrijetla ugljika u sastavu svakog pojedinog goriva. Tablica 6. prikazuje da ugljen u svom sastavu ima najveći udio ugljika. Također, taj ugljik nije biogenog podrijetla što znači da će korištenjem ugljena postojati doprinos nastanku stakleničkih plinova i, s tim, globalnom zatopljenju. Kruto oporabljeno gorivo ima manje ugljika u svom sastavu i otprilike 70% tog ugljika je biogenog podrijetla. Analiza je pokazala da će zamjena 10% ugljena (na toplinskoj bazi) sa odgovarajućom količinom krutog oporabljenog goriva u termoelektrani na ugljen imati za rezultat smanjenje od otprilike 1500 g $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$ / kg krutog oporabljenog goriva [12]. Kod slučaja cementne peći rezultat je smanjenje od otprilike 2500 g $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$ / kg krutog oporabljenog goriva. Kod ostalih slučajeva porast utjecaja objašnjava se porastom udjela ugljika naspram prvotnih goriva. Kod slučaja sa spalionicom biomase na drvenu sječku, udio ugljika u gorivima otprilike je isti, oko 47, odnosno 49%. Doduše, ugljik u drvenoj sječki je 100% biogenog podrijetla dok u krutom oporabljenom gorivu nije i zbog toga se u tom slučaju primjećuje porast utjecaja od oko 500 g $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$ / kg krutog oporabljenog goriva [12].

Što se tiče acidifikacijskog potencijala, porast utjecaja kod slučaja spalionica komunalnog otpada i biomase rezultat je većeg udjela sumpora kod krutog oporabljenog goriva. S druge strane, kako kruto oporabljeno gorivo u svom sastavu ima značajno manje sumpora od ugljena (0.24% kod krutog oporabljenog goriva prema 1.1% kod ugljena), logičan je i značajan pad utjecaja kad se primarna goriva termoelektrane na ugljen i cementne peći zamjene krutim oporabljenim gorivom.

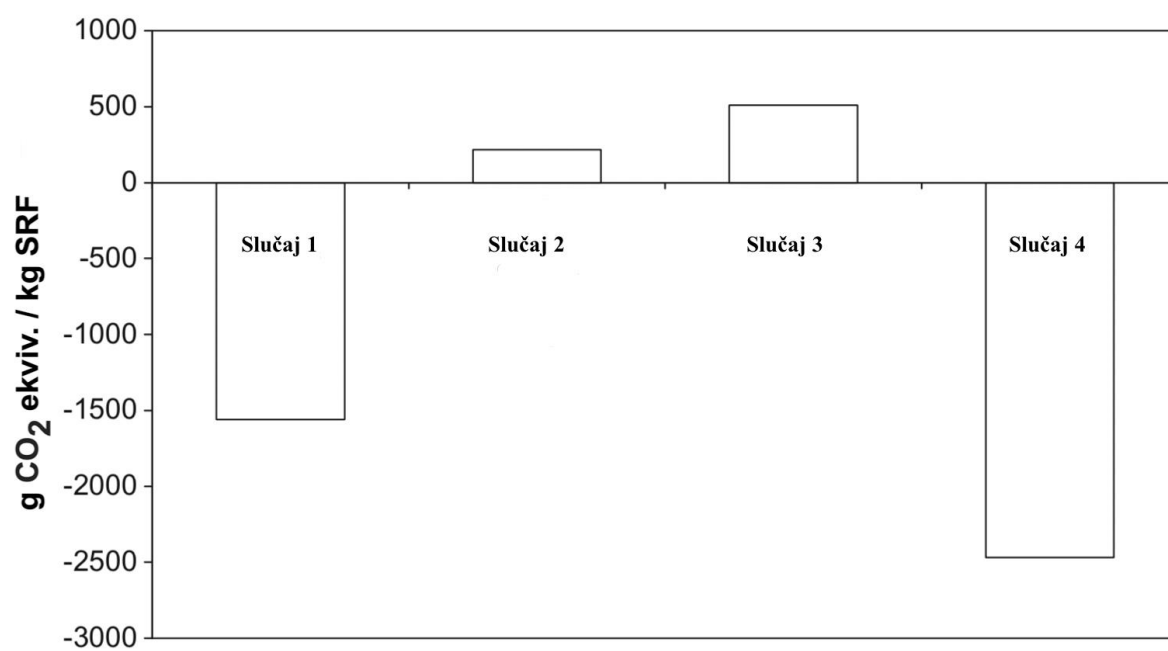
Potencijal za nastajanje zimskog smoga također je modeliran EI95 metodologijom. Kako je vidljivo iz slike 10. potencijal nastanka zimskog smoga povećat će se u svim slučajevima osim u slučaju spalionice komunalnog otpada. Razlog tog povećanja nalazimo u količini pepela koji nastaje izgaranjem krutog oporabljenog goriva. Jedino kod krutog komunalnog otpada nastaje znatno više pepela, čak 35% prema 10.9% kod krutog oporabljenog goriva. Upravo to je razlog zašto u slučaju spalionice komunalnog otpada vidimo znatni pad u potencijalu za nastanak zimskog smoga.



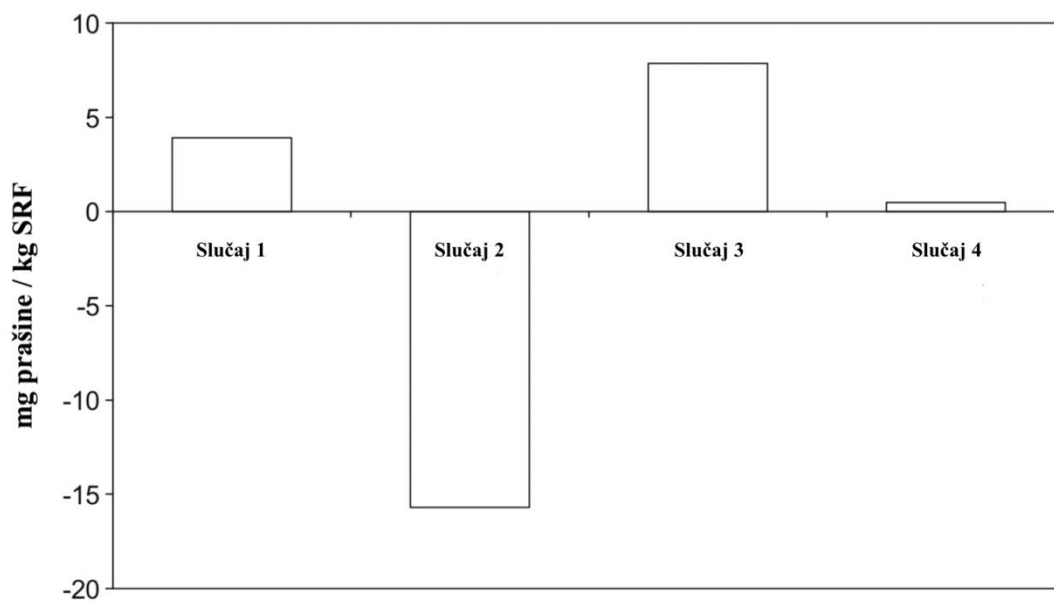
Slika 7. Utjecaj na generaciju električne energije i topline



Slika 8. Utjecaj na acidifikacijski potencijal



Slika 9. Utjecaj na globalno zatopljenje



Slika 10. Utjecaj na nastanak zimskog smoga

Rezultati su zatim rangirani kako bi se utvrdilo u kojem slučaju je korištenje krutog oporabljenog goriva donijelo najviše pozitivnih promjena. U tablici 8., brojevima od 1 – 4 označen je poredak svakog parametra u svakom od slučajeva. Za potrebe rangiranja pretpostavljeno je da svaki proučavani parametar ima jednaki značaj.

Tablica 8. Poredak parametara u svakom od slučajeva

Slučaj	1) Termoelektrana na ugljen	2) Spalionica komunalnog otpada	3) Spalionica biootpada na drvnu sječku	4) Cementna peć
Generacija električne energije	3	1	2	4
Globalno zatopljenje	2	3	4	1
Acidifikacija	2	3	4	1
Zimski smog	3	1	4	2
Σ	10	8	14	8
Konačni poredak	3	1	4	1

Slučaj označen najmanjim brojem u ukupnom poretku, smatra se kao najbolja, odnosno najprihvatljivija opcija. Iz tablice je vidljivo da su slučaj 4. i slučaj 2., odnosno slučaj termoelektrane na ugljen i cementna peć najprihvatljivije opcije za iskorištavanje krutog oporabljenog goriva. Ostali slučajevi nisu pokazali zadovoljavajuće rezultate, odnosno nisu postignuta poboljšanja dodatkom krutog oporabljenog goriva. Nadalje, vrijednosti emisija u svakom od slučajeva uspoređene su s graničnim vrijednostima propisanim u europskoj direktivi za spaljivanje (engl. Waste Incineration Directive (WID)).

Zaključeno je da su emisije unutar propisanih vrijednosti za svaki slučaj osim kod slučaja 2., odnosno za slučaj spalionice komunalnog otpada. Tu je utvrđeno da emisije HCl-a premašuju propisanu vrijednost za skoro 50%. Razlog tomu je visok udio klora u komunalnom otpadu korištenom za istraživanje, kako je i vidljivo iz tablice 7. Emisije dušikovih oksida bile su blizu granice, ali je ni u jednom slučaju nisu premašile. Iz ovih podataka valja zaključiti da je, u slučaju 2., za korištenje krutog oporabljenog goriva potrebno uložiti u dodatnu tehnologiju za uklanjanje HCl i NO_x spojeva [12].

Zaključno, iz provedene analize utvrđeno je da korištenje u cementnim pećima zahtijeva minimalno rizika među proučavanim slučajevima. Najveći izazovi u tom slučaju su u vidu prikupljanja dozvola te nabava krutog oporabljenog goriva zadovoljavajuće kvalitete.

Na temelju navedenih podataka konačni poredak proučavanih slučajeva izgleda ovako:

1. Cementne peći
2. Termoelektrane
3. Spalionice komunalnog otpada
4. Spalionice biomase

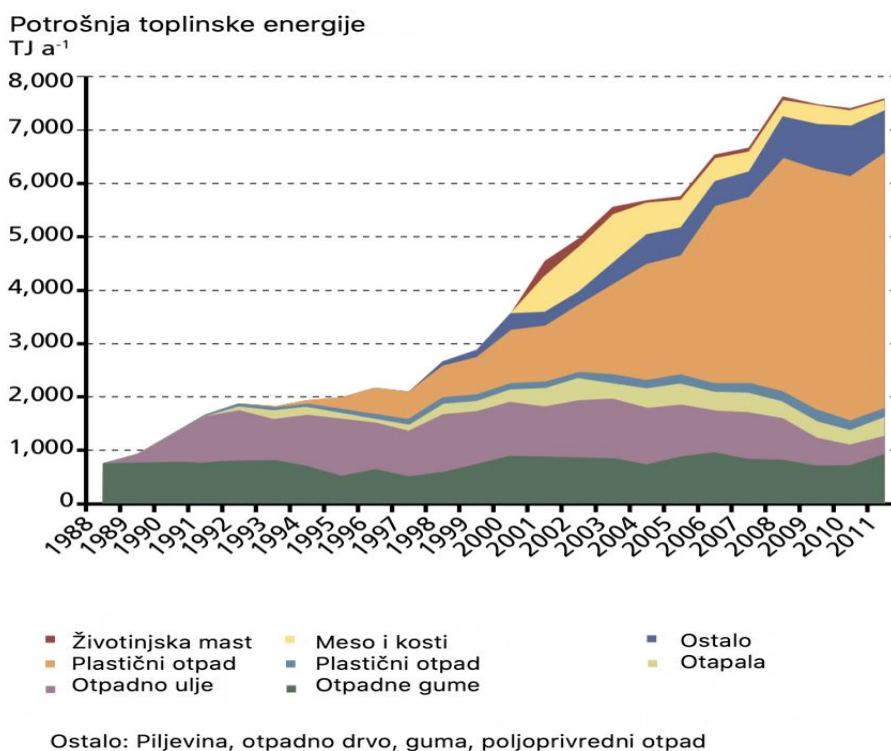
Korištenje krutog oporabljenog goriva u procesima izgaranja sa sobom donosi određene nedostatke. Izgaranjem stvoreni pepeo, na primjer, može sadržavati teške metale. Također, izgaranjem mogu nastati plinovi koji doprinose efektu staklenika te za ljudsko zdravlje štetni dioksini i furani [15]. Ispitivanjima na animalnim subjektima se pokazalo da produkti izgaranja kombinacije goriva iz otpada i ugljena imaju značajniji utjecaj na zdravlje nego produkti izgaranja čistog ugljena [14]. Međutim, kad se koristi primjerice u cementnoj industriji, ti nedostaci mogu biti znatno umanjeni pa i u potpunosti uklonjeni. Kako troškovi energije u cementnoj industriji čine skoro pola ukupnih troškova, ta grana industrije posebno je zainteresirana za istraživanje alternativnih goriva. Nadalje, kad se koristi u kombinaciji sa klasičnim gorivima za zagrijavanje cementnih peći, produkti izgaranja krutog oporabljenog goriva imaju izrazito mali utjecaj na okoliš. Razlog tomu je što se pepeo koji nastaje izgaranjem uspješno inkorporira u krajnji produkt [13]. Također, zbog izrazito povoljnih reakcijskih uvjeta u cementnoj peći, temperatura oko 2000 stupnjeva celzijusa, nastaje minimalno za zdravlje i okoliš štetnih plinova [13].

3.2. Austrija

Prema podacima iz 2014., u Austriji postoji 2400 postrojenja za obradu raznih oblika otpada od čega je otprilike 70 specijalizirano za termalnu obradu otpada. U tim postrojenjima godišnje se toplinski obradi otprilike 8% ukupne količine generiranog otpada [16]. Prema Federalnom planu za upravljanje otpadom, 2012. godine je u Austrijskim toplinskim postrojenjima obrađeno 1.532 miliona tona otpada i to [16]:

- 1 041 400 tona krupnog otpada
- 152 600 tona visoko kalorične frakcije dobivene sortiranjem otpada
- 321 800 tona energetski upotrebljivih ostataka nakon sortiranja odvojeno prikupljenog otpada

Su-spaljivanje krutog oporabljelog goriva u cementnim pećima već je dobro uhodana i opće prihvaćena praksa u Austriji sa udjelom od 65.3% u 2011. i čak 72.36% u 2013. Na slici 11. prikazan je doprinos goriva iz otpada u Austrijskoj cementnoj industriji u periodu od 1988. do 2011. godine.



Slika 11. Doprinos goriva iz otpada Austrijskoj cementnoj industriji

Sastav goriva iz otpada ograničen je graničnim vrijednostima za As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni, Hg te Sb. Najmanje deset paralelnih analiza potrebno je za statističku evaluaciju i procjenu kvalitete goriva iz otpada. Goriva iz otpada također moraju zadovoljiti sve zahtjeve definirane u «Direktivi za Spaljivanje Otpada».

Ako gorivo ima slični fizikalni i kemijski sastav kao i konvencionalno, fosilno gorivo, proizvođač takvog goriva za njega može proglasiti tzv. «Kraj otpada», (engl. «End-of-waste»). Kad je proces deklaracije gotov i svi zahtjevi su ispunjeni i prihvaćeni od strane nadležnih tijela, takvo gorivo se proglašava krutim oporabljenim gorivom i može se koristiti u za to predviđenim procesima. Primjer klasifikacije različitih krutih oporabljenih goriva korištenih za su-spaljivanje u različitim industrijskim sektorima u Austriji dan je u tablici 9.

Tablica 9. Klasifikacija različitog krutog oporabljenog goriva

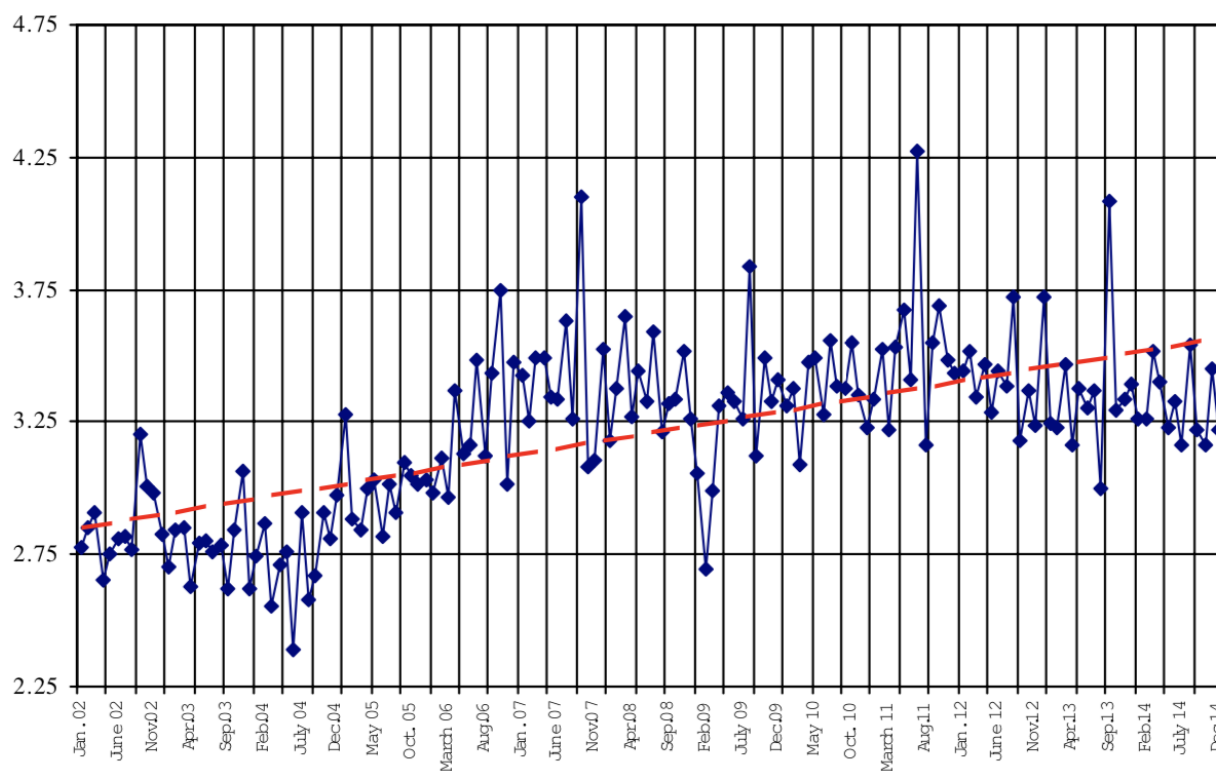
Parametri za klasifikaciju	Specifikacija krutog oporabljenog goriva							
	Mjerna jedinica	Termoelektrana na ugljen	Kalciner	Spaljivanje na rešetki	Spaljivanje u fluidiziranom sloju	HOT DISC Spaljivanje	Primarna cementna peć	Visoka peć u željezari
				Kotlovi				
Net kalorijska vrijednost	<i>MJ / kg</i>	11-15	11-18	11-16	11-16	14-16	20-25	>25
Veličina čestica	<i>mm</i>	<50	<50-80	<300	<20-100	<120	<10-30	<10
Nečistoće	<i>mas.% suhe tvari</i>	<1	0	<3	<1-2	*	<1	0
Klor	<i>mas.% suhe tvari</i>	<1.5	<0.8	<1-0.8	<1-0.8	0.8-0.6	<1-0.8	<2
Pepeo	<i>mas.% suhe tvari</i>	<35	*	*	<20	20-30	<10	<10

Poznato je da materijalna uporaba otpada zahtjeva određena postupanja s otpadom kao što su odvojeno sakupljanje, sortiranje, mehanička obrada, uklanjanje neželjenih frakcija za izradu recikliranog papira i druge. Nakon takvih operacija zaostaje dio materijala koji više nije pogodan za materijalnu uporabu. Prema strogim Austrijskim zakonima takav otpad se ne smije odlagati na odlagalište već se mora toplinski uporabiti. Toplinsko postrojenje za uporabu otpada Zwentendorf koje se nalazi na sjeveroistoku Austrije, svega 40 kilometara od Beča, nakon proširenja 2010. godine, u mogućnosti je obraditi i do 525 000 tona godišnje otpada zaostalog nakon materijalne uporabe što ga čini najvećim takvim postrojenjem u Austriji [17]. U tablici 10. prikazane su vrste otpada sa pripadajućim postotkom koji zaostaje nakon procesa odvojenog prikupljanja i sortiranja.

Tablica 10. Vrste otpada i postotak ostatka nakon odvojenog prikupljanja i sortiranja

Vrsta otpada	Ostatak [%]
Papir i karton	5 - 15
Ambalažna plastika	30 - 70
Otpadno staklo	2 - 10
Građevinski otpad	10 - 40

Kalorijska vrijednost takvog zaostalog materijala fluktuiira tijekom vremena i razlikuje se prema području nastanka. Takva fluktuacija jasno je vidljiva na primjeru postrojenja za toplinsku obradu otpada Flötzersteig koja se nalazi na zapadu Beča i prikazana je na slici 12.



Slika 12. Količina generirane pare u ovisnosti o vremenu

Inače je poznato da se odvojeno prikupljena plastika, ostaci nakon procesa recikliranja otpadnog papira, mehanički osušen kanalizacijski mulj te mehanički obrađen ostali otpad, odnosno otpad s nižom ili iznimno visokom kalorijskom vrijednosti može efikasno upotrijebiti u postrojenju toplinske obrade s fluidiziranim slojem [16]. Za takav sustav, otpad treba biti pogodan za jednostavno doziranje te veličina čestica mora biti oko 80 mm [16].

U Austriji postoji desetak postrojenja koje koriste tehnologiju s spaljivanja i su-spaljivanja u fluidiziranom sloju, kao na primjer:

- 4 postrojenja u samom Beču (čtvrtn Simmering)
- 1 industrijsko postrojenje na sjeveroistoku Austrije (gradić Pitten)
- 4 industrijska postrojenja na sjeveru Austrije
- 3 industrijska postrojenja na jugozapadu Austrije
(čtvrtn Gratkorn u Gracu, grad Bruck/Mur, četvrtn Niklasdorf u Lebenu)
- 4 postrojenja na jugu Austrije
(grad Frantschach, grad Arnoldstein, grad St. Veit/Glan, grad Fürnitz)

Sva navedena, kao i sva ostala postrojenja moraju zadovoljiti stroge Austrijske propise o koncentraciji onečišćivala u ispuštima iz postrojenja. U tablici 10. prikazano je kako su ti propisi evoluirali tijekom godina, odnosno kako su se mijenjale dopuštene koncentracije onečišćivala u ispuštima u atmosferu.

Tablica 10. Dopuštene koncentracije onečišćivala u ispušnim plinovima

	Prašina	Cd	HCl	SO₂	NO_x	Hg	PCDD/F
1970	100	0,2	1000	500	300	0,5	50
1980	50	0,1	100	100	300	0,2	20
1990	1	0,005	5	20	100	0,01	0,05
2000	1	0,001	1	5	40	0,005	0,05

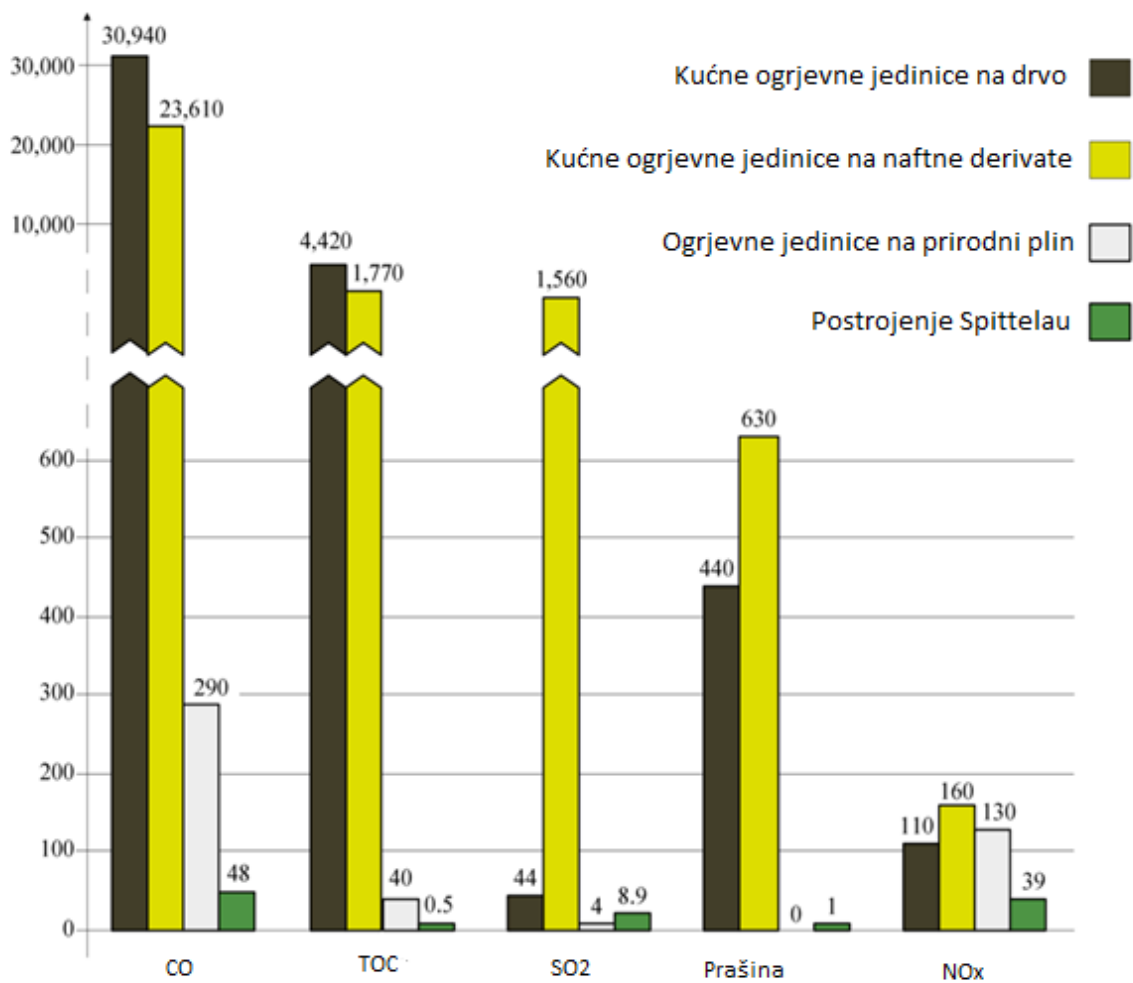
Također, valja napomenuti da prema Austrijskom zakonu, za postrojenja koja koriste otpad kao energent, vrijede stroža pravila nego za postrojenja s istom generacijom koja koriste konvencionalne energente. Za ljude koji žive u blizini postrojenja za toplinsku obradu otpada, kvaliteta zraka i aktivno mjerenje istog od velikog su značaja. Akt o informaciji o okolišu (engl. The Environmental Information Act, UIG) obvezuje tvrtke i postrojenja na aktivnu odgovornost po pitanju informacije. Prema Austrijskom zakonu, oni su obvezni mjeriti i objavljuvati podatke o emisijama iz procesa u svojim postrojenjima.

Prema Članku 13. propisa o toplinskoj obradi otpada (AVV), vlasnici toplinskih postrojenja s nominalnim kapacitetom od dvije tone po satu ili više, dužni su objavljivati podatke o emisijama preko za to predviđenog alata razvijenog od strane Austrijske vlade. Na primjer, postrojenje Spittelau u Beču izvrstan je primjer transparentnosti i dijeljenja informacije sa zainteresiranom javnošću. Naime, informacije o emisijama objavljuju na velikoj, jasno vidljivoj oglasnoj ploči ispred postrojenja kakva je prikazana na slici 13. Također, informacija je dostupna i preko interneta i redovito je ažurirana.



Slika 13. Oglasna ploča s informacijama o emisijama u atmosferu

Također, postrojenje Spittelau jedno je od najvećih postrojenja za proizvodnju energije iz otpada u Europi s cjevovodom dužine od preko 1000 km [18]. Ono toplinskom energijom opskrbljuje više od 262 000 stanova i 5 300 industrijskih konzumenata te je s ukupnom izlaznom snagom od 460 MW drugo najveće postrojenje u toplinskoj mreži grada Beča [18]. Kao i u svakom postrojenju za generaciju energije iz otpada, u postrojenju Spittelau tijekom pretvorbe otpada u toplinsku energiju nastaje veliki broj za ljudsko zdravlje i okoliš opasnih tvari koje treba na odgovarajući način obraditi. Zahvaljujući naprednom sustavu obrade nastalih plinova prije ispuštanja u atmosferu na slici 14. jasno je vidljivo da postrojenje Spittelau u atmosferu ispušta daleko manje onečišćujućih tvari od nekih drugih mogućih izvora.



Slika 14. Usporedba generacije onečišćivača iz raznih izvora pri jednakoj količini proizvedene topline

3.3 Grčka

Prema podacima iz 2015. godine, postotak otpada koji se odlaže na odlagalištima u Grčkoj je na visokih 88%, dok se reciklira svega 12%. Trenutno u Grčkoj postoji nekoliko MBO postrojenja koje proizvode gorivo iz otpada. Iz provedenih istraživanja zaključeno je da u Grčkoj postoji veliki potencijal za energetske oporabu komunalnog otpada.

Proizvedeno gorivo iz otpada / kruto oporabljeno gorivo može se koristiti u postojećim postrojenjima za proizvodnju električne energije na Peloponezu i u Makedoniji, dok područje Atene, Soluna, Tesalija i zapadne Grčke zahtjeva izgradnju postrojenja za pretvorbu otpada u energiju. Zaključeno je da je moguće proizvoditi 1.6 TWh električne energije godišnje što je 2.5% ukupnih energetske potreba Grčke u 2006. godini [8]. Također, emisije CO₂ tako bi se smanjile za 128 kilotona godišnje [8]. Prema izvješću iz 2006. godine, mehaničko biološko postrojenje u pokrajini Ano Liosia proizvodilo je 220 kilotona godišnje goriva iz otpada i njen inicijalni dizajn prikazan je u tablici 11 [8], a elementarni sastav proizvedenog goriva prikazan je u tablici 12. Na otoku Kreti, nacionalnim planom za kruti komunalni otpad također je predviđeno postrojenje na gorivo iz otpada kapaciteta 105 000 tona godišnje. Prema istraživanjima, takvo postrojenje generiralo bi oko 70 GWh električne energije godišnje [9].

Tablica 11. Inicijalni dizajn MBO postrojenja u pokrajini Ano Liosia

Ulazna struja		Izlazna struja		Prosječni sastav goriva iz otpada	
Materijal	Količina, t/dan	Materijal	Količina, t/dan	Materijal	%
Komunalni otpad	1200	Kompost	300	Tiskarski papir	37.80
Kanalizacijski mulj	300	Gorivo iz otpada	360	Ostali papir	4.90
Zeleni otpad	130	Željezno	35	Papirnata ambalaža	16.50
		Aluminij	5	Plastična ambalaža	26.20
		Ostatak za odlaganje	330	Ostala plastika	1.30
		Voda/CO ₂	500	Tekstil	11.00
		Hlapljiva tvar	100	Drvo	0.40
Ukupni ulaz	1630	Ukupni izlaz	1630	Organska tvar	0.80

Tablica 12. Elementarni sastav i udio vlage u proizvedenom RDF-u

	Udio, %
C	55.26
H	7.21
N	1.32
S	0.25
O	35.33
Cl	0.43
Vlaga	26.72

Koristeći se empirijskim formulama, možemo izračunati ogrjevnu vrijednost proizvedenog goriva iz otpada.

$$H_d = 34.8 \times 0.553 + 93.9 \times 0.072 + 10.46 \times 0.0025 + 6.28 \times 0.013 - 10.8 \times 0.3533 - 2.5 \times 0.2672$$

$$H_d = 21.629 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{goriva}}$$

$$H_g = 21.629 + 2.5 \times (9 \times 0.072 + 0.268)$$

$$H_g = 23.919 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{goriva}}$$

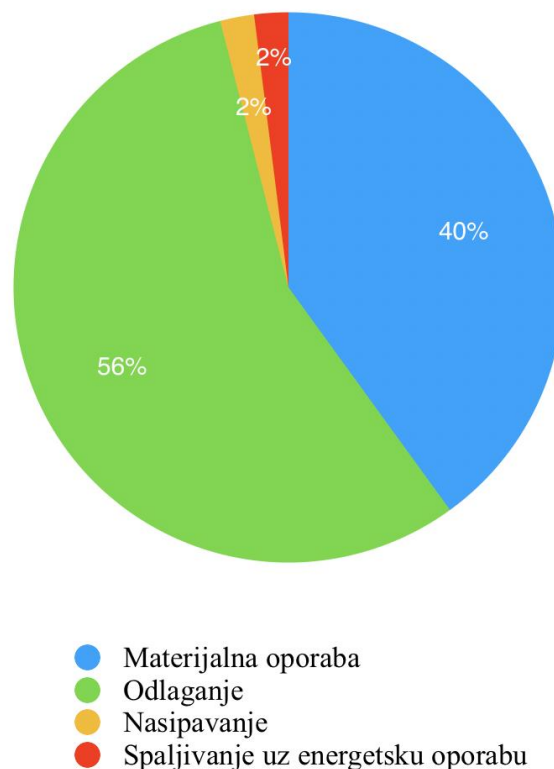
S nižom kalorijskom vrijednosti od $21.526 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{goriva}}$, proizvedeno gorivo iz otpada spada u drugu kategoriju goriva prema kalorijskoj vrijednosti. Kategoriziramo li proizvedeno gorivo prema udjelu klora, zaključit ćemo da to gorivo također spada u drugu kategoriju.

3.4. Republika Hrvatska

Prema podacima iz 2017. godine, u 2014. godini, u Hrvatskoj se službeno proizvelo 3,7 milijuna tona komunalnog i industrijskog otpada. Od toga 97% čini neopasni otpad, a 3% opasni otpad. Najviše otpada proizvedeno je u kućanstvima, skoro trećina, odnosno 31% [19]. Također, prema podacima pravnih osoba zaduženih za zbrinjavanje otpada, u 2014. godini obrađeno je 3,4 milijuna tona. Od toga 3,1 milijun tona otpada je došlo s područja Republike Hrvatske, dok je 315 000 tona uvezeno [19]. Valja naglasiti da se navedeni podaci odnose na takozvane «završne postupke obrade», odnosno da iza tih postupaka nema daljnjeg postupanja tim otpadom. Preostala količina otpada upućena je na daljnju obradu, odnosno pripremu za završni postupak obrade ili je izvezeno na obradu izvan Republike Hrvatske.

Nadalje, godišnji energetske potencijal komunalnog otpada u Hrvatskoj procjenjuje se na 12 PJ, što uz prosječnu ogrjevnju moć od 7.5 MJ/kg čini 2,8% godišnjih energetske potreba [20]. Prema klasifikaciji tehničkog odbora CEN/TC 343, takav otpad spada u kategoriju 5, odnosno u zadnju kategoriju čiji je interval od 5 – 10 MJ / kg_{goriva}.

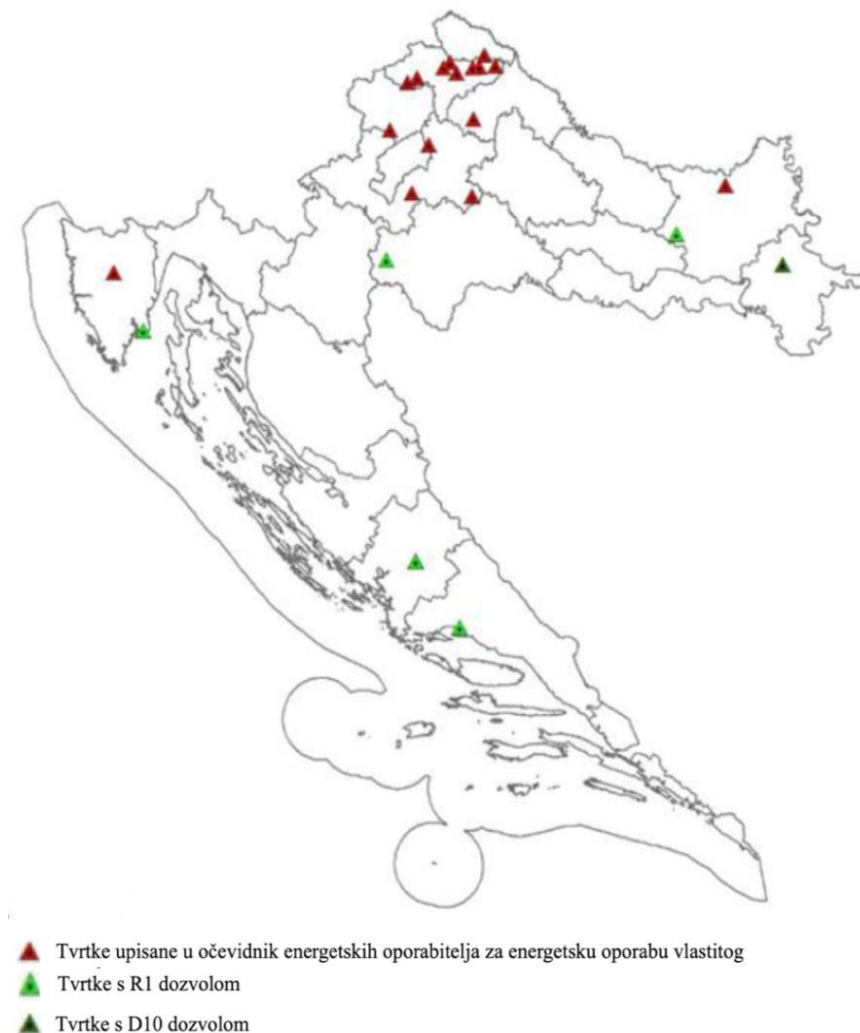
Kako je vidljivo iz slike 15., u 2014. godini energetske je oporabljeno svega 2% proizvedenog otpada, dok je na odlagališta odloženo više od pola, čak 56%.



Slika 15. Udio postupaka obrade otpada u Republici Hrvatskoj u 2014. godini

3.3.1. Proizvodnja i iskorištavanje SRF-a

Prema podacima iz 2016. godine, na području Republike Hrvatske postoji 23 postrojenja za energetske oporabe otpada. Od toga je 17 upisano u Očevidnik energetskih oporabitelja za energetske oporabe vlastitog otpada, a 5 tvrtki na 7 lokacija ima ishođenu dozvolu za R1 postupak oporabe [19]. R1 postupak obrade, prema agenciji za zaštitu okoliša, označava «Korištenje otpada uglavnom kao goriva ili drugog načina dobivanja energije». Jedna bolnica ima dozvolu za spaljivanje isključivo vlastitog otpada. Većina energetske oporabe otpada obavlja se u postrojenjima izvan Republike Hrvatske te plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. – 2022. godine ne predviđa veća ulaganja i konkretno usmjeravanje ka energetske oporabi otpada.



Slika 16. Postrojenja s dozvolom za energetske oporabe otpada u 2016. Godini

U Republici Hrvatskoj trenutno funkcioniraju dva županijska centra za gospodarenje otpadom. To su ŽCGO Marišćina u Primorsko-goranskoj županiji te ŽCGO Kaštijun u Istarskoj županiji. Za obradu otpada koriste tehnologiju mehaničko – biološke obrade koja kao produkt generira kruto oporabljeno gorivo. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike je u svojim nacrtima iznijelo planove za uspostavu još 11 takvih centara te bi se s tim prostorno pokrile sve županije. Također, svi centri koristili bi mehaničko – biološku obradu i generirali bi kruto oporabljeno gorivo. Glavni potrošač krutog oporabljenog goriva u Republici Hrvatskoj je cementna industrija s nekoliko predstavnika.

Neki od njih su:

- Cemex Hrvatska d.d. sa tri cementare u Dalmaciji,
- Našicecement d.d. na kontinentu,
- Holcim d.o.o. u Istri,
- Calucem d.o.o. u Istri

Također, postojala je mogućnost iskorištavanja 5% goriva iz otpada u kombinaciji s ugljenom u termoelektrani Plomin, no to nije ostvareno. Procjena je da je ukupni maksimalni kapacitet cementara u Republici Hrvatskoj za korištenje goriva iz otpada oko 170 000 tona godišnje [21]. Pretpostavka je da će planiranih 11 županijskih centara za gospodarenje otpadom proizvoditi daleko veće količine goriva iz otpada nego što se može iskoristiti u cementnoj industriji, a alternativnog rješenja za nastalo gorivo iz otpada trenutno nemamo. Štoviše, trenutno ne postoji jasno definirano tržište ni uhodana praksa za trgovinu ovim tipom energenta što otežava moguću prodaju viška proizvedenog goriva. Inicijalna je ideja da se svo proizvedeno kruto oporabljeno gorivo iskorištava u lokalnim postrojenjima cementne industrije. Hrvatska cementna industrija, čak i u slučaju zamjene konvencionalnih goriva gorivo iz otpada na razini od 18% što je europski prosjek [21], neće biti u mogućnosti iskoristiti baš cijelu količinu proizvedenog goriva. To nas dovodi do zaključka da je potrebno ili izgraditi postrojenje specifično za iskorištavanje viška proizvedenog goriva ili izvoziti taj višak na strano tržište. Međutim, valja napomenuti da je mehaničko biološka obrada u europskim zemljama uhodan proces i tržište krutog oporabljenog goriva prilično je zasićeno. No kako bi Hrvatsko kruto oporabljeno gorivo trebalo biti visoke kvalitete, ne bi trebao biti problem plasirati ga na Azijsko tržište [21].

4. ZAKLJUČAK

Kruto oporabljeno gorivo, proizvedeno sukladno opisanim standardima može se učinkovito upotrijebiti u energetske intenzivne procese, kao što su, na primjer, procesi u cementnoj industriji. Kako je prikazano u istraživanju iz Ujedinjenog Kraljevstva, među četiri promatrana slučaja, baš primjer iskorištavanja u cementnoj industriji pokazao se kao najoptimalniji. Također, kao jedna od dobro utvrđenih tehnologija za proizvodnju goriva iz otpada navedena je mehaničko – biološka obrada otpada. Iz literaturnih podataka i dostupnih informacija može se saznati da je to i jedna od jeftinijih tehnologija proizvodnje goriva iz otpada. Kao primjer države u kojoj je iskorištavanje goriva iz otpada dobro uhodano i općeprihvaćeno, navedena je Austrija. U Austriji, gorivo iz otpada iskorištava se kako u industrijske svrhe u vidu su-spaljivanja u cementnim pećima, tako i u komunalne svrhe u vidu generiranja topline energije za potrebe grijanja u kućanstvima. Primjer potonjeg je spalionica Spittelau u centru Beča.

U Republici Hrvatskoj, kad govorimo o energetske uporabi otpada, situacija nije na europskoj razini. Većina otpada odlazi se na odlagalištima, dok se ostatak uglavnom materijalno oporabljuje. U planu je izgradnja dodatnih jedanaest županijskih centara za gospodarenje otpadom u sklopu kojih bi se proizvodilo gorivo iz otpada i to procesom mehaničko – biološke obrade otpada. Proizvedeno gorivo bi se iskorištavalo u nekoliko cementnih postrojenja diljem zemlje. Međutim, kako planirana proizvodnja premašuje kapacitete dostupnih cementnih postrojenja, postavlja se pitanje što s ostatkom proizvedenog goriva. Kao jedno od mogućih rješenja, spomenuta je izgradnja dodatnog postrojenja za iskorištavanje goriva iz otpada kapaciteta jednakog višku proizvedenog goriva iz otpada. Također, kako bi prema planu proizvedeno gorivo trebalo biti visoke kvalitete, ne bi trebao biti problem plasirati ga na, još uvijek nezasićeno, azijsko tržište.

5. LITERATURA

- [1] Makarichi L., Jutidamrongphan W., Techato K., The evolution of waste-to-energy incineration: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, kolovoz 2018., str. 812-821
- [2] Garcés D., Díaz E., Sastre H., Ordóñez S., González-LaFuente J.M., Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels, *Waste Management*, 47. Part B, siječanj 2016., str. 164-173
- [3] Martins F., Felgueiras C., Smitkova M., Fossil fuel energy consumption in European countries, *Energy Procedia*, 153, listopad 2018, str. 107-111
- [4] Garg A., Smith R., Hill D., Longhurst P. J., Pollard S.J.T., Simms N.J., An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste, *Waste Management*, 29, Izdanje 8, kolovoz 2009, str. 2289 – 2297
- [5] Pradhan P., Mahajani S.M., Arora A., Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review, *Fuel Processing Technology*, 181, prosinac 2018, str. 215-232
- [6] Basic information for producers and users of SRF, public authorities and other stakeholders, European association for recovered fuel from solid non-hazardous waste, Rue d'Arlon 21, 1050 Bruxelles, Belgium
- [7] Kakaras E., Grammelis P., Agraniotis M., Derichs W., Schiffer H.P., Maier J., Hilber T., Glorius T., Becker U., Solid recovered fuel as coal substitute in the electricity generation sector, *Thermal Science*, 9, 2005., str. 17 – 30
- [8] Psomopoulos C.S., Themelis N.J., The Combustion of As-received and Pre-processed (RDF/SRF) Municipal Solid Wastes as Fuel for the Power Sector; *Energy Sources*, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 37, 2015, str. 1813 – 1820
- [9] Psomopoulos C.S., Themelis N.J., Potential for energy generation in Greece by combustion of asreceived or pre-processed (RDF/SRF) municipal solid wastes, *Proceedings of the 2nd International CEMEPE & SECOTOX Conference*, 2009, str. 1121 – 1125
- [10] Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T., Production and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels Using Mechanical—Biological Treatment (MBT) of Waste: A Comprehensive Assessment, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, str. 979-1105
- [11] Grosso M., Dellavedova S., Rigamonti L., Scotti S., Case study of an MBT plant producing SRF for cement kiln co-combustion, coupled with a bioreactor landfill for process residues, *Waste Management*, 47, 2016, str. 267 – 275
- [12] Garg A., Smith R., Hill D., Longhurst P.J., Pollard S.J.T., Simms N.J., An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste, *Waste Management*, 29, kolovoz 2009, str. 2289 – 2297

- [13] Garces D., Diaz E., Sastre H., Ordonez S., Gonzalez – LaFuente J.K., Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels, *Waste Management*, 47, 2016., str. 164 – 173
- [14] Fernandez A., Wendt J.O.L., Wolski N., Hein K.R.G., Wang S., Witten M.L., Inhalation health effects of fine particles from the co-combustion of coal and refuse derived fuel, *Chemosphere*, 51, lipanj 2003, str. 1129 – 1137
- [15] Samolada M.C., Zabaniotou A.A., Energetic valorization of SRF in dedicated plants and cement kilns and guidelines for application in Greece and Cyprus, *Resources Conservation and Recycling*, 83, veljača 2014, str 34 – 43
- [16] Greech H., Neubacher F., Waste to Energy in Austria, Whitebook Figures, Data, Facts; Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Stubenring 1, 1010 Wien
- [17] Kimbrell C., Kuncova J., Osička J., Waste-to-Energy in the Danube Strategy Region: Challenges and Prospects, Office of the Government of the Czech Republic, Danube Region Strategy, Masaryk University Press 2019
- [18] Spittelau. The thermal waste treatment plant., Wien Energie Fernwärme, Spittelauer Lande 45, 1090 Vienna, Austria
- [19] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_01_3_120.html
- [20] Dobrović S., Schneider R.D., Seminar Obnovljivi izvori energije - Energija iz otpada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 19. Veljače 2010.
- [21] Traven L., Kegalj I., Šebelja I., Management of municipal solid waste in Croatia: Analysis of current practices with performance benchmarking against other European Union member states, *Waste Management & Research*, 1 - 7, 2018
- [22] Fuk B., Gorivo iz otpada – Rješenje ili Problem, *Sigurnost : časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini*, 61, 2019, str. 67 – 70
- [23] CEN/TR 343, Solid recovered fuels – Guidelines on occupational health aspects, Technical Report, 2006
- [24] izv. prof. dr. sc. Igor Sutlović, kolegij Energetika, Izgaranje, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije