

# HAZARDOUS WASTE MANAGEMENT AND SUITABLE WASTE-TO-ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES IN THE REPUBLIC OF SERBIA

Jovana Anđelković, Dejan Cvetinović, Predrag Škobalj, Aleksandar Erić, Nikola Živković

“VINCA” Institute for Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Laboratory for Thermal Engineering and Energy, Mike Petrovića-Alasa 12-14, 11351 Vinča-Belgrade, Serbia

**Abstract:** Population growth, consumerism, and industrial development have led to the increased hazardous and solid municipal waste amounts worldwide. Incineration, gasification, pyrolysis, smelting, or glazing have been proposed to treat the hazardous waste before disposal in inert soil. This paper discusses the management of hazardous waste, proper legislation treating this field, the quantity of the hazardous waste substances, and energy production potentials from this type of waste materials in the territory of the Republic of Serbia. This paper gives an overview of the available thermal treatment methods and waste-to-energy technologies in terms of their performance and environmental impact suitable for the Republic of Serbia. The analysis showed that proper development of this industrial sector could contribute to increased opportunities for new jobs to help mitigation of environmental issues, which will significantly improve overall Serbian economy.

**Apstrakt:** Rast populacije, konzumerizam i industrijski razvoj doveli su do povećanja količine opasnog otpada i čvrstog komunalnog otpada širom sveta. Za tretiranje opasnog otpada pre odlaganja na intertno tlo predloženi su insineracija, gasifikacija, piroliza, topljenje i zastakljivanje. U ovom radu razmatra se upravljanje opasnim otpadom, odgovarajuća zakonska regulativa na ovom polju, količina opasnih otpadnih materija i potencijali za proizvodnju energije iz ove vrste otpada na teritoriji Republike Srbije. U radu je dat pregled raspoloživih metoda termičke obrade i tehnologija za proizvodnju energije iz otpada u pogledu njihovih performansi i uticaja na životnu sredinu, shodno uslovima u Republici Srbiji. Analizom je pokazano da bi pravilan razvoj razmatranog industrijskog sektora mogao pružiti mogućnost za nova radna mesta u cilju ublažavanja ekoloških problema, što bi takođe moglo da unapredi privredu Republike Srbije.

## Opasan otpad – stanje u RS

Polazni dokument koji obezbeđuje racionalno i održivo upravljanje otpadom na teritoriji Republike Srbije je Strategija upravljanja otpadom koja je usvojena 2010. godine. Strategijom je stanje opasnog otpada u Srbiji opisano kao problematično i identifikovani su glavni problemi koji se tiču upravljanja

otpadom. Kao glavni problem navodi se nedostatak infrastrukture za tretman i odlaganje opasnog otpada. U Srbiji ne postoji nijedna lokacija za odlaganje i centralno skladištenje opasnog otpada. U takvim okolnostima proizvođači opasnog otpada skladište opasan otpad unutar svojih proizvodnih kompleksa, često bez nadzora i odgovarajućih mera zaštite, sa svim rizicima po životnu sredinu koje takvo postupanje sa opasnim otpadom nosi [1]. Zbog nedostatka alternative, otpad se na pojedinim mestima skladišti decenijama. Samim tim, Srbija je opterećena potencijalno velikom količinom tzv. istorijskog otpada. Pored toga što ova skladišta predstavljaju potencijalnu opasnost, ona su posebno izazovna za planiranje upravljanja otpadom. Sistematizovani podaci o količinama istorijskog otpada su nedostupni [2], ali se procenjuju na oko 100000 tona [1].

Drugi veliki problem na polju upravljanja opasnim otpadom jeste zajedničko odlaganje na deponije opasnog otpada iz domaćinstva i komunalnog otpada zbog nedostatka sistema separacije ove dve vrste otpada. Srbija još uvek nema postrojenje za fizičko-hemijski i termički tretman opasnog otpada [1], ali trenutno dve fabrike cementa poseduju odgovarajuće dozvole za termički tretman opasnog otpada. Ove fabrike su raspoložive za iskorišćenje opasnog otpada u procesu koinsineracije [2]. Pored toga, u okviru privatnog sektora postoji nekoliko postrojenja za tretman pojedinih vrsta posebnih tokova otpada koji spadaju u opasne (akumulatori, elektronski i električni otpad, otpadna ulja, otpadna vozila) [3,4]. Dozvolu da prime određene vrste opasnog otpada imaju samo 3 regionalne deponije koje primarno rade kao regionalne sanitarne deponije za neopasan otpad i nalaze se u privatnom vlasništvu. U okviru ovih deponija postoje odvojene ćelije za prihvatanje otpada koji sadrži azbest, drugog opasnog građevinskog otpada i otpada od rušenja ili soldifikovanog opasnog otpada. Kao još jedan problem u upravljanju opasnim otpadom javlja se i nedostatak kapaciteta za tretman organskog otpada koji potiče iz industrije i medicinskog otpada [4].

U okviru Nacionalnog programa zaštite životne sredine [3] navodi se da je upravljanje opasnim otpadom u Srbiji na niskom nivou i da zahteva integralan pristup rešavanju problema, odnosno sagledavanje otpada od njegovog nastajanja, minimizacije, preko sakupljanja, transporta i tretmana do odlaganja [1].

U Srbiji su još uvek glavni izazovi upravljanja otpadom obezbeđivanje dobre pokrivenosti i kapaciteta za sakupljanje, transport i sanitarno odlaganje otpada. Zbog toga je prvenstveno potrebno uspostaviti sveobuhvatni sistem upravljanja otpadom koji će biti organizovan u skladu sa nacionalnim i evropskim zakonima i standardima. Pod tim se podrazumeva propisno sakupljanje i transport opasnog otpada u cilju izgradnje regionalnih skladišta i deponija opasnog otpada. Kao prioritet u cilju rešavanja problema opasnog otpada takođe se nameće i razmatranje mogućnosti i uslova za korišćenje kapaciteta postojećih postrojenja i instalacija (fabrike cementa, termoelektrane, toplane, železara) za tretman određenih vrsta opasnog otpada, uz potpunu kontrolu emisija. Potrebno je izgraditi i postrojenje za fizičko-hemijski i termički tretman opasnog otpada [1].

## Opasan otpad – statistika

Podaci o upravljanju otpadom u Republici Srbiji prikupljaju se u skladu sa Zakonom o upravljanju otpadom. Prema članu 75 ovog zakona [5] obavezu izveštavanja o otpadu imaju proizvođač, vlasnik i/ili držalac otpada (izuzev domaćinstva), pravna lica, odnosno preduzetnici koji učestvuju u prometu otpada, proizvođač i uvoznik proizvoda koji posle upotrebe postaju posebni tokovi otpada, operateri postrojenja za ponovno iskorišćenje otpada i operateri na deponiji. Svi obaveznici su dužni da vode dnevnu evidenciju o količinama generisanog, preuzetog, iskorišćenog, deponovanog, uvezenog i izvezenog otpada i da dostavljaju godišnji izveštaj Agenciji za zaštitu životne sredine.

Dozvole za sakupljanje, transport, tretman, skladištenje, ponovno iskorišćenje i odlaganje otpada izdaju nadležni organi, u skladu sa Zakonom o upravljanju otpadom. Pregled važećih dozvola za upravljanje opasnim otpadom dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Pregled važećih dozvola za upravljanje opasnim otpadom\* [6]

Vrsta dozvole	Broj izdatih dozvola po nadležnom organu	
	Ministarstvo	AP Vojvodina
Sakupljanje	220	12
Transport	164	11
Skladištenje	121	45
Tretman	106	29
Odlaganje	2	2
Ukupan broj dozvola po nadležnom organu	613	99
Ukupan broj izdatih dozvola	718	

\* do 18.11.2020.

Kretanje opasnog otpada prati poseban Dokument o kretanju opasnog otpada koji popunjava proizvođač, odnosno vlasnik i/ili drugi držalac, kao i svako ko preuzima opasan otpad, u skladu sa Zakonom o upravljanju otpadom (član 45) [5]. Kretanja opasnog otpada na ovaj način prate se od 2017. godine kada je usvojen Pravilnik [7] koji se primenjuje na kretanje opasnog otpada u Srbiji. Od marta 2017. godine, kada je Pravilnik usvojen, do kraja 2017. prijavljeno je 35800 kretanja opasnog otpada, a tokom 2018. 60879 kretanja opasnog otpada na teritoriji Republike Srbije [8].

U Srbiji su dostupna dva izvora podataka o generisanju otpada – podaci na osnovu istraživanja Statističkog zavoda Republike Srbije i podaci Agencije za zaštitu životne sredine Srbije.

U tabeli 2 date su količine generisanog, ponovo iskorišćenog za dobijanje energije, deponovanog, izvezenog i uvezenog opasnog otpada na teritoriji Republike Srbije u periodu od 2013-2018. godine, prikupljene od strane Agencije za zaštitu životne sredine. Udeo generisanog opasnog otpada u ukupnoj

količini otpada u ovom periodu iznosio je između 0,6 i 1,3%. Tokom 2018. godine povećale su se količine opasnog otpada koji je iskorišćen za dobijanje energije u industriji cementa [8].

Tabela 2: Količine proizvedenog, ponovno iskorišćenog za dobijanje energije, deponovanog, izvezenog i uvezenog opasnog otpada u periodu 2013-2018 (t/god) [8]

Godina	Proizveden opasan otpad	Ponovo iskorišćen opasan otpad operacijom R1	Deponovan opasan otpad	Izvoz otpada	Uvoz otpada
2013	126930	439.5	7390	10680	304
2014	54864	4296.5	5995	25003	24
2015	53486	8846.4	13900	23848	/
2016	74318	9650.2	30417	16686	163
2017	80002	8166	27915	9944	1081
2018	94507	14779	29404	11074	996

U izveštaju Agencije za zaštitu životne sredine [8] dostupne su količine generisanog opasnog otpada prema kategorijama iz Kataloga otpada (tabela 3). Otpad iz grupe 01 (otpad koji nastaje u istraživanjima, iskopavanjima iz rudnika ili kamenoloma, i fizičkom i hemijskom tretmanu minerala) od 2015. godine nije obuhvaćen Okvirnom direktivom o otpadu (2008/98/EC), već Direktivom o rudarskom otpadu (2006/21/EC) [2]. Iz tog razloga količine otpada generisanog u grupi 01 nisu dostupne u izveštaju Agencije.

Količine otpada iz sektora rudarstva dostupne su u godišnjim izveštajima i bazama podataka Republičkog zavoda za statistiku [9]. U periodu od 2013-2018. godine, količina generisanog opasnog otpada varirala je između 13,4 i 17,1 miliona tona.

Tabela 3: Količine generisanog opasnog otpada prema grupama u Katalogu otpada za period 2013-2018 (t/god) [8]

Broj grupe u katalogu otpada	Godina					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
01						
02	0.50	2.60	0.60		0.36	0.74
03	3		16			0.2
04					80	
05	3459	5537	1613	3629	5442	3694
06	67829	120	354	772	926	771
07	402	1422	1300	687	494	4465
08	2759	1910	2047	1840	2000	1738

09	120	123	115	100	133	126
10	12796	10508	15632	29806	29509	32321
11	453	436	402	1092	723	915
12	622	1568	1702	3237	3060	1618
13	0.628	12170	10751	10182	11598	13019
14	181	88	197	27	28	149
15	1229	1448	2303	4188	2556	4380
16	4082	11699	8660	10147	12178	17735
17	14854	2335	2100	819	2809	1941
18	2232	2623	2542	2564	2731	3351
19	847	1277	2255	3084	4155	5803
20	1435	1596	1479	2144	1580	2480

### **Zakonodavstvo u oblasti upravljanja opasnim otpadom**

Kroz dugogodišnje iskustvo razvijenih zemalja u uspostavljanju adekvatnog načina za upravljanje opasnim otpadom, izdvojeni su osnovni principi i uspostavljena osnovna pravila koja omogućavaju pravilno funkcionisanje sistema upravljanja opasnim otpadom. Kako bi ovakve postavke imale svoju praktičnu primenu, zahtevale su adekvatnu zakonodavno-pravnu utemeljenost, čime je započeta izgradnja složenog pravnog sistema EU, kao i uspostavljanje insitucionalnog okvira koji je omogućavao njihovo potpuno sprovođenje.

Ciljevi Republike Srbije u oblasti upravljanja otpadom povezani su sa opštim opredeljenjem vezanim za članstvo u EU. Na svom putu ka EU Srbija, glavni cilj je postizanje visokog nivoa usklađenosti nacionalnog zakonodavstva sa pravnim tekovinama EU i njegova implementacija. Zakonodavstvo EU smatra se jednim od najkompleksnijih u ovoj oblasti. Njegova obim i složenost čini usklađivanje zakonodavnog okvira Republike Srbije sa propisima EU izazovnim. U pogledu usvajanja zakona i podzakonskih akata, Srbija se nalazi na dobrom putu ka postizanju ciljeva koje je postavila EU. Ipak, upravljanje otpadom je složeno područje koje zahteva multidisciplinarni pristup, ne samo u pogledu donošenja propisa, već i u pogledu njihovog sprovođenja. Sa te strane, pitanje primene propisa i kontrole njihovog sprovođenja predstavlja veliki izazov.

Najznačajnija pravna dokumenta EU su direktive, pravilnici i odluke.

Propisi EU koji se odnose na otpad grupisani su u tri kategorije [10]:

- okvirni propisi
- propisi o aktivnostima vezanim za tretman otpada

- propisi koji se odnose na posebne tokove otpada.

Tri ključne direktive u oblasti upravljanja otpadom su Okvirna direktiva 2008/98/EC, Direktiva o deponijama 1999/31/EC i Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu 1994/69/EC. Ove tri direktive su posebno obimne i kompleksne u pogledu transpozicije i implementacije u zakonodavstvo Republike Srbije [10].

Okvirna Direktiva o otpadu delimično je prenetu u srpsko zakonodavstvo Zakonom o upravljanju otpadom i podzakonskim aktima koji proizilaze iz navedenog Zakona. Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu je potpuno prenetu Zakonom o ambalaži i ambalažnom otpadu i pratećim podzakonskim aktima. Direktiva o deponijama je većim delom prenetu kroz Zakon o upravljanju otpadom i Uredbu o odlaganju otpada na deponije [11].

Dva osnovna zakona kojima se propisuje upravljanje otpadom u Republici Srbiji su Zakon o upravljanju otpadom i Zakon o ambalaži i ambalažnom otpadu. Usvajanjem ova dva zakona stvoren je zakonski okvir za uspostavljanje sistema upravljanja otpadom u skladu sa propisima EU.

Zakon o upravljanju otpadom [5] je osnovni pravni dokument kojim se uređuje upravljanje otpadom u Republici Srbiji. Osnovni principi na kojima bi trebalo da se zasniva upravljanje otpadom, a koji su zajednički svim direktivama EU [1,5] su sledeći:

- princip prevencije – očuvanje prirode i prirodnih resursa obezbeđuje se putem smanjenja proizvedenih količina otpada;
- princip predostrožnosti – potrebno je obezbediti smanjenje uticaja otpada na zdravlje ljudi i životnu sredinu, i smanjenje količine opasnih materija u otpadu;
- princip blizine – otpad je potrebno zbrinuti što bliže mestu nastanka, što zahteva adekvatnu infrastrukturu i osnivanje integrisanog sistema i mreže postrojenja za tretman i odlaganje otpada u blizini mesta nastanka;
- princip ‘‘zagađivač plaća’’ – proizvođači otpada i zagađivači životne sredine dužni su da snose pune troškove posledica svojih aktivnosti.

Zakonom [5] su definisane vrste i klasifikacije otpada, planiranje i organizovanje upravljanja otpadom, odgovornosti i obaveze u upravljanju otpadom u upravljanju otpadom, uslovi i postupci izdavanja dozvola, prekogranično kretanje otpada i druga pitanja od značaja u oblasti upravljanja otpadom. Prema članu 5/18 ovog Zakona, opasan otpad je definisan kao otpad koji po svom poreklu, sastavu ili koncentraciji opasnih materija može prouzrokovati opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi. Pod opasnim otpadom podrazumeva se i ambalaža u koju je otpad bio ili jeste upakovan. Pretpostavlja se da opasan otpad pokazuje najmanje jednu od opasnih karakteristika prikazanih u tabeli 4, koje su

propisane Aneksom 3 Okvirne direktive o otpadu [12] i Pravilnikom o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada [13].

Tabela 4. Karakteristike koje otpad čine opasnim [12,13]

HP1	''Explosive''
HP2	''Oxidising''
HP3	''Flammable''
HP4	''Irritant – skin irritation and eye damage''
HP5	''Specific Target Organ Toxicity/Aspiration Toxicity''
HP6	''Acute Toxicity''
HP7	''Carcinogenic''
HP8	''Corrosive''
HP9	''Infectious''
HP10	''Toxic for reproduction''
HP11	''Mutagenic''
HP12	''Release of an acute toxic gas''
HP13	''Sensitising''
HP14	''Ecotoxic''
HP15	''Waste capable of exhibiting a hazardous property listed above not directly displayed by the original waste''

Otpad se razvrstava prema Katalogu otpada koji je propisan Pravilnikom o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada. Pravilnikom [13] je implementirana Evropska lista otpada [14], jedinstvena klasifikacija otpada koju koriste sve zemlje članice EU. Evropska lista otpada predstavlja sveobuhvatnu listu opasnog i neopasnog otpada, u okviru koje je otpad razvrstan na 20 grupa. Opasan otpad nalazi se u okviru svake od 20 grupa [13].

Upravljanje opasnim otpadom bliže je propisano članom 44 Zakona o upravljanju otpadom [5]. Proizvodnja, skupljanje, transport, skladištenje i tretman opasnog otpada moraju da se obavljaju pod uslovima koji obezbeđuju zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi, a neophodno je da opasan otpad prilikom obavljanja navedenih operacija bude upakovan i obeležen u skladu sa međunarodnim i harmonizovanim srpskim standardima. Opasan otpad se pakuje i obeležava u zavisnosti od svojih karakteristika u skladu sa Zakonom o upravljanju otpadom i Zakonom u transportu opasne robe (''Sl. glasnik RS'', br. 104/2016, 83/2018, 95/2018 i 10/2019). Odlaganje opasnog otpada bez prethodnog tretmana kojim se značajno smanjuju njegove opasne karakteristike je zabranjeno. Tretman opasnog otpada ima prioritet u odnosu na tretmane drugog otpada, a vrši se samo u postrojenjima koja imaju dozvolu za tretman otpada, u skladu sa zakonom. Prema odredbama člana 41, termički tretman otpada se vrši u skladu sa izdatom dozvolom za tretman, u postrojenjima koja su projektovana, izgrađena i opremljena u skladu sa ovim zakonom. Pre spaljivanja otpada, vlasnik i/ili drugi držalac opasnog otpada dužan je da izvrši ispitivanje opasnih karakteristika otpada pri prvom otpremanju otpada u postrojenje, odnosno jednom godišnje za istu vrstu opasnog otpada koji se tretira u istom postrojenju u dužem vremenskom periodu.

U skladu sa članom 23, ispitivanje otpada se vrši radi klasifikacije otpada u slučaju prekograničnog kretanja, tretmana, odnosno ponovnog iskorišćenja i odlaganja otpada i prestanka statusa otpada. Karakterizacija se vrši samo za opasan otpad i otpad koji prema svom poreklu, sastavu i karakteristikama može biti opasan, osim otpada iz domaćinstva. Proizvođač otpada je dužan da napravi plan upravljanja otpadom i organizuje njegovo sprovođenje ukoliko proizvodi više od 200 kg opasnog otpada na godišnjem nivou, u skladu sa članom 26 Zakona [5].

Pored Zakona o upravljanju otpadom, opšti normativni okvir za upravljanje opasnim otpadom određen je rešenjima sadržanim u nekoliko međunarodnih ugovora koje je Republika Srbija ratifikovala. Osnovnim se smatra Bazelska konvencija o prekograničnom kretanju opasnih otpada i njihovom odlaganju [15]. Konvencija pruža okvir za identifikaciju, obaveštenje, kontrolu i upravljanje opasnim otpadom, na način koji je prihvatljiv sa aspekta zaštite životne sredine.

Smatra se da je Srbija u značajnoj meri uskladila svoje zakonodavstvo sa pravnim tekovinama EU u oblasti upravljanja otpadom i opasnim otpadom. Ipak, sprovođenje zakona je i dalje u ranoj fazi i potrebno je uložiti značajne napore kako bi se isto poboljšalo [16].

### **Termički tretmani otpada**

Cilj termičke obrade otpada je smanjenje njegove zapremine i uništavanje opasnih materija koje mogu predstavljati rizik po životnu sredinu. Termički tretman se takođe koristi za povraćaj energije iz otpada – proizvodnjom električne, toplotne ili kombinovane energije, ili proizvodnjom alternativnih goriva [17].

U skladu sa nacionalnim [18] i evropskim [19] zakonodavstvom, termičkim tretmanom otpada obezbeđuju se uslovi za sprečavanje ili ograničavanje negativnih uticaja na životnu sredinu, posebno zagađenja emisijama u vazduh, zemljište, površinske i podzemne vode i mogućih rizika na zdravlje ljudi.

Postoje tri glavne vrste termičkog tretmana otpada [20]:

- insineracija – potpuno oksidativno sagorevanje
- gasifikacija – delimična oksidacija
- piroliza – termička razgradnja organskog materijala u odsustvu kiseonika.

Postrojenja za pirolizu i gasifikaciju imaju sličnu osnovnu strukturu kao postrojenja za insineraciju, ali razlike u pogledu predtretmana otpada, opreme za rukovanje, tretiranje i skladištenje materijala i slično. Izbor termičkog tretmana prvenstveno zavisi od vrste otpada.



## **Insineracija**

Insineracija se koristi kao tretman za širok spektar otpada. Često predstavlja samo deo složenog sistema za tretman otpada koji obezbeđuje celokupno upravljanje otpadom koji nastaje u društvu.

Insineracija u osnovi predstavlja oksidaciju zapaljivih materija sadržanih u otpadu tokom koje se stvaraju dimni gasovi. Pri potpuno oksidativnom sagorevanju glavni sastojci dimnih gasova su vodena para, azot, ugljendioksid i kiseonik. U zavisnosti od sastava otpada i uslova rada insineratora, mogu se formirati manje količine ugljenmonoksida, halogenovodoničnih gasova, azotnih oksida, sumpordioksida i slično [20].

Postrojenje za insineraciju projektuje se tako da procesni gasovi, na kontrolisan i homogen način, u zavisnosti od vrste otpada dostignu temperaturu od najmanje 850°C. Vreme zadžavanja mora biti najmanje 2 sekunde na ovoj temperaturi. Ukoliko se vrši sagorevanje opasnog otpada koji sadrži više od 1% halogenih organskih supstanci izraženih kao hlor, temperatura mora da dostigne minimum 1100°C tokom 2 sekunde [18,19].

Insineracija se trenutno najviše koristi za tretiranje komunalnog čvrstog otpada, opasnog i industrijskog otpada. Postrojenja za insineraciju se dosta razlikuju u zavisnosti od vrste otpada [17]. Najčešće se primenjuju tehnologije spaljivanja na rešetki, u rotacionoj peći i u fluidizovanom sloju [20].

Insineracija je jedna od najefikasnijih metoda za tretman i odlaganje opasnog otpada. Za tretman opasnog otpada potrebno je odabrati najprikladniju opciju, s obzirom da njegovo odlaganje ima veće zahteve u odnosu na druge vrste otpada. Za spaljivanje opasnog otpada najčešće se koristi sistem sa rotacionom peći, zbog svojih karakteristika prilagodljivosti, visokog stepena uklanjanja štetnih komponenata iz otpada i dugotrajnog kontinualnog rada [21]. U rotacionim pećima može se spaljivati gotovo svaki otpad, bez obzira na vrstu i sastav. Radne temperature rotacionih peći kreću se od 500 do 1450°C. Pri konvencionalnom sagorevanju temperatura je uglavnom preko 850°C. Rotacione peći se široko primenjuju za tretiranje opasnog otpada, a u tom slučaju radne temperature se kreću u intervalu od 900-1200°C.

Za tretiranje opasnog otpada kao najuspešnija se pokazala kombinacija rotacione peći i dodatne komore za sagorevanje koja osigurava uništavanje toksičnih materija iz otpada [20]. Time je ispoštovan zahtev dvostepenog spaljivanja koji se često javlja u slučajevima tretmana industrijskog i opasnog otpada. Kao prva faza ovog procesa koristi se rotaciona peć u koju se direktno ubacuje otpad koji se tretira. Zapaljivi deo otpada u peći sagoreva u prisustvu viška kiseonika, pri čemu se oslobađa gotovo sav sadržaj toplote iz otpada. Protok vazduha do rotacione peći kontroliše se u zavisnosti od toplotne vrednosti otpada [22]. Dužina rotacione peći kreće se između 10 i 15 metara, unutrašnji prečnik kreće se u rasponu od 1-5

metara, a odnos dužine i prečnika je između 3 i 6. Vreme zadržavanja otpada u rotacionoj peći iznosi najmanje 30 minuta, a rotaciona peć napravi 3-40 obrtaja po času [20]. Za vatrostalan opasan otpad može se koristiti veći odnos prečnika i manje brzine rotacionih peći, a opasan otpad veće toplotne vrednosti može se tretirati u rotacionim pećima sa većim nagibom i brzinom [21].

Rotacione peći u sistemu sa dvostepenim sagorevanjem su nagnute prema komori za dodatno sagorevanje. Taj položaj, uz mali broj obrtaja peći, olakšava transport otpada i pepela koji se stvara na dnu peći ka komori za sagorevanje. Temperature u komori za sagorevanje kreću se u intervalu od 900-1200°C. Većina instalacija ima mogućnost ubrizgavanja sekundarnog vazduha u komoru. Visoke temperature i sekundarni dovod vazduha obezbeđuju spaljivanje dimnih gasova proizvedenih u rotacionoj peći. Komora se po potrebi može zagrevati pomoću tečnog otpada ili pomoćnog goriva kako bi se održale visoke temperature potrebne za destrukciju opasnih materija iz dimnih gasova [20]. Postizanje visoke temperature u komori za sagorevanje obično je praćeno visokim zahtevima za toplotu koja se dobija sagorevanjem gasovitog ili tečnog pomoćnog goriva [22].

Postojnje sa dvostepenim sagorevanjem, pored rotacione peći sa dodatnom komorom, sadrži kotao za pretvaranje otpadne toplote u paru i višestepeni sistem za prečišćavanje dimnih gasova [20].

### **Gasifikacija**

Gasifikacija predstavlja proces delimičnog sagorevanja organskih supstanci [20], odnosno proces termo-hemijske konverzije materijala na bazi ugljenika u zapaljivi, gasoviti proizvod – sintetički gas [23]. Proces je dizajniran tako da se maksimizuje konverzija otpada i ugljeničnog goriva u sintetički gas [24]. Ugljenični materijali reaguju sa vazduhom, kiseonikom, vodenom parom, ugljendioksidom ili smešom ovih gasova na temperaturama od 500-1800°C ili više. Pri vazdušnoj gasifikaciji dobija se gas niže toplotne vrednosti, koja se može povećati ukoliko se gasifikacija vrši u oksidacionoj atmosferi [23]. Sintetički gas sadrži ugljenmonoksid i vodonik (preko 85%) i manje količine ugljendioksida, vode, metana, argona i azota [24]. Može sadržati i zagađivače poput pepela, katrana i sitnih čestica uglja. Sintetički gas je koristan proizvod se upotrebljava za proizvodnju električne, toplotne ili kombinovane energije, kao i tečnih biogoriva [23].

Do sada je razvijeno nekoliko različitih procesa gasifikacije koji su pogodni za tretman komunalnog otpada, određenih vrsta opasnog otpada i osušenog kanalizacionog mulja. Često se zahteva predtretman otpada [20], jer bi fizičke karakteristike otpada koji se unosi u proces bi trebalo da se kreću unutar unapred definisanih granica. Time se obezbeđuje maksimalna konverzija u ugljendioksid i vodonik i stvaranje minimalne količine katrana. Opasan otpad se može gasifikovati ukoliko je u tečnom stanju ili je prethodno usitnjen [23].

Viskotempereturna gasifikacija se može koristiti i kao deo sistema za dvostepeno sagorevanje umesto rotacione peći. Proizvodi iz reaktora za gasifikaciju, koji predstavlja prvu fazu datog sistema, odvode se direktno u komoru za dodatno sagorevanje. Toplotna vrednost sintetičkog gasa dovoljna je za postizanje temperature od 1100°C koja je potrebna za termičku destrukciju opasnog otpada u komori za sagorevanje, u prisustvu viška vazduha. Samim tim, uključivanjem procesa gasifikacije kao prve faze termičke obrade, smanjuje se potrošnja pomoćnog goriva u odnosu na konvencionalna postrojenja za insineraciju. Pored toga, stvara se znatno manje dimnih gasova, što se pozitivno odražava na smanjenje veličine komore za sagorevanje i sistem za prečišćavanje gasova. Sa druge strane, nedostatak ove tehnologije je zahtev za predtretmanom otpada pre unošenja u reaktor za gasifikaciju [22].

### **Piroliza**

Piroliza je proces termohemijskog razlaganja organskog materijala na visokoj temperaturi, u odsustvu kiseonika ili u atmosferi inertnih gasova [25]. Temperature na kojima se odvija piroliza kreću se u rasponu 400-900°C, ali su obično niže od 700°C. Produkti pirolize su pirolitički gas, pirolitičko ulje i čvrsti koks. Relativni udeo produkata zavisi od vrste pirolitičkog reaktora i parametara procesa [23].

U poređenju sa insineracijom, piroliza se odvija na nižoj temperaturi uz manje emisije zagađivača vazduha. Pirolizom se mogu tretirati kombinacije čvrstih, tečnih i gasovitih proizvoda u različitim razmerama, u zavisnosti od načina rada i parametara procesa.

Produkti pirolize često imaju dobra svojstva kao goriva, pa se piroliza obično koristi u svrhe povraćaja energije iz otpada [25].

Proces pirolize ima određene prednosti, kao što su smanjenje količine dimnih gasova nakon sagorevanja, mogućnost obnavljanja dela organske frakcije kao materijala ili goriva [20], mogućnost korišćenja pirolitičkog ulja u industriji plastike i proizvodnja pirolitičkog gasa u dovoljnoj količini za proizvodnju energije. Pored toga, sortiranje otpada nije neophodno, a efikasnost procesa je daleko iznad efikasnosti insineracije i gasifikacije i iznosi 80-90%.

Ipak, postoje i nedostaci ovog procesa, poput stvaranja štetnih hemikalija, visokih troškova opreme i velike potrošnje energije. Iz tog razloga, piroliza se ne koristi u industrijskim razmerama kao insineracija [26].

### **Zaključak**

Iz postepenog razvijanja odnosa prema opasnom otpadu od strane industrijski razvijenih evropskih zemalja proistekla je izuzetna organizacija nacionalnih sistema upravljanja opasnim otpadom, koja se i danas unapređuje. Kroz višedecenijsko iskustvo razvijenih zemalja u uspostavljanju adekvatnog načina

za upravljanje opasnim otpadom, izdvojeni su osnovni principi i uspostavljena osnovna pravila koja omogućavaju pravilno funkcionisanje sistema upravljanja opasnim otpadom. Sa druge strane, zemlje u razvoju, među kojima je i Srbija, nemaju uređen i organizovan sistem upravljanja opasnim otpadom. Nepostojanje ovakvog sistema ima direktan negativan uticaj na životnu sredinu i predstavlja jedan od prioritarnih ekoloških problema u Srbiji. Dosadašnja praksa upravljanja opasnim otpadom ocenjena je kao neodrživa, te je započeta izgradnja novog zakonodavnog sistema sa ciljem približavanja standardima EU. Pri uspostavljanju planskog okvira za upravljanje opasnog otpada u Srbiji i postavljanju kratkoročnih i dugoročnih ciljeva neophodno je izvršiti analizu iskustava zemalja koje imaju razvijen i organizovan sistem upravljanja opasnim otpadom i na taj način uspostaviti smernice za promene u budućnosti. Ulaganje u uspostavljanje sistema za upravljanje opasnim otpadom trebalo bi shvatiti kao dugoročnu investiciju, koja bi u budućnosti znatno doprinela boljem stanju životne sredine.

### **ACKNOWLEDGEMENT**

The research was funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, Grant no. 451-03-09/2021-14/200017 («Vinča» Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade)

### **References**

- [1] The Waste Management Strategy for the Period 2010-2019, ``The Official Gazette of the Republic of Serbia``, No. 29/10
- [2] Serbian Integrated Hazardous Waste Management Plan, April 2017  
[https://www.hazardouswaste-serbia.info/fileadmin/inhalte/haz\\_waste/pdf/HWM\\_Plan\\_draft\\_2017-04-28.pdf](https://www.hazardouswaste-serbia.info/fileadmin/inhalte/haz_waste/pdf/HWM_Plan_draft_2017-04-28.pdf)
- [3] National Environmental Program,  
[https://www.zzps.rs/wp/pdf/Nacionalni\\_program\\_zastite\\_%20zs.pdf](https://www.zzps.rs/wp/pdf/Nacionalni_program_zastite_%20zs.pdf)
- [4] Spatial Plan of the Republic of Serbia for the Period 2021-2035, Basic Conceptual Approach to Spatial Development for Early Public Inspection, February 2020  
[https://www.zzps.rs/wp/pdf/Nacionalni\\_program\\_zastite\\_%20zs.pdf](https://www.zzps.rs/wp/pdf/Nacionalni_program_zastite_%20zs.pdf)

[5] Law on Waste Management, ``The Official Gazette of the Republic of Serbia``, No. 36/2009, 88/2010, 14/2016 and 95/2018

[6] <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=20174&id=20055&akcija=ShowExternal>

[7] Rulebook on the form of the document on the movement of hazardous waste, the form of prior notification, the manner of its delivery and instructions for completing them, ``The Official Gazette of the Republic of Serbia``, No. 17/2017

[8] Serbian Environmental Protection Agency, Waste Management in the Republic of Serbia for the Period 2011-2018, Report, August 2019

[http://www.sepa.gov.rs/download/Otpad\\_2011\\_2018.pdf](http://www.sepa.gov.rs/download/Otpad_2011_2018.pdf)

[9] Statistical Office of the Republic of Serbia, <https://www.stat.gov.rs/>

[10] National Strategy of the Republic of Serbia for Approximation in the Field of Environment, 2011

<http://www.misp-serbia.rs/wp-content/uploads/2010/05/EAS-Strategija-SRP-FINAL.pdf>

[11] National Programme for the Adoption of the *Acquis* (Third Revision), Ministry of European Integration, February 2018

[https://www.mei.gov.rs/upload/documents/nacionalna\\_dokumenta/npaa/third\\_revision\\_npaa\\_18.pdf](https://www.mei.gov.rs/upload/documents/nacionalna_dokumenta/npaa/third_revision_npaa_18.pdf)

[12] European commission, (2008), Waste Framework Directive 2008/98/EC

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&from=EN>

[13] Rulebook on Categories, Testing and Classification of Waste, ``The Official Gazette of the Republic of Serbia``, no. 56/2010 and 93/2019

[14] European Commission, (2001), *List of wastes*, Commission Decision 2001/118/EC

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000D0532-20150601&from=EN>

[15] Zakon o potvrđivanju Bazelske konvencije o kontroli prekograničnog kretanja opasnih otpada i njihovom odlaganju, ``Sl. list SRJ – Međunarodni ugovori``, br. 2/99

[16] Commission Staff Working Document, Serbia 2020 Report

[https://ec.europa.eu/neighbourhood-enlargement/sites/near/files/serbia\\_report\\_2020.pdf](https://ec.europa.eu/neighbourhood-enlargement/sites/near/files/serbia_report_2020.pdf)

[17] A. Tabasová, J. Kropáč, V. Kermes, A. Nemet, P. Stehlík, Waste-to-energy technologies: Impact on environment, *Energy*, Volume 44, Issue 1, 2012, Pages 146-155,

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.014>

[18] Uredba o vrstama otpada za koje se vrši termički tretman, uslovima i kriterijumima za određivanje lokacije, tehničkim i tehnološkim uslovima za projektovanje, izgradnju, opremanje i rad postrojenja za termički tretman otpada, postupanju sa ostatkom nakon spaljivanja, "Sl. glasnik RS", br. 102/2010 and 50/2012

[19] European Commission, Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), 2010

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02010L0075-20110106&from=EN>

[20] European Commission, Reference Document on Best Available Techniques (BAT) for Waste Incineration, 2019

[https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637\\_WI\\_Bref\\_2019\\_published\\_0.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf)

[21] Jiang, X., Li, Y. & Yan, J. Hazardous waste incineration in a rotary kiln: a review, Waste Disposal & Sustainable Energy, 1 (1) , 2019, 3–37, <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00001-3>

[22] R. Dvořák, T. Pařízek, L. Bébar, P. Stehlík, Incineration and gasification technologies completed with up-to-date off-gas cleaning system for meeting environmental limits, Clean Technologies and Environmental Policy, 11 (1), 2009, 95-105, <https://doi.org/10.1007/s10098-008-0170-7>

[23] A. Bosmans, L. Helsen, Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment, Proceedings Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste Venice, Italy; 8-11 November 2010

[24] Wetherold, B. et al. "A Comparison of Gasification and Incineration of Hazardous Wastes Final Report", 2000, <https://www.cheric.org/files/research/ip/g200101/g200101-301.pdf>

[25] D. Czajczyńska, L. Anguilano, H. Ghazal, R. Krzyżyńska, A.J. Reynolds, N. Spencer, H. Jouhara, Potential of pyrolysis processes in the waste management sector, Thermal Science and Engineering Progress, Volume 3, 2017, Pages 171-197, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>

[26] Sergeev, V.V., Vladimirov, Y.A., Kalinina, K.S., Kozhukar, E.V, Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization, Construction of Unique Buildings and Structures, 51(12), 2016, 84–92,

[https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/12\(51\)/7\\_sergeev\\_51.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/12(51)/7_sergeev_51.pdf)