

Metode termičke obrade otpada

Komljenović, Dorian

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:979342>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD
METODE TERMIČKE OBRADJE OTPADA

Dorian Komljenović

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD
METODE TERMIČKE OBRADJE OTPADA

Mentor:

doc. dr. sc. Domagoj Nakić

Student:

Dorian Komljenović

Zagreb, 2023



IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja, Dorian Komljenović, student Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, JMBAG 0082066005, ovim putem izjavljujem da je moj završni rad pod naslovom Metode termičke obrade otpada, izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, 19. rujna 2023.

Potpis

SAŽETAK

Jedan od načina zbrinjavanja otpada koji nudi učinkovita i ekonomski prihvatljiva rješenja je termička obrada otpada. Iako je od strane šire javnosti često osporavana metoda, u svijetu se značajan dio otpada, posebice u razvijenim zemljama, obrađuje spaljivanjem, suspaljivanjem ili nekim od ostalih termičkih postupaka. Minimizacija utjecaja spalionica i suspalionica na okoliš glavni je problem termičke obrade te se posebna pažnja prilikom projektiranja postrojenja za termičku obradu posvećuje pročišćavanju otpadnih nusprodukata. U završnom radu objašnjena su postrojenja za različite postupke termičke obrade i postupci koji se u njima provode. Izneseni su pozitivni i negativni aspekti i postupci kojima se minimiziraju emisije štetnih tvari. Kritički je objašnjeno stanje u Republici Hrvatskoj i zašto se u pogledu termičke obrade još uvijek zaostaje za razvijenijim europskim državama, koje desetljećima primijenjuju postupke termičke obrade uz povoljne ekološke i ekonomske rezultate.

Ključne riječi: otpad, termička obrada, spaljivanje, suspaljivanje, piroliza, uplinjavanje, emisije štetnih plinova

ABSTRACT

One of the methods of waste disposal that offers efficient and economically acceptable solutions is the thermal treatment of waste. Although the method is often disputed by the general public, a significant part of the waste in the world, especially in developed countries with a developed economy, is processed by incineration, co-incineration or some other thermal process. Minimizing the impact of incinerators and co-incinerators on the environment is the main problem of thermal treatment, and particular attention is given to the reduction and treatment of waste products when designing thermal treatment plants. The plants for various thermal treatment procedures and the procedures carried out in them are described and explained in the final paper. The advantages and disadvantages and procedures that minimize emissions of harmful substances are presented. The situation in the Republic of Croatia and the reasons why Croatia lags behind European countries, which have been applying thermal treatment procedures with good ecological and economic results for decades, were critically reviewed.

Key words: waste, thermal treatment, incineration, co-incineration, pyrolysis, gasification, emissions of harmful gases

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	O GOSPODARENJU OTPADOM.....	2
2.1.	Gospodarenje otpadom u RH.....	4
3.	TERMIČKA OBRADA OTPADA.....	6
3.1.	Spaljivanje.....	8
3.2.	Uplinjavanje i piroliza.....	10
3.2.1.	Uplinjavanje.....	10
3.2.2.	Piroliza.....	12
3.3.	Ostali postupci – plazma tehnologije.....	13
4.	TEHNOLOGIJE SPALJIVANJA OTPADA.....	15
4.1.	Spaljivanje na rešetki ili roštilju.....	15
4.1.1.	Rešetke za spaljivanje.....	16
4.1.2.	Spremnik za sakupljanje otpadnog pepela.....	17
4.1.3.	Kanali za dovod zraka.....	17
4.1.4.	Ložište.....	17
4.2.	Spaljivanje u rotacijskim pećima.....	19
4.3.	Spaljivanje u fluidiziranom sloju.....	21
4.4.	Modularne spalionice.....	22
5.	UTJECAJ SPALJIVANJA OTPADA NA OKOLIŠ.....	24
5.1.	Emisije u zrak.....	24
5.2.	Pročišćavanje dimnih plinova.....	28
5.2.1.	Smanjenje emisija krutih čestica.....	28
5.2.1.1.	Elektrostatski taložnici.....	28
5.2.1.2.	Skraberi.....	29
5.2.1.3.	Vrećasti filtri.....	30
5.2.1.4.	Aerocikloni.....	31
5.2.2.	Smanjenje emisija kiselih plinova.....	31
5.2.2.1.	Mokri proces.....	31
5.2.2.2.	Polumokri proces.....	32

5.2.2.3	Suhi proces	32
5.2.3.	Smanjenje emisija dušikovih oksida.....	32
5.2.3.1	Selektivna nekatalitička redukcija	32
5.2.3.2	Selektivna katalitička redukcija.....	33
5.2.4.	Smanjenje emisija organskih ugljikovih spojeva.....	33
5.2.5.	Smanjenje emisija stakleničkih plinova.....	34
5.3.	Emisije u vodu.....	34
5.4.	Kruti ostatci.....	35
5.4.1.	Oporaba krutih ostataka	35
5.5.	Buka	36
6.	STANJE U REPUBLICI HRVATSKOJ	38
7.	ZAKLJUČAK.....	41
	POPIS LITERATURE	42
	POPIS SLIKA.....	44
	POPIS TABLICA.....	45

1. UVOD

Ljudska vrsta, gotovo od pretpostavljenog početka života na Zemlji, stvara otpad. Od aspiracije za preživljavanjem i opstankom kod najranijih čovjekolikih vrsta, do uistinu široke palete aktivnosti kod suvremenog čovjeka, stvaranje otpada direktna je posljedica velikog broja ljudskih aktivnosti kroz različite epohe. Povijesno je vrlo značajno razdoblje tehnoloških i industrijskih revolucija koje posljednjih dvjestotinjak godina donosi, osim nezamjenjivih i za suvremeno vrijeme nezamislivih proizvoda i ideja, demografsku ekspanziju i proširivanje gradova. Prema podacima znanstvene publikacije *Our World In Data*, koja djeluje na Sveučilištu u Oxfordu, pretpostavlja se da je na Zemlji u trenutku Prve industrijske revolucije (druga polovica 18. stoljeća) živjelo otprilike jedna milijarda ljudi, što je, za usporedbu, 70% populacije današnje Narodne Republike Kine ili otprilike 12.5% populacije Zemlje u 2023. godini [1]. Upravo su populacijska ekspanzija, razvitak industrije i tehnologije te porast standarda življenja u posljednjih nekoliko stotina godina doprinijeli porastu količine i heterogenosti otpada te povećanju štetnog utjecaja na prirodni i umjetni okoliš te živi svijet.

Iako prisutni kroz cijelu ljudsku povijest, štetni utjecaji uzrokovani ljudskom djelatnošću na okoliš u širim su razmjerima uglavnom ignorirani te se tom problemu sustavno pristupa sredinom 20. stoljeća na različitim konferencijama čiji su zaključci rezultirali zakonima i strategijama koji bi se, kako u teoriji tako i u praksi, trebali primjenjivati. Što se tiče otpada, najveći problem u Republici Hrvatskoj predstavlja gospodarenje otpadom, u čemu se zaostaje za razvijenijim članicama Europske Unije. Gospodarenje otpadom podrazumijeva aktivnosti i odluke u svrhu preveniranja nastanka otpada, obavljanje sakupljanja, prijevoza i zbrinjavanja otpada te nadzora tijekom i nakon tih aktivnosti. Obrada otpada je postupak ili skup postupaka kojima se manipulira svojstvima otpada kako bi navedene probleme količine, heterogenosti i opasnosti otpada svelo na minimum i eventualne produkte tih postupaka iskoristilo u druge svrhe. Učinkovita i ekonomski relativno racionalna metoda smanjenja količine otpada je termička obrada otpada. Upitna ekonomska isplativost i ekološki utjecaj razlozi su zbog kojih je pod povećalom šire javnosti.

2. O GOSPODARENJU OTPADOM

Iako se često koriste kao istoznačnice, smeće i otpad ne predstavljaju isti pojam. Prema Zakonu o gospodarenju otpadom (NN 84/21), otpad se definira kao: „Svaka tvar ili predmet koji posjednik odbacuje, namjerava ili mora odbaciti“ [2]. Obaveza je nadležnih institucija i u javnom je interesu prikupljanje, prijevoz i obrada otpada. Sličan pojam pojmu otpada je kolokvijalizam „smeće“. Smećem se smatra otpad kojim se neprimjereno ili pogrešno rukuje, a nastaje miješanjem različitih vrsta otpada [3]. Dakle, jednak je proces stvaranja otpada i smeća, ali razlika je u tome hoće li se kontrolirano prikupljati i obrađivati (otpad) ili nemarno i nekontrolirano odbacivati u prirodu (smeće). Stvaranje otpada direktna je posljedica mnogobrojnih svakodnevnih aktivnosti, a koje su u porastu, čime je i količina otpada u stalnom porastu.

Najosnovnija podjela otpada je podjela prema svojstvima i prema mjestu nastanka, dok je dodatno moguće napraviti podjelu prema mogućnostima razgradnje i prema fizikalnim svojstvima. Podjela otpada prikazana je na dijagramu:



Slika 1 - Podjela otpada [4]

Opasni otpad je otpad koji ima jedno ili više od ovih svojstava: eksplozivnost, reaktivnost, zapaljivost, nagrizanje, štetnost, toksičnost, infektivnost, karcinogenost (kancerogenost), mutagenost, ekotoksičnost, svojstvo otpuštanja otrovnih plinova bilo reakcijom ili biološkom razgradnjom. To su, primjerice, baterije, akumulatori, otpadna ulja, medicinski infektivni otpad, radioaktivni otpad, itd. Neopasni otpad ne sadrži niti jedno svojstvo opasnog otpada. Popis neopasnog otpada vrlo je velik i to su, npr. nerasuta keramika i staklo, PET i tvrda plastika, plastične folije, otpadni metali (bez teških metala), biljna i životinjska tkiva te otpad iz šumarstva (ne uključuje motorna ulja). Inertni otpad je tip neopasnog otpada koji nakon odlaganja na odlagališta ne doživljava nikakve značajnije fizičke, kemijske ili biološke promjene. Primjer su građevinski materijali nakon rušenja konstrukcija: opečni proizvodi, beton, asfalt, gips i karton te brojni drugi [2, 5].

Ipak, vrlo važan pojam koji uključuje otpad je gospodarenje otpadom, koji je prema Zakonu o gospodarenju otpadom (NN 84/21), definiran kao „djelatnosti sakupljanja, prijevoza, uporabe uključujući razvrstavanje i zbrinjavanja otpada, uključujući nadzor nad obavljanjem tih djelatnosti, nadzor i mjere koje se provode na lokacijama na kojima se zbrinjavao otpad te radnje koje poduzimaju trgovac otpadom i posrednik u gospodarenju otpadom“ [2]. Direktno utjecaj na donošenje bilo kakvih planova, programa i odluka na temelju Zakona o gospodarenju otpadom (NN 84/21) ima red prvenstva, odnosno, s obzirom na mogućnosti obavljanje neke aktivnosti, prema hijerarhijskom načelu se dodjeljuje prednost najboljoj. Pet je aktivnosti u redu prvenstva [2]:

- sprječavanje nastanka otpada
- priprema za ponovnu uporabu
- recikliranje
- ostali postupci uporabe, npr. energetska uporaba
- zbrinjavanje

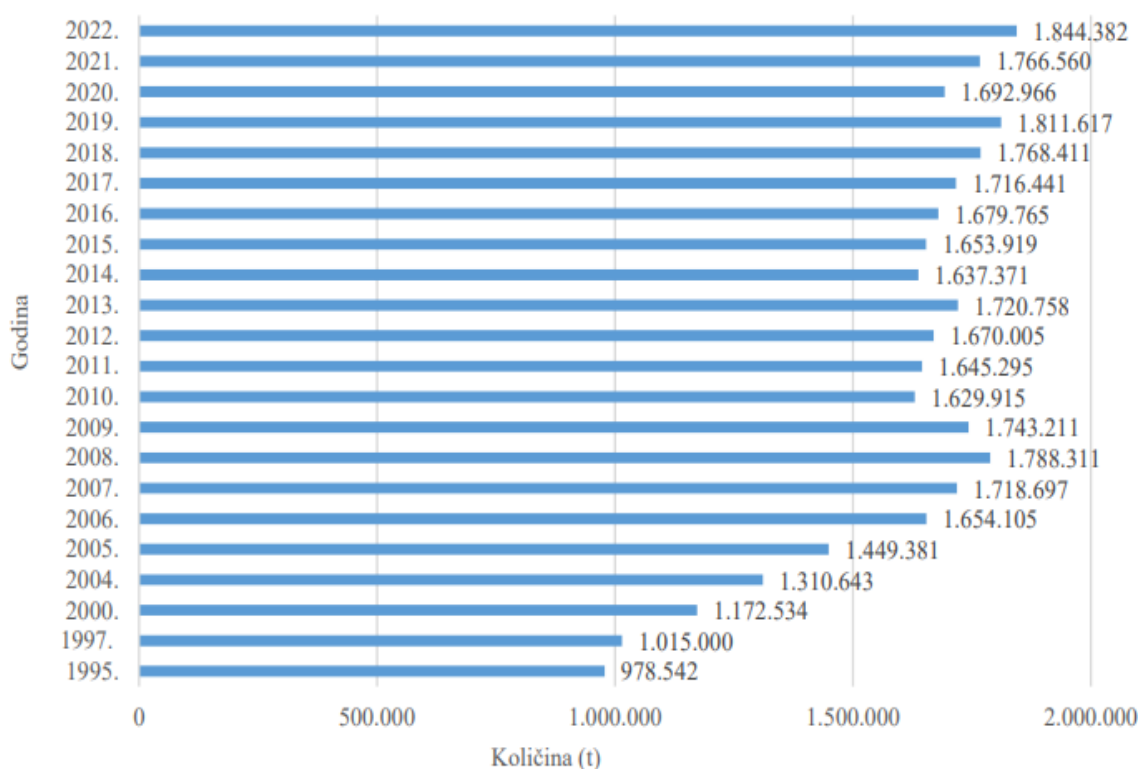
Red prvenstva nije apsolutna metoda kad se odlučuje između više mogućnosti zato što u nekim slučajevima može doći do odstupanja od reda, koja moraju biti opravdana analizama učinaka stvaranja i gospodarenja tom vrstom otpada, kod koje dolazi do odstupanja [2]. Ukratko, s otpadom se mora postupiti na način da ne ugrožava ljudsko zdravlje i ne šteti okolišu ili mu šteti, ali u najmanjoj mogućoj mjeri. Uobičajeno se pri tome koristi koncept 6R + 3E (*reduce, reuse, repair, recycle, recover, residual disposal + educate, economise, enforce*) [6]. U tom konceptu sažeta je sva bit gospodarenja otpadom.

Naposljetku, važno je razlikovati uporabu i zbrinjavanje otpada. Uporaba otpada (u redu prvenstva pod točkama 2. – 4.) je svaki postupak čiji je primarni zadatak uporaba otpada u korisne svrhe. Ti su postupci u Zakonu o gospodarenju otpadom (NN 84/21) dani kao Dodatak II., a označavaju se sa slovom „R“. Zbrinjavanje otpada je neki od postupaka obrade otpada ili konačnog odlaganja otpada čiji primarni cilj nije uporaba otpada u korisne svrhe. U Dodatku I. Zakona o gospodarenju otpadom (NN 84/21) popisani su postupci zbrinjavanja otpadom, a označavaju se slovom „D“ [2, 7].

Obrada otpada uključuje i uporabu i zbrinjavanje otpada. Mehaničkim, fizikalnim, termičkim, kemijskim ili biološkim postupkom utječe se na svojstva otpada u svrhu smanjivanja količine i povećanja iskoristivosti u daljnjim fazama. Tri najčešća postupka obrade otpada su mehanička i biološka (MBO i BMO) te termička obrada otpada [6].

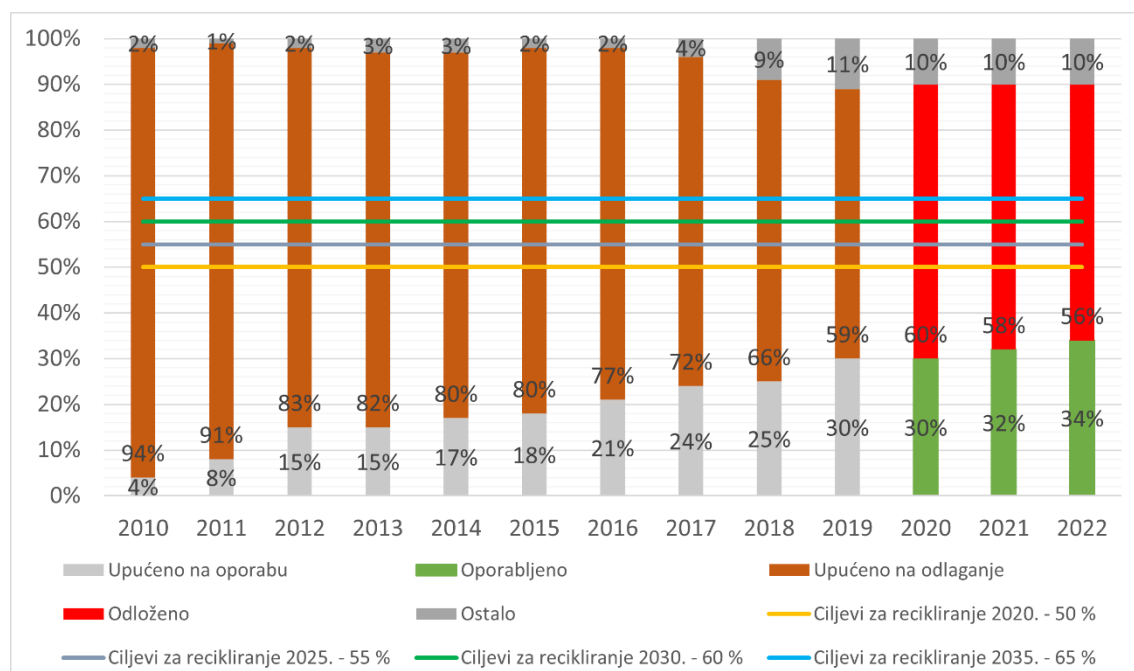
2.1. Gospodarenje otpadom u RH

Prema raznim statističkim istraživanjima provedenima u posljednjih 28 godina, Republika Hrvatska, za svoje prilike, proizvodi velike količine otpada. Kada je riječ samo o komunalnom otpadu, u 2022. proizvedeno je 1844 tisuća tona komunalnog otpada ili 474 kilogram otpada po stanovniku, uz trend rasta od 4.39 % u odnosu na 2021. godinu. Na grafičkom prikazu može se vidjeti trend rasta proizvodnje komunalnog otpada do gospodarske krize 2008. godine kada se bilježi blagi pad, ali ulaskom u Europsku uniju započinje novi početak trenda rasta [8].



Slika 2 – Količina stvorenog komunalnog otpada u RH, 1995. – 2022. [8]

Od ukupnog prikupljenog otpada 2022., 56 % završava na deponijama, 34 % otpada prolazi proces oporabe otpada, dok preostalih 10 % odlazi na ostale postupke obrade otpada, među kojima je najprimjenjivija mehaničko-biološka obrada (Slika 3) [8].



Slika 3 - Raspodjela prikupljenog otpada u Republici Hrvatskoj, 2010. – 2022. [8]

Tendencija je i jedan od glavnih ciljeva Europske komisije smanjenje odlaganja otpada na sanitarnim odlagalištima na manje od 10 % do 2035. godine, dok su ciljevi za ponovnu uporabu i recikliranje 60 % otpada do 2023. godine [8].

3. TERMIČKA OBRADA OTPADA

Čovjek većinu svog prebivanja na Zemlji nije stvarao ni približnu količinu, niti približno heterogen otpad kao u posljednjih 250 godina. Od sveukupnog otpada, jedan dio moguće je oporabiti, dok se otpad koji nije moguće oporabiti odlaže na odlagališta. S vremenom odlagališta, kojima gravitiraju velika naselja, postaju preopterećena i traže se nova rješenja za zbrinjavanje otpada. Jedan od zasigurno najstarijih antropogenih načina obrade otpada je termička obrada otpada.

Termička obrada otpada podrazumijeva fizikalno-kemijsku razgradnju otpada, gdje kemijsku komponentu predstavlja oksidacija gorive tvari, a fizikalnu komponentu promjena temperature. Iako se radi o vrlo skupoj i, od strane šire mase, omraženoj metodi obrade i uporabe otpada, procjenjuje se da se od ukupne količine obrađenog otpada u razvijenim zemljama čak do 90 % termički obrađuje, a optimizacija i ulaganje u razvoj procesa svode se na smanjenje emisije štetnih plinova i čestica [9], ali i ekonomsku optimizaciju procesa. Prema članku 4. Zakona o gospodarenju otpadom (NN 84/21)[2], razlikuju se dva pojma: spaljivanje i suspaljivanje otpada. Spaljivanje otpada je postupak uporabe odnosno zbrinjavanja otpada u kojem se spaljuje otpad sa ili bez uporabe topline proizvedene izgaranjem, što uključuje oksidacijsko spaljivanje otpada i druge termičke procese poput pirolize, uplinjavanja ili plazma procesa, sve dok se rezultirajući produkti tih obrada nakon toga spaljuju [2]. Suspaljivanje otpada je postupak uporabe odnosno zbrinjavanja otpada čija je prvenstvena svrha proizvodnja energije ili materijalnih produkata (proizvoda) i u kojem se otpad koristi kao redovno ili dopunsko gorivo ili u kojem se otpad termički obrađuje radi zbrinjavanja [2]. Prvenstvena je svrha postrojenja za suspaljivanje otpada proizvodnja energije ili materijalnih produkata, a otpad se koristi kao redovno ili dopunsko gorivo. S obzirom na to da otpad sve učestalije služi kao gorivo za stvaranje para koje pokreću turbine i stvaraju energiju, neka postrojenja za termičku obradu otpada, intuitivno prozvana spalionicama, još se nazivaju i energanama na otpad.

Mnogi su razlozi primjene termičkog načina obrade i uporabe otpada. Promatraču najočitiiji razlog je smanjenje volumena otpada u prosjeku za 60 - 80 % i smanjenje mase za minimalno 75 % početne mase otpada [9]. Nadalje, općenito je poznato da se termičkom obradom proizvoda svakodnevne upotrebe uništavaju štetne tvari i otrovi (na primjer pasterizacija prehrambenih proizvoda, sterilizacija kirurške opreme). Termičkom obradom otpada uništavaju se opasnosti iz otpada pa je kumulativna štetnost posrednih i neposrednih produkata manja u odnosu na odlaganje sirovog, neobrađenog otpada. Zahvaljujući inovacijama iz polja strojarstva, jedna od pozitivnih posljedica termičke

obrade otpada mogućnost je iskorištavanja otpada kao resursa za proizvodnju električne ili toplinske energije te kao goriva, umjesto fosilnih goriva. U stručnoj se literaturi za prvi navedeni postupak koristi naziv „Waste-to-Energy“ ili „Energy-from-Waste“ (WtE ili EfW), dok je primjena otpada kao goriva poznata kao Gorivo iz otpada (GIO) ili *Refuse Derived Fuel* (RDF). Isto tako, zahvaljujući raznim istraživanjima znanstvenika usmjerenja građevinarstva, ostaci spaljivanja primjenjivi su kao proizvodni materijal. Tako se leteći pepeo, kao ostatak procesa termičke obrade, može koristiti u građevinarstvu kao materijal za modificiranje svojstava cementne paste u betonu. *RDF* konceptom mijenja se značajna količina fosilnih goriva, čiji resursi su uvelike ograničeni. I posljednje, visoka cijena zemljišta, ograničeni kapaciteti zemljišta u većim urbanim sredinama i minimizacija troškova transporta jedan su od ključnih razloga izgradnje skupih postrojenja za termičku obradu i uporabu otpada [9 – 11].

Usprkos mnogim razlozima koji idu u prilog korištenju postrojenja za termičku obradu, svakako se mora spomenuti i niz nedostataka. Postrojenja za termičku obradu zahtijevaju velika početna ulaganja koja poslije nisu praćena jeftinim radom postrojenja, nego, naprotiv, velikim troškovima rada koji se odvija 24 sata dnevno, tijekom cijele godine. Proračun ekonomske isplativosti spalionice ili odlagališta otpada upravo je glavni argument pri odabiru načina gospodarenja otpadom. Uz to, heterogenost suvremenog otpada dovodi do toga da spaljivanjem kao nusprodukt nastaje zgura (još se koriste nazivi šljaka, troska, drozga) i štetni plinovi, koji se prije ispuštanja u okoliš moraju pročistiti, što je propisano zakonskom regulativom. Zgura je kemijski vrlo slična cementnom klinkeru i može služiti kao sastavni dio određenih vrsta cemenata, ali kao i cementni klinker, veliki je onečišćivač okoliša. Iako postrojenja za termičku obradu imaju manji doprinos u onečišćivanju okoliša od odlagališta otpada, njihov je utjecaj i dalje značajan [9, 10]. Štoviše, prema znanstvenom istraživanju *Institute for Environment and Development (LESTARI)* Nacionalnog sveučilišta u Maleziji, u društvima koja su dugoročno u okruženju spalionica za termičku obradu otpada rizik od različitih zdravstvenih komplikacija, kao što su različiti oblici tumorskih oboljenja, urođene mane, neurološke bolesti, utjecaji na reproduktivno zdravlje, i tako dalje, se povećava [12]. Nadalje, postrojenja nemaju potrebu za velikom radnom snagom, a problem predstavlja i udaljenost spalionice ukoliko se nalazi udaljeno od naselja, s obzirom na to da je u tom slučaju transport otpada prilično skup [9].

Dva su fundamentalna postupka termičke obrade otpada [9]:

- spaljivanje i suspaljivanje (izgaranje) – više od 99 % termički obrađenog otpada u svijetu
- piroliza – manje od 1 % termički obrađenog otpada u svijetu

Osim izgaranja i pirolize još postoje uplinjavanje, plazma tehnologije, sušenje, dezinfekcija (sterilizacija), hidriranje i ostali postupci, koji su kombinacija nabrojanih postupaka.

3.1. Spaljivanje

Termičke metode svoj pravi razvoj i napredak doživljavaju ulaskom u razdoblje takozvanog antropocena, a završetkom Drugog svjetskog rata, kada se naglasak stavlja na tehnologije pročišćavanja otpadnih produkata spaljivanja čije su koncentracije propisane zakonskom regulativom [11].

Spaljivanje ili izgaranje podrazumijeva kemijski proces apsolutne razgradnje gorive organske tvari sadržane u otpadu pri visokim temperaturama uz dovoljnu količinu kisika [9]. Razni su tehnološki postupci spaljivanja otpada i detaljno će biti objašnjeni u poglavlju 4. „Tehnologije spaljivanja otpada“. Sveukupno se radi o skupu aktivnosti koji obuhvaća procese kao što su spaljivanje otpada u ložištu i razmjena energije u parnom kotlu, ali i aktivnosti i procese pročišćavanja plinova prije ispuštanja u atmosferu te obrade krutih nusprodukata [9].

Na slici 4 je prikazan sustav spaljivanja kao sustav crne kutije. Sam sustav spaljivanja vrlo je složen i promatrača laika jedino što zanima je ono što je očito, a to su ulaz i izlaz iz sustava. *Input* sustava su različiti resursi, kao što su novac, vrijeme, energija, ljudstvo, pa onda sve što izravno ulazi u ložište, kao što su otpad, dodatci i tvari, stabilizatori, zrak, i tako dalje. Unutar crne kutije događaju se neke aktivnosti, koje promatraču ili korisniku sustava nisu od značaja, nego su mu od značaja izlazi iz sustava. Takozvani *Output* sustava čine opipljivi i vidljivi produkti, kao što su pepeo, drozga (šljaka, zgura), ostali kruti ostatci, otpadne vode (ukoliko postoji vidljivo zagađenje) i dimnjački dim te nevidljivi dio izlaza kao što su toplinska i/ili električna energija te različiti plinovi.



Slika 4 - Prikaz sustava spaljivanja

Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, a aspekti vezani uz spaljivanje prikazani su u tablici 1. Ključno je odrediti pozitivne i negativne posljedice spaljivanja te mjere zaštite i kontrole u svrhu optimizacije procesa. To se radi raznim studijama, počevši od studije utjecaja zahvata na okoliš, izradom cjeloživotne analize spaljivanja na temelju projektiranog razdoblja korištenja postrojenja i sl. [9].

Tablica 1 - Prednosti i nedostaci spaljivanja [9]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • Relativno čist proces ako se postrojenje izvodi i proces vodi po pravilima struke • Nije nužna dislokacija • Bez značajnije buke i mirisa • Mogućnost recikliranja produkata • Oporaba energije • Pogodno za velike količine otpada • Odlaganje znatno manje količine inertnog otpada • Povoljno za visokokaloričan otpad, patološki otpad i slično 	<ul style="list-style-type: none"> • Mala produktivnost za mala postrojenja s malim kapacitetom • Veliki inicijalni troškovi i troškovi upravljanja • Potrebna visokoobrazovana struka za upravljanje postrojenjem • Toksični metali u pepelu • Emisije toksičnih plinova • Nepovoljno za vlažan i manje kaloričan otpad

3.2. Uplinjavanje i piroliza

Relativna svrsishodnost i učinkovitost procesa spaljivanja nije zaustavila istraživanja u polju termičke obrade otpada, stoga su 1970-ih godina otkriveni i razvijeni procesi pirolize i uplinjavanja. Procjenjuje se da je manje od 1 % termički obrađenog otpada na globalnoj razini obrađeno procesima koji nisu spaljivanje i suspaljivanje, što prikazuje stvarnu sliku primjene različitih termičkih postupaka, ali i nepobitnu dominaciju spaljivanja. Alternativni tehnološki postupci uplinjavanja i pirolize teže razdvajanju reakcijskih komponenata koje se javljaju pri klasičnom postupku izgaranja u procesu spaljivanja, a sve na način da se kontroliraju temperaturni uvjeti i tlak u posebno projektiranim spremnicima, tj. reaktorima. Oba procesa mogu se odvijati na dva načina: ili u posebno projektiranim reaktorima, ili u reaktorima za konvencionalnu tehnologiju izgaranja koja je posebno prilagođena uvjetima reakcija, odnosno prilagođene su koncentracije kisika i temperature [9, 13].

Osim općenitih ciljeva termičke obrade otpada (npr. učinkovito zbrinjavanje otpada, smanjenje volumena i mase otpada, itd.), pirolitički sustavi i uplinjavanje dodatno teže pretvaranju određenih frakcija otpada u sintetski plin (u engleskoj literaturi, pa i u domaćoj, čest je pojam *syngas*) i smanjenju volumena dimnog plina i koncentracije štetnih tvari u njemu kako bi se smanjili troškovi pročišćavanja dimnih plinova prije ispuštanja u atmosferu. Dok spaljivanje funkcionira na način da obnavlja isključivo energetska vrijednost otpada, piroliza i uplinjavanje razlikuju se u tom slučaju zato što su korišteni za obnovu kemijske vrijednosti otpada, tj. dobiveni kemijski produkti u drugim se procesima mogu koristiti kao sirovina. Međutim, ovo je rijetka pojava s obzirom na to da se u termičkoj obradi otpada spaljivanje, uplinjavanje i piroliza najčešće međusobno kombiniraju i to u istom postrojenju za obradu kao dio jedinstvenog, integriranog procesa. U tom će se slučaju događati energetska uporaba otpada, a ne kemijska uporaba, što je cilj pirolize i uplinjavanja [13].

3.2.1. Uplinjavanje

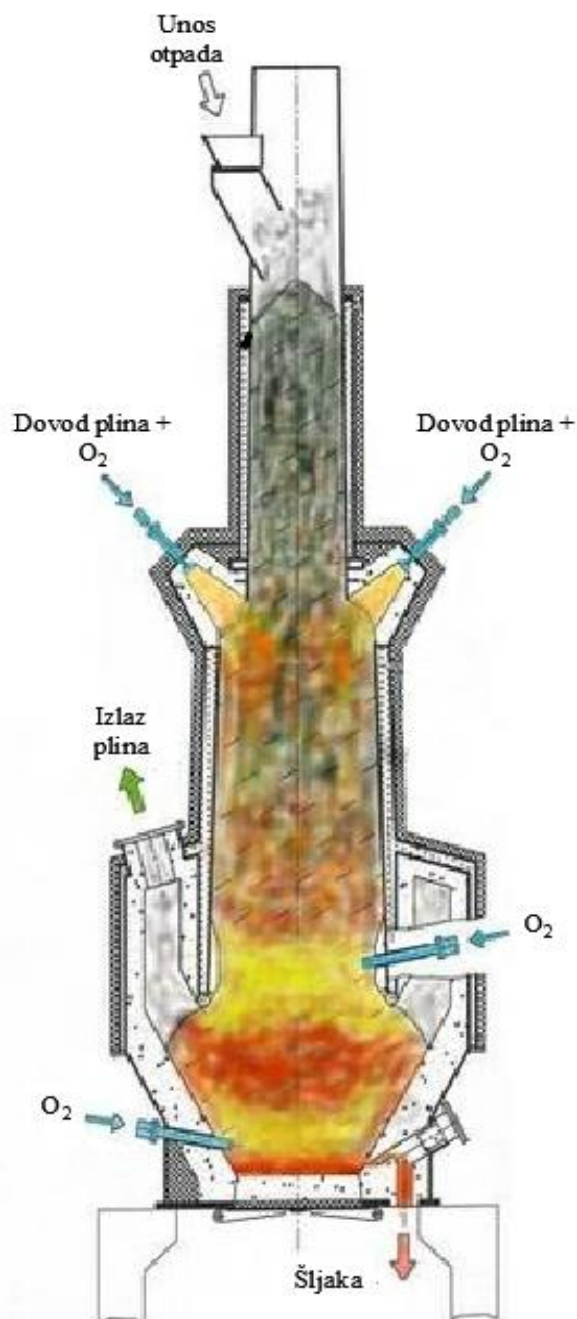
Uplinjavanje je postupak djelomične termičke obrade otpada uz nedovoljnu količinu kisika pri vrlo visokim temperaturama, kojim nastaje sintetski plin/*syngas* koji se može koristiti kao sirovina u nekim drugim procesima ili kao goriva tvar. Pogodna je metoda za obradu komunalnog otpada, određenih vrsta opasnog otpada i osušenog mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) [14].

Karakteristike procesa rasplinjavanja su [13]:

- odvijanje procesa na temperaturama od 500 do 1600 °C,
- stvaranje plina i šljake kao krutog produkta (posebice pri visokim temperaturama),
- odvijanje procesa pod visokim tlakovima (1 do 45 bara),
- mala postrojenja za obradu (posebice kod uplinjavanja pod visokim tlakom),
- smanjena emisija štetnih tvari.

Tehnologija uplinjavanja nije široko primjenjivan sustav termičke obrade iz razloga što zahtijeva primjenu goriva razmjerno homogenog sastava, što znači da je potreban predtretman komunalnog otpada. Usprkos tomu, ima veliki potencijal za iskorištavanje zbog toga što se sintetski plin može koristiti u plinskim motorima i turbinama s ciljem smanjenja korištenja fosilnih goriva, što je jedan od ciljeva Europske komisije [9, 13].

Na slici 5 prikazan je primjer postrojenja za uplinjavanje pri izrazito visokim temperaturama.



Slika 5 – Ložište postrojenja za postupak uplinjavanja [13]

3.2.2. Piroliza

Piroliza, kao druga osnovna metoda termičke obrade otpada, je kemijski proces razgradnje organske tvari pri visokim temperaturama bez prisustva kisika pri čemu nastaju pirolitički plin i ulje te čvrsti koks. Sam proces izvodi se u vakuumu, ali uvijek se računa na određenu koncentraciju kisika koja se nalazi u otpadu, a nije eliminirana preliminarnim postupcima. S obzirom na temperaturu pri kojoj se piroliza odvija, razlikuje se niskotemperaturna (do 500 °C), srednjetemperaturna (do 800 °C) i

visokotemperaturna (više od 800 °C) piroliza. Proporcionalno s rastom temperature povećava se i udio pirolitičkog plina, a smanjuje se udio krute i tekuće faze [9].

Četiri su glavne, najjednostavnije faze pirolitičkog procesa prema Margeti [9]:

- sušenje: temperatura od 100 do 150 °C
- destilacija i kreiranje: temperatura od 200 do 550 °C
- uplinjavanje: temperatura od 600 do 700 °C
- izgaranje (nepotpuno, uz manjak kisika): temperatura od 800 do 1200 °C.

U stranoj se literaturi prije faze sušenja navodi još i priprema i mljevenje otpada, koji su nužni kao predtretman komunalnog otpada [13].

Pirolitički proces vrlo je složen i, kao i uplinjavanje, pravu primjenu ne nalazi u obradi komunalnog otpada jer ne odgovara zahtjevu obrade ogromne količine otpada u kratkom vremenu. Potencijal pirolize je u obradi čišćih organskih materijala, kao što je drvo, gdje daje zadovoljavajuće rezultate.

Tablica 2 - Prednosti i nedostaci pirolitičkih procesa [9]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • Oporaba sintetskog plina • Čišći i ekološki prihvatljiviji procesi • Manja postrojenja za obradu (pogotovo postrojenja pod tlakom) • Jednostavnija i jeftinija kontrola emisije plinova • Moguće odvijanje u postrojenjima za spaljivanje 	<ul style="list-style-type: none"> • Nepovoljno za vlažni otpad • Nužan predtretman komunalnog otpada • Velika viskoznost nastalog ulja može stvarati problem kod transporta • Nije pogodno za obradu velikih količina otpada u kratkom vremenu

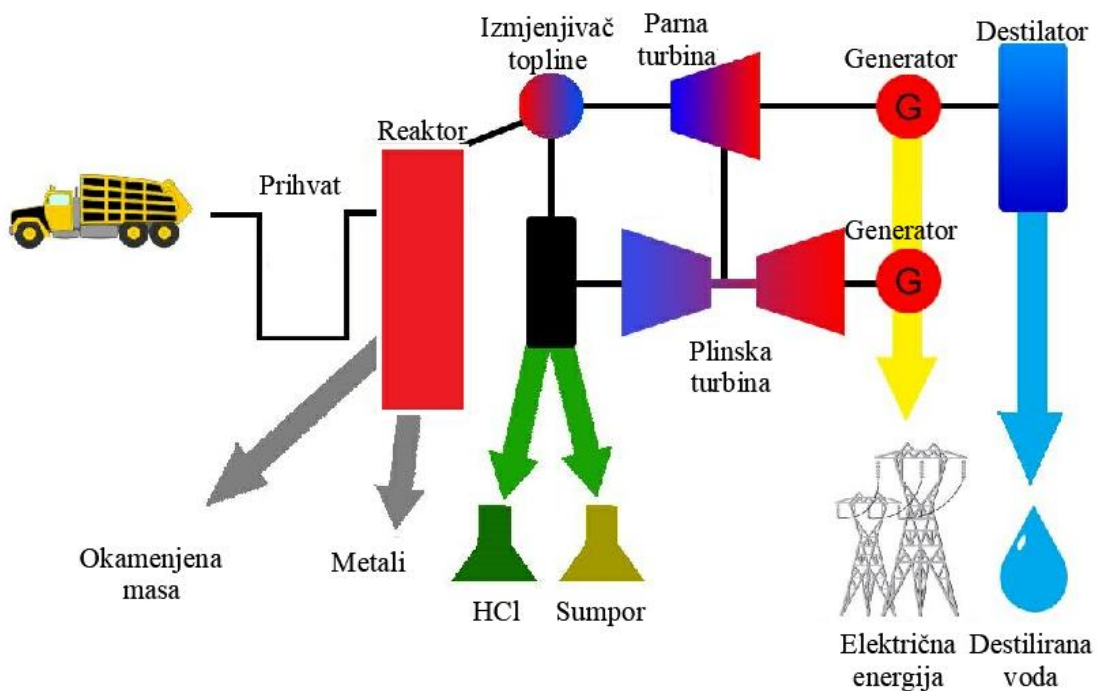
3.3. Ostali postupci – plazma tehnologije

Plazma postupak je, u osnovi, varijanta procesa uplinjavanja. Razlog zbog kojeg se zasebno obrađuje je taj što se radi o trenutno najboljoj i najnaprednijoj tehnologiji termičke obrade otpada, koja uz najnižu cijenu za obradu jedne tone komunalnog otpada može obrađivati gotovo sve vrste otpada, osim nuklearnog [13, 15].

Plazma je tvar sastavljena od nabijenih čestica (elektrona ili iona) koja nastaje pri izrazito visokim temperaturama (prisutno u međugalaktičkim područjima, uključujući

Sunce). Umjetno se može stvoriti zagrijavanjem neutralnog plina ili jakim elektromagnetskim poljem, a nabijene čestice čine ju elektroprovodljivom. Zbog različitih svojstava u odnosu na krutine, tekućine i plinove smatra se zasebnim agregatnim stanjem [15].

Postupak se odvija u vertikalnom spremniku oblika krnjeg stošca unutar kojeg se nalaze takozvane plazma-baklje, uređaji koji stvaranjem izrazito visoke temperature od 5000 do 15000 °C induciraju plazmu. Prije početka postupka u reaktoru, otpad je poželjno usitniti i homogenizirati, ali nije nužno. Ulaskom u reaktor gotovo odmah dolazi do procesa uplinjavanja zbog ekstremno visokih temperatura, organski materijali sagorijevaju i izdvajaju u plinove, a anorganski teku iz reaktora poput lave. Proces u potpunosti iskorištava sve što u reaktor ulazi: anorganske tvari vraćaju se kao kamen staklaste strukture; metali ostaju metali; plinovi se vraćaju kao plinovi, a voda preostaje kao destilirana voda (slika 5). Tehnologija je komercijalno uspostavljena i dostupna, ali može biti vrlo skupa i složena te zahtjevna za operatera čime je njezina isplativost upitna [13, 15].



Slika 6 - Proces zbrinjavanja otpada plazma postupkom [15]

4. TEHNOLOGIJE SPALJIVANJA OTPADA

Dvije su osnovne podjele postrojenja za termičku obradu i oporabu otpada velikih razmjera otpada: postrojenja za masovno spaljivanje (engl. *mass burn incinerator*) i modularne spalionice (engl. *modular incinerator units*). U ovom će se poglavlju obraditi osnovni tehnološki postupci masovnog spaljivanja kao što su spaljivanje na rešetki ili roštilju, spaljivanje u rotacijskoj peći i spaljivanje u fluidiziranom sloju. S obzirom na mogućnosti spaljivanja velikih količina otpada, spalionice koje se koriste jednom od ovih tehnologija s pravom nose status *large-scale* spalionica, odnosno spalionica velikog kapaciteta [16 – 18].

4.1. Spaljivanje na rešetki ili roštilju

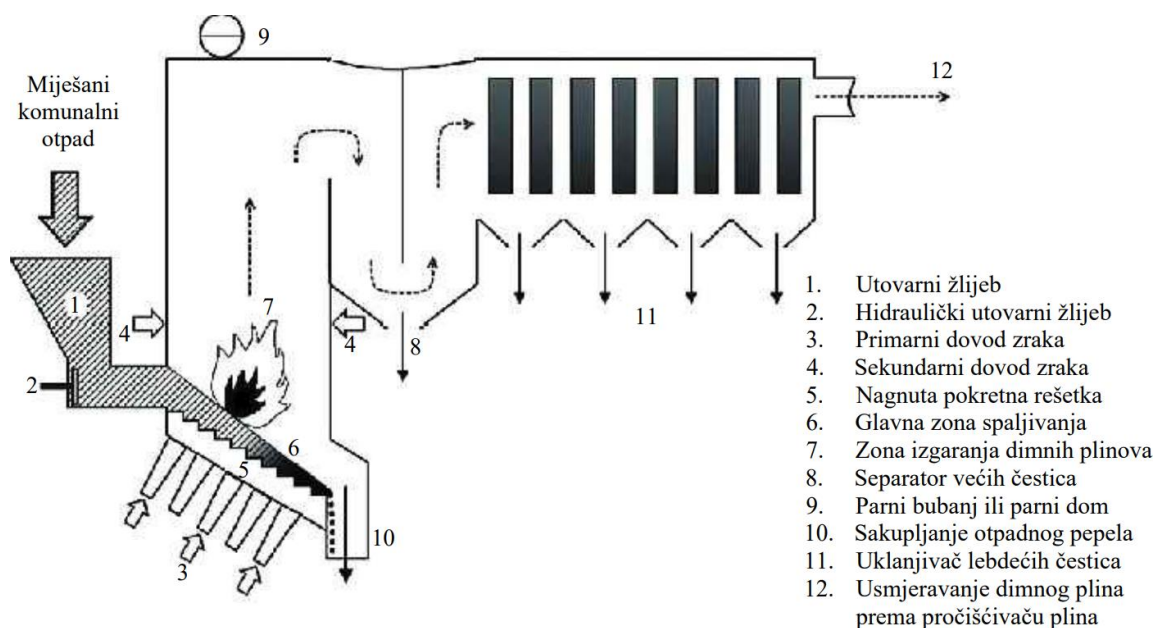
Spaljivanje na rešetki (roštilju) najstariji je tehnološki postupak termičke obrade otpada prvotno korišten u svrhu spaljivanja ugljena, a kasnije je preinačen za termičku obradu otpada. Postupak spaljivanja na rešetki najčešće se primjenjuje pri spaljivanju prethodno neobrađenog miješanog komunalnog otpada (engl. *Municipal solid waste*, skr. *MSW*). Istovremeno s komunalnim otpadom moguće je spaljivati i komercijalni i industrijski otpad, mulj s UPOV-a. i određeni medicinski otpad. Približno 90 % postrojenja za termičku obradu komunalnog otpada koristi se ovom tehnologijom [13].

Postrojenja za termičku obradu otpada koja koriste tehnološki postupak izgaranja na rešetki moraju biti osmišljena, projektirana i upravljana tako da poluče dobro sagorijevanje plinova osiguravajući minimalno zadržavanje istih na minimalnoj temperaturi i uz minimalno prisustvo kisika. Spaljivanje se provodi na temperaturama od minimalno 850 °C do 1100 °C. Proces izgaranja traje najmanje dvije sekunde pri koncentraciji kisika od minimalno 6 %, a ključni pokazatelj uspješnosti i kvalitete spaljivanja je sadržaj ugljikovog monoksida (CO) u dimnim plinovima. Izuzetno je važno naglasiti kako primarni plinoviti produkt spaljivanja nije dozvoljeno ispustiti izravno u atmosferu, već on prolazi razne procese pročišćavanja i smanjenja do zakonski reguliranih koncentracija supstanci [13].

Uobičajeno, ovaj se tip postrojenja sastoji od nekoliko sastavnih dijelova (slika 7) [13]:

- spremnika za doziranje otpada,
- rešetke za spaljivanje,
- spremnika za sakupljanje otpadnog pepela,

- kanala za dovod zraka,
- ložišta ili komore za spaljivanje,
- pomoćnih plamenika.



Slika 7 - Shema postrojenja za postupak spaljivanja na pokretnoj rešetki [13]

4.1.1. Rešetke za spaljivanje

Nekoliko je različitih uloga rešetki za spaljivanje [13]:

- transport otpada koji se spaljuje kroz peć,
- potpaljivanje i oslabljivanje (rahljenje) otpada koji se spaljuje,
- pozicioniranje glavne zone spaljivanja u ložištu, sukladno propisanim mjerama kontrole rada,
- dobra raspodjela zraka unutar ložišta s obzirom na uvjete i zahtjeve prema izgaranju otpada.

Otpad se na rešetkama ne zadržava dulje od 60 minuta. Radni vijek rešetke produljuje se ispravnim održavanjem i hlađenjem rešetke kako bi se kontrolirale temperature metala. Mediji kojima se hlađenje provodi su zrak i tekući mediji kao voda, ulja i tekućine za rashlađivanje. Prema podacima sakupljenim od strane Europske unije, otprilike 90% postrojenja koja koriste tehnološki postupak rešetke za izgaranje služi se principom zračnog hlađenja, gdje je primarna funkcija zraka upumpavanje kisika u ložište, no, s obzirom na to da se upumpavanje vrši kroz primarni dovod zraka koji se nalazi ispod same rešetke, ujedno se vrši i hlađenje rešetki. Nekoliko je tipova rešetki

među kojima je glavna podjela na pomične i nepomične te kose i ravne rešetke. Suvremena postrojenja sadrže pomične kose rešetke [13].

4.1.2. Spremnik za sakupljanje otpadnog pepela

Iako ime obznanjuje prilično jednoličnu ulogu, spremnik je multifunkcionalni dio postrojenja. Osim sakupljanja otpadnog pepela, spremnik služi za hlađenje i naknadno izbacivanje pepela koji nastaje kao produkt izgaranja otpada na rešetki. Nadalje, služi i kao zračna plomba, odnosno zračna brtva za ložište, na način da sprječava nekontrolirani prodor zraka u ložište te sprječava emisije nepročišćenih dimnih plinova [13].

4.1.3. Kanali za dovod zraka

Zrak je vrlo bitna stavka procesa izgaranja na rešetki jer obuhvaća sljedeće zadatke [13]:

- osiguravanje dovoljne količine kisika u svakom trenutku procesa,
- hlađenje rešetki,
- izbjegavanje stvaranja šljake u ložištu,
- miješanje dimnih plinova.

Prema mjestu upumpavanja zraka u ložište, razlikujemo primarni i sekundarni zrak, ali zbog različitih vrsta postrojenja negdje se koriste i tercijarni zrak te recirkulirani dimni plinovi [13].

Primarni zrak u ložište se upuhuje u prostor ispod rešetke iz razloga što se na taj način omogućuje kontrolirana raspodjela zraka. U normalnim uvjetima zrak se ne mora zagrijavati, no u slučaju kada je kalorična vrijednost otpada niska i potrebno ga je prethodno prosušiti i obraditi, zrak se može zagrijati [13].

Sekundarni zrak upuhuje se u ložište velikim brzinama pomoću posebnih instrumenata. Najčešće se upuhuje iznad glavne zone spaljivanja (iznad otpada) čime se postiže potpuno izgaranje i miješanje dimnih plinova [13].

4.1.4. Ložište

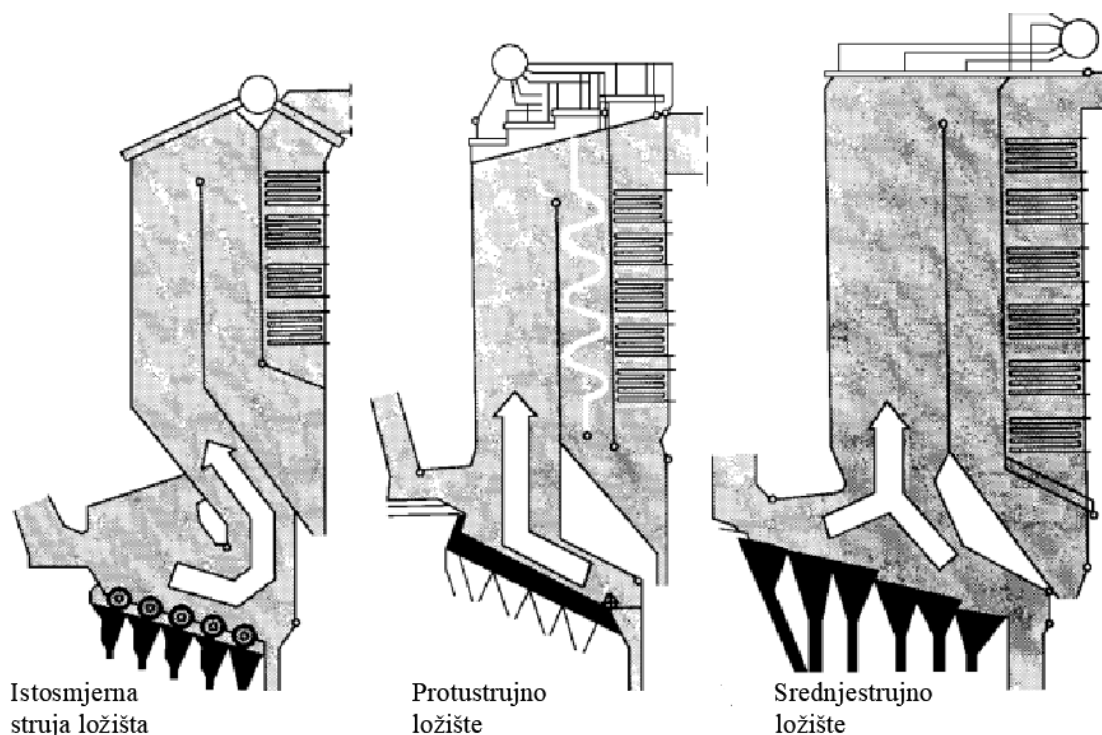
U većini slučajeva, radi se o prostoru omeđenom rešetkom na dnu, hlađenim i nehlađenim zidovima s bočnih strana i stropa na kojem se može nalaziti parni bubanj. Vrsta ložišta određuje se prema sljedećim kriterijima [13]:

- vrsti i veličini rešetke za spaljivanje – definira veličinu poprečnog presjeka,

- potrebnom vremenu zadržavanja dimnih plinova unutar ložišta – za potpuno izgaranje potrebno je određeno vrijeme reakcije plinova pri visokim temperaturama,
- činjenici da se dimni plinovi hlade upumpavanjem sekundarnog zraka – nužno je zadržati dimne plinove na gornjoj granici dozvoljene temperature i ne dozvoliti premašivanje iz razloga što se leteći pepeo ne smije rastaliti u ložištu.

S obzirom na to da je prvi i najvažniji uvjet kod projektiranja ložišta upravo tip i veličina rešetke, vrlo je važno uzeti u obzir da neadekvatno usklađivanje rešetke i ložišta dovodi do neefikasnog postrojenja za spaljivanje otpada. Kako navodi BREF [13], pojavit će se problemi sa zadržavanjem zapaljivih plinova u zoni izgaranja dimnih plinova, lošim izgaranjem i povećanim emisijama štetnih tvari [13].

Moguća su tri različita dizajna ložišta čije nazivlje i sustav opisuju smjer dimnih plinova u odnosu na tok otpada: istosmjerno strujno, protustrujno i srednjestrujno ložište. Slika 8 prikazuje tipove ložišta i protok dimnih plinova unutar njih. Za lakše razumijevanje shema: rešetke (podebljano) prenose otpad prema spremniku za prikupljanje pepela (ucrtan ulaz), a tok zraka označen je strelicom [13].



Slika 8 - Tipovi ložišta [13]

4.2. Spaljivanje u rotacijskim pećima

Prethodno opisana metoda spaljivanja na rešetki ili roštilju pogodna je i najčešće primjenjivana za spaljivanje miješanog komunalnog otpada. Rotacijske peći učinkovite su za termičku obradu gotovo svih vrsta otpada, a svoju istaknutu ulogu pronalaze u termičkoj obradi onih vrsta opasnog otpada koje nije moguće spaljivati na rešetki [9, 13].

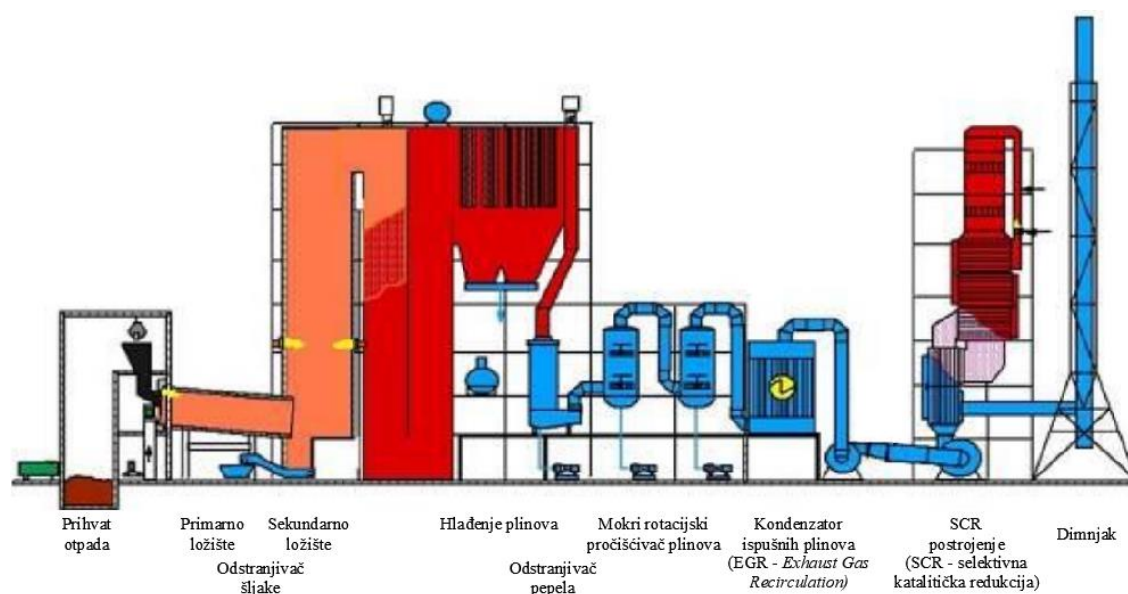
S obzirom na to da rotacijske peći ne služe isključivo za spaljivanje, već i za proces uplinjavanja, raspon temperatura koji se koristi u ovim pećima iznosi od 500 °C do 1450 °C. Uobičajeno se temperature od 500 °C do 850 °C i smanjena koncentraciju kisika rotacijske peći koriste u procesu uplinjavanja, dok se temperature od 850 °C i dovoljne prisutnost kisika koriste u procesu oksidacije ili spaljivanja. Temperature peći od 900 °C na više uobičajene su prilikom spaljivanja opasnog otpada, a razlog iznimno visokim temperaturama je što je pri takvim uvjetima smanjen rizik od temperaturnih oscilacija, čime se osigurava kontinuirano izgaranje otpada, a kontinuirano izgaranje važan je uvjet prilikom spaljivanja opasnog otpada [9]. Usprkos tome, dugotrajno djelovanje visokih temperatura ima štetan utjecaj na postrojenje. Dugotrajnim zadržavanjem visoke temperature bez rashlađivanja peći dolazi do porasta naprezanja vatrostalne obloge peći, što dovodi do oštećenja obloge i isključenosti iz rada radi održavanja. Iz tog razloga suvremene rotacijske peći projektirane su tako da se vatrostalna obloga zaštiti rashladnim plaštem koji je ili zračni ili vodeni [13].

Rotacijske peći sastoje se od dva dijela, primarnog i sekundarnog ložišta, u kojima se odvijaju međuzavisni procesi. Posuda se uobičajeno nalazi na valjcima koji omogućuju ložištu da se okreće oko svoje osi ili, kao drugi način kretanja, generira trzajne pokrete, to jest gore - dolje ili naprijed - nazad. Kruti otpad u spremnik se ubacuje gravitacijski, kroz nerotirajući otvor na samom ulazu u spremnik, dok se otpad u tekućem ili plinovitom stanju upumpava/ubrizgava, pogotovo u slučajevima gdje taj otpad predstavlja sigurnosne prijetnje i zahtijeva posebno rukovanje kako bi se smanjila izloženost radnika na stroju. Vrijeme zadržavanja krutog otpada određeno je kutom otklona od horizontale i brzinom vrtnje spremnika. U pravilu je za postizanje dobrog sagorijevanja dovoljno između 30 i 90 minuta u primarnom ložištu. Sekundarno ložište ili ložište za naknadno izgaranje (engl. *post-combustion chamber*) služi za potpuno izgaranje dimnih plinova i razgradnju opasnih organskih spojeva kao što su dioksini, poliklorirani bifenili (PCB), policiklički aromatski ugljikovodici i manji lanci ugljikovodika. Proces spaljivanja u sekundarnom ložištu odvija se pri temperaturama koje se kreću od 900 °C do 1200 °C, ovisno o otpadu koji se spaljuje [9, 13, 14].

Na slici 9 prikazano je postrojenje za termičku obradu velikog kapaciteta i svih vrsta otpada koje koristi tehnologiju spaljivanja u rotacijskoj peći, u gradiću Leverkusen-Bürrig njemačke regije Sjeverne Rajne-Vestfalije (ger. Nordrhein-Westfalen), jedne od ekonomski najrazvijenijih regija Savezne Republike Njemačke. Postrojenje je nominalnog kapaciteta spaljivanja 45000 t/god, što ga ne svrstava u kategoriju postrojenja za termičku obradu velikog kapaciteta, ali je shematski prikaz vrlo sličan većini suvremenih postrojenja koja koriste tehnologiju rotacijskih peći za spaljivanje otpada [13]. Postrojenje je podijeljeno na tri glavna područja/dijela [13]:

- primarno i sekundarno ložište,
- generator pare – proizvodi paru koja služi za dobivanje električne ili toplinske energije – WtE princip,
- višestupanjski pročišćivač dimnih plinova – SCR tehnologija (selektivna katalitička redukcija).

Osim glavnih dijelova, spalionice uglavnom sadrže prostore za skladištenje krutog otpada i goriva te infrastrukturu za ispuštanje pročišćenih dimnih plinova [9].



Slika 9 - Postrojenje za termičku obradu s rotacijskom peći u gradu Leverkusen-Bürrig [13]

4.3. Spaljivanje u fluidiziranom sloju

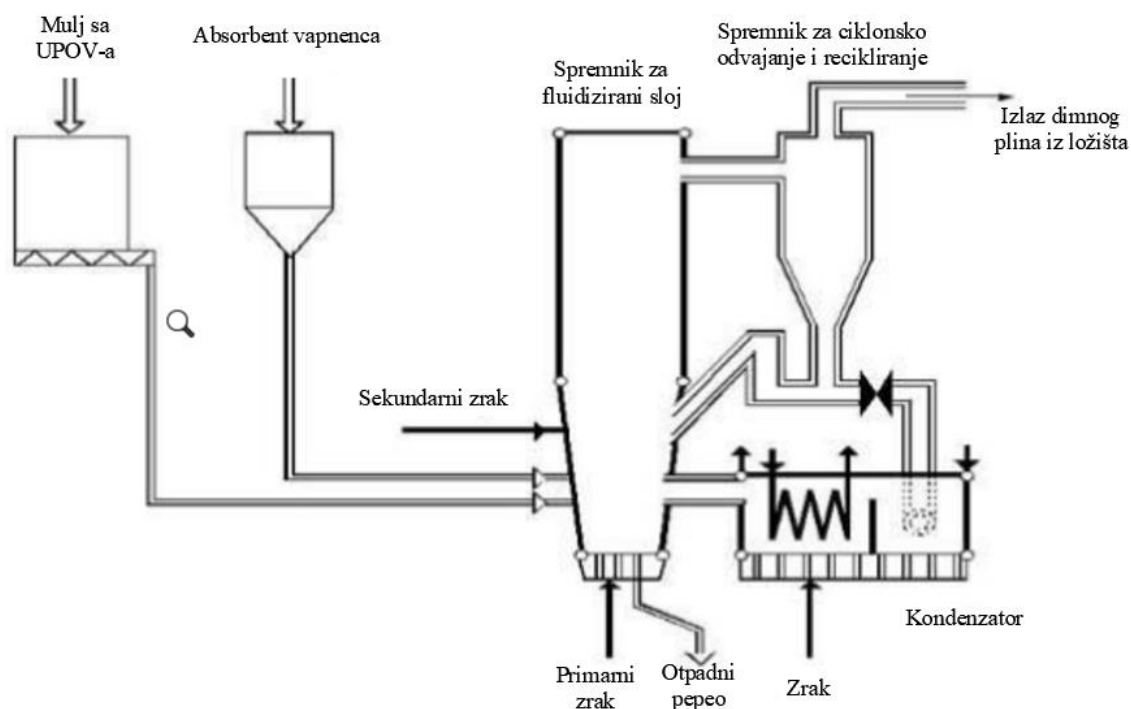
Spaljivanje u fluidiziranom sloju desetljećima se koristi za spaljivanje homogenih masa, a primjenu nalazi u termičkoj obradi prethodno obrađenog komunalnog, komercijalnog ili/i industrijskog otpada, otpadnog mulja s UPOV-a, ugljena, sirovog lignita i biomase [9, 13, 14].

Prethodna obrada otpada ili predtretman obično se sastoji od razvrstavanja i usitnjavanja većih čestica. S obzirom na heterogenost otpada, ponekad je nužno izdvojiti željezne i neželjezne materijale koji nisu primjereni termičkoj razgradnji. Promjer obrađenih čestica za ovaj tehnološki postupak iznosi do 50 mm, iako za neke podtipove postupka, konkretno rotirajuće fluidizirane slojeve, postoje praktični podaci gdje su obrađivane čestice promjera veličine 200 – 300 mm. [9, 13, 14]

Ložište postrojenja za spaljivanje u fluidiziranom sloju čini vertikalno postavljen cilindrični spremnik u čijem se donjem dijelu nalazi sloj inertnog materijala, npr. pijeska ili pepela, koji se pod utjecajem prethodno zagrijanog zraka fluidizira (slika 10). Tako nastaje fluidizirani sloj u kojem se odvijaju procesi sušenja otpada i isparavanja vode te paljenja i izgaranja otpada. Otpad se u ložište dovodi neprestano pomoću pokretnih traka koje otpad ubacuju s vrha spremnika ili sa strane te pumpama pod tlakom. Temperatura u prostoru iznad fluidiziranog sloja iznosi od 850 °C do 950 °C, čime se uz dovoljno vrijeme zadržavanja dimnih plinova omogućuje potpuno izgaranje dimnih plinova. Sam sloj puno je nižih temperatura, do 650 °C. Zbog dobrog miješanja u reaktoru, tehnološki postupak spaljivanja u fluidiziranom sloju prepoznat je kao sustav s ujednačenom temperaturom i koncentracijom kisika, što je odlika koja ga čini iznimno stabilnim i pouzdanim postupkom. [9, 13, 14]

Visoka cijena predtretmana otpada potrebna za homogenizaciju otpada ograničila je korištenje ove metode, pogotovo iz razloga što su inicijalni troškovi bilo koje vrste spalionice vrlo visoki te se traži ekonomski najpovoljnije rješenje. Nerentabilno je koristiti ovaj postupak kao *WtE* metodu s obzirom na to da se iz neobrađenog otpada oporabi ista količina energije kao i iz obrađenog [9]. Taj je problem nadvladan razvojem standarda kvaliteta za GIO ili RDF-a i ciljanim odvajanjem otpada sličnih karakteristika. Prethodno obrađeni otpad i tendencija da se u njemu nalazi čim manje štetnih spojeva doveli su do poboljšanja kontrole procesa izgaranja i pojeftinjenja faze čišćenja dimnih plinova. Ukoliko se pogleda shemu postrojenja za spaljivanje otpada u rotacijskim pećima (slika 9), može se primijetiti da velik dio cijelog postrojenja čini faza čišćenja dimnih plinova prije nego li se oni ispuste u okoliš. Ovim bi se postupkom ta faza značajno

pojeftinila i, iako je s predtretmanom proces inicijalno skuplji, razvojem faze pročišćavanja moglo bi se, ako ne izjednačiti, barem unaprijediti proces spaljivanja u fluidiziranom sloju [13].



Slika 10 - Postrojenje za spaljivanje u fluidiziranom sloju [13]

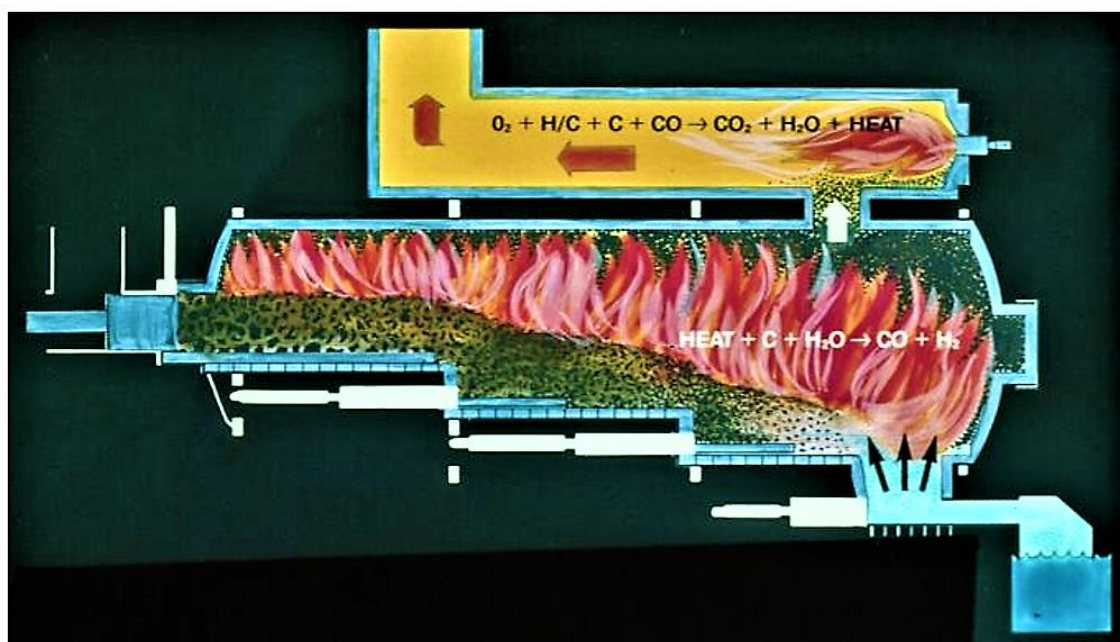
4.4. Modularne spalionice

S obzirom na podjelu postrojenja za spaljivanje velikih razmjera, druga je osnovna vrsta modularna spalionica. Modularne spalionice su tvornički predgotovljena (prefabricirana) postrojenja, malog do srednjeg kapaciteta obrade u granicama od 5 do 200 tona krutog otpada dnevno, ili 1800 do 75000 tona otpada godišnje. Razlog manjeg kapaciteta je što se koriste u sredinama koje ne iziskuju masovne spalionice, a procjena struke je da bi troškovi građenja odlagališta i transporta otpada u najbližu spalionicu premašili troškove građenja i operativne troškove modularne spalionice [18].

Modularne spalionice koriste drugačiji proces spaljivanja od postrojenja s masovnim spaljivanjem, koji uključuje dva ložišta, odnosno dva modula. Primarni modul ili primarno ložište dio je postrojenja u kojem se nalazi reaktor za uplinjavanje. Uloga koja se tiče primarnog modula je isključivo pretvaranje krutog otpada u plinovitu fazu, jer zbog nedostatne koncentracije kisika u samoj reakciji ne dolazi do potpunog sagorijevanja (kao kod spaljivanja), a zapaljivi plinovi kao plinovita faza nastavljaju proces u sekundarnom modulu. Proces je spor i zahtijeva veći reaktor ili veći broj modula.

U sekundarnom modulu dolazi do potpunog sagorijevanja dimnih plinova uz dovoljnu koncentraciju kisika, dakle, dolazi do prave oksidacije tvari. Proces u sekundarnom ložištu brži je od procesa u primarnom i nije potrebna ista veličina reaktora niti broj modula. Zanimljivo je da se ovim tehnološkim postupkom odjeljuju dva vrlo slična procesa čime se omogućuje izgradnja nešto jednostavnije konstrukcije, ali se i postiže to da je izgaranje u sekundarnom modulu učinkovitije od izgaranja kod masovnih spalionica [18]. Ovakva metoda, gdje se u odvojenim ložištima spaljuju kruti otpad i dimni plinovi, ekološki je prihvatljivija od ostalih navedenih tehnoloških postupaka. Razlog je taj što gore posljedice ima spaljivanje krutog otpada i, primjerice, ugljena, negoli spaljivanje plinova i, primjerice, tekućih ulja. Čak i uz navedenu činjenicu, ovaj princip spaljivanja rjeđe se koristi od ostalih navedenih, a jedan od razloga je što se metode termičke obrade i oporabe otpada principijelno ne razvijaju u smjeru spaljivanja, već u smjerovima proizvodnje energije i, vrlo važno, tehnologijama pročišćavanja otpadnih plinova [13, 18].

Na slici 10 prikazan je shematski prikaz jedne modularne spalionice. Jasno se daju razlikovati dva modula: donji, koji služi kao primarno ložište, u kojem se odvija proces uplinjavanja (produkt ugljični monoksid) i gornji, kao sekundarno ložište, u kojem se odvija proces potpune oksidacije. U primarnom su modulu temperature u rasponu od 650 °C do 950 °C, dok su u sekundarnom ložištu temperature nešto više i iznose od 750 °C do 1100 °C [18, 19].



Slika 11 - Shematski prikaz ložišta modularne spalionice [19]

5. UTJECAJ SPALJIVANJA OTPADA NA OKOLIŠ

Postrojenja na okoliš mogu djelovati neposredno (izravno) i posredno (neizravno). Neposredan se utjecaj na okoliš očituje u mjerljivim podacima kao što su: ukupne emisije u zrak i vodu, uključujući i neugodan miris; ukupni kruti ostaci među kojima su najzastupljeniji pepeo i šljaka; vibracije i buka; fugitivne (difuzne) emisije nastale od skladištenja otpada. Posredni se utjecaji očituju, primjerice, prilikom transporta otpada na spaljivanje i transporta ostataka od spaljivanja izvan postrojenja te predtretmana otpada [13].

Mjerodavni dokumenti kojima su propisane dozvoljene koncentracije onečišćujućih tvari u Republici Hrvatskoj su Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 42/21) (u daljnjem tekstu: Uredba) i Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 26/20) (u daljnjem tekstu: Pravilnik). Uredba i Pravilnik nastali su na temelju različitih direktiva Europske unije te propisuju [20, 21]:

- granične vrijednosti emisija (u daljnjem tekstu: GVE) onečišćujućih tvari,
- razine dopuštenog prekoračenja za određeno razdoblje,
- način praćenja i vrednovanja emisija te upis podataka,
- način smanjivanja emisija onečišćujućih tvari.

Prema Uredbi, emisija znači „izravno ili neizravno ispuštanje tvari, vibracija, topline ili buke iz pojedinačnih ili difuznih izvora postrojenja u zrak, vodu ili zemlju“ [20]. Prema istom dokumentu, granična vrijednost emisije ili GVE je „najveća dopuštena emisija, izražena ili koncentracijom onečišćujućih tvari u otpadnim plinovima i/ili količinom ispuštanja onečišćujućih tvari u određenom vremenu“ [20].

Nekoliko je glavnih čimbenika koji utječu na emisije spalionica [10, 13]:

- sastav i sadržaj otpada,
- tehničko oblikovanje i rad postrojenja za spaljivanje,
- tehničko oblikovanje i rad opreme za čišćenje dimnih plinova.

5.1. Emisije u zrak

Emisije štetnih plinova u zrak zasigurno su jedan od značajnijih problema sa znanstvenog i stručnog stajališta te stajališta subjektivnog promatrača. Radi se o problemu prisutnom od samih početaka masovnog spaljivanja kojem se sustavno počinje

pristupati tek 50-ih godina 20. stoljeća. Od tada je glavnina ulaganja u termičke obrade otpada usmjerena prema optimizaciji pročišćavanja otpadnih produkata kako bi se minimizirali štetni utjecaji termičke obrade otpada na okoliš. Prema istraživanjima provedenim na većem uzorku spalionica komunalnog i opasnog otpada [13], proizvodnja otpadnih plinova kod spaljivanja komunalnog otpada iznosi između 4500 i 6000 m³ otpadnih plinova/t otpada, dok spalionice opasnog otpada proizvode između 6500 i 10000 m³ otpadnih plinova/t otpada, ovisno o prosječnoj ogrjevnoj vrijednosti otpada ili neto kaloričnosti otpada (engl. LHV – *lower heating value* ili engl. NCV - *net calorific value*). Vrlo je važno naglasiti da ovi podaci vrijede za spaljivanje, dok je za pirolitičke procese i uplinjavanje te plazma tehnologije proizvodnja otpadnih plinova/t obrađenog otpada puno manja [10, 13].

Najzastupljenije onečišćujuće tvari u dimnim plinovima su [13]:

- krute čestice ili praškaste tvari (nano čestice),
- kiseli plinovi kao što su HCl, HF, SO₂, NO_x, NH₄, HBr,
- teški metali kao što su Hg, Cd, Tl, Pb, Sb, As, Cr, Vn, Sb,
- ugljikovi spojevi – hlapljivi organski spojevi (VOC), dioksini i furani (PCDD i PCDF), poliklorirani bifenili (PCB), ugljikov monoksid i dioksid.

Emisije kiselih plinova i metala najviše ovise o sastavu (strukturi) otpada koji se spaljuje i kvaliteti sustava za pročišćavanje dimnih plinova. Emisije ugljikovog monoksida i hlapljivih organskih spojeva (VOC) određene su primarno tehničkim specifikacijama peći/ložišta i heterogenošću otpada. Emisije krutih čestica u obliku praškastih tvari ponajprije ovise o sustavu za pročišćavanje dimnih plinova. O svim do sad navedenim uvjetima ovisi emisija dioksina i furana (u daljnjem tekstu: dioksini), jednih od najtoksičnijih produkata termičke obrade otpada [13, 14]. „Dioksini“ je opći naziv za veliku skupinu spojeva u koje spadaju različiti predstavnici polikloriranih dibenzodioksina i polikloriranih dibenzofurana. Radi se o karcinogenim spojevima koji, osim najtežih oblika tumora i raka, mogu izazvati reproduktivne i razvojne probleme. Loša karakteristika je to što su vrlo stabilni spojevi što im omogućava akumuliranje u hrani [22]. Zbog svega toga, izrazito je važno mjerenje graničnih vrijednosti emisija onečišćujućih tvari.

Ostale emisije u zrak mogu činiti: [10, 14]:

- neugodni mirisi, koji su posljedica neprikladnog rukovanja otpadom,
- staklenički plinovi, koji nastaju uslijed kemijskih reakcija uskladištenog otpada,

- buka, koja je posljedica rada postrojenja i nikako ne smije biti zanemariva.

Staklenički plinovi koji nastaju zbog termičke obrade ili prikupljanja otpada u spremnicima su ugljikov dioksid (CO_2), didušikov oksid (N_2O) i metan (CH_4). Ugljikov dioksid prepoznat je kao najveći uzročnik trenda zagrijavanja Zemlje. Prirodno je proizvod vulkanskih erupcija, dok problem čini antropogena proizvodnja u aktivnostima kao što su spaljivanje fosilnih goriva i iskrčivanje šuma. Prema mjerenjima, na jednu tonu spaljenog otpada proizvede se 0.7 – 1.7 tona ugljikovog dioksida. Metan u spalionici ne nastaje izravno spaljivanjem, već nastaje u bunkeru za otpad u anaerobnim uvjetima, kada otpad nije razrahljen, već zbijen. Didušikov oksid najčešće nastaje kada se ne ostvari dovoljno visoka temperatura za potpuno izgaranje. Dodatno može nastati u procesu pročišćavanja dušikovog dioksida u procesu selektivne nekatalitičke redukcije, ovisno o temperaturi pročišćavanja i doziranju uree kao reagensa. Smatra se da od navedenih plinova ugljikov dioksid ima najveći doprinos efektu staklenika, dok didušikov oksid najmanji. No, smatra se da je metan oko 80 puta snažniji od ugljikovog dioksida, dok didušikov oksid oko 280 puta. Utjecaj stakleničkih plinova uzrokovanih termičkom obradom otpada u modernim postrojenjima zanemariv je zbog pročišćavanja dimnih plinova.

Uredba propisuje dozvoljene, odnosno granične vrijednosti emisija u zrak [20]. U tablici 3 nalaze se podaci o koncentraciji dimnih plinova prije nego što uđu u procese pročišćavanja plinova, uz referentnu vrijednost koncentracije kisika od 11 %. Podatci su dobiveni prilikom istraživanja na spalionicama različitih vrsta otpada u Europi [13] te se odnose na suvremene spalionice. Kod starijih spalionica koncentracije mogu, i uglavnom jesu, značajno više, posebno one koje ovise o peći i pročišćavanju dimnog plina kao ugljikovi spojevi [13].

Tablica 3 - Koncentracije onečišćujućih tvari u sirovom dimnom plinu [13]

Onečišćujuća tvar	Jedinica mjere	Postrojenje za :		
		Komunalni otpad	Opasni otpad	Mulj s UPOV-a
Krute čestice -praškaste tvari	mg/Nm ³	1 000 - 5 000	1 000 - 10 000	30 000 - 200 000
Ugljikov (II) oksid - CO	mg/Nm ³	5 - 50	< 30	5 - 50
Ukupni organski ugljik - TOC	mg/Nm ³	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Dioksini/Furani	ng TEQ ¹ /Nm ³	0.5 - 10	0.5 - 10	0.1 - 10
Živa	mg/Nm ³	0.05 - 10	0.05 - 10	0.2
Kadmij+ talij	mg/Nm ³	< 3	< 5	2.5
Ostali teški metali ²	mg/Nm ³	< 50	< 100	800
Klorovodik ³	mg/Nm ³	500 - 2 000	3 000 - 100 000	NI
Fluorovodik ⁴	mg/Nm ³	5 - 20	50 - 1 000	NI
Sumporov (IV) oksid - SO ₂	mg/Nm ³	200 - 1 000	1 500 - 50 000	NI
Dušikovi oksidi - NO _x	mg/Nm ³	150 - 500	100 - 1 500	< 200
Ugljikov (IV) oksid - CO ₂	%	5 - 10	5 - 9	NI
Vodena para (H ₂ O _(g))	%	10 - 20	6 - 20	NI

¹ Ekvivalent toksičnosti
² Olovo, arsen, krom, kobalt, bakar, mangan, nikal, vanadij, kositar, antimon
³ Kao najzastupljeniji anorganski spoj klora
⁴ Kao najzastupljeniji anorganski spoj fluora
 NI - Nema informacija

U tablici 4 prikazane su dozvoljene vrijednosti emisija onečišćujućih tvari u zraku ili granične vrijednosti emisija. Rezultati mjerenja mogu se uzimati u obzir kao srednja dnevna vrijednost, srednja vrijednost razdoblja od 30 minuta do 8 sati i srednja vrijednost razdoblja manjeg od 30 minuta (primjerice 10-minutna srednja vrijednost) [20]. Pritom, rezultati srednjih vrijednosti razdoblja manjih od 8 sati smiju odstupati u određenim granicama, ali srednja dnevna vrijednost nipošto ne smije odstupati. Iz tablice 4 može se primijetiti da pojedine koncentracije imaju odstupanja od 1 do 6 puta u odnosu na srednju dnevnu vrijednost, dok teški metali i dioksini ne smiju prelaziti referentne vrijednosti ni u kojem razdoblju kontinuiranog mjerenja [20].

Tablica 4 - Dozvoljena koncentracija onečišćujućih tvari dimnog plina nakon pročišćavanja [20]

Onečišćujuća tvar	GVE	
	Srednja dnevna vrijednost	Srednja vrijednost razdoblja [30 min, 480 min]
Krute čestice	10 mg/Nm ³	30 mg/Nm ³
Ugljikov (II) oksid - CO	50 mg/Nm ³	100 mg/Nm ³
Ukupni organski ugljik - TOC	10 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³
Dioksini/Furani	0.1 ng/Nm ³	
Živa	0.05 mg/Nm ³	
Kadmij+ talij	0.05 mg/Nm ³	
Ostali teški metali	0.5 mg/Nm ³	
Klorovodik	10 mg/Nm ³	60 mg/Nm ³
Fluorovodik	1 mg/Nm ³	4 mg/Nm ³
Sumporov (IV) oksid - SO ₂	50 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³
Dušikovi oksidi - NO _x	200 mg/Nm ³	400 mg/Nm ³

5.2. Pročišćavanje dimnih plinova

5.2.1. Smanjenje emisija krutih čestica

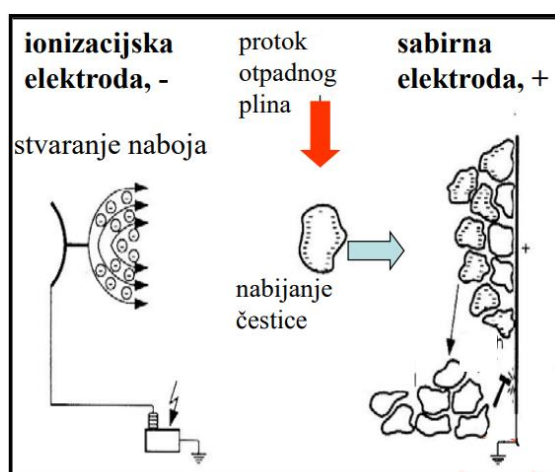
Krute čestice se iz otpadnog plina uklanjaju na dva načina: ili prisilnim usmjeravanjem na kretanje suprotno toku smjera plina i skupljanjem na površini namijenjenoj prikupljanju krutih čestica, ili se koncentriraju u struju plina koji ima poseban tok odvodnje plina i čestica. Uređaji kojima se postiže jedan od efekata su elektrostatski taložnici, skraberer (engl. *scrubber*), vrećasti ili tkaninski filtri i aerocikloni. Odabir tehnologije pročišćavanja krutih čestica ovisi o granulometriji čestica, protoku dimnog plina, količinama krutih čestica unutar dimnog plina, potrebnoj izlaznoj koncentraciji i kompatibilnosti s ostalim komponentama pročišćavanja dimnih plinova [10, 13].

5.2.1.1 Elektrostatski taložnici

Elektrostatski taložnici, precipitatori ili elektrofiltri (ESP) koriste električnu energiju za razdvajanje finih čestica iz dimnog plina s relativno velikom učinkovitošću. Pojednostavljeni princip rada: unutar spremnika se pomoću ionizacijske elektrode stvara električno polje i električni naboj koji se prenosi na česticu. Nabijene čestice putuju do sabirne elektrode, na suprotnoj strani od generirajuće ionizacijske elektrode, gdje se

skupljaju (adhezija) i na kraju uklanjaju sa sabirne elektrode [13]. Princip rada prikazan je na slici 11.

S obzirom na način provedbe procesa i uklanjanja čestica razlikuju se suhi i mokri postupak. Tehnološki princip suhog i mokrog postupka razlikuje se u tome što se prašina koja se taloži na sabirnim elektrodama povremeno ili kontinuirano ispiri vodom. Prednosti su elektrostatskih taložnika vrlo visoka učinkovitost uklanjanja čestica (> 99 %), mala potrošnja energije i mali radni troškovi, kontinuiran i dugotrajan rad, minimalna opasnost od požara i mogućnost rada pri različitim temperaturama plinova. Nedostatci su veliki kapitalni troškovi, zahtijevaju veliki prostor, nisu fleksibilni na promjene radnih uvjeta, nastajanje ozona [10, 13].



Slika 12 - Princip rada elektrofiltra [13]

5.2.1.2 Skraber

Skraber ili ispirać plinova je sustav koji se koristi za istovremeno uklanjanje krutih čestica i plinovitih tvari iz dimnog plina prije nego što se smije ispustiti u atmosferu. Dvije su vrste skrabela s obzirom na tip medija koji koriste: mokri i suhi skraber [10, 23].

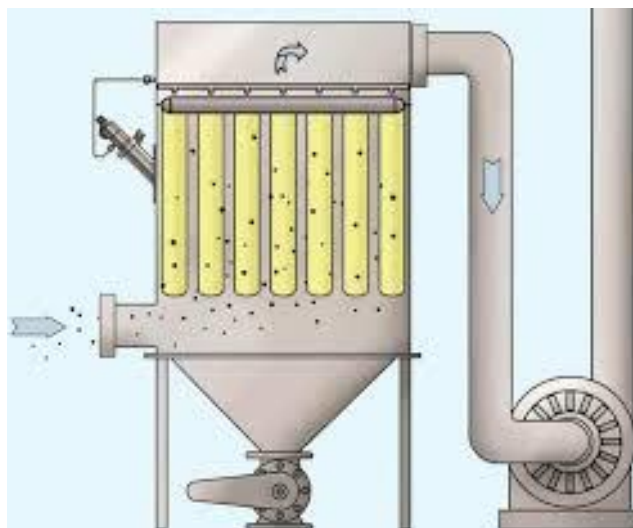
Kod mokrih skrabela, tok dimnih plinova dolazi u kontakt s kapljicama vode i mokrim površinama, ili prolazi kroz vodenu zavjesu. Suhi skraber uz pomoć finih, praškastih materijala, stvaraju reakciju u kojoj čestice dimnih plinova reagiraju s reagensom iz praškastih materijala (vapno) [10, 23]. Prednosti i nedostaci mokrih i suhih skrabela navedeni su u tablici 5.

Tablica 5 - Prednosti i nedostaci skrabela [10]

	Prednosti	Nedostaci
Mokri skraber	<ul style="list-style-type: none"> ● nema opasnosti od eksplozije prašine 	<ul style="list-style-type: none"> ● pojava mulja
	<ul style="list-style-type: none"> ● nema ograničenja temperature plina 	<ul style="list-style-type: none"> ● troškovi vode
	<ul style="list-style-type: none"> ● nisu osjetljivi na tekućine i hlapljive čestice 	<ul style="list-style-type: none"> ● sklonost koroziji
Suhi skraber	<ul style="list-style-type: none"> ● uklanjaju i kisele komponente dimnog plina 	<ul style="list-style-type: none"> ● visoka cijena reagensa
	<ul style="list-style-type: none"> ● nema problema s korozijom 	<ul style="list-style-type: none"> ● taloženje čestica i reagensa na stijenke skrabela (vapnenac nije topiv u vodi)
	<ul style="list-style-type: none"> ● manji pad tlaka u odnosu na mokri skraber 	<ul style="list-style-type: none"> ● začepljenje brizgalica

5.2.1.3 Vrećasti filtri

Vrećasti ili tkaninski filtri uređaji su u kojima se djelovanjem inercijalnih sila i zadržavanjem čestica na filtrima događa izdvajanje krutih čestica. „Vrećice“ su napravljene od filtarskog materijala koji zadržava čestice, a propušta tok plina. S obzirom na to da se čestice zadržavaju, potrebno je periodički čistiti filtarske vrećice, što ovisi o materijalu od kojeg je vrećica napravljena i količini čestica u struji plina. Na učinkovitost ove metode utječu karakteristike filtarskog materijala i karakteristike dimnog plina kao što su: granulometrija krutih čestica; brzina, temperatura i relativna vlažnost dimnog plina; učestalost čišćenja filtra. Prednost vrećastih filtara je mogućnost izdvajanja jako sitnih čestica, ovisno o filtarskom materijalu, a veliki nedostaci su to što trajnost filtra uvelike ovisi o vlažnosti i temperaturi dimnog plina. Naime, uslijed visoke vlage u dimnom plinu dolazi do začepljenja mikropora filtra, a uslijed visokih temperatura dolazi do tinjanja čestica koje proširuju pore filtra i time smanjuju učinkovitost [10, 13].



Slika 13 – Shematski prikaz rada cilindričnih vrećastih filtera [13]

5.2.1.4 Aerocikloni

Sami ne mogu postići potrebne razine emisije krutih čestica, međutim imaju važnu ulogu kao predtretman dimnih plinova prije neke od prethodno navedenih tehnologija. Glavna prednost ciklona očituje se u širokom rasponu radnih temperatura i robusnosti konstrukcije, ali problem stvara erozija na mjestu udara dimnog plina kada je dimni plin preopterećen krutim česticama [13].

5.2.2. Smanjenje emisija kiselih plinova

Kiseli plinovi se iz otpadnih dimnih plinova najčešće uklanjaju injektiranjem alkalnih kemijskih reagensa, uglavnom vapna ili natrijeva karbonata uz nastajanje otopljenih ili suhih soli. U svrhu uklanjanja kiselih plinova primjenjuju se mokri, polumokri i suhi procesi [10, 13].

5.2.2.1 Mokri proces

Karakteristično je za mokri proces uklanjanja da se odvija na jednom od nekoliko različitih vrsta skrabela. U prvoj fazi rada, otopina u skraberu je jako kisela, $\text{pH} = 0 - 1$ i uklanjaju se klorovodici i fluorovodici. Efluent, tekućina koja nastaje kao nusprodukt procesa, reciklira se i koristi nekoliko puta u procesu. U kiselom mediju uklanjanje sumporovog dioksida niskih je razmjera, stoga se zahtijeva druga faza. U drugoj fazi otopina u skraberu je neutralna ili blago lužnata, $\text{pH} = 6 - 7$. Ovisno o tome koristi li se kaustična soda ili vapno kao medij u skraberu, nastaju i različiti produkti. Kaustična soda stvara produkte topive u vodi, dok kod vapna nastaje gips s primjesama soli koje nepovoljno djeluju na uređaj [10, 13].

5.2.2.2 Polumokri proces

Često nazivan i polusuhi proces, u procesu se reagens u spremnik ubacuje u obliku suspenzije u vrući otpadni plin ili se odvojeno upumpavaju voda i kalcijev hidroksid (gašeno vapno). Toplina dima koristi se za eliminaciju vode iz procesa, a nastaju krute tvari koje se poslije uklanjaju u vrećastim ili tkaninskim filtrima [10, 13].

5.2.2.3 Suhi proces

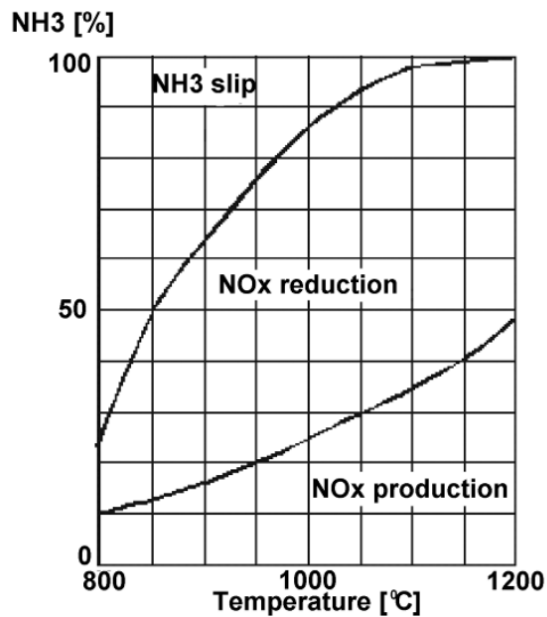
Kod suhog procesa reagens se u proces ubacuje u obliku suhih prahova, najčešće vapna. Količina reagensa ovisi o temperaturi, odnosu koncentracija sumporovog oksida i zbroja koncentracija klorovodika i fluorovodika ($\text{SO}_2 / (\text{HCl} + \text{HF})$), vrsti reagensa i ostalim uvjetima procesa. Produkti reakcija su, kao i kod polusuhog procesa, krute tvari koje se kasnije uklanjaju u vrećastim filtrima [10, 13].

5.2.3. Smanjenje emisija dušikovih oksida

Dva su postupka uklanjanja dušikovih oksida: selektivna nekatalitička redukcija (SNCR) i selektivna katalitička redukcija (SCR).

5.2.3.1 Selektivna nekatalitička redukcija

U procesu selektivne nekatalitičke redukcije dušikovi se oksidi uklanjaju ubrizgavanjem amonijaka ili uree (redukcijski agens). Reakcija se odvija pri visokim temperaturama, od 800 °C do 1200 °C. Problem SNCR-a je to što se korištenjem amonijaka kao sredstva za redukciju dušikovih spojeva stvaraju – dušikovi spojevi. Naime, o temperaturi reakcije ovisi kolika će koncentracija amonijaka reagirati, a kolika će „ispasti“ iz procesa. Pri temperaturi od 1000 °C redukcija dušikovih spojeva je 85 %, iz procesa je ispalo 15 % amonijaka koji stvara oko 25 % dušikovih spojeva, što znači da je uspješno uklonjeno 60 % dušikovih spojeva. Funkcijska ovisnost uklanjanja dušikovih spojeva, stvaranja dušikovih spojeva i „ispadanja“ amonijaka iz procesa u ovisnosti o temperaturi reakcije prikazana je na slici 14. Kako bi se optimizirao ovaj proces i smanjilo ispadanje amonijaka iz procesa, amonijak se može uštrcavati u više slojeva. Također, korištenjem mokrog skrabera amonijak se izdvaja iz dimnog plina [13].



Slika 14 - Grafički prikaz povezanosti smanjenja i stvaranja NO_x, ispadanja amonijaka i reaktivne temperature SNCR procesa [13]

5.2.3.2 Selektivna katalitička redukcija

Tijekom SCR-a, smjesa amonijaka i zraka dodaje se dimnom plinu i prolazi kroz katalizator gdje amonijak reagira s dušikovim oksidom, a produkti reakcije su čisti dušik (N₂), vodena para i ugljikov dioksid. Za učinkovitu redukciju zahtijevaju se temperature između 150 °C i 450 °C, iako je uobičajena temperatura pri provođenju reakcije od 200 °C do 250 °C. SCR se može postaviti nakon elektrostatskog taložnika kako bi se smanjile potrebe za ponovnim zagrijavanjem plina pri uvođenju u reakciju redukcije dušikovih spojeva. Učinkovitost smanjenja koncentracije dušikovih spojeva procjenjuje se na preko 90 % [13].

5.2.4. Smanjenje emisija organskih ugljikovih spojeva

Glavni parametar koji utječe na količinu organskih spojeva u dimnim plinovima je učinkovitost izgaranja – čim je izgaranje bolje provedeno, emisija ugljikovih spojeva je manja. Dimni plinovi u sebi mogu sadržavati veliki broj različitih organskih spojeva u tragovima koji, usprkos svojoj maloj koncentraciji, mogu biti jako štetni za okoliš. To su, primjerice: halogenirani i policiklički aromatski ugljikovodici; benzen, toluen, ksilen; dioksini i furani. Za smanjenje emisija dioksina koriste se procesi adsorpcije i katalitičke oksidacije, a smanjenje organskih spojeva ugljikovodika može se provesti uklanjanjem krutih čestica i aerosola iskorištavanjem svojstva adsorpcije na finije čestice te prisilnim trenutnim hlađenjem dimnih plinova [13].

- Adsorpcija aktivnim ugljenom [13]:

Aktivni ugljen izravno se ubrizgava u struju dimnog plina. Ova metoda pokazuje visoku učinkovitost adsorpcije na živu i dioksine.

- Selektivna katalitička redukcija [13]:

Osim za redukciju dušikovih oksida, SCR sustavi mogu se koristiti i za uništenje dioksina katalitičkom oksidacijom. U tom se slučaju SCR sustav dizajnira u skladu s višefunkcionalnom namjenom, kao višeslojni SCR sustav čija učinkovitost uništenja dioksina iznosi više od 98 %.

- Katalitički vrećasti filtri [13]:

Filtri koji se koriste u vrećastim filtrima ili su impregnirane katalizatorom ili je praškasti katalizator izravno miješan s organskim tvarima. U ovom načinu ne koristi se aktivni ugljen, stoga nema ni krutog ostatka, ali katalizator nema nikakav utjecaj na uklanjanje žive, o čemu je potrebno kasnije voditi računa.

5.2.5. Smanjenje emisija stakleničkih plinova

Nekoliko je načina redukcije stakleničkih plinova među kojima su kontrola izlaznih emisija ugljikova dioksida nakon pročišćavanja i optimizacija procesa selektivne nekatalitičke redukcije [13].

5.3. Emisije u vodu

Uz emisije onečišćujućih tvari u zrak, drugi ekološki problem predstavlja ispuštanje efluenta, odnosno otpadne vode. Dvije su glavne, vrlo općenite, podjele izvora otpadnih voda u postrojenjima za termičku obradu otpada: otpadne vode iz postrojenja za pročišćavanje dimnih plinova i ostali izvori otpadnih voda [10, 13].

Glavnina otpadne vode u spalionicama rezultat je pročišćavanja dimnog plina mokrim postupkom. Ostali tipovi pročišćavanja uobičajeno ne proizvode otpadnu vodu. U nekim slučajevima otpadna voda iz postrojenja za pročišćavanje dimnih plinova samo ispari, dok se voda koja istječe u kanalizacijske otvore obrađuje prije nego što se smije ponovo koristiti u postrojenju ili ispustiti u okoliš. Volumen otpadne vode kao rezultat pročišćavanja dimnih plinova ovisi o faktorima kao što su: vrsta otpada koji se obrađuje, kapacitet spalionice, način pročišćavanja dimnih plinova, karakteristike otpada, i dr. U spalionicama komunalnog otpada kapaciteta spaljivanja od 250000 t/god, prosječna je

proizvodnja otpadne vode od 0.15 do 0.3 m³/t otpada. Spalionice opasnog otpada operativnog kapaciteta do 60000 t/god proizvode između 0.15 i 0.20 m³/t otpada [13].

Ostali izvori otpadnih voda i onečišćivači su [13]:

- voda za hlađenje – soli, biocidi,
- manipulacija pepela – soli, teški metali, organske tvari,
- otpadne vode iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda spalionice – soli i metali,
- kondenzat iz dimnjaka – soli, metali,
- zagađena i nezagađena kišnica – razrijeđene procjedne vode, soli,
- skladišta otpada i voda s manipulativnih površina – razrijeđene procjedne vode.

5.4. Kruti ostatci

Karakteristike i količina krutih ostataka proizvedenih termičkom obradom otpada jedan su od ključnih problema industrijskog sektora i razvoja spaljivanja. Razlog tomu je što prema krutim ostacima možemo procijeniti uspješnost izgaranja otpada, što je pozitivno. Istovremeno, kruti ostatci predstavljaju najveći potencijalni otpad koji nastaje u postrojenju, s obzirom na to da se postupcima pročišćavanja plina i otpadne vode dobiju kruti ostatci [10].

Iako tip i količina ostataka najviše ovise o metodi spaljivanja i dovozu otpada, gotovo uvijek prisutni su [10, 13]:

- pepeo i/ili šljaka (drozga),
- pepeo iz kotla ,
- leteći pepeo,
- ostatci pročišćavanja dimnih plinova,
- mulj s UPOV-a.

Procjenjuje se da oko 30 % početne mase otpada nakon spaljivanja pretvori u pepeo na dnu ložišta, što na jednu tonu spaljenog otpada čini oko 300 kg. Pepeo s dna većim je dijelom anorganska tvar, a oko 15 % sastava čine željezne primjese i teški metali [10].

5.4.1. Oporaba krutih ostataka

Značajno je svojstvo pojedinih krutih ostatak mogućnost uporabe, odnosno kruti otpad postaje resurs ili gorivo u proizvodnom procesu. Što se tiče građevinskog sektora,

visok sadržaj anorganske tvari čini ih pogodnima kao osnovni materijal ili dodatak. Ipak, nužno je da kruti ostatci zadovolje tehničke i ekološke uvjete, što najčešće zahtijeva određenu vrstu dodatne obrade. Uz sve tehničke i ekološke zahtjeve, upotreba recikliranih materijala na kraju će ovisiti o lokalnom zakonodavstvu: dopušta li zakon primjenu, i ako da, u kojoj mjeri i u kojim uvjetima [13]

Zbog velike proizvodne količine i manje opasnosti od otrovnih primjesa i procjeđivanja, ostatci nastali spaljivanjem neopasnog komunalnog otpada najčešće se recikliraju. Nizozemska, Danska, Njemačka i Francuska prednjače u iskorištavanju pepela i šljake s dna ložišta peći s preko 80 % (Nizozemska i Danska preko 90 %) recikliranog pepela od sveukupnog proizvedenog pepela [13]. S druge strane, u posljednje je vrijeme uporaba letećeg ili lebdećeg pepela postala sve učestalija, iako se ne primjenjuje kao uporaba pepela s dna ložišta. Leteći pepeo je fini prah koji se nalazi u dimnim plinovima, a izdvaja se jednim od postupaka navedenim u poglavlju 5.2., među kojima se ističu vrećasti filtri. Primjena letećeg pepela je vrlo velika, i u niskogradnji i u visokogradnji, gdje može naći neku od korisnih uloga, kao što su: modifikator svojstava asfaltne mase ili betona, sredstvo stabilizacije tla, mineralno punilo i proizvodnja žbuke te u tehnologiji zbrinjavanja otpada kao stabilizator otpada [13].

5.5. Buka

Spaljivanje proizvodi količinu buke usporedivu s velikim industrijskim postrojenjima i energanama. Uzimajući u obzir buku i neugodne mirise koji se proizvode tijekom procesa, uobičajeno je smjestiti postrojenje u zatvorenu konstrukciju (ili konstrukcije) udaljenu od stambenih naselja [13].

Glavni izvori buke i mjere smanjenja jakosti zvuka navedene su u tablici 6. Uz navedene mjere smanjenja jakosti zvuka, postoje i neopipljive mjere zakonske regulative kojima se, primjerice, ograničava jakost zvuka za rad danju i rad noću [13].

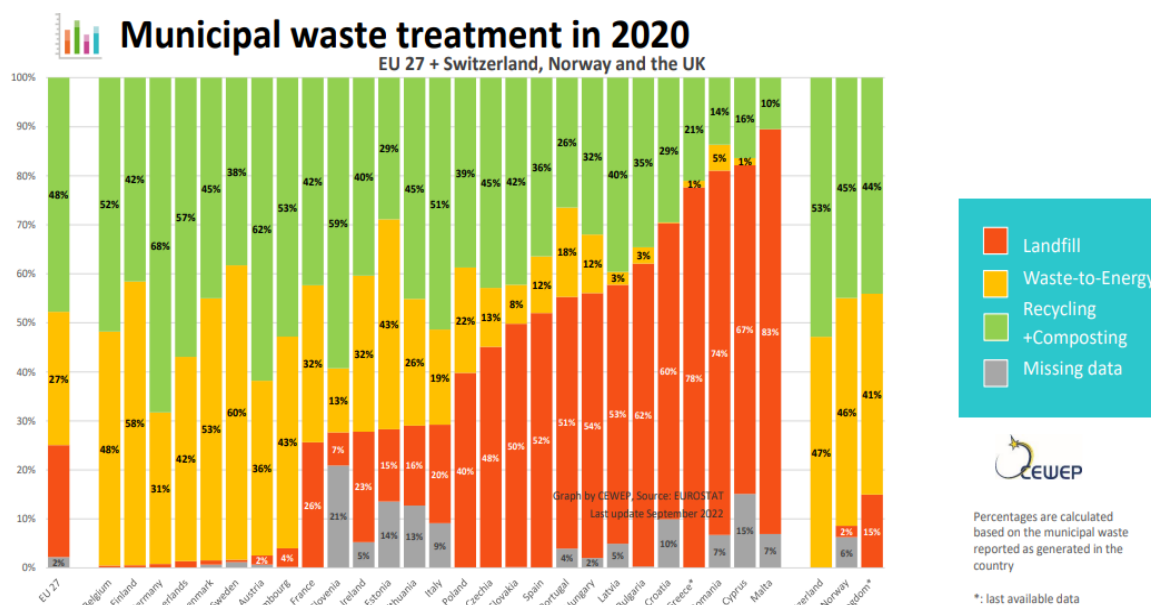
Tablica 6 - Izvori, mjere smanjenja i jakost zvuka određenih dijelova postrojenja [13]

Izvor zvuka	Mjere smanjenja jakosti zvuka	Jakost zvuka [dB(A)]
Dovoz otpada, buka od dostavnih vozila	Zatvorena konstrukcija za prijem otpada	104-109
Postrojenje za predtretman otpada	Zatvorena konstrukcija za predtretman otpada	95-99
Spremnik za otpad	Zvučna izolacija korištenjem porobetonskih elemenata	79-81
Postrojenje za spaljivanje	Višeljuskasta konstrukcija, korištenje porobetonskih elemenata, ventilacijski kanali sa spojnim prigušivačima	78-91
Strojarski uređaji	Zvučno izolirane cijevi, zvučno izolirana konstrukcija, prilagođeni tihi ventili	82-85
Čišćenje dimnih plinova	Zatvorena, zvučno izolirana konstrukcija, prigušivači zvuka na izlazu dimnjaka	82-95
Odlaganje ostataka	Akustične ograde	71-96
Hlađenje	Prigušivači zvuka na usisnoj i tlačnoj strani	90-97
Postrojenje za proizvodnju energije	Posebno projektirano postrojenje sa zvučnom izolacijom	71-80
Ukupna jakost zvuka u dB(A)		
Dan		105-110
Noć		93-99

6. STANJE U REPUBLICI HRVATSKOJ

U ovom poglavlju se obrađuje tema motivirana mišlju sa predavanja iz kolegija Zaštita voda, izv. prof. Dražena Vouka, dr.sc., i glasi: „Je li postrojenje za termičku obradu otpada potrebno Zagrebu i Hrvatskoj“, a upravo je ta tema pokretač ideja za pisanje završnog rada. Ispunjava li Zagreb uvjete za građenje jednog ovakvog sustava postrojenja i je li ekonomski racionalno izgraditi postrojenje za termičku obradu otpada po najmodernijim ekološkim kriterijima? Iz mora pitanja koja se postavljaju, izvučena su tek dva pitanja, stoga će cilj 6. poglavlja biti utvrditi i iznijeti stav o (ne)primjenjivosti tehnologije termičke obrade u Republici Hrvatskoj.

Govoreći o stanju unutar granica Europe, opće je poznato da problem gospodarenja otpadom utječe na svaku državu u većoj ili manjoj mjeri. Isto tako, svaka država tom problemu pristupa individualno i unutar vlastitih mogućnosti, a sve to popraćeno je smjernicama iz direktiva Europske komisije. Europska komisija nalaže postupno smanjivanje odlaganja otpada na deponijima tako da do 2035. postotak odloženog otpada iznosi do 10 %. Velik broj razvijenijih država Europe odavno je implementirao koncept bez deponijskog zbrinjavanja otpada postupcima oporabe otpada te spaljivanja i suspaljivanja (Slika 15) [24].



Slika 15 - Postotni udjeli pojedinih metoda zbrinjavanja komunalnog otpada država Europe, 2020. [25]

Na osnovi prikazanog grafa može se zaključiti da sve navedene države imaju visoku stopu oporabe otpada, ali u pojedinim slučajevima još višu stopu spaljivanja i suspaljivanja otpada u energanama na otpad. Činjenica je da nije svaki model primjenjiv na svaku

situaciju, no vođeni primjerima zemalja kao što su Danska, Belgija i Nizozemska, jasno je vidljivo da je korist od energana na otpad višestruka [25].

Hrvatska posjeduje očiti potencijal za izgradnju postrojenja za energetske uporabu otpada. Osim komunalnog otpada koji se stvara u količinama od oko 1850 tisuća tona godišnje, stvara se još toliko proizvodnog otpada koji je pogodan za obradu s konačnim produktom goriva za RDF postupak. Osim toga, mulj s UPOV-a, ukoliko se ne iskoristi, odlazi na deponije, na kojima se ne smije zadržati dulje od 12 mjeseci. S obzirom na to da Zagreb vidljivo raste (iako je po rezultatima cenzusa izgubio 20000 stanovnika, ogroman je prirast stanovništva iz inozemstva), nužno je izgraditi energanu na otpad, jer Jakuševac (odlagalište otpada) postupno postaje nedostatan za zadovoljenje aktualnih potreba grada. Korist od energane prije svega se očituje u smanjenju količine otpada za minimalnih 85 % [9], a dodatna prednost tehnološkog postupka je energetska iskoristivost. No, i dalje, mnogi su faktori koji koče ovaj proces. Politika, koja bi trebala biti u službi javnog interesa, u ovom slučaju neprestano usporava ionako trom proces i finalizaciju barem pravnog postupka. Napravljene su studije isplativosti, napravljeni su planovi, ali postavljanje kamena temeljca još se čeka. Drugo, sveprisutan je NIMBY sindrom (engl. *Not In My Backyard*). Dakako da je razumljivo da čovjek svojoj obitelji želi priuštiti zdrav život u čistom okolišu, no vrlo je važno osvijestiti da za sav otpad koji proizvedemo, moramo pronaći adekvatno rješenje zbrinjavanja [7]. Iz tog razloga nije razumljiv taj prenaplašeni stav da se „zaštiti svoje“, unatoč tomu što su napravljene procjene utjecaja zahvata na okoliš i studije isplativosti i koje bi trebale biti rezultat objektivno sagledanih činjenica na razini znanstveno-stručne zajednice. Činjenica je, međutim, da kod građana postoji nedostatak povjerenja u vlast i stručnjake, i zbog toga je vrlo važno postići konsenzus vlasti i oporbe, jer u interesu je svih strana rješavanje problema zbrinjavanja otpada. Potrebno je educirati i informirati javnost o trenutnim i mogućim problemima, ali i mogućnostima koje donosi energana na otpad. Važno je napomenuti da nije u planu projekt postrojenja za spaljivanje čija je jedina svrha spaljivanje otpada, nego se radi o postrojenju za energetske uporabu koje će, laički rečeno, spaljivanjem otpada stvarati energiju upotrebljivu u kućanstvima i industriji. I na kraju, vrlo je važno projekt osmisliti racionalno i gledati na njega kao dugoročni projekt. Stoga, ne treba težiti čim većem kapacitetu spaljivanja, nego takvom da zadovolji realne trenutne i buduće potrebe stanovništva Zagreba uzimajući u obzir porast stope proizvodnje svih vrsta otpada (komunalnog, proizvodnog, mulja s UPOV-a) i ulaganje u najmoderniji sustav za pročišćavanje dimnih plinova prema najstrožim europskim standardima.

Uostalom, ako grad Beč, kao prijestolnica kulture i dvostruko veći grad od Zagreba, ima četiri spalionice u užoj i široj zoni grada, a i dalje je turistički posjećivan i kakvoća zraka prema trenutnim podacima daleko je bolja nego u Zagrebu, što nas onda toliko koči i zašto ne izvučemo pouke iz postojećih primjera?

7. ZAKLJUČAK

Izravne posljedice populacijske ekspanzije i porasta standarda života su povećanje količine stvorenog otpada i njegova heterogenost. Uz problem stvaranja velikih količina otpada veže se problem gospodarenja otpadom, koji je individualan i svaka mu država pristupa na jedinstven način. Težnja je, prateći red prvenstva gospodarenja otpadom, da se čim veća količina otpada oporabi, ali nakon uporabe ostaje određena količina koju je potrebno zbrinuti na drugi način. Razne su metode obrade otpada, ali je osnovni cilj isti – smanjenje količine i štetnih utjecaja otpada na okoliš. Metoda koja se obrađivala u ovom završnom radu je termička obrada otpada. Osim smanjenja količine i brzog rješavanja problema otpada, mogućnost termičke obrade je energetska uporaba otpada čime se u procesu spaljivanja proizvode električna i toplinska energija. Opisani su osnovni principi rada različitih tipova postrojenja za termičku obradu otpada, njihove prednosti i nedostaci te razni postupci pročišćavanja dimnih plinova. Osnovni je zadatak projektanta ovakvog postrojenja pronaći ekonomski i ekološki optimum te nikako ne smije vrijediti načelo „Cilj opravdava sredstvo“, odnosno vrlo je važno kako će se postići konačni ishod. Ekonomski optimum postiže se racionalnim odabirom elemenata postrojenja i postupaka koji će se provoditi, a ekološki optimum korištenjem najmodernijih uređaja i standarda za pročišćavanje štetnih nusprodukata. Iako prihvaćena od strane velikog broja razvijenih zemalja Europske unije, termička obrada otpada svoju pravu primjenu još uvijek ne pronalazi na području R. Hrvatske. Postrojenje projektirano po najboljim ekološkim standardima nužno je za dugoročno ostvarenje ciljeva koji se tiču smanjenja odlaganja otpada na deponijama.

POPIS LITERATURE

- [1] Our World In Data: „Population, 1700 to 2021“, 2023. [Dostupno na: <https://ourworldindata.org/grapher/population?time=1700..latest>], <posjećeno: 1.8.2023.>
- [2] Zakon o gospodarenju otpadom (NN 84/21)
- [3] Makarski komunalac: „Što je otpad, a što smeće“, 2016. [Dostupno na: <https://www.makarski-komunalac.com/sto-je-otpad-a-sto-smece/>], <posjećeno: 1.8.2023.>
- [4] Grčić, M: „Termička obrada otpada“, diplomski rad, Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, Strojstvo, 2017.
- [5] Pravilnik o katalogu otpada (NN 90/15)
- [6] Marin Kuspilić: „4.2. Utjecaj odlagališta otpada“, interna prezentacija kolegija Zaštita okoliša, 2021./2022.
- [7] Fuk, B.: „Spalionice otpada u Hrvatskoj – fikcija ili potreba“, 2022. [Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/417770>], <posjećeno: 2.8.2023.>
- [8] Skupina autora: „Izvješće o komunalnom otpadu za 2022. godinu“, Zagreb, 2023. [Dostupno na: <https://mingor.gov.hr/vijesti/izvjesce-o-komunalnom-otpadu-za-2022-godinu/9335>], <posjećeno: 9.8.2023.>
- [9] Margeta, J.: „Upravljanje krutim komunalnim otpadom“, Split, 2017.
- [10] Kalambura, S.; Krička, T.; Kalambura, D.: „Gospodarenje otpadom“, Velika Gorica, 2011.
- [11] Wikipedia: „Incineration“, 2023. [Dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Incineration>], <posjećeno: 9.8.2023.>
- [12] Skupina autora: „Incineration and its implications: The need for sustainable waste management system in Malaysia“, Selangor, National University of Malaysia (UKM), 2013. [Dostupno na: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1066.8372&rep=rep1&type=ppd>], <posjećeno: 9.8.2023.>
- [13] Neuwahl, F.; Cusano, G.; Gómez Benavides, J.; Holbrook, S.; Roudier, S.: „Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration“, EU, 2019. [Dostupno na: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/202001/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf], <posjećeno: 13.8.2023.>
- [14] Kalambura, S.; Kiš, D.; Guberac, S.: „Gospodarenje otpadom II“, Osijek, 2018.

- [15] Wikipedia: „Plazma rasplinjavanje“, 2023. [Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Plazma_rasplinjavanje], <posjećeno: 14.8.2023.>
- [16] Open Solid Waste: „9.2a, 9.2.1a Incineration and Mass Burn Incinerators Part 1“, YouTube, 2021. [Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=E79i8K8ZV84>], <posjećeno: 23.8.2023.>
- [17] Open Solid Waste: „9.2.1b Mass Burn Incineration Part 2“, YouTube, 2021. [Dostupno na: https://www.youtube.com/watch?v=_jjbNmAgDgs], <posjećeno: 23.8.2023.>
- [18] Open Solid Waste: „9.2.2 Modular Incineration“, YouTube, 2021. [Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=KuE4eQRizw0>], <posjećeno: 23.8.2023.>
- [19] Stauffer, B.; Spuhler, D.: „Factsheet: Incineration (Large-scale), 2019. [Dostupno na: <https://sswm.info/water-nutrient-cycle/wastewater-treatment/hardwares/sludge-treatment/incineration-%28large-scale%29>], <posjećeno 25.8. 2023.>
- [20] Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 42/21)
- [21] Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 26/20)
- [22] ANT – Laboratorij za analitiku i toksikologiju d.o.o.: „Mjerenje i analiza emisija dioksina i furana“, 2005. [Dostupno na: <https://www.ant.hr/dioksini-i-furani.html>], <posjećeno: 27.8.2023.>
- [23] Wikipedia: „Scrubber“, 2023. [Dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Scrubber#Combustion>], <posjećeno: 3.9.2023>
- [24] Europski parlament: „Gospodarenje otpadom u EU-u: infografika“, 2018. [Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20180328STO00751/go/spodarenje-otpadom-u-eu-u-infografika>], <posjećeno: 12.9.2023.>
- [25] CEWEP: „Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2020“, 2022. [Dostupno na: <https://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2020/>], <posjećeno: 12.9.2023.>

POPIS SLIKA

Slika 1 – Količina stvorenog komunalnog otpada u RH, 1995. – 2022.

Slika 2 - Raspodjela prikupljenog otpada

Slika 3 - Prikaz sustava spaljivanja

Slika 4 – Ložište postrojenja za postupak rasplinjavanja

Slika 5 - Proces zbrinjavanja otpada plazma postupkom

Slika 6 - Shema postrojenja za postupak spaljivanja na pokretnoj rešetki

Slika 7 - Tipovi ložišta

Slika 8 - Postrojenje za termičku obradu s rotacijskom peći u gradu Leverkusen-Bürrig

Slika 9 - Postrojenje za spaljivanje u fluidiziranom sloju

Slika 10 - Shematski prikaz ložišta modularne spalionice

Slika 11 - Princip rada elektrofiltra

Slika 12 – Shematski prikaz rada cilindričnih vrećastih filtera

Slika 13 - Grafički prikaz povezanosti smanjenja i stvaranja NO_x , ispadanja amonijaka i reaktivne temperature SNCR procesa

Slika 14 - Raspodjela komunalnog otpada država Europe, 2020.

POPIS TABLICA

Tablica 1 - Prednosti i nedostaci spaljivanja [9]

Tablica 2 - Prednosti i nedostaci pirolitičkih procesa [9]

Tablica 3 - Koncentracije onečišćujućih tvari u sirovom dimnom plinu [13]

Tablica 4 - Dozvoljena koncentracija onečišćujućih tvari dimnog plina nakon pročišćavanja [20]

Tablica 5 - Prednosti i nedostaci skrabela [10]

Tablica 6 - Izvori, mjere smanjenja i jakost zvuka određenih dijelova postrojenja [13]