

# Tehno-ekonomska analiza postrojenja za energetske uporabu komunalnog otpada

---

**Kirac, Mislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2008**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:521321>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Mislav Kirac

Zagreb, 2008

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

Doc. dr.sc. Daniel R. Schneider

Mislav Kirac

Zagreb, 2008

Zagreb, 04.07.2008.

## ZAVRŠNI RAD

Student: **Mislav KIRAC**

Mat. br.:  
0035151810

Naslov: **Tehno-ekonomska analiza postrojenja za energetska uporabu komunalnog otpada**

Opis zadatka:

Količine otpada koje nastaju u Svijetu a tako i u RH svake se godine povećavaju. Usprkos sve većem udjelu otpada koji se prikuplja u svrhu reciklaže, jedan dio otpada se i dalje odlaže. Budući da se prema novoj direktivi EU otpad koji sadrži organske tvari iznad određene vrijednosti (35% masenog udjela) više ne smije odlagati na odlagališta potrebno ga je prije toga obraditi. Jedan od načina na koji se to može napraviti je i energetska uporaba otpada. Njome se smanjuje masa i volumen otpada koja dospijeva na odlagališta a ujedno se iskorištava energija pohranjena u otpadu, čime se smanjuje i ovisnost proizvodnje energije o fosilnim gorivima.

U radu je potrebno:

1. Pregledom stručne literature izabrati i opisati tehnologije za energetska iskorištavanje otpada.
2. Opisati različite varijante tehnologije izgaranja otpada na rešetki.
3. Za godišnju količinu od 100.000 t komunalnog otpada, napraviti tehno-ekonomska analizu postrojenja koje će kao rezultat izgaranja otpada proizvoditi toplinska i električna energija u vezanom procesu (kogeneracija).
4. Posebnu pažnju treba posvetiti zaštiti okoliša u smislu emisija onečišćujućih tvari u atmosferu, krutog ostatak nakon spaljivanja i pepela, te otpadnih voda. U tu svrhu treba predvidjeti opremu odnosno dijelove postrojenja koja će navedena onečišćenja svesti na prihvatljivu razinu radi neškodljivog ispuštanja u okoliš.
5. Usporediti različite varijante čišćenja dimnih plinova koje bi se mogle primijeniti u analiziranom postrojenju.

Svi potrebni ulazni podaci za proračun nalaze se kod mentora.

Zadatak zadan:  
27. listopada 2007.

Rok predaje rada:  
27. listopada 2008.

Zadatak zadao:

Predsjednik Središnjeg  
povjerenstva / voditelj studija ili smjera

Doc.dr.sc. Daniel R. Schneider

Prof.dr.sc. Bojan Jerbić

### **Sažetak rada**

U radu je dat pregled tehnologija za termičku obradu otpada koje se koriste pri energetske uporabi otpada. Detaljnije je opisana tehnologija izgaranja na rešetki, uz pregled danas najzastupljenijih tehnoloških rješenja najpoznatijih proizvođača opreme za izgaranje otpada na rešetki. Obradene su energetske značajke postupka, te je napravljen proračun proizvodnje električne i toplinske energije.

Opisan je utjecaj postrojenja na okoliš, detaljnije kruti ostaci izgaranja, emisije u atmosferu, te problem otpadnih voda. Dat je pregled poznatih tehnologija za pročišćavanje dimnih plinova. Napravljen je tehn-ekonomska analiza za dvije varijante izbora sustava za pročišćavanje dimnih plinova, gdje su uspoređeni početni i pogonski troškovi za obje varijante.

**Izjava**

*Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i dostupnu literaturu.*

*Zahvaljujem se mentoru Doc. dr.sc. Danielu R. Schneideru na stručnim savjetima, velikom strpljenju i nesebičnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.*

*Svojoj obitelji koja mi je pružila potporu i razumijevanje.*

*Svojoj Ani na strpljenju i potpori.*

## **Sadržaj**

Zadatak .....	3
Sažetak .....	4
Izjava .....	5
Popis slika .....	7
Popis tablica .....	8
Popis oznaka i mjernih jedinica .....	9
<b>1. UVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2. TEHNOLOGIJE ZA ENERGETSKO ISKORIŠTAVANJE OTPADA.....</b>	<b>13</b>
2.1. IZGARANJE.....	13
2.1.1. Izgaranje u rotacijskoj peći .....	14
2.1.2. Izgaranje u fluidiziranom sloju .....	15
2.2. PIROLIZA .....	17
2.3. RASPLINJAVANJE .....	18
<b>3. TEHNOLOGIJA IZGARANJA NA REŠETKI .....</b>	<b>20</b>
3.1. OPIS TEHNOLOGIJE.....	20
3.1.1. Rešetka za izgaranje .....	20
3.1.2. Sakupljač pepela.....	21
3.1.3. Ložište i kotao.....	22
3.1.3. Dovod zraka za izgaranje.....	24
3.2. KAPACITETI I KARAKTERISTIKE .....	26
3.2.1. Von Roll.....	28
3.2.2. Martin.....	31
3.2.3. Keppel-Seghers.....	33
3.3. ENERGETSKE ZNAČAJKE POSTUPKA .....	34
3.3.1. Čimbenici za odabir tipa energetskog ciklusa.....	34
3.3.2. Proizvodnja i potrošnja energije .....	36
3.3.2.1. Vanjski čimbenici - vrsta i sastav otpada .....	38
3.3.2.2. Utjecaj smještaja postrojenja na proizvodnju energije.....	40
3.3.3. Energetska bilanca za referentno postrojenje.....	40
3.3.4. Vrsta i svojstva nusprodukata .....	46
3.4. PRIMJENJIVOST POGONA U HRVATSKIM UVJETIMA .....	47

3.5. MEĐUNARODNA ISKUSTVA .....	48
3.5.1. <i>Austrija</i> .....	50
3.5.2. <i>Danska</i> .....	51
<b>4. ZAHTJEVI VEZANI UZ ZAŠTITU OKOLIŠA .....</b>	<b>52</b>
4.1. EMISIJE KOJE ODLAZE U ZRAK .....	52
4.1.1. <i>Sastav dimnih plinova koji nastaju izgaranjem otpada</i> .....	52
4.1.2. <i>Postupci pročišćavanja</i> .....	57
4.2. KRUTA MATERIJAZ OBRADU OTPADA .....	67
4.2.1. <i>Sastav i značajke</i> .....	67
4.2.2. <i>Mogućnosti uporabe</i> .....	69
4.3. PROBLEM OTPADNIH VODA .....	70
4.3.1. <i>Sastav i mogućnost upotrebe</i> .....	70
<b>5. EKONOMSKE I ORGANIZACIJSKE ZNAČAJKE TEHNOLOGIJE IZGARANJA NA REŠETKI .....</b>	<b>72</b>
5.1. VISINA INVESTICIJSKOG ULAGANJA .....	72
5.1.1. <i>Visina investicijskog ulaganja za sustav čišćenja dimnih plinova</i> .....	74
5.1.1.1. <i>Varijanta 1</i> .....	74
5.1.1.2. <i>Varijanta 2</i> .....	75
5.2. TROŠKOVI POGONA I ODRŽAVANJA .....	77
5.2.1. <i>Naknada za emisiju CO<sub>2</sub></i> .....	77
5.2.2. <i>Troškovi pogona i održavanja - varijanta 1</i> .....	80
5.2.3. <i>Troškovi pogona i održavanja - varijanta 2</i> .....	82
5.2.4. <i>Prihodi energane na otpad</i> .....	85
5.3. POTREBAN KADROVSKI SASTAV ZA VOĐENJE I ODRŽAVANJE PROCESA .....	86
5.4. ANALIZA OSJETLJIVOSTI .....	87
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>89</b>
<b>REFERENCE .....</b>	<b>90</b>
<b>PRILOG .....</b>	<b>92</b>



**Popis slika**

Slika 1. Sustav s rotacijskim ložištem .....	15
Slika 2. Sakupljač pepela .....	22
Slika 3. Izvedbe ložišta s obzirom na tok dimnih plinova .....	24
Slika 4. Sustav spaljivanja na rešetki .....	26
Slika 5. <i>Von Roll</i> sustav za izgaranje otpada .....	29
Slika 6. <i>Aquaroll</i> sustav.....	30
Slika 7. <i>Martin</i> sustav za izgaranje otpada .....	32
Slika 8. Sustav prevrtanja otpada na rešetki .....	33
Slika 9. Udio spaljivanja komunalnog otpada u EU (2003.) .....	49
Slika 10. Sastav komunalnog otpada u Zagrebu .....	53
Slika 11. SNCR postupak .....	58
Slika 12. Odnos između stvaranja i uklanjanja NO <sub>x</sub> , pobjega amonijaka i temperature reakcije .....	59
Slika 13. Moguće pozicije SCR postupka u sustavu za pročišćavanje dimnih plinova .....	60
Slika 14. Mehanizam otprašivanja u elektrostatičkom otprašivaču .....	61
Slika 15. Vrećasti filter sa sustavom komprimiranog zraka .....	62
Slika 16. Mokri postupak čišćenja dimnih plinova .....	63
Slika 17. Sustav suhog čišćenja dimnih plinova .....	65
Slika 18. Sustav polusuhog čišćenja dimnih plinova .....	66
Slika 19. Varijanta 1 - sustav za pročišćavanje dimnih plinova.....	75
Slika 20. Varijanta 2 - sustav za pročišćavanje dimnih plinova.....	76
Slika 21. Analiza osjetljivosti (cijena preuzimanja otpada) .....	87
Slika 22. Analiza osjetljivosti (cijena toplinske energije).....	88

**Popis tablica**

Tablica 1. Prosječni kapacitet postrojenja za spaljivanje otpada u EU .....	27
Tablica 2. Čimbenici koji se uzimaju u obzir prilikom odabira energetskog ciklusa za spalionice otpada.....	34
Tablica 3. Specifična potrošnja električne i toplinske energije za 50 spalionica KKO u EU ..	38
Tablica 4. Izračunate kalorične vrijednosti za 50 spalionica KKO u EU.....	39
Tablica 5. Ulazni parametri .....	41
Tablica 6. Parametri vode i pare.....	41
Tablica 7. Energetska bilanca postrojenja .....	45
Tablica 8. Geografski razmještaj u spalionicau EU .....	50
Tablica 9. Emisije u atmosferu.....	57
Tablica 10. Koncentracije organskih spojeva u ostacima termičke obrade.....	68
Tablica 11. Specifična i godišnja proizvodnja pepela .....	69
Tablica 12. Sastav otpadnih voda iz mokrog postupka čišćenja (prije pročišćavanja vode)....	71
Tablica 13. Struktura početnih troškova (bez sustava za pročišćavanje dimnih plinova).....	73
Tablica 14. Varijanta 1 - početni troškovi .....	75
Tablica 15. Varijanta 2 - početni troškovi .....	76
Tablica 16. Usporedba investicijskih troškova.....	76
Tablica 17. Kemijski sastav komunalnog otpada .....	77
Tablica 18. Varijanta 1 - troškovi pogona i održavanja .....	80
Tablica 19. Varijanta 2 - troškovi pogona i održavanja .....	83
Tablica 20. Usporedba pogonskih troškova za sustave čišćenja dimnih plinova.....	84
Tablica 21. Prihodi od preuzimanja otpada .....	85
Tablica 22. Prihodi od prodaje električne i toplinske energije.....	86
Tablica 23. Prihodi od prodaje izdvojenog materijala.....	86
Tablica 24. Kadrovski sastav i godišnje plaće.....	87

## Popis oznaka i mjernih jedinica

Oznaka	Jedinica	Naziv
$\lambda$	-	koeficijent pretička zraka
$H_d$	J / kg	donja ogrjevna moć otpada
B	h / god	godišnji broj radnih sati postrojenja
$q_{otp}$	$t_{otp}$ / god	godišnji kapacitet postrojenja
$\eta_{kot}$	-	stupanj iskoristivosti kotla
$\Phi_{prod}$	W	prodana toplina
$q_p$	kg / s	količina proizvedene pare
h	kJ / kg	entalpija vode/pare
$P_{T1}$	W	snaga visokotlačnog dijela turbine
$P_{T2}$	W	snaga niskotlačnog dijela turbine
$q_{p\ odu}$	kg / s	količina regulirano oduzete pare iz turbine
$P_T$	W	ukupna snaga turbine
$\Phi_{pov}$	W	povrat topline u kotao
$\eta_{gen}$	-	stupanj iskoristivosti generatora električne energije
$E_{el}$	MWh / god	proizvodnja električne energije
$E_t$	MWh / god	proizvodnja toplinske energije
$C_e$	MWh / god	potrošnja električne energije u postrojenju
$C_t$	MWh / god	potrošnja toplinske energije u postrojenju
$t_{otp}$	t	tona otpada
$tCO_2$	t	tona ugljikovog dioksida ( $CO_2$ )
$tCO_{2eq}$	t	tona ekvivalentnog $CO_2$
toe	t	tona ekvivalentne nafte
$tCH_4$	t	tona metana ( $CH_4$ )
$n_C$	kg / mol	količina ugljika u dimnim plinovima
$m_{CO_2}$	kg / $t_{otp}$	masa $CO_2$ iz jedne tone otpada

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Naziv</b>
$m_{\text{CO}_2 \text{ UK}}$	kg / god	ukupna godišnja masa $\text{CO}_2$ iz otpada
$n_{\text{S}}$	kg / mol	količina $\text{SO}_2$ u dimnim plinovima
$m_{\text{SO}_2}$	kg / $t_{\text{otp}}$	masa $\text{SO}_2$ iz jedne tone otpada
$m_{\text{SO}_2 \text{ UK}}$	kg / god	ukupna godišnja masa $\text{SO}_2$ iz otpada

## **1. UVOD**

Iskorištavanje komunalnog otpada u svrhu dobivanja energije, ali i adekvatno zbrinjavanje otpada, postalo je nužnost suvremenog razvijenog svijeta. Energetsko iskorištavanje otpada pritom objedinjuje nekoliko razloga koji čvrsto stoje iza napora razvijenih zemalja (EU, SAD i Japan) koji se ulaže u navedeno područje. Porastom životnog standarda raste i proizvodnja komunalnog otpada, za čije zbrinjavanje već odavno nisu adekvatna odlagališta na kojima se otpad prethodno ne sortira, mehanički obrađuje, a potom i djelomično reciklira. Velika količina otpada koji se odlaže u blizini većih gradskih naselja ili gradova negativno utječe na zdravlje ljudi ali i kvalitetu života općenito. Izgaranjem otpada u postrojenju za termičku obradu otpada značajno se smanjuje volumen (do 90 %) i masa odloženog ostatka izgaranja (do 75 %).

Osim problema zbrinjavanja otpada, svijet se suočava s problemom dobave energije. Energija postaje sve veća politička poluga, ali koja predstavlja nesigurnost i napetost. Osigurati i dobiti dovoljnu količinu energije među najvažnijim su zadaćama u razvijenim, ali i tranzicijskim zemljama, koje bilježe snažan gospodarski rast. U tom smislu, uporaba otpada predstavlja jedno od rješenja za smanjenje ovisnosti o energiji. U otpadu je koncentrirana energija. Ova činjenica sama je dovoljna kako bi se zaključilo da je energetsko iskorištavanje otpada potreba. Potreba, koja će u bliskoj budućnosti biti još izraženija.

Područje energetske uporabe otpada predstavlja vrlo opsežno multidisciplinarno područje, koje nije moguće obuhvatiti predviđenim opsegom ovog rada, te će se ovaj rad usredotočiti na tehno-ekonomske analize, danas još uvijek najzastupljenije, tehnologije izgaranja otpada na rešetki.

## 2. TEHNOLOGIJE ZA ENERGETSKO ISKORIŠTAVANJE OTPADA

Termičkom obradom komunalnog otpada smanjuje se volumen otpada, te se izdvajaju ili uništavaju potencijalno opasne tvari iz otpada. Produkti termičke obrade mogu biti ili izravno toplina ili plin koji se kasnije može koristiti kao gorivo u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju topline i električne energije. Takva postrojenja se tada nazivaju energane na otpad (ENO).

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

- smanjenje udjela organskih tvari u otpadu
- uništavanje organskih štetnih tvari
- izdvajanje anorganskih tvari (plemeniti metali i dr.)
- smanjenje mase i volumena otpada
- iskorištenje energije pohranjene u otpadu

U nastavku je dan pregled tehnologija koje se koriste za energetske iskorištavanje otpada.

### 2.1. Izgaranje

Primarni značaj spaljivanja jest drastično smanjenje mase otpada (do 75%) i volumena otpada (do 90%) [1], čime se štedi često vrlo ograničeni prostor na odlagalištima otpada. Izgaranjem otpada uništavaju se neke opasne, nemetalne organske tvari, uništavaju se bakterije i virusi, te je stoga posebno pogodno za zbrinjavanje medicinskog otpada.

Najčešće korištena tehnologija za termičku obradu otpada jest izgaranje ukupnog, nerazvrstanog otpada na rešetki (*mass-burn*). Takvom, nerazvrstanom otpadu potrebno je dodati gorivo kojim se povećava ogrjevna vrijednost otpada. Najčešće se kao dodatno gorivo koristi prirodni plin, ali i ugljen i drvena biomasa, naročito ako se otpad prethodno ne osuši. Rešetka na kojoj otpad izgara može biti izvedena kao ravna, kosa ili stepenasta.

Postoji nekoliko varijacija tehnologije izgaranja, te tako osim izgaranja na rešetki postoji izgaranje u rotacijskoj peći i izgaranje u fluidiziranom sloju.

### **2.1.1. Izgaranje u rotacijskoj peći**

Izgaranje u rotacijskoj peći postupak je u kojem se otpad gravitacijski ili mehanički ubacuje u cilindričnu peć postavljenu pod kutom kako bi se, uz rotaciju peći, ostvario protok otpada kroz peć. Prolaskom kroz peć, otpad se termički obrađuje spaljivanjem koje se vrši pomoću plamenika. Pri tom nastali plinovi posebno se kasnije filtriraju i spaljuju, a proizvedena toplina koristi se za predgrijavanje otpada, ali i u druge svrhe, ovisno o vrsti postrojenja. Nastali pepeo se deponira ili koristi kao materijal koji se ugrađuje u asfalt (vidi poglavlje 4.3.2.).

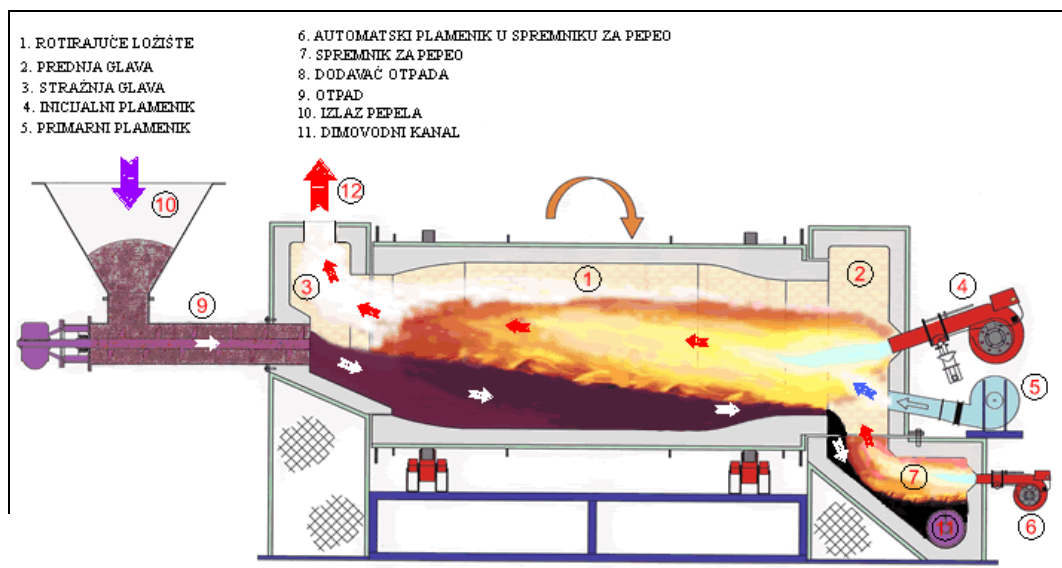
Postupak spaljivanja otpada je vrlo robustan, s obzirom na to da se njime može obrađivati gotovo bilo kakav otpad, neovisno o vrsti i sastavu. Ovaj se postupak naročito široko primjenjuje za spaljivanje opasnog otpada, kliničkog otpada, te manje za spaljivanje komunalnog otpada.

Temperature na kojima se odvija izgaranje u rotacijskim pećima kreću se od 500 °C (za rasplinjavanje) do 1450 °C (za visokotemperaturno taljenje pepela). Moguće su i više temperature, ali nisu uobičajene za postupke oporabe otpada.

Kada se rotacijske peći koriste za konvencionalno izgaranje, temperatura je obično iznad 850 °C, dok su temperature 900-1200 °C karakteristične za spaljivanje opasnog otpada.

U pravilu, ovisno o sastavu otpada, više temperature povećavaju rizik od stvaranja vapnenog taloga na stjenkama peći, a povećavaju i rizik od štete uslijed visokih temperaturnih opterećenja. Neke peći su hladene vodom ili zrakom, čime se produljuje njihov životni vijek, a time i vrijeme između dvaju gašenja radi održavanja.

Slika 1 prikazuje shematski prikaz sustava s rotacijskom peći.



Slika 1. Sustav s rotacijskim ložištem [2]

Vrijeme izgaranja krutog otpada u rotacijskoj peći ovisi o kutu pod kojim je peć nagnuta i o brzini vrtnje same peći. Uobičajeno vrijeme od 30-90 minuta je dovoljno za adekvatno spaljivanje otpada.

Kruti, tekući, plinoviti i muljeviti otpad može se spaljivati u rotacijskim pećima. Kruti otpad se obično u peć uvodi iz lijevka, tekući otpad se može injektirati u peć kroz sapnice plamenika, dok se muljeviti otpad može uvoditi pomoću vodom hlađene cijevi.

Kako bi se povećala efikasnost uništavanja otrovnih komponenti, obično se dodaje i komora za naknadno izgaranje. Kako bi se održala potrebna temperatura u peći, može se u peć uvoditi dodatni tekući otpad ili čak gorivo.

### 2.1.2. Izgaranje u fluidiziranom sloju

Ova tehnologija široko se primjenjuje za spaljivanje temeljito razvrstanog otpada, npr. goriva dobivenog iz otpada (GIO ili engl. *Refuse Derived Fuel*, RDF) ili kanalizacijskog mulja. Ova se tehnologija koristi desetljećima, najviše za spaljivanje homogenih goriva, kao što su ugljen, sirovi lignit, kanalizacijski mulj i biomasa (npr. drvo).

Spalionicu čini ložište koje je izvedeno u obliku vertikalnog cilindra. U donjem dijelu komore, sloj inertnog materijala (npr. pijeska ili pepela) na rešetki ili ploči je fluidiziran sa



zrakom. Otpad koji se spaljuje kontinuirano se nanosi na fluidizirani sloj odozgora ili sa strane.

Predgrijani zrak se upuhuje u komoru kroz otvore na ploči, stvarajući fluidizirani sloj s pijeskom ili nekim drugim inertnim materijalom, ponekad uz dodatak vapnenca. Vapnenac se koristi za smanjenje sumporovih oksida ( $\text{SO}_x$ ) i do 90 % [3], te može biti sadržan u inertnom sloju ili prskan u ložište. Otpad se uvodi u ložište pomoću pumpe ili pužnog vijka.

Zahvaljujući homogenom sastavu otpada i ravnomjernoj distribuciji otpada u fluidiziranom sloju, ovakvi sustavi u pravilu imaju uniformno raspodijeljenu temperaturu i udio kisika, što proces čini stabilnim. Za otpad heterogenog sastava, otpad se najprije mora pripremiti u smislu ujednačavanja veličine čestica u otpadu. Ovaj postupak zahtijeva relativno malu veličinu čestica, često do maksimalno 50 mm promjera čestice. Ovo se može postići mehaničkom obradom.

S obzirom da su troškovi predobrade (pripreme) otpada za ovaj postupak relativno visoki, ekonomski faktor je glavna prepreka bržem rastu ove tehnologije. Ipak, djelomično se ovaj problem može riješiti selektivnim skupljanjem otpada, ali i razvojem viših standarda za gorivo iz otpada (RDF). Odvojeno prikupljen otpad (papir, plastika, karton) mora se oporabiti, a najčešće se reciklira. Otpad pogodan za reciklažu nije ekonomski ni ekološki prihvatljivo spaljivati, osim ako se radi o posebnim vrstama opasnog (medicinskog) otpada. Prikupljeni biootpad se kompostira ili koristi u procesu anaerobne digestije. Kombinacija dobro pripremljenog i kontroliranog otpada i tehnologije izgaranja u fluidiziranom sloju omogućava napredak u kontroli procesa izgaranja, te za potencijalno jednostavnije, a time i jeftinije pročišćavanje dimnih plinova.

Postoji više varijanti ove tehnologije, a razlikuju se u brzini plinova i konstrukciji ploče sa sapnicama:

- Stacionarni (mjehurićasti) fluidizirani sloj (atmosferski i pod tlakom): Inertni materijal se miješa, ali uzlazno gibanje krutih čestica nije značajno.
- Vrtložni fluidizirani sloj: Varijanta mjehurićastog fluidiziranog sloja, gdje se fluidizirani sloj vrtložno giba u ložištu, čime se postiže dulji boravak otpada u ložištu. Ova varijanta se za izgaranje komunalnog otpada koristi oko deset godina.

- Cirkulirajući fluidizirani sloj: Veće brzine strujanja plinova u ložištu uzrokuju djelomično odnošenje materijala iz sloja koji se nakon odvajanja čestica neizgorenog goriva i pepela u ciklonskim odvajačima vraća nazad u ložište.

Kako bi proces izgaranja započeo, fluidizirani sloj se mora prethodno zagrijati minimalno na temperaturu zapaljenja otpada koji se ubacuje, ili čak na višu temperaturu (ovisno o legislativi). Ovo se postiže predgrijavanjem zraka koristeći uljne ili plinske plamenike, koji se gase tek kada izgaranje postane samoodrživo. U pravilu se veći dio pepela odnosi s dimnim plinovima, te ga je kasnije potrebno izdvojiti iz dimnih plinova. Udio pepela koji se zadržava na dnu fluidiziranog sloja ovisi o samoj tehnologiji i o sastavu otpada, te parametrima procesa.

Izgaranje u fluidiziranom sloju pokazuje veću konzistentnost u radu od tehnologije masovnog izgaranja (*mass burn*) i može se efikasnije kontrolirati kako bi se postigla veća energetska učinkovitost, smanjio udio ostatnog pepela i emisije plinova u atmosferu. Također, s obzirom da je kod ove tehnologije prisutna niža temperatura nego kod izgaranja na rešetki, smanjena je produkcija NO<sub>x</sub> i ne dolazi do taljenja i lijepljenja pepela za isparivačke cijevi kotla. U Europi se tek očekuje prodor ove tehnologije, usporedno s akumulacijom znanja i iskustva, te padom cijene i većom energetska učinkovitošću.

## 2.2. Piroliza

Piroliza je proces razgradnje otpada bez prisustva kisika, gdje se uz povišenu temperaturu termički razgrađuju organske molekule u otpadu. Produkti pirolize su pirolitički plin, ulje i koks. Ogrjevne vrijednosti u procesu pirolize leže između 5-15 MJ/m<sup>3</sup> za komunalni otpad i između 15-30 MJ/m<sup>3</sup> za gorivo iz otpada (RDF). U širem smislu, piroliza je zajednički naziv koji objedinjuje više različitih tehnoloških kombinacija koje sadrže, u pravilu, slijedeće korake:

- Proces tinjanja: Stvaranje plinova iz krutih čestica otpada pri temperaturama 400-600°C
- Piroliza: Termička razgradnja organskih molekula otpada pri temperaturama 500-800 °C
- Rasplinjavanje: Konverzija udjela ugljika u koksu pri temperaturama 800-1000 °C, uz pomoć sredstva za rasplinjavanje (npr. zrak ili para), u ugljikov monoksid i vodik

- Izgaranje: Ovisno o tehnologiji, plin i pirolitički koks izgaraju u ložištu

Postrojenja za zbrinjavanje otpada tehnologijom pirolize u pravilu sadrže slijedeće osnovne faze procesa:

1. Priprema i mljevenje: mljevenjem otpada homogenizira se sastav otpada, što omogućuje bolji prijenos topline među česticama
2. Sušenje (ovisno o procesu): odvojeni postupak sušenja povećava donju ogrjevnu vrijednost pirolitičkog plina i pospješuje efikasnost izgaranja
3. Piroliza otpada, gdje osim pirolitičkog plina nastaje i kruta faza koja osim ugljika sadrži i minerale i metale
4. Sekundarna obrada pirolitičkog plina i koksa kondenzacijom plinova kako bi se ekstrahiralo energetska iskoristivo ulje i/ili izgaranjem plina i koksa

Prema rasponu temperatura pri kojima se odvija proces pirolize, razlikujemo niskotemperaturnu (do 500 °C), srednjetemperaturnu (od 500-800 °C), te visokotemperaturnu (od 800 °C).

S povišenjem temperature, povećava se i udio nastalog pirolitičkog plina, a smanjuje se udio krute i tekuće faze. Dimni plinovi se uvode u kotao u kojem se hlađenjem dimnih plinova proizvodi para koja se može koristiti za grijanje ili za pokretanje parne turbine.

### 2.3. Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je postupak tijekom kojeg se pri povišenoj temperaturi u reaktor s gorivom bogatim ugljikom dovodi sredstvo za rasplinjavanje (kisik, vodena para, zrak ili ugljikov dioksid). Izbor oksidansa ovisi o nekoliko faktora:

- tehnološka jednostavnost pridobivanja
- troškovi pridobivanja odnosno osiguranja oksidansa
- utjecaj na ogrjevnu vrijednost sintetskog plina
- udio inertnih plinova zagrijanih na procesne temperature

- utjecaj na temperature u procesu i formiranje katrana
- troškovi izgradnje postrojenja

Produkt reakcije je smjesa plinova koja se naziva sintetski plin (*syngas*). Tako dobiveni plin može se spaljivati kao gorivo u kogeneracijskim postrojenjima (istovremena proizvodnja topline i električne energije) ili se može upotrijebiti za sintezu različitih tekućih ugljikovodika u Fischer-Tropsch procesu (npr. kao sintetsko gorivo za motorna vozila).

Kako je za postupak rasplinjavanja potrebno gorivo (otpad) relativno homogenog sastava, to znači da je potrebno prethodno obraditi otpad, te zato ova tehnologija nije još raširen postupak termičke obrade otpada. U manjim postrojenjima moguće je rasplinjavati tekući opasni otpad ili visokoenergetski otpad kao što je plastični otpad. Rasplinjavanje se može primijeniti i kao postupak naknadne obrade krute faze nastale u postupku pirolize.

Rasplinjavanje se može provoditi u uređajima za rasplinjavanje (reaktorima) u fiksnom sloju goriva, s rasplinjavanjem u struji smjese goriva i sredstva za rasplinjavanje, te u postupku s fluidiziranim slojem.

S obzirom na smjer dovođenja goriva (otpada) i odvođenja plinovitih produkata rasplinjavanja razlikujemo istostrujno, protustrujno i poprečnostrujno rasplinjavanje. Rasplinjavanje se može provoditi pri atmosferskom tlaku ili pri povišenom tlaku, a u ovisnosti o izvoru topline koja se dovodi u prvoj fazi procesa, razlikujemo autotermno i altotermno rasplinjavanje. Toplina se mora dovesti s obzirom na to da je rasplinjavanje u osnovi endoterman proces, te je potrebno dovesti toplinu. Autotermno rasplinjavanje je postupak pri kojem se toplina stvara u samom reaktoru, dok se kod altotermnog procesa toplina dovodi izvana, pomoću posrednika.

Također je poznata tehnologija rasplinjavanja na bazi plazme, koja predstavlja najnapredniji oblik rasplinjavanja. Trenutno se razvijaju pilot projekti u Japanu, te se očekuje jači razvoj ove tehnologije u bliskoj budućnosti.

### **3. TEHNOLOGIJA IZGARANJA NA REŠETKI**

#### **3.1. Opis tehnologije**

Izgaranje krutog komunalnog otpada (KKO) na rešetki je najrasprostranjenije rješenje za termičko zbrinjavanje i oporabu otpada. Otpad iz domaćinstva ili komunalni otpad dovodi se cestovnim putem (kamionima) i odlaže u spremnik za otpad. Prije ubacivanja u ložište, otpad se može podvrgnuti mehaničkoj obradi, najčešće samo grubom usitnjavanju. Ukoliko se dostavljeni otpad prethodno mehanički ne usitni, obično je vrlo heterogen po sastavu i veličini čestica. Tada se lijevak kojim otpad dopijeva u ložište dimenzionira tako da glomazni otpad može proći bez da postoji opasnost od zaglavljivanja, što može uzrokovati nejednoliko punjenje ložišta i blokirati ulazak zraka u ložište. Tri danas najzastupljenije tehnologije izgaranja na rešetki su tehnologije proizvođača *Martin*, *Von Roll*, te *Keppel-Seghers* (poglavlje 3.2.).

##### **3.1.1. Rešetka za izgaranje**

Iz spremnika se otpad dizalicom ubacuje u ložište. Otpad koji se pod utjecajem gravitacije i nadolazećeg otpada polako pomiče po kosoj rešetki samopodrživo izgara. Rešetka na kojoj otpad izgara ima slijedeće funkcije:

- Prenosi otpad koji se spaljuje kroz ložište
- Raspršuje otpad po rešetki
- Pozicionira glavnu zonu izgaranja u ložištu, po mogućnosti u kombinaciji s kontrolnim parametrima koji upravljaju procesom (protok otpada, količina primarnog zraka i sl.)

Zrak koji je nužan kako bi se provelo izgaranje djelomično se dovodi iz spremnika za otpad. Zadaća rešetke jest osigurati dobru distribuciju zraka koji omogućava spaljivanje otpada. Primarni zrak upuhuje se kroz male otvore u rešetki u sloj otpada, dok se više zraka upuhuje iznad sloja otpada kako bi se dovršilo izgaranje (sekundarni zrak).

Uobičajeno je da fine čestice pepela prođu kroz otvore rešetke, gdje se potom skupljaju u posebni spremnik. Od tamo se pepeo može ponovno vratiti izravno u ložište na dogorijevanje ili se može odvesti iz pogona. Ukoliko se pepeo vraća kroz lijevak za ubacivanje otpada, treba se paziti da ne dođe do zapaljenja otpada u lijevku.

Temperatura u ložištu iznosi približno 950 °C (minimalno 850 °C), dok je vrijeme izgaranja između 45-60 minuta [1]. Količina kisika u ložištu mora uvijek iznositi barem 6 % volumnog udjela u dimnim plinovima, kako bi se osiguralo što potpunije izgaranje. Potreban koeficijent pretička (viška) zraka ( $\lambda$ ) iznosi:

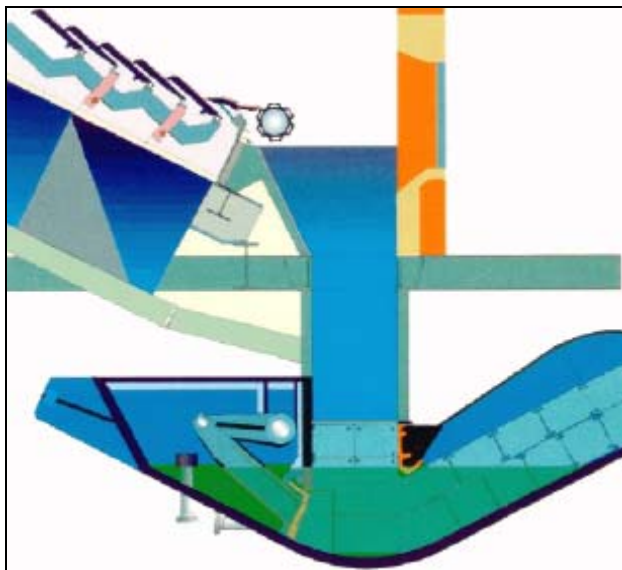
$$\lambda = \frac{\text{St var no potrebna količina}}{\text{Teoretski potrebna količina}} = \frac{21}{21-6} = 1,4$$

Većina rešetki je hlađena, najčešće zrakom. U nekim slučajevima koristi se rashladna tekućina (obično voda). Rashladni medij progresivno struji od hladnije zone do toplije, kako bi se maksimalizirao prijenos topline. Toplina apsorbirana rashladnim medijem može se koristiti u samom procesu ili za upotrebu van procesa.

Vodeno hlađenje najčešće se koristi kada je kalorična vrijednost otpada nešto veća, npr. 12-15 MJ/kg za komunalni otpad. Izvedba hlađenja s vodom nešto je složenija od izvedbe hlađene zrakom.

### **3.1.2. Sakupljač pepela**

Sakupljač pepela sakuplja, hladi i odvodi krute ostatke koji se skupljaju na rešetki. Sakupljač može biti izveden kao bazen s vodom, koja osim što hladi pepeo, djeluje kao brtva kako zrak iz okoline ne bi ušao u ložište. Za izvlačenje pepela s dna bazena obično se koriste pokretne trake, koje mogu podnijeti i veće komade eventualno neizgorenog otpada. Voda koja služi za hlađenje se ekstrahira iz pepela na izlazu, te se može vratiti nazad u sakupljač. Napajanje vodom odozgo obično je potrebno kako bi se razina vode u sakupljaču održala konstantnom, pošto se dio vode gubi s pepelom i isparivanjem.



**Slika 2. Sakupljač pepela [1]**

Pepelo se hladi, te se odvajaju veće čestice. Ohlađeni pepeo prolazi kroz elektromagnet koji odvaja metalne dijelove, dok se pepeo skladišti u skladištu za pepeo. Plemeniti metali odvojeni iz pepela mogu se isporučiti prerađivačima metalnih sirovina. Iz pepela se naknadno odvajaju opasne tvari, te se ostatak pepela može koristiti u graditeljstvu, npr. u proizvodnji asfalta. Ipak, treba voditi računa o sastavu pepela s obzirom na moguće štetne posljedice po okoliš i zdravlje ljudi.

### **3.1.3. Ložište i kotao**

Izgaranje se odvija u ložištu, iznad rešetke. Kao cjelina, ložište uobičajeno čini rešetka smještena na dnu ložišta, hladeni i nehladeni zidovi ložišta, te strop, odnosno površina kotla. Kako komunalni otpad sadrži mnogo isparljivih tvari, te se nastali plinovi brzo dižu prema gore, tako samo manji dio izgaranja se zapravo odvija na rešetki.

Zahtjevi koji utječu na konstrukciju ložišta:

- Oblik i veličina rešetke - veličina rešetke određuje veličinu presjeka ložišta.
- Vrtloženje i homogenost toka plinova, što omogućava potpuno izgaranje plinova koji se oslobađaju iz otpada, te drugih neizgorelih tvari u dimnim plinovima.
- Dostatno vrijeme zadržavanja dimnih plinova u ložištu, kako bi se osiguralo potpuno izgaranje.

- Djelomično hlađenje dimnih plinova - kako bi se izbjegla fuzija sa vrućim pepelom koji se skuplja u kotlu, temperatura dimnih plinova ne smije premašivati postavljenu gornju granicu na izlazu iz ložišta.

Konstrukcija ložišta povezana je s vrstom rešetke za izgaranje. Precizna konstrukcija ložišta zahtijeva određene kompromise ukoliko se promijene parametri procesa, najčešće zbog promjene svojstava otpada. Europska iskustva su pokazala kako nema značajnijih prednosti ili nedostataka za različite izvedbe ložišta.

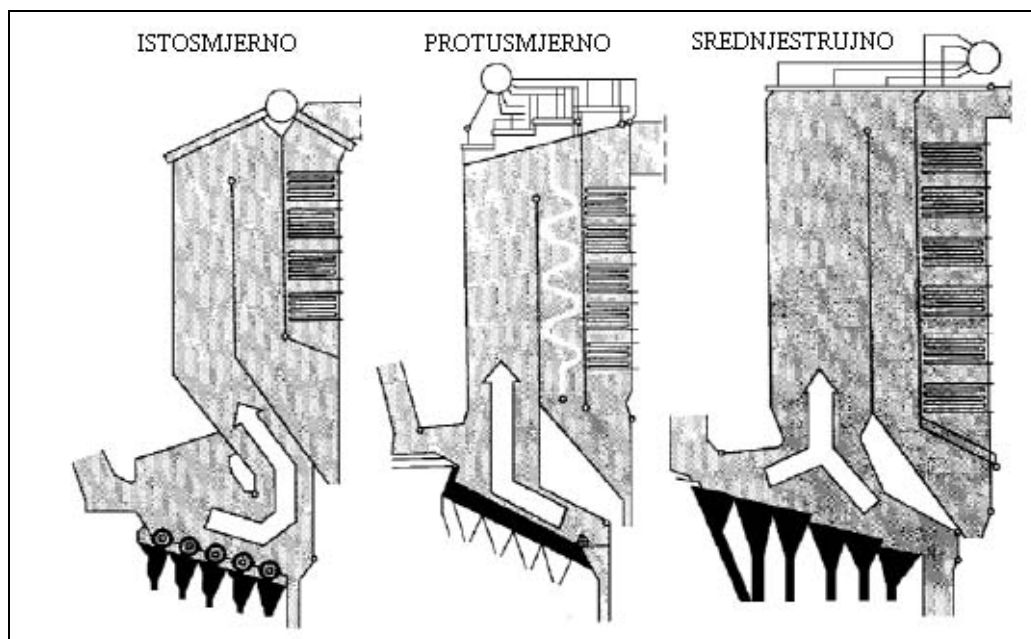
U osnovi, razlikuju se tri tipa, a nazivlje dolazi prema toku dimnih plinova u odnosu na tok otpada: istosmjerno, protusmjerno te srednjesmjerno.

Kod istosmjernog strujanja, primarni zrak i otpad teku paralelno kroz ložište. Iz tog razloga, izlaz za dimne plinove smješten je na kraju rešetke. U usporedbi sa drugim tipovima, relativno malo energije se izmijeni između dimnih plinova i otpada na rešetki. Prednost ovog koncepta istosmjernog strujanja jest to što dimni plinovi provode najviše vremena u ložištu, što osigurava kvalitetno izgaranje plinova koji se oslobađaju iz otpada. Kako bi izgaranje započelo, primarni zrak se mora predgrijati.

U slučaju protusmjernog strujanja, primarni zrak i otpad teku u međusobno suprotnim smjerovima, a izlaz za dimne plinove smješten je na početku rešetke za spaljivanje. Vrući dimni plinovi koji struje preko otpada suše i pale otpad. Kod ovakvog tipa ložišta posebno treba paziti da se izbjegne prolaz neizgorenih plinova iz ložišta. U pravilu se kod ovakvog tipa mora dodavati više sekundarnog zraka kako bi se osiguralo potpuno izgaranje plinova.

Kako kompozicija i sastav komunalnog otpada značajno varira, srednjesmjerno strujanje predstavlja kompromis koji omogućava korištenje šireg spektra parametara procesa u ovisnosti o sastavu otpada. U ovom je slučaju izlaz za dimne plinove smješten iznad sredine rešetke za spaljivanje.





Slika 3. Izvedbe ložišta s obzirom na tok dimnih plinova [1]

Prilikom pokretanja pogona, često se koriste pomoćni plamenici kako bi zagrijali ložište na zahtijevanu temperaturu. Ovo je glavni zadatak pomoćnih plamenika, te se oni mogu automatizirati, tako da se automatski uključe ukoliko temperatura u ložištu padne ispod zahtijevane temperature tijekom procesa. Tijekom gašenja pogona, ovi plamenici se obično koriste samo ukoliko se otpad još nalazi u ložištu.

### 3.1.3. Dovod zraka za izgaranje

Zrak koji se uvodi u ložište ima slijedeće funkcije:

- Osigurava oksidans
- Hladi rešetku
- Sprječava formiranje šljake u ložištu
- Miješa dimne plinove

Zrak se uvodi na različitim mjestima u ložištu. Osim primarnog i sekundarnog zraka, koriste se još i tercijarni i recirkulirani zrak.

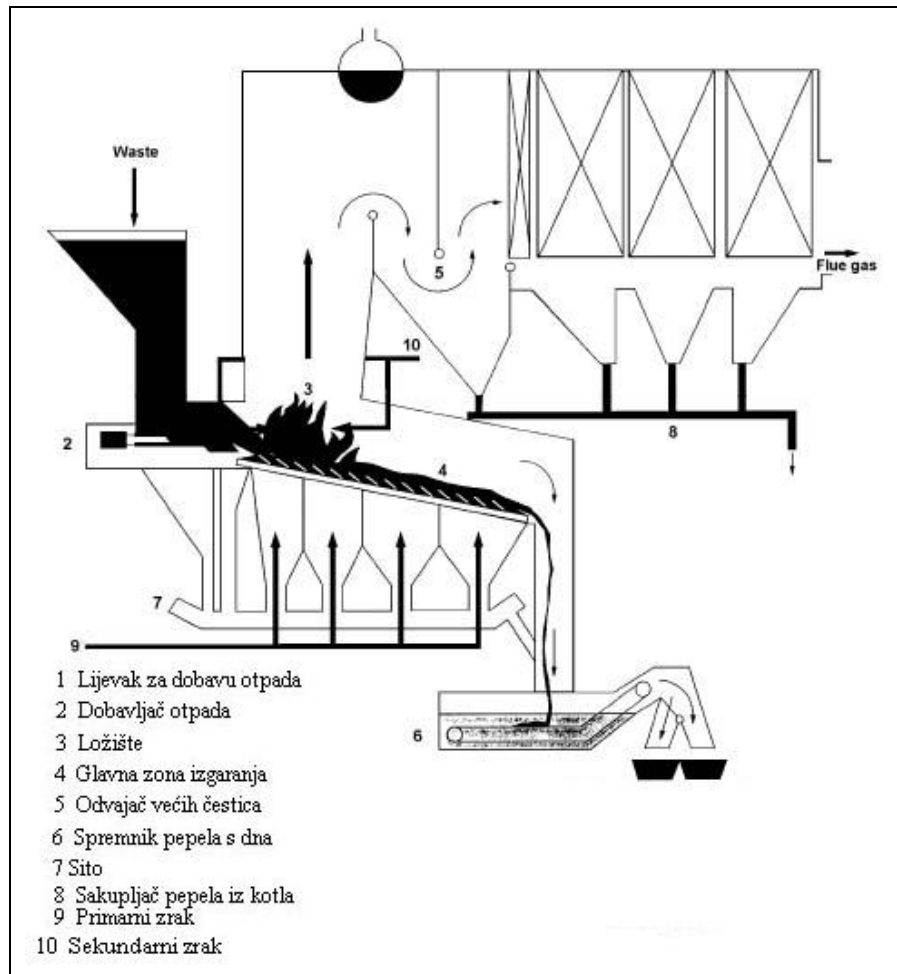
Primarni zrak se uobičajeno uzima iz spremnika za otpad. Time se smanjuje tlak u spremniku i eliminira se većina emisija neugodnih mirisa iz spremnika. Primarni zrak se upuhuje

ventilatorima u prostor ispod rešetke, gdje se distribucijom zraka može upravljati koristeći višestruke zračne spremnike, te distribucijske ventile.

Zrak se može predgrijati ukoliko ogrjevna vrijednost otpada padne do razine kada postaje nužno prethodno osušiti otpad. Primarni zrak se upuhuje kroz rešetku u sloj otpada. Zrak ujedno hladi rešetku i dovodi kisik do zone izgaranja.

Sekundarni zrak se upuhuje u ložište pri velikim brzinama, te osigurava potpuno izgaranje otpada. Također, sekundarni zrak je odgovoran za intenzivno miješanje plinova koji se oslobađaju iz otpada i dimnih plinova, u kojima se mogu naći neke neizgorene čestice iz otpada. Udio ugljikovog monoksida u dimnim plinovima ključan je indikator kvalitete izgaranja plinova.

Stijenke kotla i stijenke ložišta zaštićene su vatrostalnim oblogama, koje sprječavaju nastanak temperaturne korozije uslijed stalnog izlaganja plamenu i vrućim dimnim plinovima.



Slika 4. Sustav spaljivanja na rešetki [1]

### 3.2. Kapaciteti i karakteristike

Tehnologija izgaranja na rešetki pogodna je za obradu većih količina otpada, tj. više od 100.000 tona otpada godišnje. Povećanjem kapaciteta pogona, snižava se cijena spaljivanja po toni otpada, a povećava se i energetska učinkovitost uporabe. Tablica 1 prikazuje prosječnu veličinu kapaciteta pogona za spaljivanje krutog komunalnog otpada u pojedinim zemljama EU [1].

**Tablica 1. Prosječni kapacitet postrojenja za spaljivanje otpada u EU [1]**

<b>Država</b>	<b>Prosječni kapacitet pogona za spaljivanje KKO (10<sup>3</sup> tona/god)</b>
Austrija	178
Belgija	141
Danska	114
Francuska	132
Njemačka	257
Italija	91
Nizozemska	488
Portugal	390
Španjolska	166
Švedska	136
Velika Britanija	246
Norveška	60
Švicarska	110
<b>PROSJEČNO</b>	193

Kapaciteti znatno variraju, jer ovise o mnogo faktora:

- Količini dostupnog otpada
- Blizini izvoru otpada (većem gradu, npr.)
- Ekološkim zahtjevima okoline
- Nacionalnim politikama gospodarenja otpadom

Količina dostupnog otpada može se jednostavno kvantificirati i može predstavljati donju granicu kapaciteta pogona, ukoliko je količina otpada na nekom prostoru relativno ograničena. Ovo se najviše odnosi na izolirane regije, najčešće otoke, koji svaki zasebno predstavljaju jedan izolirani sustav. U manjim izoliranim sustavima, godišnja proizvodnja otpada biti će možda jedini kriterij prilikom proračunavanja kapaciteta pogona.

Blizina izvoru otpada bitna je s aspekta troškova prijevoza otpada do pogona za spaljivanje. Pogoni smješteni bliže izvoru otpada mogu biti manjeg kapaciteta nego pogoni smješteni

dalje od izvora, budući da s udaljenošću raste cijena oporabe po toni, te su potrebni veći kapaciteti kako bi se ostvarila ista rentabilnost pogona.

Ekološki zahtjevi okoline mogu biti ograničavajući faktor prilikom proračuna kapaciteta za spaljivanje otpada. Za pojedinu lokaciju se utvrđuje maksimalno dozvoljena emisija pojedinih onečišćujućih tvari, te njihov utjecaj na okoliš. U neposrednoj blizini ili u samim gradovima za očekivati je pogone manjih kapaciteta.

Politike gospodarenja otpadom razlikuju se od države do države, a njima se reguliraju i planiraju prioritete i dugoročni planovi za gospodarenje otpadom. Upravo dugoročno planiranje osigurava odabir najpovoljnije tehnologije, ali i kapaciteta pogona.

Pogoni za spaljivanje komunalnog otpada mogu primiti otpad koji je prethodno gotovo nepripremljen, osim odvajanja eventualnih krupnijih objekata (bijela tehnika, namještaj i sl.). Ipak, bez obzira što su ovi pogoni relativno fleksibilni, odvajanje otpada na izvoru je nužno ukoliko se želi postići ekološki odgovorna oporaba otpada i ušteda resursa.

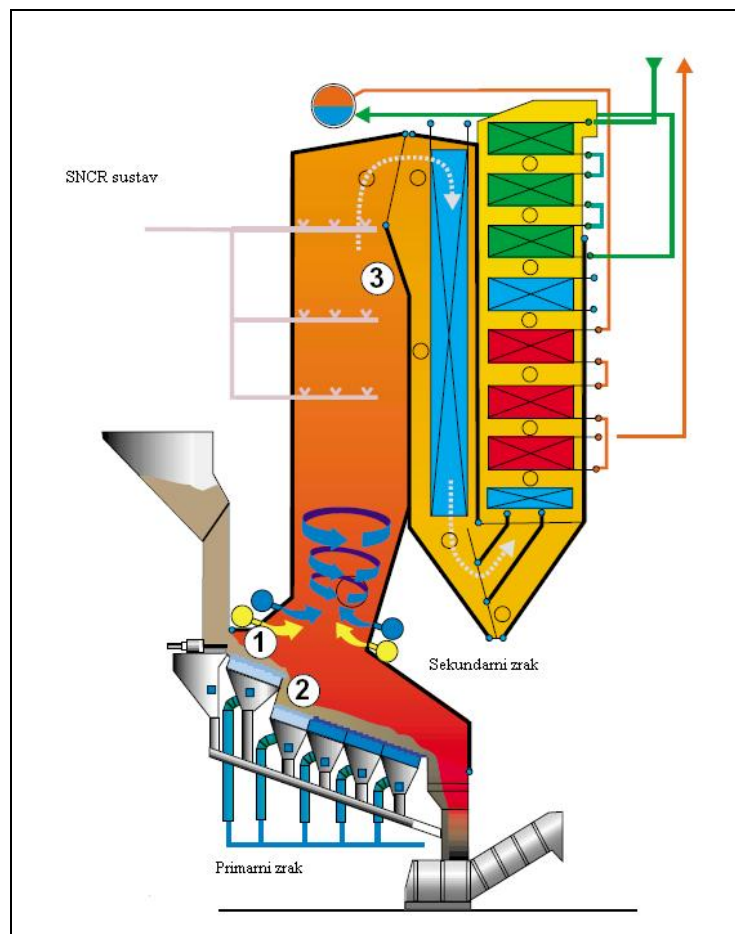
Pravilnikom o načinima i uvjetima termičke obrade otpada [4], koji propisuje Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, određeni su glavni uvjeti koje pogoni za spaljivanje moraju ispuniti. Tako pravilnik propisuje sadržaj ukupnog organski vezanog ugljika (TOC) u šljaci i pepelu, koji mora biti manji od 3 %. Propisana je i minimalna temperatura od 850 °C, koja mora biti održana najmanje 2 sekunde i nakon posljednjeg ubacivanja zraka i pod najnepovoljnijim uvjetima, kako bi se osiguralo potpuno izgaranje. Za spaljivanje opasnog otpada temperatura mora doseći najmanje 1100 °C.

### **3.2.1. Von Roll**

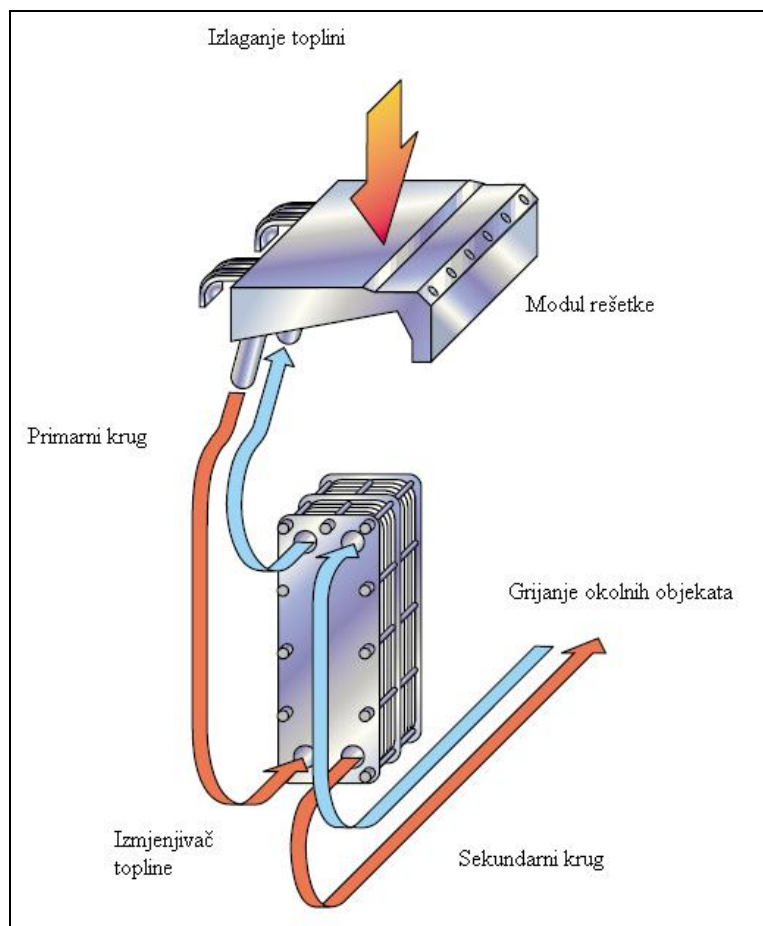
Tehnologija izgaranja otpada na rešetki *Von Roll* sastoji se od slijedećih komponenti:

- Sustava za kontrolirano i kontinuirano dovođenje otpada na rešetku
- Povratne rešetke
- Srednjestrujnog sekundarnog ložišta
- Visokoučinkovitog sustava povrata topline

Otpad se ubacuje u lijevak za dobavu otpada u ložište, nakon čega se otpad kontrolirano gura na rešetku. Sustav rešetke se sastoji od individualnih modula, tj. pomičnih i nepomičnih redova nagnutih za 18°. Moduli prenose otpad kroz ložište. Rešetka je podijeljena na četiri ili pet zona, koje predstavljaju zasebne faze izgaranja: sušenje, zapaljivanje, gorenje i potpuno izgaranje. Procesom izgaranja upravlja se regulacijom svake pojedine zone rešetke, tj. moguće je kontrolirati brzinu pomicanja svake pojedine zone te svaka zona posjeduje vlastito napajanje zrakom. Razvijeni sustav hlađenja „Aquaroll“ sastoji se od primarnog kruga gdje cirkulira voda pod tlakom, koja prima toplinu hlađenjem rešetke. U izmjenjivaču topline se toplina prenosi na sekundarni krug, kojim se može predgrijavati zrak za izgaranje ili se može koristiti za grijanje okolnih objekata. Ovim sustavom se postiže veća toplinska iskoristivost otpada, a produljuje se i životni vijek rešetke.



**Slika 5. Von Roll sustav za izgaranje otpada [5]**



**Slika 6. Aquaroll sustav[5]**

Sekundarno ložište smješteno je iznad primarne zone za izgaranje, tako da se dimni plinovi izravno uzdižu prema sekundarnoj komori. Niz sapnica postavljenih na stjenkama sekundarnog ložišta stvara vrtložno strujanje dimnih plinova, što ujednačava sastav i temperaturu mješavine, pospješuje izgaranje čestica u plinovima, te smanjuje potrošnju amonijaka u SNCR procesu smanjenja  $\text{NO}_x$ .

Generator pare proizvodi paru, koja se može koristiti za dobivanje električne energije i/ili topline. U svemu je vrlo bitna kontrola procesa, koja je moguća zahvaljujući sensorima i mjernim uređajima koji mjere parametre kao što su temperatura, protok pare, udio kisika, itd.

Dimni plinovi prolaze kroz nekoliko faza pročišćavanja. Sustav čišćenja dimnih plinova nije jedinstven, već postoji nekoliko varijanti, već prema sastavu i kapacitetu otpada koji se spaljuje. Tako se uz *Von Roll* tehnologiju mogu koristiti sustavi mokrog, polusuhog i suhog čišćenja, te sustav za selektivnu katalitičku redukciju (SCR) ili selektivnu nekatalitičku

redukciju (SNCR). Proizvođači navode podatke od 85 % smanjenja NO<sub>x</sub> za SCR postupak i 90 % redukcije NO<sub>x</sub> za postupak SNCR.

Kapaciteti sustava za izgaranje variraju i kreću se od 4 do 35 m<sup>3</sup> otpada po satu, odnosno uz 7500 radnih sati godišnje, kapacitet iznosi od 30.000 do 262.000 tona/god. Do sada je u svijetu instalirano ili je u izgradnji preko 400 postrojenja s ukupnim kapacitetom od približno 45 milijuna tona/god (uz 7500 radnih sati godišnje).

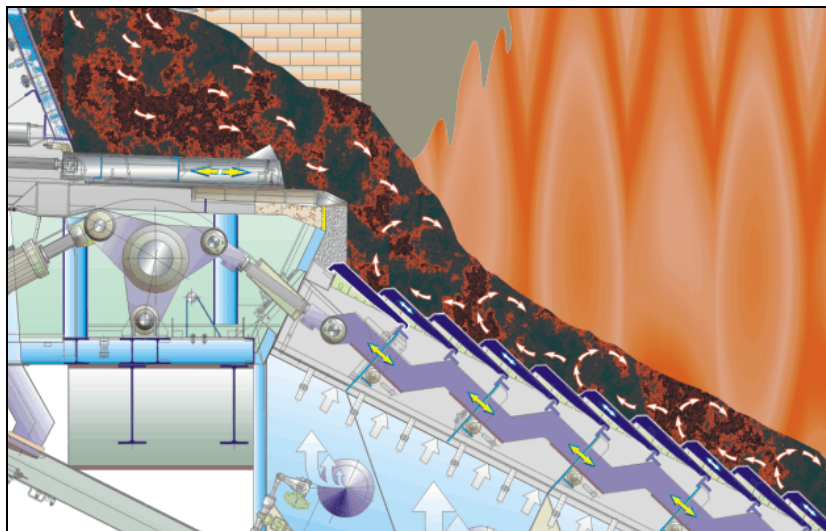
### **3.2.2. Martin**

Ova tehnologija vrlo je slična tehnologiji koju primjenjuje *Von Roll*. Koristi se rešetka s povratnim modulima, koji pospješuju prevrtanje otpada na rešetki, a time i bolje prozračivanje odnosno izgaranje. Rešetka je nagnuta pod kutom od 26°, dok se svaka druga stepenica na rešetki pomiče u smjeru suprotnom nagibu rešetke. Osim prozračivanja, na ovaj način se užarena masa otpada miješa s novopridošlim otpadom, što pospješuje izgaranje. Temperature na rešetki dostižu i 1000 °C. Na zadnjem kraju rešetke ugrađena je brana kojom se može regulirati visina sloja na rešetki, što omogućava kontrolu vremena zadržavanja otpada u ložištu, neovisno o protoku otpada.

Rešetka je u longitudinalnom smjeru podijeljena na 3-6 zračnih zona, preko kojih se primarni zrak kontrolirano upuhuje u ložište. Sekundarni zrak se upuhuje kroz sapnice koje su postavljene tako da osiguravaju turbulentno strujanje i miješanje zraka za izgaranje, plinova iz otpada i dimnih plinova, te tako osiguravaju potpuno izgaranje na temperaturama 1000-1200 °C.

Rešetka je modularne konstrukcije, a svaki je modul širok 1,5-2,5 m. Moduli se mogu sastaviti u tvornici i tako sastavljeni isporučiti kupcu. Do osam modula se može paralelno povezati što daje ukupnu širinu rešetke preko 15 m.





**Slika 7. Martin sustav za izgaranje otpada [6]**

*Martin* nudi i horizontalno postavljenu rešetku koja se hladi vodom, što znači da se primarni zrak upuhuje isključivo prema potrebama procesa izgaranja, a ne i radi hlađenja rešetke. Također, nudi se i sustav za recirkulaciju dimnih plinova. Ovaj sustav vraća dimne plinove nakon otprašivanja u ložište kao nadopunu za sekundarni zrak, čime se povećava toplinska efikasnost i osigurava potpuno izgaranje eventualno neizgorenih tvari u dimnim plinovima.

*Martin* je razvio i tehnologiju izgaranja otpada koja uključuje recirkulaciju dimnih plinova, kisikom obogaćeni primarni zrak, četveroredni sustav sekundarnog zraka, te termografski nadzor i regulaciju izgaranja pomoću neizrazite logike. Ovom tehnologijom se postiže jednoličnije izgaranje u ložištu, smanjuje se razina ugljikovog monoksida u dimnim plinovima, te se povećava efikasnost kotla.

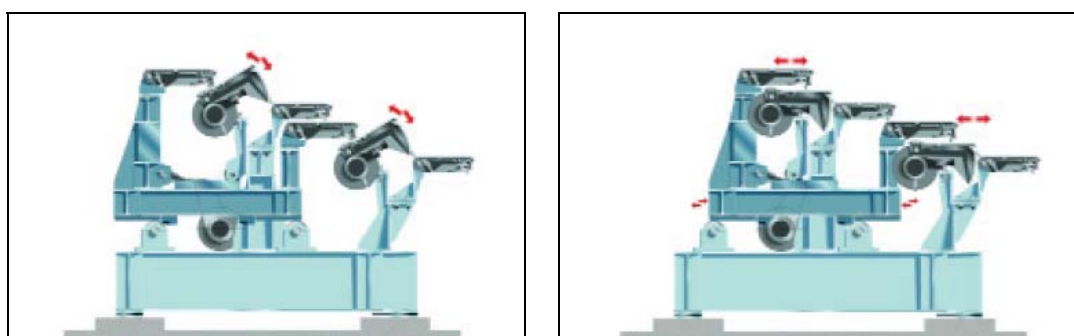
Kapaciteti postrojenja se kreću od 40 tona/dan do 1200 tona/dan, što na godišnjoj bazi iznosi od 12.500 tona/god do 375.000 tona/god.

Ovom tehnologijom izgrađena je i najveća svjetska spalionica otpada u Singapuru, ukupnog kapaciteta 4320 tona/dan na šest linija za spaljivanje.

### 3.2.3. Keppel-Seghers

Ovaj proizvođač nudi dvije osnovne varijante tehnologije za izgaranje, rešetku sa zračnim ili vodenim hlađenjem. Iako se u osnovi ova tehnologija ne razlikuje mnogo od prethodno opisanih, postoji razlika u sustavu rešetke za izgaranje.

*Keppel-Seghers* koristi nešto drugačiju izvedbu rešetke u odnosu na *Von Roll* i *Martin* tehnologije. *Keppel-Seghers* zrakom hlađena rešetka opremljena je sustavom za pomicanje i prevrtanje (prozračivanje) otpada tako da postoji vertikalno i horizontalno pomicanje otpada na rešetki. Za vertikalno pomicanje otpada zaduženi su rotirajući elementi rešetke, dok su za horizontalno pomicanje zaduženi ključući elementi, kako je prikazano na slici 8.



Slika 8. Sustav prevrtanja otpada na rešetki [7]

Zrakom hlađena rešetka koristi za izgaranje otpada niže kalorične vrijednosti (6-14 MJ/kg). Ova tehnologija omogućava neovisno kontrolirane module rešetke za prevrtanje i transport otpada kroz ložište, čime se ostvaruje bolja kontrola svake pojedine faze unutar ložišta, te u konačnici potpunije izgaranje otpada.

Vodom hlađene rešetke se koriste prilikom izgaranje otpada veće kalorične vrijednosti (10-30 MJ/kg). Kao i kod *Martin* tehnologije, ovdje je sustav hlađenja neovisan od dobave primarnog zraka, što znači da se primarni zrak koristi isključivo prema potrebama procesa izgaranja, čime se omogućava optimalno iskorištavanje primarnog zraka. Hlađenje vodom je efikasnije i produljuje vijek trajanja modula rešetki. Proizvođač navodi vijek trajanja modula od preko 32.000 sati uz zamjenu modula manju od 10 %. Ovdje se ne koriste rotirajući moduli rešetke, već osim nepomičnih, postoje horizontalno ključući moduli koji transportiraju otpad kroz ložište.

Sustav vodenog hlađenja može biti za svaki pojedini red, koji je sačinjen od nekoliko paralelno spojenih modula, može biti izoliran pomoću ventila, te se može izvršiti redovna kontrola ili manji popravak bez prekida hlađenja drugih modula.

Kapaciteti postrojenja se kreću od 1,5 t/h do 30 t/h, što na godišnjoj bazi iznosi raspon od 11.250 t/god do 225.000 t/god (uz 7500 radnih sati/god).

### 3.3. Energetske značajke postupka

Osim redukcije volumena i mase otpada, te neutralizacije opasnih tvari, smisao spaljivanja otpada se očituje i u proizvodnji energije, toplinske ili električne. U Republici Hrvatskoj je nužno energetske oporabiti otpad prilikom spaljivanja, osim u slučaju da se radi o spaljivanju opasnog otpada ili drugih vrsta posebnog otpada (otpadne biomase).

#### 3.3.1. Čimbenici za odabir tipa energetske ciklusa

U tablici 2 dat je prikaz čimbenika koji se uzimaju u obzir prilikom određivanja izvedbe novog postrojenja (spalionice):

Tablica 2. Čimbenici koji se uzimaju u obzir prilikom odabira energetske ciklusa za spalionice otpada

Čimbenici	Detaljni aspekti za razmatranje
<b>Dobava otpada</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kvantiteta i kvaliteta</li><li>• Dostupnost, varijacije dostave kroz godinu</li><li>• Predviđanje promjene prirode i kvantitete otpada</li><li>• Efekti separacije i recikliranja otpada</li></ul>
<b>Mogućnosti prodaje električne i toplinske energije</b>	<b>Toplina</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Lokalno grijanje</li><li>• Prodaja topline industriji</li><li>• Geografska ograničenja, infrastruktura cjevovoda</li><li>• Trajanje dobave, trajanje ugovora o dobavi</li><li>• Obaveza osiguravanja topline i kada se ne spaljuje otpad, tj. postojanje drugog izvora</li><li>• Parametri pare/vruće vode: tlak (normalni/minimalni), temperatura, protok,</li></ul>

<p><b>Mogućnosti prodaje električne i toplinske energije</b></p>	<p>povrat kondenzata</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Krivulja potražnje kroz godinu</li> <li>• Subvencije znatno utječu na ekonomičnost</li> <li>• Sigurnost kupca, tj. ugovor o opskrbi toplinom</li> </ul> <p><b>Električna energija</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nacionalna mreža ili industrijska mreža (rijetko), vlastita potrošnja u postrojenju</li> <li>• Cijena električne energije znatno utječe na investiciju</li> <li>• Subvencije za proizvodnju električne energije olakšavaju ulaganje</li> <li>• Tehnički zahtjevi: napon, snaga, spajanje na distribucijsku mrežu</li> </ul>
<p><b>Lokalni uvjeti</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Izbor rashladnog medija: zrak ili voda</li> <li>• Meteorološki uvjeti: temperatura, vlažnost (minimalna, maksimalna, prosječna, krivulje)</li> <li>• Dostupnost rashladne vode: more ili rijeka             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura i kvaliteta vode</li> <li>- Protok ovisno o godišnjem dobu</li> <li>- Dozvoljeno povećanje temperature</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Kombinirana proizvodnja topline i električne energije</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Omjer proizvedene topline i električne energije ovisno o godišnjem dobu</li> <li>• Evolucija omjera proizvodnje u budućnosti</li> </ul>
<p><b>Zaštita okoliša</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nacionalna legislativa o emisijama</li> <li>• Blizina stambenih objekata</li> <li>• Prihvatljiva razina buke</li> </ul>
<p><b>Ostalo</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odabir između povećanja izvoza energije, smanjenja investicijskih troškova, kompleksnosti procesa itd.</li> <li>• Dostupan prostor</li> <li>• Građevinska ograničenja</li> </ul>

### **3.3.2. Proizvodnja i potrošnja energije**

Pogoni za spaljivanje otpada proizvode i troše energiju. U velikoj većini slučajeva, energija dobivena iz otpada premašuje potrebe energane na otpad, što omogućava izvoz energije. Ovo se posebno odnosi na spalionice komunalnog otpada.

Imajući na umu trend znatnog povećanja količine otpada, energetska uporaba otpada može predstavljati značajan izvor energije.

Ulaz energije može predstavljati:

- Otpad
- Aditivna goriva (npr. dizel, prirodni plin); koriste se za pokretanje i gašenje procesa, za održavanje potrebne temperature u peći kod otpada s manjom kaloričnom vrijednosti, te za dogrijavanje dimnih plinova prije faze čišćenja ili ispuštanja.
- Uvezena električna energija; koristi se u fazi pokretanja i gašenja procesa, te u pogonima koji ne generiraju električnu energiju.

Proizvodnja, potrošnja i izvoz može uključivati:

- Električnu energiju
- Toplinu (kao para ili vruća voda)

Efikasan povrat energije iz otpada generalno se smatra ključnim pitanjem industrije uporabe otpada. Efikasnija energetska uporaba direktno smanjuje troškove pogona, čime se povećava rentabilnost pogona.

Sustavom potrošnje i proizvodnje energije upravlja se i kontrolira iz kontrolne sobe unutar pogona. Svi procesi mogu biti u velikoj mjeri automatizirani i optimirani u ovisnosti o ulaznim parametrima (sastav otpada, vlaga u otpadu i sl.).

U postrojenjima za spaljivanje otpada, kotao ima dvije međusobno povezane funkcije:

- Ohladiti dimne plinove
- Prenijeti toplinu s dimnih plinova na neki drugi fluid, obično vodu, iz koje se kasnije proizvodi para

Parametri pare (tlak i temperatura) ili vruće vode određene su lokalnim energetskim potrebama i ograničenjima. Konstrukcija kotla najviše ovisi o:

- Parametrima pare
- Karakteristikama dimnih plinova (korozijski i erozijski potencijal)

Karakteristike dimnih plinova su ovisne o sastavu otpada. Opasni otpad npr. znatno varira u sastavu, te ponekad može sadržavati visoke koncentracije korozivnih supstanci (npr. kloride) u nastalom plinu. Ovo ima značajan utjecaj na moguće tehnologije za energetska oporabu koje se mogu primijeniti. Posebno je značajna visokotemperaturna korozijska, te se tlak pare mora sniziti prilikom izgaranja takvog otpada, kako bi se spriječila pojava korozijske.

Ovisno o prirodi otpada koji se spaljuje, te o izvedbi ložišta, može se generirati dovoljno topline za uspostavljanje samopodržavajućeg izgaranja, što znači da nije potrebno dodavati aditivna goriva.

Energija koja se predaje kotlu može se koristiti kao:

- Proizvodnja i opskrba toplinom (para ili vruća voda)
- Proizvodnja i opskrba električnom energijom
- Kombinacija gore navedenog

Dobivena energija može se koristiti unutar postrojenja (zamjenjujući uvezenu energiju) i/ili izvan postrojenja. Energija se može koristiti za mnogo različitih procesa. Uobičajeno je da se toplina i para koriste za sustave grijanja industrijskih pogona ili drugih okolnih objekata, te u industrijskim procesima koji uključuju toplinu i paru. Električna energija se izvozi u nacionalnu mrežu i/ili se koristi unutar postrojenja.

Toplinska energija planira se izvesti do obližnjih industrijskih pogona koji koriste izravno paru ili vruću vodu za procese proizvodnje. Time će se osigurati izvoz energije tijekom cijele godine, a ne samo u mjesecima kada se grije.

Postrojenje troši određenu količinu električne energije i pare, što se može izraziti kao količina energije koja je potrebna po toni spaljenog otpada, kao što je prikazano u tablici 3. [1].

**Tablica 3. Specifična potrošnja električne i toplinske energije za 50 spalionica KKO u EU [1]**

<b>Energija</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Minimalno</b>	<b>Prosječno</b>	<b>Maksimalno</b>
Električna energija	MWh <sub>e</sub> /t	0,062	0,142	0,257
Toplinska energija	MWh <sub>t</sub> /t	0,021	0,433	0,935

Za daljnju analizu uzeti će se sljedeći parametri:

- Specifična potrošnja električne energije - 0,1 MWh<sub>e</sub>/t
- Specifična potrošnja toplinske energije - 0,05 MWh<sub>e</sub>/t

Te vrijednosti su odabrane tako da budu bliže minimalnim vrijednostima u tablici 3 jer suvremena postrojenja – energane na otpad troše manje energije od onih starije generacije, što znači da je njihova neto bilanca energije pozitivna (tj. više se energije proizvodi nego troši prilikom izgaranja otpada).

### **3.3.2.1. Vanjski čimbenici - vrsta i sastav otpada**

Karakteristike otpada koji se dobavlja postrojenju određuju prikladnu tehnologiju i stupanj energetske učinkovitosti. Prilikom odabira adekvatne tehnologije, kemijske i fizičke karakteristike otpada se uzimaju u obzir.

Kemijske i fizičke karakteristike otpada pod utjecajem su mnogih lokalnih faktora:

- Ugovori s dobavljačima otpada (npr. proizvodnog otpada i dr.)
- Postupci za separaciju/predobradu otpada izvan ili unutar postrojenja
- Tržišni uvjeti koji utječu na izbor tehnologije

Kako bi se izračunala efikasnost procesa izgaranja, bitno je u obzir uzeti tokove energije u sustavu koji se promatra. Kod postrojenja za spaljivanje otpada teško je točno procijeniti učinkovitost procesa, uzimajući u obzir varijablu kalorične vrijednosti ulazne energije - otpada, koja nije konstantna kroz godinu.

Postoji nekoliko metoda za izračunavanje kalorične vrijednosti otpada. Koristeći metodu koja će biti kasnije pojašnjena, dobiveni su sljedeći rezultati kalorične vrijednosti otpada za 50 obrađenih spalionica krutog komunalnog otpada [1]:

**Tablica 4. Izračunate kalorične vrijednosti za 50 spalionica KKO u EU [1]**

Mjerna jedinica	Minimum	Prosječno	Maksimum
MJ/kg	8	10,4	12,6
MWh/t	2,2	2,9	3,5

Primjer metode za izračunavanje kalorijske vrijednosti otpada:

Ova metoda omogućuje vrlo jednostavan, ali i dovoljno pouzdan izračun (+/- 5 %) kalorične vrijednosti otpada. Gubici topline su uzeti u obzir u izračunu. Podaci potrebni za izračun su u pravilu dobivaju u postrojenjima, te su ili mjereni ili su izračunati iz dimenzijskih veličina, npr. parametara pare.

$$H_d = (1.133 \cdot (m_{st w} / m) \cdot c_{st x} + 0.008 \cdot T_b) / 1.085 \text{ (GJ / t)}$$

$H_d$  = donja kalorična vrijednost izgorenog otpada  $m_{st w} / m \geq 1 \text{ (GJ / t)}$

gdje je  $m_{st w} = m_{st x} - (m_f \cdot (c_f / c_{st x}) \cdot \eta_b)$

$m_{st w}$  - količina pare proizvedena samo iz otpada u istom vremenskom periodu kao i  $m_{st x}$ , npr. u godinu dana (t/god)

$m_{st x}$  - ukupna količina pare proizvedena u određenom vremenu, npr. u godinu dana (t/god)

$m_f$  - masa dodanog goriva za proizvodnju pare (t/god)

$m$  - masa izgorenog otpada u određenom vremenu, npr. u godinu dana (t/god)

$c_{st x}$  - neto entalpija sustava (entalpija pare umanjena za entalpiju kotlovske vode (GJ/t)

$c_f$  - neto kalorična vrijednost dodatnog goriva za proizvodnju pare (GJ/t)

$T_b$  - temperatura dimnih plinova iza kotla (generatora pare) uz 4-12 %  $O_2$  u dimnim plinovima ( $^{\circ}C$ )

0,08 - specifični sadržaj energije u dimnim plinovima (GJ / t ·  $^{\circ}C$ )

$\eta_b$  - stupanj iskoristivosti prijenosa topline na kotao (približno 0,80)

1,133 i 1,085 su konstante dobivene iz regresijskih jednadžbi



Napomena: Ova metoda je primjenjiva samo na već postojeća postrojenja, a ne za dimenzioniranje novih postrojenja. Također, jednadžba je primjenjiva u rasponu udjela  $O_2$  4-12 %, s tim da ukoliko su koncentracije  $O_2$  izvan udjela 7-9 %, moraju se modificirati koeficijenti, kako bi se zadržala točnost.

### **3.3.2.2. Utjecaj smještaja postrojenja na proizvodnju energije**

Osim same kvalitete otpada i tehničkih aspekata postrojenja, moguća efikasnost procesa spaljivanja otpada ovisna je u velikoj mjeri mogućim opcijama izvoza proizvedene energije. Najveća energetska učinkovitost može se postići u procesima gdje se toplina dobivena u procesu spaljivanja može kontinuirano isporučivati u obliku vruće vode za grijanje okolnih objekata, procesne pare ili u kombinaciji s proizvodnjom električne energije. Ipak, primjena različitih sustava vrlo je ovisna o lokaciji samog postrojenja, posebno zbog dostupnosti pouzdanog korisnika proizvedene energije.

Sama proizvodnja električne energije (bez proizvodnje topline) je uobičajena i u pravilu predstavlja sustav manje ovisan o lokalnim uvjetima. Troškovi priključenja na distribucijsku mrežu električne energije u pravilu su manji od troškova izgradnje vrelovoda i ostale infrastrukture za isporučivanje toplinske energije (vruće vode ili pare). Ovi troškovi ovise o lokalnim uvjetima, tj. postojećoj infrastrukturi.

Također, smještaj postrojenja uz riječne tokove ili more omogućava korištenje vodom hlađenog kondenzatora, što povećava učinkovitost postrojenja. Ovo ipak ograničava izbor potencijalnih lokacija izgradnje.

U kontinentalnom dijelu Hrvatske postoji veća potreba za toplinskom energijom za grijanje kućanstava nego u hrvatskom priobalju, budući da je broj grijanih dana manji uslijed utjecaja mediteranske klime i viših prosječnih temperatura.

### **3.3.3. Energetska bilanca za referentno postrojenje**

Kako bi se mogla provesti analiza, potrebno je kvantificirati pojedine parametre koji se odnose na proizvodnju energije. Ulazni parametri navedeni su u tablici 5.

**Tablica 5. Ulazni parametri**

Parametar	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Kapacitet	$q_{otp}$	100.000	t/god
Radni sati	B	7.500	h/god
Ogrjevna vrijednost otpada	$H_d$	10	MJ/kg
Efikasnost kotla	$\eta$	80	%
Prodaja toplinske snage	$\Phi_{prod}$	10	MW

Toplina proizvedena izgaranjem otpada i sadržana u vrućim dimnim plinovima koristi se za proizvodnju pare. Para se uvodi u visokotlačni dio kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare koja se odvodi do izmjenjivača topline gdje kondenzira do zasićene vrele vode zagrijavajući tako procesnu vodu za potrebe obližnje industrije (npr. tekstilna, papirna, brodograđevna i sl.). Ostatak pare prolazi kroz niskotlačni dio turbine, te potom potpuno kondenzira u zraku hladnom kondenzatoru.

Parametri pare su navedeni u tablici 6.

**Tablica 6. Parametri vode i pare**

<b>Voda - ulaz u kotao</b>		
Temperatura	112	°C
Tlak	50	bar
Entalpija ( $h_0$ )	471	kJ/kg
<b>Para - ulaz u turbinu</b>		
Temperatura	400	°C
Tlak	50	bar
Entalpija ( $h_1$ )	3.197	kJ/kg
<b>Para - oduzimanje iz turbine</b>		
Temperatura	240	°C
Tlak	15	bar
Entalpija ( $h_2$ )	2.900	kJ/kg
<b>Para - izlaz iz turbine</b>		
Temperatura	40	°C
Tlak	0,074	bar
Entalpija ( $h_3$ )	2400	kJ/kg
<b>Vrela voda - izlaz iz izmjenjivača</b>		
Temperatura	198 °C	°C
Tlak	15	bar
Entalpija ( $h_4$ )	845	kJ/kg
<b>Vrela voda - izlaz iz kondenzatora</b>		
Temperatura	40	°C
Tlak	50	bar
Entalpija ( $h_5$ )	168	kJ/kg

Para na ulazu u kotao ima temperaturu 112 °C iz razloga što postoji povrat topline nakon što para oduzeta iz turbine prođe kroz izmjenjivač topline, te se potom kao vrela voda vraća u kotao i miješa s vodom iz kondenzatora.

### Proračun električne i toplinske snage postrojenja

Toplina izgaranjem oslobođena iz otpada:

$$\Phi_0 = q_{\text{otp}} \cdot H_d$$

$$\Phi_0 = 100000 \frac{\text{t}}{\text{god}} \cdot 10000 \frac{\text{kJ}}{\text{t}} = 1 \cdot 10^{12} \frac{\text{kJ}}{\text{god}}$$

Toplina iskorištena u kotlu za proizvodnju pare:

$$\Phi_k = \Phi_0 \cdot \eta_k$$

$$\Phi_k = 1 \cdot 10^{12} \frac{\text{kJ}}{\text{god}} \cdot 0,8 = 0,8 \cdot 10^{12} \frac{\text{kJ}}{\text{god}}$$

Količina proizvedene pare (400 °C i 50 bar):

$$q_p = \frac{\Phi_k}{h_1 - h_0}$$

$$q_p = \frac{0,8 \cdot 10^{12} \frac{\text{kJ}}{\text{god}}}{3197 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 471 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 29,35 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{god}} = 10,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Para ekspandira u visokotlačnom dijelu turbine; snaga prije oduzimanja iznosi:

$$\Delta h_{T1} = h_1 - h_2$$

$$\Delta h_{T1} = 3197 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 297 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{T1} = q_p \cdot \Delta h_{T1}$$

$$P_{T1} = 10,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 297 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3228 \text{ kW}_e$$

Oduzimanje pare (240 °C i 15 bar) za potrebe prodaje toplinske energije (10 MW):

$$\Delta h_{T2} = h_2 - h_4$$

$$\Delta h_{T2} = 2900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 845 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2055 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{p \text{ odu}} = \frac{\Phi_{\text{prod}}}{\Delta h_{T2}}$$

$$q_{p \text{ odu}} = \frac{10000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{2055 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Para ekspandira u niskotlačnom dijelu turbine; snaga nakon oduzimanja iznosi:

$$\Delta h_{T3} = h_2 - h_3$$

$$\Delta h_{T3} = 2900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{T2} = (q_p - q_{p \text{ odu}}) \cdot \Delta h_{T3}$$

$$P_{T2} = (10,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 4,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) \cdot 500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3000 \text{ kW}_e$$

Ukupna snaga turbine:

$$P_T = P_{T1} + P_{T2}$$

$$P_T = 3228 \text{ kW} + 3000 \text{ kW} = 6228 \text{ kW}_e$$

Povrat topline iz izmjenjivača topline:

$$\Delta h_{\text{pov}} = h_4 - h_5$$

$$\Delta h_{\text{pov}} = 845 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 168 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 677 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Phi_{\text{pov}} = q_{p \text{ odu}} \cdot \Delta h_{\text{pov}}$$

$$\Phi_{\text{pov}} = 4,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 677 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3297 \text{ kW}_t$$

Povrat topline omogućava veću proizvodnju pare, koja bez povrata topline iznosi 9,77 kg/s.

Postupkom iteracije snaga povrata topline se uračunala u proračun.

Ukupni stupanj iskoristivosti postrojenja (uz učinkovitost generatora električne energije

$\eta_{\text{gen}} = 0,98$ ):

$$\eta = \frac{(P_{T1} + P_{T2}) \cdot \eta_{\text{gen}} + \Phi_{\text{prod}}}{\Phi_0}$$

$$\eta = \frac{(3228 \text{ kW}_e + 3000 \text{ kW}_e) \cdot 0,98 + 10000 \text{ kW}_t}{37000 \text{ kW}} = 0,435$$

Proizvedena električna energija iznosi:

$$E_{\text{el}} = P_T \cdot B$$

$$E_{\text{el}} = 6228 \text{ kW}_{\text{el}} \cdot 7500 \frac{\text{h}}{\text{god}} = 46,71 \cdot 10^6 \frac{\text{kWh}_{\text{el}}}{\text{god}} = 46710 \frac{\text{MWh}_{\text{el}}}{\text{god}}$$

Proizvedena toplinska energija iznosi:

$$E_t = \Phi_{\text{prod}} \cdot B$$

$$E_t = 10000 \text{ kW}_t \cdot 7500 \frac{\text{h}}{\text{god}} = 75 \cdot 10^6 \frac{\text{kWh}_t}{\text{god}} = 75000 \frac{\text{MWh}_t}{\text{god}}$$

### **Potrošnja toplinske i električne energije za potrebe postrojenja**

Potrošnja električne energije iznosi:

$$C_e = 0,1 \frac{\text{MWh}_e}{\text{t}} \cdot 100000 \frac{\text{t}}{\text{god}} = 10000 \frac{\text{MWh}_e}{\text{god}}$$

Potrošnja toplinske energije iznosi:

$$C_t = 0,05 \frac{\text{MWh}_t}{\text{t}} \cdot 100000 \frac{\text{t}}{\text{god}} = 5000 \frac{\text{MWh}_t}{\text{god}}$$

Ukupna proizvodnja i potrošnja električne energije i topline dana je u tablici 7:

Tablica 7. Energetska bilanca postrojenja

Energetska bilanca	MWh/god
<b>Proizvodnja</b>	
Proizvodnja el. energije	46.710
Proizvodnja toplinske energije	75.000
<b>Potrošnja</b>	
Potrošnja el. energije	10.000
Potrošnja toplinske energije	5.000
<b>Izlaz energije</b>	
Izlaz el. energije	36.710
Izlaz toplinske energije	70.000

Ukupna energetska bilanca postrojenja je pozitivna i iznosi 106.710 MWh energije godišnje. Iz toga proizlazi da se iz jedne tone otpada proizvodi 1,06 MWh energije. Može se izračunati koliko se nafte uštedi izgaranjem otpada. Uz energetske vrijednost jedne tone ekvivalenta nafte (engl. *toe, ton of oil equivalent*),  $toe = 11,626$  MWh, slijedi:

$$1 t_{\text{otp}} = \frac{1,06}{11,626} toe = 0,0912 toe$$

Godišnje se izgaranjem otpada uštedi 9120 tona nafte.

### **Bonitet emisija**

Izgaranjem otpada također se i smanjuju emisije stakleničkih plinova u odnosu na odlaganje neobrađenog otpada. Ovo se naziva bonitet emisija postrojenja, a umanjivanje izravne emisije stakleničkih plinova iznosi [8]:

- kod električne energije u iznosu 0,758 tCO<sub>2</sub>/MWh
- kod toplinske energije u iznosu 0,22 tCO<sub>2</sub>/MWh

Za promatrano postrojenje bonitet emisije iznosi 35.400 tCO<sub>2</sub>/god za proizvodnju električne energije i 16.500 tCO<sub>2</sub>/god za proizvodnju toplinske energije. Ovo ukupno iznosi 51.900 tCO<sub>2</sub>/god.

Emisija stakleničkih plinova s odlagališta otpada s velikim udjelom lako razgradivih organskih tvari, kakva su osobito odlagališta komunalnog otpada, javlja se u obliku deponijskog plina, čiji su većinski sastojci ujedno i glavni staklenički plinovi: metan (CH<sub>4</sub>) s volumnim udjelom 40-60 % i ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) s udjelom 10-40 %. Pritom se kao

klimatski relevantne uzimaju samo emisije metana, jer je staklenički potencijal CO<sub>2</sub> 21 puta manji od nego metana, a uz to je znatan dio CO<sub>2</sub> u deponijskom plinu organskog podrijetla, odnosno klimatski neutralan.

Ukoliko bi se neobrađeni otpad odlagao na odlagalište pretpostavljaju se sljedeće vrijednosti [8]:

- 190 m<sup>3</sup>/t - proizvodnja deponijskog plinu u jednoj godini odlaganja
- 40 % - sakupljeni dio deponijskog plina
- 55 % - udio CH<sub>4</sub> u deponijskom plinu
- 0,717 kg/m<sup>3</sup> - gustoća CH<sub>4</sub>

Specifična emisija CH<sub>4</sub> iz 1 tone otpada iznosi 0,045 tCH<sub>4</sub>. Godišnje se proizvede 4.500 tCH<sub>4</sub>. Budući da je CH<sub>4</sub> ima 21 puta veći staklenički potencijal od CO<sub>2</sub>, to daje iznos od 94.500 t CO<sub>2</sub>eq/god. Od prikupljenog CH<sub>4</sub> (37.800 tCH<sub>4</sub>/god) proizvodi se električna energija (oko 18.000 MWh/god), koja donosi bonitet emisije u iznosu 13.775 tCO<sub>2</sub>/god [8].

### **3.3.4. Vrsta i svojstva nusprodukata**

Nakon izgaranja, kao produkti ostaju:

- Pepeo, većinom se sastoji od krupnog negorivog materijala i neizgorelih organskih tvari, koji se sakuplja u poseban spremnik ispod ložišta.
- Filtrat rešetke, uključuje relativno fini materijal koji prolazi kroz rešetku i sakuplja se na dnu ložišta. Filtrat je često pomiješan s pepelom, tako da ih nije moguće razdvojiti. Zajedno s pepelom, filtrat rešetke obično predstavlja 20-30 % početne mase otpada na mokroj bazi.
- Pepeo iz kotla, predstavljaju krupnije čestice koje dimni plinovi odnose sa sobom iz peći. Ovaj pepeo se sakuplja u kotlu i može predstavljati i do 10% početne mase otpada na mokroj bazi.
- Pepeo dimnih plinova, vrlo fine čestice koje lebde s dimnim plinovima. Iz dimnih plinova se otklanja prije završnog pročišćavanja dimnih plinova i može predstavljati 1-3 % početne mase otpada na mokroj bazi.
- Ostaci nakon, uključuju krutu, tekuću ili muljevituu fazu, ovisno o tome da li se upotrebljava suhi, polusuhi ili mokri postupak čišćenja dimnih plinova. Ovi ostaci obično predstavljaju 2-5 % početne mase otpada na mokroj bazi.

Također, među ostatke se ubrajaju i kovine, npr. željezo i aluminij, koji se mogu odvojiti iz pepela, te se mogu prodati. Za analizu je pretpostavljeno kako količina kovinskih ostataka iznosi [9]:

- Fe - 2400 t/god
- Al - 400 t/god

Postrojenje za pročišćavanje dimnih plinova čini najveći dio energane na otpad. Dimni plinovi nastali izgaranjem otpada moraju biti pročišćeni prije nego li se mogu ispustiti u atmosferu, a te kriterije određuju europske direktive, ali i nacionalni pravilnici. Dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ) nastali tijekom izgaranja reduciraju se injektiranjem amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) u ložištu nakon izgaranja u procesu selektivne katalitičke ili nekatalitičke redukcije. Lebdeći pepeo koji se nalazi u dimnim plinovima djelomično se sliježe, a ostali dio se odvaja u elektrostatičkom otprašivaču i vrećastom filteru.

Stvaranje dioksina i furana može se spriječiti preventivnim postupcima. Adekvatno upravljanje izgaranjem otpada i dobro poznavanje svojstava otpada koji izgara smanjuje inicijalno stvaranje ovih spojeva. Također, ovi spojevi se uklanjaju nizom postupaka u procesu čišćenja dimnih plinova. Postupci za otklanjanje dioksina i furana iz dimnih plinova opisani su u poglavlju 4.1.2.

### 3.4. Primjenjivost pogona u hrvatskim uvjetima

Postrojenje za spaljivanje otpada svakako može naći primjenu u hrvatskim uvjetima. Kako je u Hrvatskoj započeo proces saniranja mnogobrojnih odlagališta otpada, uz još uvijek visok broj „divljih“ odlagališta, postrojenje za spaljivanje otpada koje bi kapacitetom moglo osigurati zbrinjavanje komunalnog otpada na razini regije znatno bi usporilo porast volumena otpada koji se mora odlagati.

Očekuje se kako će s porastom cijene fosilnih goriva, isplativost i nužnost energane na otpad biti će još izraženija. Korisnost i potreba energane na otpad prvenstveno se odnosi na rješavanje problema adekvatnog zbrinjavanja komunalnog otpada, a tek onda i na energetske iskoristivost otpada.



Ipak, u Hrvatskoj, kao zemlji u kojoj je turistička djelatnost najznačajnija, potreban je dodatni oprez i temeljita analiza utjecaja na životnu sredinu u cijelosti, kako bi se negativni utjecaji minimizirali.

Također, potrebno je obrazovati i osvijestiti stanovništvo o problemima s kojima se suočavamo i koji će postati sve izraženiji u budućnosti.

Pogon bi zaposlio najmanje 70 radnika, što nije zanemarivo, s obzirom da bi lokacija spalionice vjerojatno bila podalje od većih gradskih središta, a bliže manjim mjestima ili selima, gdje je nezaposlenost izraženija. Osim izravno zaposlenih radnika, očekuje se kako bi se razvio čitav lanac ekonomskih aktivnosti, u kojem bi spalionica činila samo jednu od karika. Tako bi primjerice, mogla koegzistirati poduzeća za skupljanje i dovoz otpada do spalionice, poduzeća za sortiranje ili odvajanje reciklabilnog materijala, poduzeće za recikliranje metalnih ostataka, kao i industrijske ili poljoprivredne djelatnosti (npr. staklenici ili papirna, tekstilna ili brodograđevna industrija) koje bi mogle koristiti proizvedenu toplinu.

Pošto bi troškovi infrastrukture bili manji (troškovi priključenja na električnu i vodovodnu mrežu), očekivao bi se i razvoj ostalih industrijskih postrojenja, koje bi gravitirale postrojenju za spaljivanje.

### 3.5. Međunarodna iskustva

U Europi postoji duga tradicija spaljivanja otpada na rešetki, te stoga postoji mnogo s vremenom prikupljenog iskustva, koje znatno olakšava i ubrzava proces izgradnje postrojenja i njegovog puštanja u pogon. Problem s kojim se suočava gotovo svaka zemlja jest porast proizvodnje otpada, dok je prostor na odlagalištima ograničen. U skladu s tim, EU nastoji prekinuti odlaganje neobrađenog otpada. Opseg spaljivanja otpada u zemljama članicama EU znatno varira, od 0-62 %.



Slika 9. Udio spaljivanja komunalnog otpada u EU (2003.) [10]

**Tablica 8. Geografski razmještaj spalionica u EU**

<b>Zemlja</b>	<b>Ukupni broj energana na otpad</b>	<b>Obrađeni otpad Mt/god</b>
Austrija	5	0,88
Belgija	17	1,64
Danska	32	3,24
Finska	1	0,05
Francuska	123	11,25
Grčka	0	0,00
Irska	0	0,00
Italija	49	3,47
Luksemburg	1	0,12
Njemačka	58	13,18
Portugal	3	1,00
Španjolska	11	1,86
Švedska	28	3,13
Nizozemska	12	5,18
Velika Britanija	15	3,17
Norveška	21	0,79
Švicarska	29	2,97
<b>Ukupno</b>	<b>405</b>	<b>51,9</b>

Područje spaljivanja otpada regulirano je opsežnim zahtjevima legislative na regionalnoj, nacionalnoj i na europskoj razini. Trenutačno se primjenjuju slijedeće direktive EU za postrojenja za spaljivanje otpada:

- 89/369/EEC - za nove spalionice komunalnog otpada
- 89/429/EEC - za postojeće spalionice komunalnog otpada
- 94/67/EC - za spaljivanje opasnog otpada
- 2000/76/EC - za spaljivanje otpada

### **3.5.1. Austrija**

U Austriji je 2000.g. bilo instalirano 950.000 t/god kapaciteta postrojenja za spaljivanje krutog komunalnog otpada, uz izgradnju još 480.000 t/god. Možda najznačajniji primjer spalionice predstavlja postrojenje Spittelau u Beču, kapaciteta 270.000 t/god. Spalionica je smještena u samom središtu grada, što je vrlo značajno s aspekta problema zagađenja zraka i štetnog utjecaja na zdravlje stanovništva. Ovaj primjer pokazuje kako se uz dugogodišnje ulaganje u obrazovanje i upoznavanje stanovništva s problemima i mogućim rješenjima za zbrinjavanjem otpada može provesti takav projekt.

### **3.5.2. Danska**

Danska ima vrlo veliko iskustvo i tradiciju u postupku spaljivanja otpada. Prva spalionica otpada u Danskoj je pokrenuta 1903. godine. Danas u Danskoj postoje 32 postrojenja za spaljivanje otpada i još 4 u izgradnji. 1997.g.. Danska, prva u svijetu uvodi zabranu odlaganja otpada koji se može spaliti. U 2002.g. u Danskoj je spaljeno približno 2,9 milijuna tona otpada, tj. oko 600 kg po stanovniku, što Dansku stavlja uz bok Švicarskoj i Japanu po količini spaljenog otpada po stanovniku.

## **4. ZAHTJEVI VEZANI UZ ZAŠTITU OKOLIŠA**

Efekti u zaštiti okoliša glavne su prepreke, ali i prednosti tehnologije za spaljivanje otpada. Spaljivanjem otpada smanjuje se volumen i masa otpada, te se uništavaju potencijalno opasne tvari iz otpada. Ipak, dimni plinovi nastali spaljivanjem štetni su i moraju proći postupak pročišćavanja, nakon čega se ispuštaju u atmosferu.

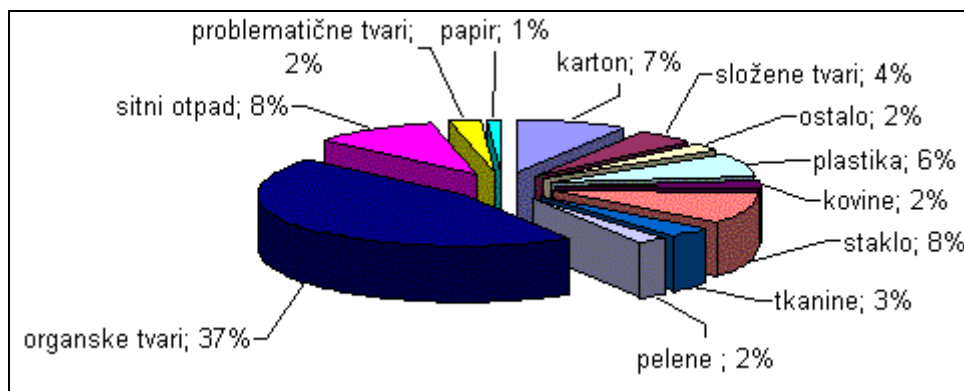
Iako postrojenja za spaljivanje otpada emitiraju stakleničke plinove, ona pridonose smanjenju količinu emitiranih stakleničkih plinova koja bi se emitirala kada bi se otpad odlagao na odlagalište. Na odlagalištima se u anaerobnim uvjetima razvija metan ( $\text{CH}_4$ ) koji ima 22 puta veći staklenički potencijal od ugljikovog dioksida. Iz tog razloga se često na odlagalištima otpada spaljuje metan na bakljama, pretvarajući ga u  $\text{CO}_2$ .

Buka koju stvara postrojenje nije zanemariva i jedan je od razloga što se postrojenja za spaljivanje otpada u pravilu nalaze dalje od stambenih objekata. Osim samog postrojenja, buku proizvode i vozila koja dovoze otpad, te eventualna mehanička predobrada otpada. Buka se može reducirati izoliranjem glavnih proizvođača buke i primjerenom konstrukcijom otvora i vrata.

### **4.1. Emisije koje odlaze u zrak**

#### **4.1.1. Sastav dimnih plinova koji nastaju izgaranjem otpada**

Komunalni otpad nehomogena je smjesa različitih tvari, te njegov sastav varira s obzirom na lokaciju i godišnje doba. Slika 10 prikazuje sastav komunalnog otpada proizveden u Zagrebu [11].



Slika 10. Sastav komunalnog otpada u Zagrebu [11]

Izgaranjem nastaje smjesa plinova čiji sastav varira u ovisnosti o karakteristikama spaljenog otpada. U nastalim dimnim plinovima nalazi se:

- Ugljikov monoksid
- Ukupni organski ugljik (TOC)
- Klorovodik
- Fluorovodik
- Vodikov jodid, bromid i bromin
- Sumporovi oksidi ( $\text{SO}_2$  i  $\text{SO}_3$ )
- Dušikovi oksidi ( $\text{NO}$  i  $\text{NO}_2$ ) i didušikov oksid ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Lebdeće čestice ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ )
- Olovo i spojevi olova
- Spojevi kadmija i talija
- Drugi spojevi teških metala
- Poliklorirani bifenili (PCB)
- Poliklorirani dibenzo-dioksini (PCDD) i poliklorirani dibenzo-furani (PCDF)
- Ugljikov dioksid
- Metan

### **Ugljikov monoksid**

Ugljikov monoksid ( $\text{CO}$ ) u dimnim plinovima nastaje uslijed nepotpunog izgaranja ugljikovih spojeva.  $\text{CO}$  nastaje ukoliko postoji lokalni nedostatak kisika i/ili zbog nedovoljno visoke temperature izgaranja koja bi provela potpunu oksidaciju do  $\text{CO}_2$ . Kontinuirano mjerenje

količine CO može se koristiti kao provjera efikasnosti procesa izgaranja, tj. razina CO jest mjera kvalitete izgaranja. Nakon što je pušten u atmosferu, CO postupno oksidira do CO<sub>2</sub>.

### **Ukupni organski ugljik**

Ukupni organski ugljik (engl. TOC) je parametar koji uključuje niz organskih plinova, čije je individualno raspoznavanje u pravilu kompleksno i skupo, a često i nemoguće. Tijekom spaljivanja odvijaju se mnogobrojne kemijske reakcije, od kojih neke ostanu nedovršene, što dovodi do vrlo složenog uzorka spojeva koji se nalaze u tragovima. TOC se može kontinuirano mjeriti, te predstavlja indikator kvalitete izgaranja (uz manji TOC, izgaranje je kvalitetnije).

### **Klorovodik**

U komunalnom otpadu približno 50 % klorovodika (HCl) nastaje iz PVC-a sadržanog u otpadu. U procesu spaljivanja, organski dio kloridnih spojeva izgara, dok se klor veže uz vodik, te nastaje HCl.

### **Sumporovi oksidi**

Ukoliko se u otpadu nalaze spojevi sumpora, tijekom spaljivanja će se najviše stvarati SO<sub>2</sub>. U određenim uvjetima se može stvarati i SO<sub>3</sub>, kojega pri spaljivanju komunalnog otpada može biti oko 5 % prije pročišćavanja.

### **Dušikovi oksidi**

Različiti oksidi dušika se stvaraju i emitiraju iz spalionica. Oni mogu biti otrovni, kiseli i utjecati kao staklenički plin, ovisno o pojedinom oksidu. NO i NO<sub>2</sub> potječu od dušikovih spojeva sadržanih u otpadu (gorivni NO<sub>x</sub>), te iz pretvorbe atmosferskog dušika iz dovedenog zraka u dušikove okside (toplinski NO<sub>x</sub>). Kod spalionica komunalnog otpada, udio toplinskog NO<sub>x</sub> je obično vrlo nizak uslijed nižih temperatura u sekundarnom ložištu. Udio toplinskog NO<sub>x</sub> ovisi i o količini i načinu upuhavanja sekundarnog zraka u sekundarnu komoru za izgaranje, s tim da više temperature podrazumijevaju i veći udio toplinskog NO<sub>x</sub>.

Mehanizmi nastajanja NO<sub>x</sub> iz dušikovih spojeva u otpadu vrlo su složeni. Ovo je dijelom i stoga što dušik u otpadu može biti sadržan u mnogo oblika, te ovisno o okolini, može nastati

ili  $\text{NO}_x$  ili elementarni dušik. Udjeli  $\text{NO}$  i  $\text{NO}_2$  u ukupnoj količini emisija  $\text{NO}_x$  obično su 95 %  $\text{NO}$  i 5 %  $\text{NO}_2$ .

Dišikov oksid se stvara ukoliko temperatura izgaranja nije dovoljno visoka (npr. manje od  $850\text{ }^\circ\text{C}$ ) i ako količina kisika nije dovoljno visoka. Stoga je emisija  $\text{N}_2\text{O}$  usko povezana sa emisijom  $\text{CO}$ . Ukoliko se primjenjuje SNCR postupak pročišćavanja  $\text{NO}_x$  plinova, kao što je slučaj u ovom primjeru, stvaranje  $\text{N}_2\text{O}$  se može povećati.

### **Živa i živini spojevi**

Živa se može u otpadu nalaziti većinom sadržan u akumulatorima, termometrima, zubnom amalgamu, fluorescentnim žaruljama i sl. Živa je visoko otrovan metal, te bez adekvatnog pročišćavanja, spaljivanje otpada koji sadrži živu može uzrokovati znatno povećanje štetnih emisija. Budući da se pri većim udjelima klora, uobičajenim za komunalni otpad, živa nalazi u ionskom obliku, mokri postupak čišćenja učinkovito otklanja živu iz dimnih plinova.

U RH postoji sustav odvojenog skupljanja medicinskog, električnog i elektroničkog otpada, baterija i akumulatora, a predviđena je i predobrada ulaznog otpada te izdvajanje tvari koje bi eventualno mogle sadržavati živu i druge opasne tvari, tako da se u analiziranom postrojenju ne predviđa izgaranje takvog otpada.

### **Drugi spojevi teških metala**

U ovu skupinu spadaju teški metali antimon, arsen, olovo, krom, kobalt, bakar, mangan, nikel, vanadij, kositar i njihovi spojevi. Ova grupa sadrži kancerogene metale i metalne spojeve kao što su arsenovi i kromovi spojevi, kao i potencijalno toksične metale. Ovi metali se mogu odstraniti adekvatnim filtriranjem prašine, pošto su oni vezani za čestice prašine.

### **Poliklorirani bifenili**

Manje količine polikloriranih bifenila (PCB) se mogu pronaći u dimnim plinovima izgoranog komunalnog otpada. Veće količine PCB obično dolaze iz otpada koji se skuplja posebnim programima skupljanja otpada (transformatori, kondenzatori) pa se takav otpad neće spaljivati u analiziranom postrojenju. PCB-i se efikasno mogu uništiti na višim temperaturama



izgaranja (iznad 1200 °C), ali i na nižim temperaturama (950 °C), ukoliko se postigne pogodna turbulencija plinova i osigura dovoljno vrijeme zadržavanja u ložištu.

### **Poliklorirani dibenzo-dioksini i poliklorirani dibenzo-furani**

Dioksini i furani (PCDD i PCDF) su grupa spojeva, od kojih su neki vrlo toksični, te se smatraju kancerogenima. Ovi spojevi nisu karakteristični samo za spaljivanje otpada, već nastaju pri svim toplinskim procesima (npr. izgaranje vrtnog otpada, biomase, nekontrolirano spaljivanje komunalnog otpada na otvorenom, izgaranje ogrjevnog drva u pećima itd.) pod određenim uvjetima. Nastaju na nižim temperaturama (250-500 °C), dok se pri višim temperaturama (850 °C) učinkovito uništavaju. Ispuštanje dioksina i furana u atmosferu posljedica je ponovnog formiranja ovih spojeva u dimnim plinovima uslijed njihovog postupnog hlađenja tijekom postupaka pročišćavanja. Predstavljaju možda i najveći negativni utjecaj na zdravlje ljudi.

### **Ugljikov dioksid**

Prilikom spaljivanja jedne tone komunalnog otpada, nastaje približno 0,7 do 1,7 tona CO<sub>2</sub>. Ugljikov dioksid se ispušta izravno u atmosferu, te kao staklenički plin pridonosi efektu staklenika. Pošto je komunalni otpad heterogena smjesa koja se sastoji od biorazgradivog dijela otpada i dijela otpada fosilnog podrijetla (npr. plastika, guma, stiropor, folije, sintetički tekstil), udio CO<sub>2</sub> koji nastaje iz otpada koji nije biorazgradiv, a koji se smatra relevantnim za klimatske promjene, iznosi od 33-50 %.

### **Metan**

Pretpostavlja se kako bi se nastajanje metana (CH<sub>4</sub>) moglo potpuno izbjeći pri adekvatnim uvjetima izgaranja. Metan se može nastati u spremniku za otpad iz anaerobnih procesa, naročito ako se otpad dulje vremena nalazi u spremniku.

### **Lebdeće čestice (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>)**

Utjecaj lebdećih čestica na zdravlje ovisi o njihovoj koncentraciji, veličini i kemijskom sastavu, a može se mijenjati u ovisnosti o dnevnim fluktuacijama razina koncentracija PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>. Najčešće se klasificiraju kao primarne (izravno oslobođene u atmosferu) i sekundarne

(formirane u atmosferi uslijed kemijskih i fizikalnih procesa). Zadržavanje i prijenos čestica u atmosferi ovisi o njihovoj veličini, te može iznositi i do 10 dana [8].

Toksični sadržaji ugljika, sumpora, teških metala, policikličkih aromatskih ugljikovodika i ostalih zagađenja vezani su u frakcijama lebdećih čestica malih promjera, a u potpunosti na česticama promjera manjeg od 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), odnosno 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ).

### Emisije polutanata koji se ispuštaju u atmosferu

Tablica 9. Emisije u atmosferu

Polutant	Emisije (t/god)		Udio emisije postrojenja u ukupnoj emisiji RH, %
	Emisije iz postrojenja	Ukupne emisije u RH (1999.g.)	
NO <sub>2</sub>	100	72,1*10 <sup>3</sup>	0,14
SO <sub>2</sub>	30	90,7x10 <sup>3</sup>	0,03
CO	25	334,3x10 <sup>3</sup>	0,01
HCl	6		
Cd	0,025	1,06	2,36
Hg	0,025	0,32	7,81
Dioksini i furani	0,6x10 <sup>-7</sup>	9,8x10 <sup>-7</sup>	6,12
Hlapivi organski spojevi	6	72,9x10 <sup>3</sup>	0,01
Prašina ili krute čestice	6	40,6x10 <sup>3</sup>	0,01

Tablica 9 prikazuje odnos između emisija što će ih postrojenje emitirati i ukupne količine emisija u RH [8]. Ovdje se pretpostavlja sustav pročišćavanja dimnih plinova kako je prikazano u varijanti 1 (poglavlje 5.3.1.). Vidljivo je kako bi udio emisija emitiranih iz postrojenja bio zanemariv za sve promatrane plinove, osim za dioksine i furane, te živu.

#### 4.1.2. Postupci pročišćavanja

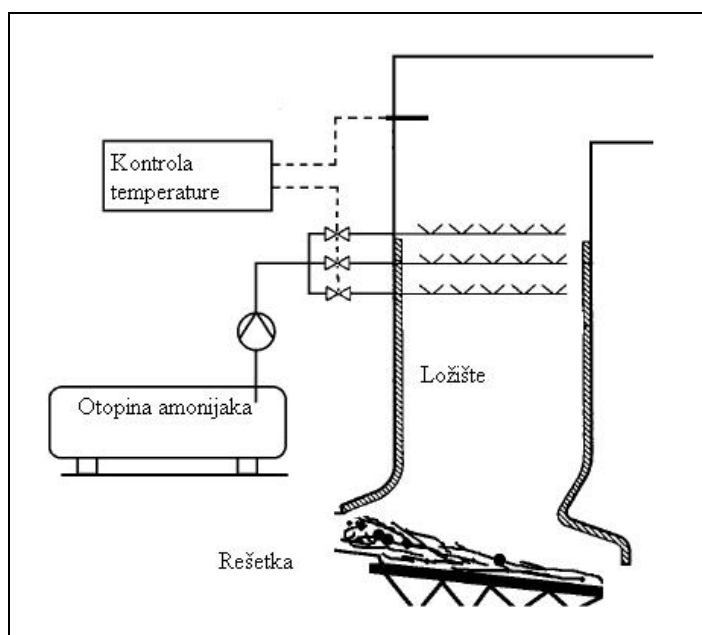
Odabir tehnologije za pročišćavanje dimnih plinova ključan je za sastav emisija, ali i bitno utječe na investicijske i pogonske troškove postrojenja. Postoji niz različitih postupaka koji se mogu kombinirati kako bi se postigla veća učinkovitost i smanjile emisije štetnih plinova i prašine u atmosferu. U nastavku su navedeni i opisani različiti postupci pročišćavanja dimnih plinova:

- Mokri, polusuhi i suhi postupak za smanjivanje HCl, HF i SO<sub>x</sub>
- Elektrostatički i vrećasti filter za otklanjanje prašine

- Selektivna katalitička i nekatalitička redukcija (SCR i SNCR) za smanjivanje  $\text{NO}_x$

### SNCR postupak

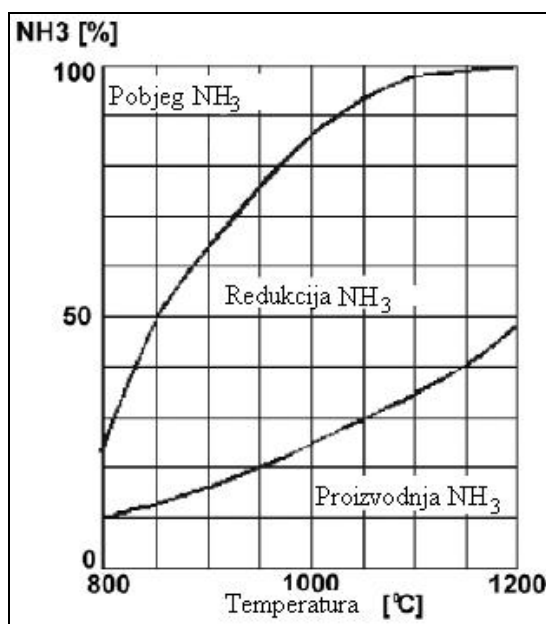
Selektivna nekatalitička redukcija je relativno jednostavna metoda uklanjanja dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ). Odvija se u gornjem dijelu ložišta pri temperaturama 850-1000 °C, gdje se ubrizgavanjem otopine amonijaka reduciraju dušikovi oksidi. Slika 11 prikazuje shemu SNCR postupka i raspored sapnica kroz koje se ubrizgava otopina amonijaka.



Slika 11. SNCR postupak [12]

Učinkovitost odvajanja iznosi oko 50 %, često i preko 60 % [12]. Učinkovitost jako ovisi o vrtloženju dimnih plinova, što pospješuje intenzitet reakcija, te vremenu zadržavanja u prostoru gdje se ubrizgava reduktant. Ipak, SNCR postupak ima i neke nedostatke, kao što je nepotpuna pretvorba reduktanta (amonijaka), što znači da se troši više reduktanta nego što bi bilo potrebno u idealnim uvjetima. Nepotpuno pretvoreni amonijak odlazi nošen dimnim plinovima do postrojenja za čišćenje dimnih plinova, gdje se taloži u filterskoj prašini, te se kasnije oslobađa kao plin iz ostataka čišćenja dimnih plinova.

Pri nižim temperaturama, učinkovitost uklanjanja  $\text{NO}_x$  je smanjena, te se javlja pobjeg amonijaka koji nije reagirao s  $\text{NO}_x$ . Pri višim temperaturama, pobjeg amonijaka se smanjuje uslijed oksidacije amonijaka i stvaranja  $\text{NO}_x$ . Odnos između stvaranja i uklanjanja  $\text{NO}_x$ , pobjega amonijaka i temperature reakcije prikazana je na slici 12.

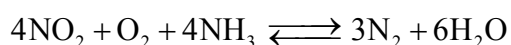
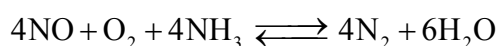


Slika 12. Odnos između stvaranja i uklanjanja NO<sub>x</sub>, pobjega amonijaka i temperature reakcije [12]

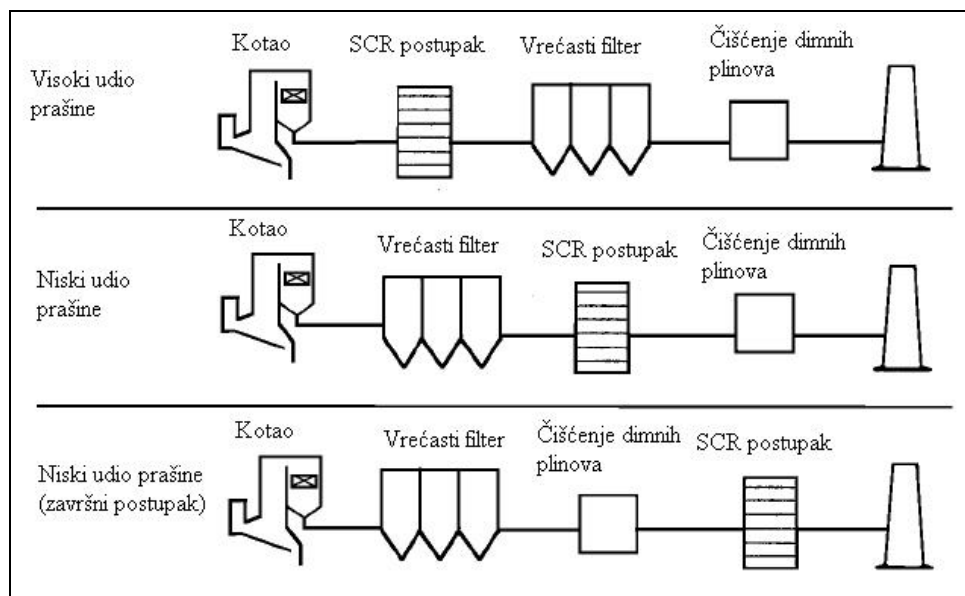
Uklanjanje NO<sub>x</sub> SNCR postupkom jeftinije je od SCR postupka uslijed manjih investicijskih, ali i pogonskih troškova.

### SCR postupak

Selektivna katalitička redukcija je katalitički proces pri kojem se smjesa zraka i amonijaka (reduktant) u obliku plina ili vodene otopine dodaje smjesi dimnih plinova koji tada prolaze kroz katalizator. Katalizator je obično porozan, načinjen od platine, rodija, titanovog oksida i sl. Prolazeći kroz katalizator, amonijak reagira sa NO<sub>x</sub>, te nastaje dušik i vodena para. Pojednostavljeno se reakcije mogu izraziti jednadžbama:



Otklanjanje NO<sub>x</sub> postiže se na temperaturama između 180-450 °C. Većinom ovi sustavi rade na temperaturama 300 °C, ovisno o poziciji u odnosu na ostale postupke čišćenja koji se primjenjuju u pojedinom postrojenju. Pozicioniranje SCR postupka u odnosu na ostale postupke prikazuje slika 13.



**Slika 13. Moguće pozicije SCR postupka u sustavu za pročišćavanje dimnih plinova [12]**

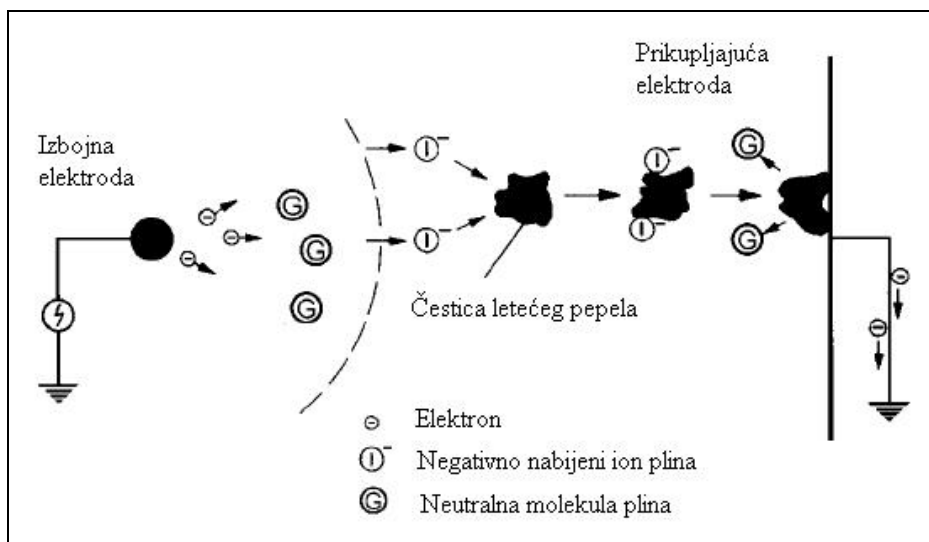
Ukoliko se SCR postupak primjenjuje kao prvi u nizu postupaka čišćenja plinova, osigurana je dovoljno visoka temperatura, te nije potrebno predgrijavanje, ali zbog velike koncentracije teških metala i prašine, učinkovitost je smanjena. Zbog ovoga se u spalionicama otpada SCR postupak najčešće pozicionira kao zadnja faza čišćenja, nakon faze otprašivanja i uklanjanja kiselih tvari (HCl, HF, SO<sub>2</sub>). U takvom rasporedu potrebno je predgrijati plinove, kako bi se povećala učinkovitost katalizatora. Instalirati SCR postupak kao srednju fazu čišćenja plinova nije preporučljivo, budući da temperatura nakon prolaska kroz elektrostatički ili vrećasti filter znatno opada (ispod 300 °C), te se mora predgrijati, a sadrži kisele tvari koje umanjuju učinkovitost čišćenja [12]. Učinkovitost uklanjanja NO<sub>x</sub> obično prelazi 70 % [12], a nerijetko i 90 % [1].

Novorazvijeni materijali od kojih se izrađuju katalizatori mogu učinkovito otklanjati NO<sub>x</sub> i na nižim temperaturama, čime nestaje potreba za predgrijanjem dimnih plinova.

Kao što je rečeno, SCR postupak je skuplji od SCNR postupka, posebice zbog troškova zamjene katalizatora i troškova predgrijavanja dimnih plinova.

### **Elektrostatički otprašivač**

Odvajanje čestica prašine u elektrostatičkom otprašivaču zasniva se na djelovanju elektrostatičke sile u električnom polju. Mehanizam otprašivanja prikazan je na slici 14.



**Slika 14. Mehanizam otprašivanja u elektrostatickom otprašivaču [12]**

Kako bi otprašivač mogao odvajati čestice, one moraju biti električki nabijene. Nabijanje čestica se vrši pomoću negativno nabijenih molekula plina, koje se vežu za česticu te ju transportiraju do pozitivno nabijene elektrode, gdje se čestice izbijaju i gdje nastaje sloj prašine, koji se s vremenom mora odstraniti vibriranjem elektrode.

Učinkovitost odvajanja čestica prašine kod elektrostatickih otprašivača dostiže i do 99 % [12]. Elektrostaticki otprašivač može biti izveden kao sklop 2-4 zasebnih odjeljaka, od kojih svaki ima vlastito napajanje električnom energijom, za slučaj kvara jednog od odjeljaka.

Efikasnost otklanjanja prašine iz dimnih plinova kod elektrostatickih otprašivača ovisi najviše o električnoj otpornosti čestica prašine. Električna otpornost je uvjetovana sastavom otpada, te se može vrlo brzo mijenjati. Sumpor u otpadu često smanjuje otpornost, te stoga pospješuje uklanjanje prašine u električnom polju.

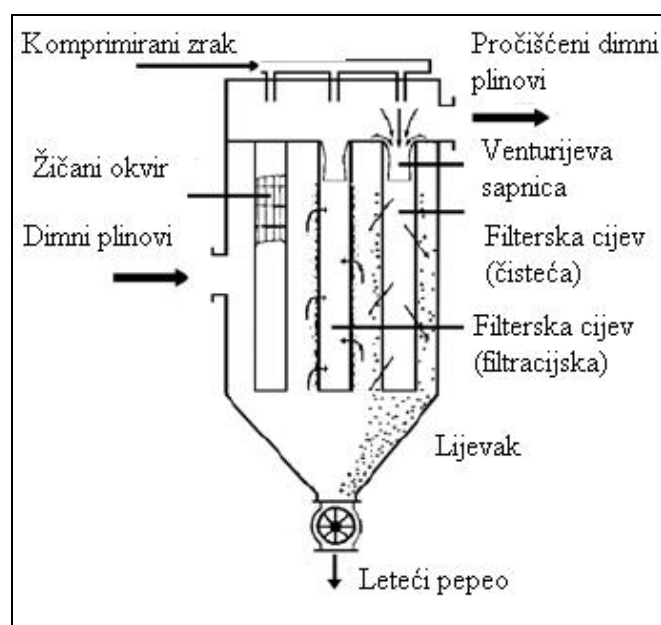
Tipične radne temperature elektrostatickog otprašivača su između 160-260 °C. Rad na višim temperaturama se izbjegava pošto se time povećava rizik od ponovnog nastajanja PCDD/F spojeva, a s time i njihovog ispuštanja u atmosferu.

### **Vrećasti filter**

Vrećasti filteri odvajaju čestice prašine iz dimnih plinova. Plinovi prolaze kroz filter koji sprječava prolazak čestica, te se one nakupljaju na površini filtera. Ovo uzrokuje pad tlaka na izlazu iz filtera i zbog toga se filter mora redovito čistiti. Upravo se pad tlaka u filteru koristi

kao indikator količine nataložene prašine. Vrećasti filteri su često upotrebljavani u postrojenjima za spaljivanje otpada i vrlo su učinkoviti u otklanjanju širokog raspona dimenzija čestica, više od 99 % [12]. Učinkovitost se smanjuje za čestice manje od 1  $\mu\text{m}$ , ali udio ovih čestica u dimnim plinovima iz spalionica otpada je relativno nizak.

Površina filtera može se čistiti trešnjom ili komprimiranim zrakom. Komprimirani zrak se u kratkim impulsima upuhuje kroz filtersku površinu u smjeru suprotnom smjeru nastrujavanja dimnih plinova. Slika 16 prikazuje vrećasti filter sa sustavom komprimiranog zraka.



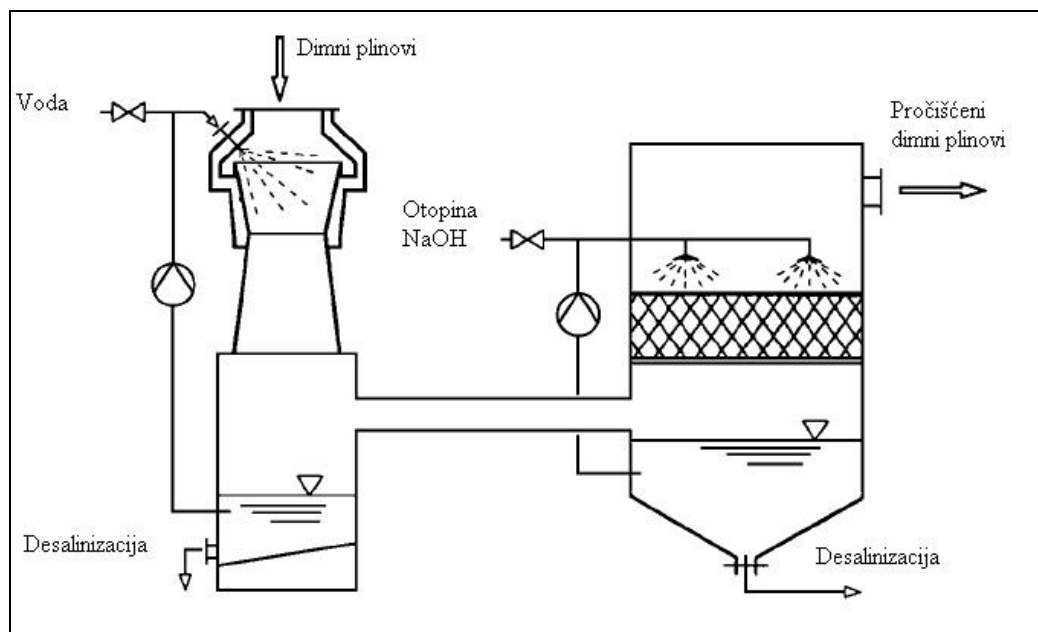
Slika 15. Vrećasti filter sa sustavom komprimiranog zraka [12]

Radna temperatura u vrećastom filteru uvjetovana je materijalima koji se koriste za filtersku površinu, a raspon se najčešće kreće od 170-200  $^{\circ}\text{C}$  [12]. Kako bi se izbjeglo oštećivanje filterske površine uslijed previsoke temperature dimnih plinova, prije ulaza u filter dimni plinovi prolaze kroz poseban uređaj koji vodom hladi plinove, ukoliko je to potrebno. Ovakav sustav se sve manje koristi, zahvaljujući napretku u konstrukciji kotla.

Mehaničko i toplinsko opterećenje filterske površine određuje njen životni vijek i troškove održavanja. Vrećasti filter se može, kao i elektrostatički otprašivač, izvesti kao sklop zasebnih odjeljaka, radi jednostavnijeg održavanja.

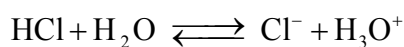
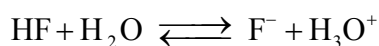
### **Mokri postupak**

Mokri postupak odvaja HCl, HF i SO<sub>2</sub> upijanjem ovih spojeva u vodenim otopinama, a slijedi nakon postupka otprašivanja. Mokri se postupak obično odvija u dvije faze, kao što je prikazano na slici 17.



**Slika 16. Mokri postupak čišćenja dimnih plinova [12]**

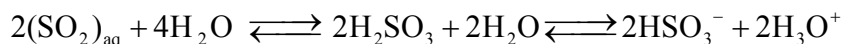
U prvoj fazi se kiseli spojevi HCl i HF odvajaju iz dimnih plinova korištenjem vode, bez dodatnih reagensa. Stvaraju se kisele otopine, a njihove reakcije su prikazane jednadžbama:



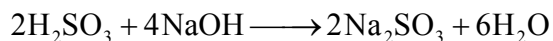
U ovoj fazi pH vrijednost iznosi 0-1, te se u ovako kiselom mediju ne može odvojiti SO<sub>2</sub>. Voda se dozira kontrolirano, najčešće kao funkcija pH vrijednosti u ispirom tornju.

U drugoj fazi odvaja se SO<sub>2</sub>. U ovoj fazi potrebno je održavati pH vrijednost 7 dodavanjem pomoćnih reagensa, najčešće natrijevog hidroksida, kalcijevog hidroksida ili kalcijevog karbonata. Pretvorba SO<sub>2</sub> u Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> odvija se u više koraka. U prvoj fazi SO<sub>2</sub> se otapa u vodi, dok se kemijska pretvorba u sumpornu kiselinu odvija u drugoj fazi, prema jednadžbi:

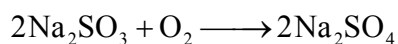




Vrlo male količine  $\text{SO}_2$  se pretvaraju u sumpornu kiselinu, radi vrlo kiselih uvjeta. Pri većim pH vrijednostima stvaraju se značajnije količine sumporne kiseline, koja se kasnije neutralizira natrijevim hidroksidom ili nekim drugim reagensom, kako prikazuje jednažba:



Daljnjom oksidacijom sumporne kiseline s kisikom iz dimnih plinova nastaje natrijev sulfat iz natrijevog sulfita, prema jednažbi:

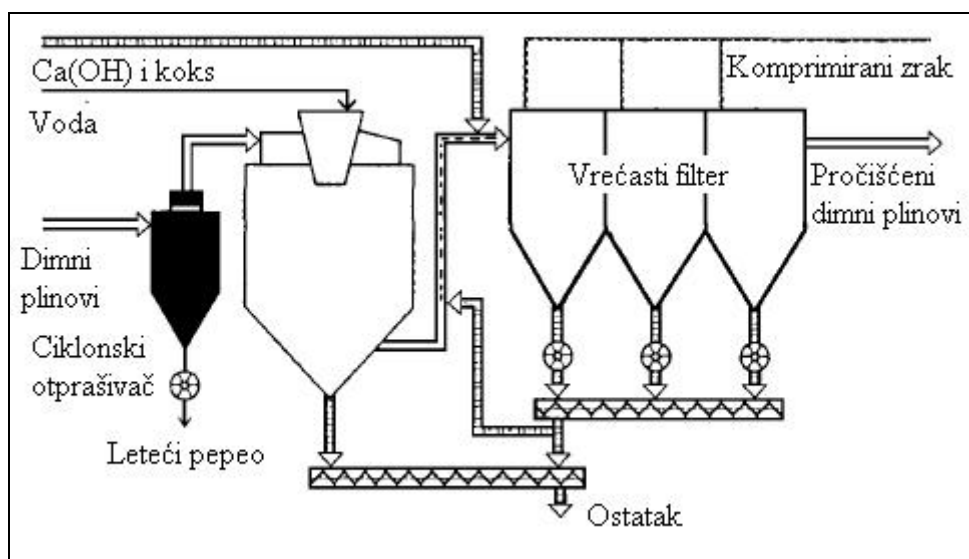


U pravilu se natrijev sulfat pretvara u gips uz pomoć kalcijevog hidroksida tijekom postupka obrade otpadne vode. U usporedbi sa suhim i polusuhim postupcima, mokri postupak karakterizira niska potrošnja reagensa za neutralizaciju. Također, vrlo visoka učinkovitost odvajanja može se postići gotovo sa stehiometrijskom potrošnjom pomoćnih reagensa (stehiometrijski faktor je obično 1,1-1,4). Shodno tome su i ostaci koje treba zbrinuti manji. Nedostatak mokrog postupka je inicijalno veća cijena pogona.

Dioksini i furani mogu se ukloniti u mokrom postupku čišćenja uz upotrebu ugljikom impregniranih materijala. U postrojenje za čišćenje mokrim postupkom ugrađuje se dodatni dio koji je izrađen od polipropilena u koji je umetnut ugljik. Ugljik apsorbira dioksine i furane, ali se ovakav sustav mora s vremenom čistiti. Kontaminirani apsorber dioksina i furana može se kao opasni otpad izvesti ili ponovno spaljivati u ložištu. Ovom se metodom može postići redukcija dioksina i furana u iznosu 60-75 %. Bez korištenja ugljikom impregniranih materijala reducira se do 4 % dioksina i furana [1].

### **Suhi postupak**

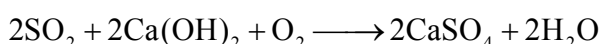
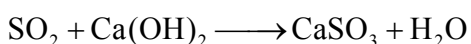
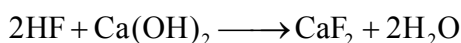
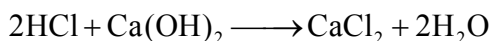
Čišćenje kiselih tvari iz dimnih plinova suhim postupkom predstavlja najjednostavniji postupak u smislu korištene tehnologije. Kruti reagens, najčešće  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ubacuje se izravno u dimne plinove kao fino mljeveni prah. Potpuno suhi postupak sa  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  danas se više ne koristi [12]. Suvremeni sustav suhog postupka prikazan je na slici 18.



Slika 17. Sustav suhog čišćenja dimnih plinova [12]

Sustav se sastoji od hladnjaka, sapnice za ubacivanje suhog reagensa u dimovodni kanal, te vrećastog filtera. Za optimalnu učinkovitost reagensa, potrebna je određena temperatura i udio vode u dimnim plinovima. Ovi se parametri postižu u hladnjaku. Ovakva varijanta suhog postupka naziva se još i uvjetovani suhi postupak.

Reakcija kiselih tvari i reagensa pojednostavljeno se može izraziti jednadžbama:



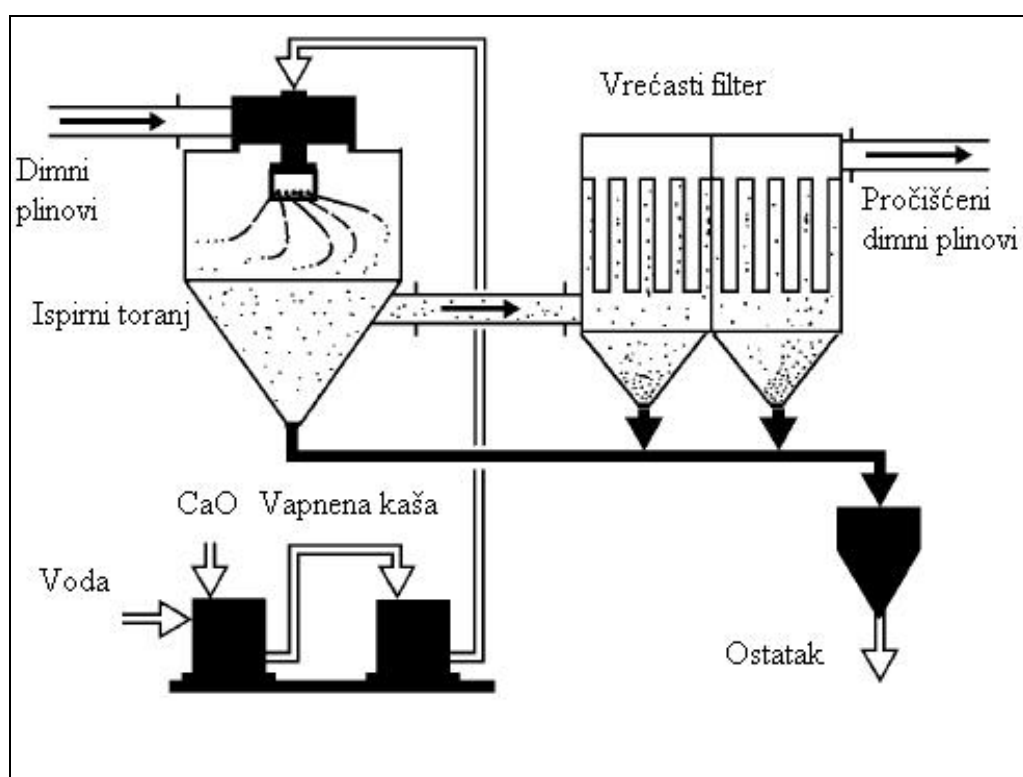
Potrošnja reagensa najviše ovisi o njegovoj specifičnoj površini. Kalcijev hidroksid obično ima specifičnu površinu od 3-20 m<sup>2</sup>/g [12]. Relativno velike količine reagensa se moraju upotrebljavati kako bi se postigao zadovoljavajući stupanj uklanjanja kiselih tvari (stehiometrijski faktor 2,4-3,0). Ovo znači i velike količine ostatka čišćenja, koji se mora odložiti.

Suhi postupak se može kombinirati s otprašivanjem. Na slici 18 prvo je prikazano otprašivanje u ciklonskom otprašivaču, a nakon ubacivanja reagensa fina prašina i reagens se uklanjaju u vrećastom filteru. Kemijske reakcije između kiselih tvari i reagensa odvijaju se u

dvije faze, prvo u dimovodnim kanalima nakon ubacivanja reagensa, te nakon toga u nakupljenom sloju prašine u vrećastom filteru. Reagens koji se nakuplja na filterskoj površini je smjesa različitih soli i nepretvorenog  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Kako bi se smanjila potrošnja reagensa, dio nakupljene tvari na filterskoj površini se ponovno ubacuje u dimovodni kanal.

### Polusuhi postupak

Polusuhi postupak za uklanjanje  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$  i sl. vrlo je sličan uvjetovanom suhom postupku u smislu rasporeda uređaja. Slika 19. prikazuje sustav polusuhog čišćenja dimnih plinova.



Slika 18. Sustav polusuhog čišćenja dimnih plinova [12]

U ovom postupku se otprašivanje može vršiti odvojeno ili zajedno s produktima čišćenja. U sustavu sa odvojenim otprašivanjem, otprašivač je smješten prije ispirnog tornja. U sustavu bez odvojenog otprašivanja, dimni plinovi se dovode izravno iz kotla u ispirni toranj (engl. *scrubber*).

U ispirnom tornju, lužnata otopina (reagens) se raspršuje na način da se postigne što veća kontaktna površina između dimnih plinova i reagensa. Produkti reakcija su soli koje napuštaju

ispirni toranj zajedno s pročišćenim dimnim plinovima. Dimni plinovi se uvode u elektrostatički ili vrećasti otprašivač, gdje se soli uklanjaju iz plinova.

Kisele tvari u plinovima su apsorbirane u kapljice reagensa ili kasnije reagiraju s krutom fazom reagensa koja nastaje isparavanjem, kristalizacijom ili sušenjem kapljice. Ove reakcije koriste energiju vrućih dimnih plinova.

U polusuhom postupku reagens je učinkovitiji nego u suhom postupku, te se time smanjuje potrošnja reagensa za postizanje iste učinkovitosti. Stehiometrijski faktor 2,2-3,0 je uobičajen [12].

### **Uklanjanje dioksina i furana**

Dioksini i furani najvećim su dijelom sadržani u krutoj fazi ostataka izgaranja (letećoj prašini), stoga se najviše ovih spojeva uklanjanja u otprašivačima. Vrećasti otprašivači postižu učinkovitost uklanjanja iz krute faze i veću od 99 % [1]. Filteri mogu biti impregnirani katalizatorom, koji onda učinkovito uklanja (99 %) dioksine i furane iz plinovite faze. Ovi se spojevi mogu učinkovito uklanjati i ubacivanjem ugljikovog emulgata u ispirni toranj tijekom mokrog postupka čišćenja.

SCR postupak može uklanjati dioksine i furane iz plinovite faze s učinkovitošću i do 99,9 % [1]. Ovo se postiže uvođenjem višeslojnih katalizatora u SCR postupak. Osim navedenih postupaka pročišćavanja dimnih plinova, dioksini i furani mogu se ukloniti ponovnim spaljivanjem ostataka iz faze pročišćavanja.

## **4.2. Kruta materija iz obrade otpada**

### **4.2.1. Sastav i značajke**

Kruti ostaci termičke obrade su pepeo s dna, leteći pepeo i ostaci čišćenja dimnih plinova. Ovi se ostaci obrađuju radi daljnje upotrebe ili radi ekoloških zahtjeva ukoliko je potrebno. Suvremena postrojenja proizvode 200-350 tona pepela s dna po jednoj toni izgorenog otpada. Osim pepela s dna, u krute ostatke ubraja se i leteći pepeo koji je odnesen iz ložišta s dimnim plinovima, te ostaci nakon čišćenja dimnih plinova.

Pepeo s dna produkt je izgorenog otpada kojeg je rešetka iz ložišta prenijela u spremnik za pepeo. Ovo predstavlja najveći udio krutih ostataka, a može se uvjetno upotrebljavati u građevinskoj industriji, kako je opisano u poglavlju 4.2.2. Inače se može odlagati bez dodatne obrade.

Pepeo iz kotla se skuplja u kotlu nakon što je odnesen strujom dimnih plinova, te se kasnije obrađuje zajedno s letećim pepelom. Leteći pepeo se odvaja u elektrostatičkim otprašivačima ili vrećastim filterima, a kasnije se može koristiti kao punilo za bitumen, ukoliko zadovoljava ekološke propise.

Ostaci od čišćenja dimnih plinova mokrim postupkom sadrže čestice letećeg pepela, te produkte reakcije (natrijev sulfat) i nepretvorene lužnate reagense.

Tipične koncentracije organskih spojeva prikazane su u tablici 10., a u mjerenje su obuhvaćene samo suvremena postrojenja [1].

**Tablica 10. Koncentracije organskih spojeva u ostacima termičke obrade [1]**

Tvar	Pepeo s dna (ng/g)	Kotlovski pepeo (ng/g)	Pepeo iz filtera (ng/g)
PCDD/F	<0,001-0,01	0,02-0,5	0,2-10
PCB	<5-20	4-50	10-250
PCBz	<2-20	200-1000	100-4000
PCPh	<2-50	20-500	50-10000
PAH	<5-10	10-300	50-2000

Sastav pepela s dna najviše ovisi o sastavu otpada i hlapljivosti sadržanih elemenata, ali i o tipu tehnologije za izgaranje, vrsti rešetke, te o uvjetima samog izgaranja. U pepelu se nalaze i teški metali, kao što su As, Cd ili Hg, čija koncentracija može biti povećana u pepelu u odnosu na neizgoreni otpad, uslijed njihovog isparivanja iz drugih spojeva u kojima se nalaze u otpadu.

Magnetskim odvajanjem iz pepela se uklanjaju metali koji se recikliraju u postrojenjima za preradu sekundarnih sirovina. Ostatak pepela se može prosijavati na različite granulacije, prema potrebi kasnije upotrebe.

Pepeo koji se ne bi prodao za proizvodnju građevinskog materijala, morao bi se odlagati. Za njegovo odlaganje potrebno je osigurati primjereno odlagalište, koje bi bilo spremno za prihvatanje proizvedene količine pepela tijekom životnog vijeka postrojenja.

Pepeo koji se nakuplja u vrećastom filteru ili elektrostatičkom otprašivaču tretira se kao opasni otpad, te ga je potrebno zbrinuti na prikladan način.

Masa i volumen proizvedenog pepela prikazana je u tablici 11. Volumen je proračunat uz prosječnu gustoću pepela od 1130 kg/m<sup>3</sup> [13].

**Tablica 11. Specifična i godišnja proizvodnja pepela**

<b>Pepeo</b>	<b>1/toni otpada</b>	<b>1/god</b>
Masa (t)	0,3	30.000
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,22	22.000

#### **4.2.2. Mogućnosti uporabe**

##### **Odvajanje metala**

Moguće je odvajati i magnetične i nemagnetične metale. Magnetični metali se odvajaju magnetom, dok se nemagnetični odvajaju uređajem u kojem brzorotirajuća zavojnica inducira magnetsko polje u nemagnetičnim česticama i izbacuje ih iz ostatka materijala.

Odvajanje metala je nužno kako bi se ostatak pepela moglo kasnije koristiti u građevinskoj industriji. Magnetični metali se nakon odvajanja nečistoća (prašine) koriste kao željezni otpad pri proizvodnji čelika, dok se nemagnetični pretaljuju nakon detaljnog razvrstavanja prema vrsti. Pretpostavlja se kako bi postrojenje prodavalo odvojeni metal prerađivaču sekundarnih sirovina.

##### **Građevinski materijal**

Pepeo s dna moguće je upotrebljavati kao agregat pri proizvodnji betona, ali mora se napraviti analiza pepela u kojoj se ispituje topivost elemenata u vodi. Ukoliko bi dolazilo do prekomjernog onečišćenja vode uslijed otapanja pojedinih štetnih tvari iz pepela, pepeo bi se morao podvrgnuti obradi. Također, ukoliko pepeo sadrži tvari koje oštećuju beton, kao što su kloridi, sulfati, organski spojevi i staklo, potrebna je predobrada prije korištenja takvog pepela

u proizvodnji betona. Uključci aluminija su posebno štetni, a to se može izbjeći adekvatnim odvajanjem metala iz pepela.

Studije [14] su pokazale kako se svojstva pepela mogu poboljšati dodatnom obradom. Ispiranje pomaže uklanjanju organskih spojeva, dok se udio otpadnog stakla može prepoloviti optičko-mehaničkim odvajanjem. Također, obrada s natrijevim hidroksidom smanjuje udio aluminija i uklanja opasne tvari, kao što su kloridi i sulfati.

Postrojenje bi prodavalo neobrađeni pepeo postrojenju za proizvodnju građevinskog materijala. Prvo treba provesti analizu kvalitete pepela, koja bi tada odredila da li se pepeo mora dodatno obraditi, što bi u konačnici odredilo i prodajnu cijenu.

### 4.3. Problem otpadnih voda

Postrojenje za spaljivanje otpada projektirano je na način da spriječi mogućnost prodora otpadnih voda u podzemne vode. Ovo je moguće primjenom vodonepropusnih kanalizacijskih sustava, te izoliranjem od podzemlja svih površina na kojima se mogu pojaviti masnoće (ulja), kemikalije, pogonske tekućine ili bilo koje druge štetne tvari. Sve otpadne vode, uključujući i oborinske, moraju se pročistiti do potrebnog stupnja čistoće prema važećoj zakonskoj regulativi. Otpadne vode iz tehnoloških procesa sakupljaju se i tretiraju lokalno (taloženje i odvajanje masnoća), te se pročišćene odvede u sustav odvodnje otpadnih voda. Otpadne vode moraju zadovoljiti kriterije čistoće kako bi se ishodila vodopravna dozvola koju u RH izdaju županijski uredi prema pribavljenom mišljenju „Hrvatskih voda“ [15]. Potrebno je pratiti kvalitetu i sastav podzemnih voda, kako bi se na vrijeme spriječilo onečišćenje.

#### 4.3.1. Sastav i mogućnost upotrebe

Sastav otpadnih voda nakon mokrog postupka čišćenja dimnih plinova, a prije podvrgavanja pročišćavanju, prikazan je u tablici 11.

**Tablica 12. Sastav otpadnih voda iz mokrog postupka čišćenja (prije pročišćavanja vode)**

<b>Tvar</b>	<b>Minimalno</b>	<b>Maksimalno</b>	<b>Prosječno</b>
Ukupni organski ugljik (mg/l)	47	105	73
Slufati (mg/l)	1.200	20.000	4.547
Kloridi (mg/l)	85.000	180.000	115.000
Fluoridi (mg/l)	6	170	25
Hg (µg/l)	1.030	19.025	6.167
Pb (mg/l)	0,05	0,92	0,25
Cu (mg/l)	0,05	0,2	0,1
Zn (mg/l)	0,39	2,01	0,69
Cr (mg/l)	<0,05	0,73	0,17
Ni (mg/l)	0,05	0,54	0,24
Cd (mg/l)	<0,005	0,02	0,008

### **Otpadne vode iz postrojenja za čišćenje dimnih plinova**

Mokri postupak čišćenja dimnih plinova povećava količinu otpadnih voda. U nekim se postrojenjima ova voda isparava, dok se u drugima obrađuje, a kasnije ispušta. Količina otpadne vode dobivena mokrim postupkom čišćenja dimnih plinova iznosi približno 0,2 m<sup>3</sup>/toni otpada [1]. Ovo daje ukupnu godišnju količinu otpadne vode iz mokrog postupka od 20.000 m<sup>3</sup>. Proizvodnja otpadne vode, a time i potrošnja pitke vode se može umanjiti ponovnim vraćanjem otpadne vode u ispirni toranj, ali ovo se može provoditi samo do određenog stupnja, s obzirom da se u vodi nakupljaju soli koje smanjuju učinak mokrog postupka čišćenja.

Suhi i polusuhi postupak ne povećavaju količinu otpadnih voda, a mokri postupak se može izvesti uz povrat ostataka čišćenja dimnih plinova u proces čišćenja ili uz instalaciju isparivača, što povećava investiciju za 2 milijuna EUR [1].

Drugi izvori otpadne vode uključuju kondenzat iz dimnjaka nakon mokrog postupka čišćenja, napojnu vodu, vodu za čišćenje spremnika i kišnicu.

Lokalno pročišćena otpadna voda može se koristiti kao voda za hlađenje pojedinih dijelova postrojenja.



## **5. EKONOMSKE I ORGANIZACIJSKE ZNAČAJKE TEHNOLOGIJE IZGARANJA NA REŠETKI**

### **5.1. Visina investicijskog ulaganja**

Visina investicijskog ulaganja izračunati će se za kogeneracijsko postrojenje. Ovo postrojenje proizvodi električnu energiju u kondenzacijskoj turbini s reguliranim oduzimanjem pare, koja se kao toplinska energija prodaje kupcu (industriji). Investicijski troškovi ovise o kapacitetu energane na otpad.

Visina investicijskog ulaganja može znatno varirati, s obzirom na nekoliko utjecajnih faktora:

- Izvedba postrojenja
- Veličina postrojenja
- Postojanje lokalne infrastrukture
- Mogućnosti za prodaju energije

U gusto naseljenim regijama, otpad se do postrojenja za spaljivanje dovozi posebnim kamionima, iz kojih se otpad ubacuje u spremnik za otpad. Potrebno je izgraditi cestovnu infrastrukturu, prostor za vaganje, te sam spremnik otpada. Troškovi za gore navedeno sastoje se primarno od troškova izgradnje prilaznih cesti i temelja za spremnik otpada. Procijenjeni troškovi za izgradnju prilaznih cesti i spremnika za otpad iznose 4,6 milijuna EUR [1].

Sustav ložišta i kotla podrazumijeva slijedeće komponente:

- Sustav za doziranje otpada u ložište
- Dobava zraka za izgaranje
- Rešetka i ložište
- Odvođenje i pohranjivanje pepela i šljake
- Kanali za dimne plinove do zagrijača napojne vode
- Kotao s dobavom napojne vode i odvodom pare

Čimbenici koji utječu na cijenu sustava za izgaranje i kotla su slijedeći:

- Vrsta rešetke
- Željena učinkovitost kotla
- Izvedba kotla

Iako su tehnologije koje nude tri najzastupljenija proizvođača (poglavlje 3.2.) vrlo slične, *Von Roll* sustav hlađenja „*Aquaroll*“ omogućava da se toplina odvedena od rešetke koristi za predgrijavanje dimnih plinova prije SCR postupka ili za predgrijavanje primarnog i sekundarnog zraka, te je stoga u radu odabran ovaj tip rešetke (*Von Roll*). Za postrojenje zadanog kapaciteta, sustav izgaranje s kotlom bez troškova izgradnje i troškova elektroničke, nadzorne i regulacijske opreme košta oko 19,5 milijuna EUR [8].

Sustav vode i pare u postrojenju sastoji se od slijedećih komponenti:

- Postrojenje za obradu vode
- Kondenzator
- Kondenzacijska turbina s reguliranim oduzimanjem pare
- Regulirano oduzimanje pare s parametrima 198 °C i 15 bar za potrebe prodaje toplinske energije

Troškovi ovog sustava znatno variraju s obzirom na omjer proizvodnje vrele vode za grijanje ili električne energije. Za kogeneracijsko postrojenje u daljnjoj analizi uzeti će se trošak u iznosu 8 milijuna EUR za sustav vode i pare [8].

Ukupni trošak komponenti energane na otpad, bez komponenti sustava za pročišćavanje dimnih plinova (razmatrati će se zasebno), zajedno s troškovima projektiranja, izgradnje, elektro-mehaničkih instalacija i drugim investicijskim troškovima navedeni su u tablici 13.

**Tablica 13. Struktura početnih troškova (bez sustava za pročišćavanje dimnih plinova)**

<b>Vrsta troška</b>	<b>Trošak (EUR)</b>
Okolna infrastruktura i spremnik orpada	4.600.000
Sustav spaljivanja	19.500.000
Sustav vode i pare	8.000.000
Projektiranje	2.000.000
Izgradnja	7.000.000
Elektro-mehaničke instalacije	5.000.000
Drugi investicijski troškovi	6.000.000
<b>Ukupno</b>	<b>52.100.000</b>

### **5.1.1. Visina investicijskog ulaganja za sustav čišćenja dimnih plinova**

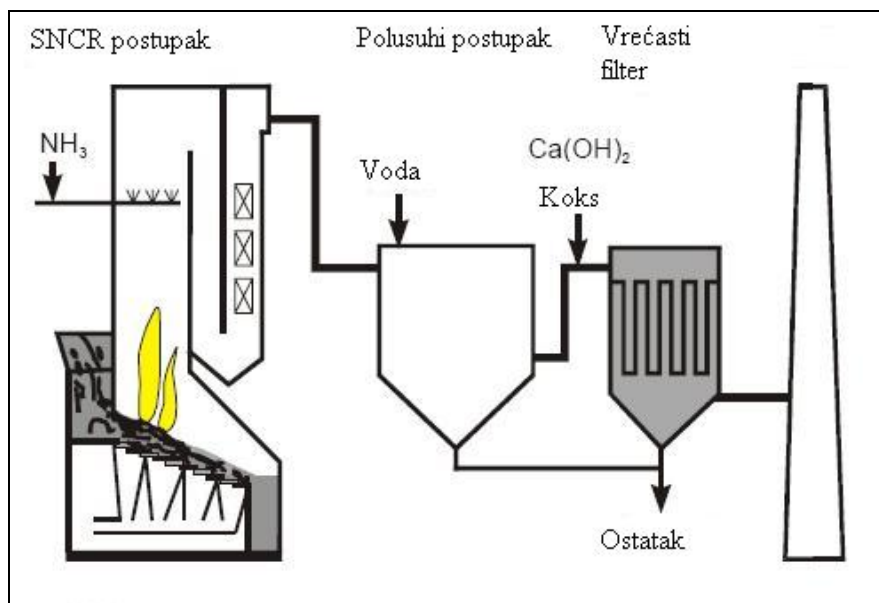
Pročišćavanje dimnih plinova predstavlja vrlo važan dio čitavog procesa kod izgaranja otpada. Čišćenje dimnih plinova teče u nekoliko koraka, kako je opisano ranije. Izbor tehnologije za pročišćavanje ovisi o sastavu dimnih plinova, količini dopuštenih emisija, lokalnim uvjetima (dobava vode, zbrinjavanje otpadne vode i sl.) i procjeni pogonskih i investicijskih troškova.

#### **5.1.1.1. Varijanta 1**

U ovoj varijanti će se razmatrati sustav za pročišćavanje dimnih plinova koji uključuje sljedeće komponente:

- Sustav za selektivnu nekatalitičku redukciju (SNCR postupak)
- Vrećasti filter
- Sustav pročišćavanja polusuhim postupkom

U ovom sustavu (slika 20) plinovi prvo ulaze u ispirni toranj gdje se kisele tvari uklanjaju raspršivanjem vode. Prije uvođenja u vrećasti filter u dimovodni kanal se ubacuje aktivni koks i kalcijev hidroksid u obliku fino mljevenog praha, koji uklanja sumporove okside, HCl, HF i živu. Reakcije se odvijaju u dimovodnom kanalu, ali i u sloju nakupljenog ostatka na vrećastom filteru. Ovime nastaju kalcijeve soli, koje se filtriraju u vrećastom filteru. Ostaci iz ispirnog tornja i vrećastog filtera mogu se skupljati zajedno, te naknadno prikladno zbrinuti, s obzirom da se radi o opasnom otpadu.



Slika 19. Varijanta 1 - sustav za pročišćavanje dimnih plinova

### Početni troškovi

Troškovi cjelokupnog sustava za varijantu 1 su kako slijedi [1]:

Tablica 14. Varijanta 1 - početni troškovi

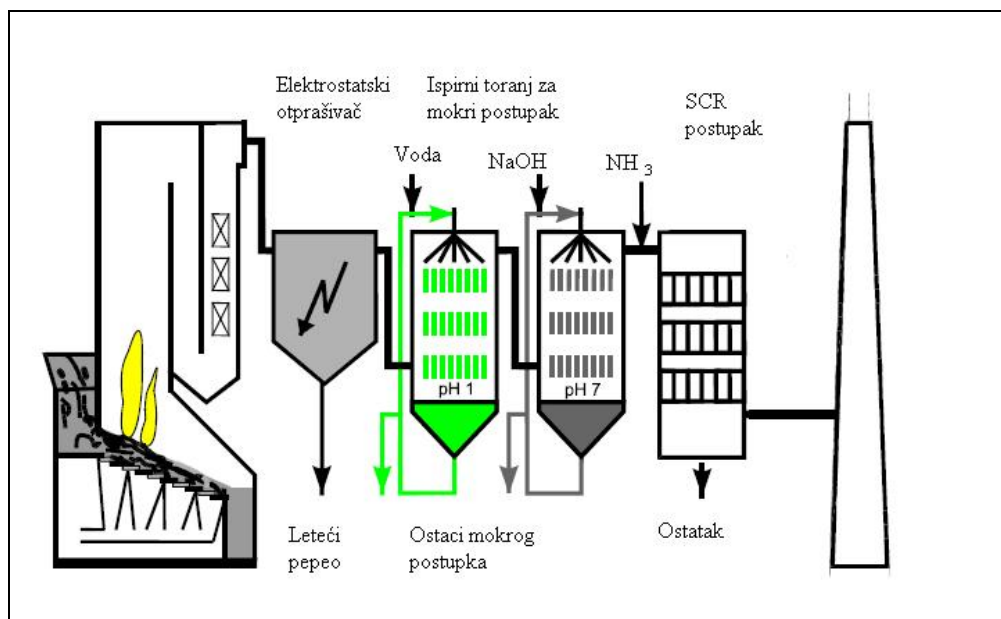
Dio sustava	Trošak (EUR)
Sustav polusuhog postupka	1.200.000
Vrećasti filter	2.200.000
SNCR postupak	800.000
<b>Ukupno</b>	<b>4.200.000</b>

#### 5.1.1.2. Varijanta 2

Ovaj se sustav za pročišćavanje dimnih plinova sastoji od slijedećih komponenti:

- Sustav za pročišćavanje mokrim postupkom
- Elektrostatski otprašivač
- SCR postupak

Ovakav sustav (slika 21) predstavlja sustav mokrog pročišćavanja dimnih plinova. Dimni plinovi su nakon izlaska iz kotla otprašeni u elektrostatskom otprašivaču. Otprašeni plinovi potom ulaze u prvi ispirni toranj u kojem se vodom uklanjaju kisele tvari (HCl i HF) i živa, nakon čega se u drugom ispirnom tornju uz dodatak natrijevog hidroksida uklanja SO<sub>x</sub>. Potom slijedi SCR postupak, gdje se iz plinova uklanja NO<sub>x</sub>.



Slika 20. Varijanta 2 - sustav za pročišćavanje dimnih plinova

### Početni troškovi

Troškovi cjelokupnog sustava za varijantu 2 su kako slijedi [1]:

Tablica 15. Varijanta 2 - početni troškovi

Dio sustava	Trošak (EUR)
SCR postupak	1.500.000
Elektrostatički otprašivač	1.200.000
Sustav mokrog postupka	5.000.000
<b>Ukupno</b>	<b>7.700.000</b>

Usporedba investicijskih troškova za postrojenje s varijantama 1 i 2 prikazana je u tablici 16.

Tablica 16. Usporedba investicijskih troškova

Vrsta troška	Varijanta 1 (EUR)	Varijanta 2 (EUR)
Okolna infrastruktura i spremnik otpada	4.600.000	4.600.000
Sustav spaljivanja	19.500.000	19.500.000
Sustav vode i pare	8.000.000	8.000.000
Projektiranje	2.000.000	2.000.000
Izgradnja	7.000.000	7.000.000
Elektro-mehaničke instalacije	5.000.000	5.000.000
Drugi investicijski troškovi	6.000.000	6.000.000
Sustav čišćenja dimnih plinova	4.200.000	7.700.000
<b>Ukupno</b>	<b>56.300.000</b>	<b>59.800.000</b>

## 5.2. Troškovi pogona i održavanja

Troškovi pogona ovise o izabranoj varijanti sustava pročišćavanja dimnih plinova. Godišnji troškovi održavanja procjenjuju se na 3 % investicijskih troškova. U pogonske troškove ulazi i naknada za emisije stakleničkih plinova. Naknada za emisiju CO<sub>2</sub> je jednaka za obje varijante pročišćavanja dimnih plinova, dok se naknada za SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> izračunava zasebno.

Troškovi pogona i održavanja ovise o tehnologiji pročišćavanja dimnih plinova, budući da različite tehnologije troše različite količine reagensa.

Naknada vlasnicima nekretnina uz postrojenje je naknada koju postrojenje mora isplatiti radi smanjene vrijednosti nekretnina u bližoj okolini postrojenja.

### 5.2.1. Naknada za emisiju CO<sub>2</sub>

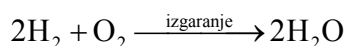
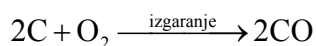
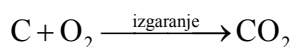
U troškove pogona moraju se uvrstiti i plaćanje naknade za emisiju CO<sub>2</sub>. Visina naknade izračunava se prema određenoj formuli, pri čemu se uzimaju u obzir i korektivni koeficijenti, zavisno od količine i podrijetla emisija.

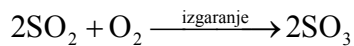
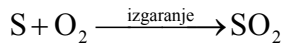
Za izračun je potrebno proračunati količinu CO<sub>2</sub> iz stehiometrijskih jednadžbi. Uz pretpostavljeni kemijski sastav otpada kako slijedi [1]:

Tablica 17. Kemijski sastav komunalnog otpada

Tvar	Maseni udio (%)
Voda	20
Pepeo	25
Ugljik	29
Vodik	3
Dušik	0,9
Kisik	18
Sumpor	0,3
Fluor	0,02
Klor	0,5
Ostalo	3,28
<b>Ukupno</b>	<b>100</b>

Osnovu izgaranja komunalnog otpada opisuje se jednadžbama:





### Proračun emisije CO<sub>2</sub>

U jednoj toni otpada nalazi se prosječno 290 kg ugljika (C). Količina ugljika iznosi:

$$n_C = \frac{m_C}{M_C}$$

$$n_C = \frac{290 \text{ kg}}{12,011 \text{ mol}} = 24,14 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

Količina CO<sub>2</sub> je jednaka količini ugljika, iz toga slijedi masa CO<sub>2</sub> iz jedne tone otpada:

$$m_{CO_2} = n_{CO_2} \cdot M_{CO_2}$$

$$m_{CO_2} = 24,011 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot (12,011 + 32) \text{ mol} = 1062 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{t_{otp}}$$

Godišnja emisija CO<sub>2</sub> tada iznosi:

$$m_{CO_2 \text{ UK}} = m_{CO_2} \cdot d_{otp}$$

$$m_{CO_2 \text{ UK}} = 1062 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{t_{otp}} \cdot 100000 t_{otp} = 106,2 \cdot 10^6 \text{ kg}_{CO_2} = 106200 t_{CO_2}$$

Iznos naknade izračunava se pomoću dane formule, pri čemu je pojedinačna naknada za jednu tonu CO<sub>2</sub> iznosi  $N_{1C} = 2,5 \text{ EUR/god}$  [14].

$$N_C = N_{1C} \cdot E_C \cdot k_{kC}$$

u kojem je:

$N_C$  - iznos naknade na emisiju CO<sub>2</sub> (EUR)

$N_{1C}$  - iznos naknade za jednu tonu emisije CO<sub>2</sub> (EUR)

$E_C$  - količina emisije u tonama u kalendarskoj godini

$k_{kC}$  - korektivni poticajni koeficijent ovisan o količini i podrijetlu emisije

$$Uz \ k_{kC} = k_{1C} \cdot k_{2C} \cdot k_{3C} \cdot k_{4C}$$

Također, poticajni korektivni koeficijenti  $k_{1C}$ ,  $k_{2C}$ ,  $k_{3C}$  i  $k_{4C}$  određuju se prema visini godišnje emisije, podrijetlu emisije, ulaganju u programe energetske učinkovitosti, te prema provedbi programa za smanjenje emisije  $\text{CO}_2$ . Koeficijenti su kako slijede iz Uredbe o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i pobližim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš ugljikovog dioksida,  $k_{1C} = 0,75$ ,  $k_{2C} = 0,2$ ,  $k_{3C} = 1,0$  i  $k_{4C} = 0,61$ . Iz danih vrijednosti slijedi  $k_{kC} = 0.0915$ .

Iako se  $\text{CO}_2$  izravno ispušta u atmosferu i time doprinosi efektu staklenika, u izračun naknade za emisiju  $\text{CO}_2$  uzima se u obzir samo  $\text{CO}_2$  nastao izgaranjem dijela otpada fosilnog podrijetla. Budući da je komunalni otpad heterogena smjesa otpada, može se odrediti prosječni udio  $\text{CO}_2$  nastao iz dijela otpada koji nije biorazgradiv (tj. nije  $\text{CO}_2$  neutralan). Ovaj udio fosilnog  $\text{CO}_2$  kreće se u rasponu 33-50 % [16]. Za daljnju analizu uzeti će se srednja vrijednost raspona, što iznosi 41,5 %. Time se uvodi novi koeficijent kojim se umanjuje ukupna količina  $\text{CO}_2$  relevantna za izračun naknade;  $k_{5C} = 0,415$ .

Naknada za emisiju  $\text{CO}_2$  slijedi:

$$N_C = N_{1C} \cdot E_C \cdot k_{kC} \cdot k_{5C} = 2.5 \frac{\text{€}}{\text{t}_{\text{otp}}} \cdot 106200 \frac{\text{t}_{\text{otp}}}{\text{god}} \cdot 0.0915 \cdot 0,415 = 10082 \text{ EUR / god}$$



### 5.2.2. Troškovi pogona i održavanja - varijanta 1

Troškovi pogona i održavanja cjelokupnog postrojenja (varijanta 1) prikazani su u tablici 18.

Tablica 18. Varijanta 1 - troškovi pogona i održavanja

Vrsta troška	Količina (t/god)	Cijena (EUR/t)	Trošak (EUR/god)
Održavanje sustava (3 % investicijskih troškova)	-	-	1.689.000
Prirodni plin	485	175	85.000
Procesna voda	33.000	0,36	12.000
Aktivni koks	93	320	30.000
Reagens za SNCR (NH <sub>3</sub> )	800	100	80.000
Reagens za polusuhi postupak (Ca(OH) <sub>2</sub> )	1.400	50	70.000
Odlaganje pepela s dna	30.000	46	1.380.000
Leteći pepeo iz kotla	3.000	46	138.000
Ostatak iz vrećastog filtera (opasni otpad)	4.500	350	1.575.000
Naknada za emisije	-	-	13.560
Naknada vlasnicima nekretnina uz postrojenje	100.000	2,46	246.000
Osooblje	-	-	1.108.000
<b>Ukupno</b>			<b>6.426.560</b>

Iz tablice 18 je vidljivo kako najveći udio u troškovima predstavljaju troškovi odlaganja ostataka termičke obrade, naročito odlaganje ostatka iz vrećastog filtera, koji se tretira kao opasni otpad.

#### Naknada za emisiju SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>

##### Proračun emisije SO<sub>2</sub>

U jednoj toni otpada nalazi se prosječno 3 kg sumpora (S). Količina sumpora iznosi:

$$n_s = \frac{m_s}{M_s}$$

$$n_s = \frac{3 \text{ kg}}{32 \text{ mol}} = 0,09375 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

Količina SO<sub>2</sub> je jednaka količini sumpora, iz toga slijedi masa SO<sub>2</sub> iz jedne tone otpada:

$$m_{\text{SO}_2} = n_{\text{SO}_2} \cdot M_{\text{SO}_2}$$

$$m_{\text{SO}_2} = 0,09375 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot (32 + 32) \text{ mol} = 6 \text{ kg}$$

Godišnja emisija SO<sub>2</sub> tada iznosi, uz pretpostavku učinkovitosti polusuhog postupka pročišćavanja dimnih plinova  $c = 0,95$  [16], dobiva se količina emisija SO<sub>2</sub> u atmosferu:

$$m_{\text{SO}_2 \text{ UK}} = m_{\text{SO}_2} \cdot q_{\text{otp}} \cdot (1 - c)$$

$$m_{\text{SO}_2 \text{ UK}} = 6 \frac{\text{kg}_{\text{SO}_2}}{\text{t}_{\text{otp}}} \cdot 100000 \text{ t}_{\text{otp}} \cdot (1 - 0,95) = 30000 \text{ kg}_{\text{SO}_2} = 30 \text{ t}_{\text{SO}_2}$$

Iznos naknade za emisiju SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> izračunava se prema izrazu:

$$N = N_1 \cdot E \cdot k_k$$

Korektivni poticajni koeficijent ( $k_k$ ) računa se prema izrazu:

$$k_k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

u kojem je:

$k_1$  - korektivni poticajni koeficijent ovisan o godišnjoj količini emisije

$k_2$  - korektivni poticajni koeficijent ovisan o podrijetlu emisije

$k_3$  - korektivni poticajni koeficijent ovisan o graničnoj vrijednosti emisije (GVE) propisanoj Uredbom o graničnim vrijednostima emisije onečišćujućih tvari iz stacionarnih izvora

Jedinična naknada za jednu tonu emisije SO<sub>x</sub> iznosi 42,5 EUR/god [19]. Koeficijenti  $k_1$ ,  $k_2$  i  $k_3$  su odabrani prema Uredbi o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i približim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš oksida sumpora izraženih kao sumporov dioksid [17]. Prema toj uredbi slijedi za SO<sub>x</sub>,  $k_{1S} = 0,67$ ,  $k_{2S} = 1,0$  i  $k_{3S} = 0,8$ .

Prema tome je  $k_{kS} = 0,536$ .

Naknada za emisiju SO<sub>2</sub> slijedi:

$$N_S = N_{1S} \cdot E_S \cdot k_{kS} = 42,5 \cdot 30 \cdot 0,536 = 684 \text{ EUR / god}$$

### **Proračun emisije NO<sub>x</sub>**

Emisija NO<sub>x</sub> izračunava se preko emisijskih faktora. EF za zbrinjavanje otpada se određuje na temelju vrste otpada i metode obrade. Za NO<sub>x</sub> emisijski faktor iznosi EF = 1,8 kg/toni otpada [18]. Naknada za jednu tonu emisije NO<sub>x</sub> iznosi 42,5 EUR/god [19]. Koeficijenti za

NO<sub>x</sub> određuju se kao i za NO<sub>x</sub>, te slijedi,  $k_{1N} = 0,83$ ,  $k_{2N} = 1,0$ ,  $k_{3N} = 0,8$ . Iz toga slijedi  $k_{kN} = 0,664$ . Pošto se u ovoj varijanti koristi SNCR postupak, za koeficijent uklanjanja NO<sub>x</sub> se uzima  $c = 0,45$ .

Naknada za emisiju NO<sub>x</sub> slijede:

$$N_N = N_{1N} \cdot EF \cdot q_{otp} \cdot k_{kN} \cdot (1 - c) = 42.5 \cdot 0,0018 \cdot 100000 \cdot 0.664 \cdot (1 - 0,45) = 2794 \text{ EUR / god}$$

Ukupni iznos naknade za emisiju SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> za varijantu 1 iznosi:

$$N_{uk1} = N_S + N_N + N_C = 684 + 2794 + 10082 = 13560 \text{ EUR / god}$$

Pogonski troškovi u sustavu ložišta i kotla proporcionalni su protoku otpada. S povećanjem protoka otpada, povećava se potrošnja električne energije za pogon ventilatora za upuhivanje primarnog i sekundarnog zraka za izgaranje, pogon napojnih pumpi, te se izravno povećavaju troškovi odlaganja pepela.

Naknada vlasnicima nekretnina u blizini postrojenja procijenjena je na 2,46 EUR/t. Ova naknada ovisi o gustoći naseljenosti u blizini postrojenja.

### **5.2.3. Troškovi pogona i održavanja - varijanta 2**

Godišnji troškovi održavanja su i ovdje procijenjeni na 3 % investicijskog ulaganja, međutim razlika slijedi iz različitih troškova u sustavu pročišćavanja dimnih plinova, ali i u količinama zbrinutog otpada. Troškovi su prikazani u tablici 19.

**Tablica 19. Varijanta 2 - troškovi pogona i održavanja**

Vrsta troška	Količina (t/god)	Cijena (EUR/t)	Trošak (EUR/god)
Održavanje sustava (3 % investicijskih troškova)	-	-	1.794.000
Prirodni plin	485	175	85.000
Procesna voda	33.000	0,36	12.000
Reagens za SCR (NH <sub>3</sub> )	400	100	40.000
Reagens za mokri postupak (NaOH)	700	50	35.000
Odlaganje pepela s dna	30.000	46	1.380.000
Leteći pepeo iz kotla	3.000	46	138.000
Leteći pepeo iz elektrostatskog otprašivača	4.200	46	193.200
Zgusnuti leteći pepeo	5.500	46	253.000
Ostaci mokrog postupka (hidroksidi teških metala)	160	350	56.000
Naknada za emisije	-	-	11.879
Naknada vlasnicima nekretnina u blizini postrojenja	100.000	2,46	246.000
Osoblje	-	-	1.108.000
<b>Ukupno</b>			<b>5.352.079</b>

### **Naknada za emisiju SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>**

#### **Proračun emisije SO<sub>2</sub>**

Proizvodnja SO<sub>2</sub> za varijantu 2 jednaka je onoj za varijantu 1, ali se razlikuju u učinkovitosti uklanjanja. U varijanti 2 koristi se mokri postupak koji je učinkovitiji od polusuhog postupka. Koeficijent učinkovitosti  $c = 0,98$ .

Količina SO<sub>2</sub> iznosi:

$$m_{\text{SO}_2 \text{ UK}} = 6 \frac{\text{kg}_{\text{SO}_2}}{\text{t}_{\text{otp}}} \cdot 100000 \text{ t}_{\text{otp}} \cdot (1 - 0,98) = 12000 \text{ kg}_{\text{SO}_2} = 12 \text{ t}_{\text{SO}_2}$$

Naknada za emisiju SO<sub>2</sub> slijedi:

$$N_s = N_{\text{IS}} \cdot E_s \cdot k_{\text{KS}} = 42,5 \cdot 12 \cdot 0,536 = 273 \text{ EUR / god}$$

#### **Proračun emisije NO<sub>x</sub>**

Emisija NO<sub>x</sub> za varijantu 2 također se razlikuje samo u koeficijentu učinkovitosti uklanjanja. U varijanti 2 za uklanjanje NO<sub>x</sub> koristi se SCR postupak koji je učinkovitiji od SNCR postupka. Koeficijent učinkovitosti  $c = 0,7$ .

Naknada za emisiju NO<sub>x</sub> slijede:

$$N_N = N_{IN} \cdot EF \cdot q_{opt} \cdot k_{kN} \cdot (1 - c) = 42.5 \cdot 0,018 \cdot 100000 \cdot 0.664 \cdot (1 - 0,7) = 1524 \text{ EUR / god}$$

Ukupni iznos naknade za emisiju SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> za varijantu 2 iznosi:

$$N_{uk1} = N_S + N_N + N_C = 273 + 1524 + 10082 = 11879 \text{ EUR / god}$$

Usporedba pogonskih troškova za postrojenja varijantama 1 i 2 prikazana je u tablici 20.

**Tablica 20. Usporedba pogonskih troškova za sustave čišćenja dimnih plinova**

Vrsta troška	Varijanta 1 (EUR/god)	Varijanta 2 (EUR/god)
Održavanje sustava (3 % investicijskih troškova)	1.689.000	1.794.000
Prirodni plin	85.000	85.000
Procesna voda	12.000	12.000
Aktivni koks	30.000	-
Reagens za SNCR (NH <sub>3</sub> )	80.000	-
Reagens za SCR (NH <sub>3</sub> )	-	40.000
Reagens za polusuhi postupak (Ca(OH) <sub>2</sub> )	70.000	-
Reagens za mokri postupak (NaOH)	-	35.000
Odlaganje pepela s dna	1.380.000	1.380.000
Leteći pepeo iz kotla	138.000	138.000
Leteći pepeo iz elektrostatskog otprašivača	-	193.200
Ostatak iz vrećastog filtera (opasni otpad)	1.575.000	-
Zgusnuti leteći pepeo	-	253.000
Ostaci mokrog postupka (hidroksidi teških metala)	-	56.000
Naknada za emisije	13.560	11.879
Naknada vlasnicima nekretnina u blizini postrojenja	246.000	246.000
Osooblje	1.108.000	1.108.000
<b>Ukupno</b>	<b>6.426.560</b>	<b>5.352.079</b>

Troškovi održavanja pogona sustava iz varijante 2 su veći, ali naprednijom tehnologijom šteti se količina potrebnog reagensa i smanjuje se količina proizvedenog opasnog otpada, čije je zbrinjavanje vrlo skupo.

Vrlo veliki troškovi održavanja, naročito troškovi zbrinjavanja pepela i ostataka određuju ukupnu ekonomsku isplativost postrojenja. Kako je prikazano u tablici ekonomske analize u Prilogu, postrojenje uz pretpostavljene parametre posluje s profitom, bez uzimanja troškova kredita. Ukoliko se u troškove ubroji i rata kredita, investicija nije isplativa.

#### 5.2.4. Prihodi energane na otpad

##### Prihodi od usluge preuzimanja otpada

Postrojenje preuzima komunalni otpad i naplaćuje uslugu zbrinjavanja istog. Cijena preuzimanja ovisi o pogonskim troškovima, iznosu prodane energije i cijeni konkurentskih načina zbrinjavanja otpada. Primjeri iz EU pokazuju kako cijena može znatno varirati (tablica 21):

Tablica 21. Cijena preuzimanja otpada u nekim zemljama EU

Država	Cijena preuzimanja otpada (EUR/t)
Belgija	56-130
Danska	40-70
Francuska	50-120
Njemačka	100-350
Italija	40-80
Nizozemska	90-180
Švedska	20-50
Velika Britanija	20-40

Na temelju europskih primjera, za analizu postrojenja odabire se cijena preuzimanja 90 EUR/t. Prihod od preuzimanja otpada prikazana je u tablici 21.

Tablica 22. Prihodi od preuzimanja otpada

Prihodi	Iznos (EUR/t)	Iznos (EUR/god)
Preuzimanje otpada	90	9.000.000

##### Prihodi od prodaje električne i toplinske energije

Prodaja električne energije u distribucijsku mrežu osigurava konstantnog kupca energije, dok se toplinska energija prodaje obližnjoj industriji tekstila, papira ili sl. Toplinska energija koja se prodaje je visoko vrijedna energija (200 °C), te može postići veću cijenu. Ovu cijenu nije moguće točno odrediti, ona se ugovara između proizvođača i kupca i nije jednoznačno određena. Za daljnju analizu uzeti će se sljedeće cijene prodane električne i toplinske energije, kako je prikazano u tablici 22 [4]:

**Tablica 23. Prihodi od prodaje električne i toplinske energije**

<b>Energija</b>	<b>EUR/kWh</b>	<b>Prodana energija (MWh/god)</b>	<b>Prihodi (EUR/god)</b>
Električna energija	0,048	36.710	1.762.080
Toplinska energija	0,024	70.000	1.680.000
<b>Ukupni prihodi od prodane energije</b>			<b>3.442.080</b>

### **Prihodi od prodaje izdvojenog metala**

Ukoliko postoji siguran kupac metala izdvojenog iz otpada (Fe i Al), troškovi izdvajanja i skladištenja se mogu isplatiti. Postrojenje godišnje može izdvojiti oko 2400 tona Fe i 400 tona Al [9]. Prihodi su prikazani u tablici 23. Potrebno je naglasiti kako troškovi ulaganja u sustav za izdvajanje metala iz pepela, te kontinuirani proces izdvajanja nosi određene troškove, koji će se pretpostaviti na visinu upravo jednaku prihodima, radi jednostavnije analize.

**Tablica 24. Prihodi od prodaje izdvojenog materijala**

<b>Materijal</b>	<b>Količina (t/god)</b>	<b>Prodajna cijena (EUR/t)</b>	<b>Prihod (EUR/god)</b>
Fe	2.400	40	96.000
Al	400	550	220.000
<b>Ukupno</b>			<b>316.000</b>

Uz date parametre koji određuju prihode i troškove, pokazuje se kako je postrojenje za izgaranje otpada na rešetki isplativo, ne uzimajući troškove kreditiranja. Detaljan tablični prikaz prihoda, troškova i ekonomskih pokazatelja nalazi se u Prilogu.

### **5.3. Potreban kadrovski sastav za vođenje i održavanje procesa**

Kako bi se odredili parametri procesa, a kasnije njima i upravljali, potrebno je znanje i iskustvo odgovornih zaposlenika. Prilikom inicijalnog određivanja parametara procesa, pretpostavlja se kako će u početku procesom upravljati stručnjaci iz tvrtke koja će isporučiti opremu. Uz njih bi budući zaposlenici tvrtke-operatera postrojenja stekli znanje za samostalno upravljanje procesom. Postupak izgaranja na rešetki najrašireniji je postupak spaljivanja otpada, te stoga postoji mnogo iskustva iz EU koja se po potrebi mogu primijeniti za dotično postrojenje. Također, proizvođačima opreme i dijelova za postrojenje u interesu je osigurati optimalnu iskoristivost opreme, što se postiže kvalitetnim prijenosom znanja kroz probni rad, stručne seminare i sl.

Budući da bi energana radila 24 sata dnevno u 3 smjene, 7 dana u tjednu, potrebno osoblje koje je potrebno za rad energane, s bruto iznosima njihovih godišnjih plaća, prikazano je u tablici 24.:

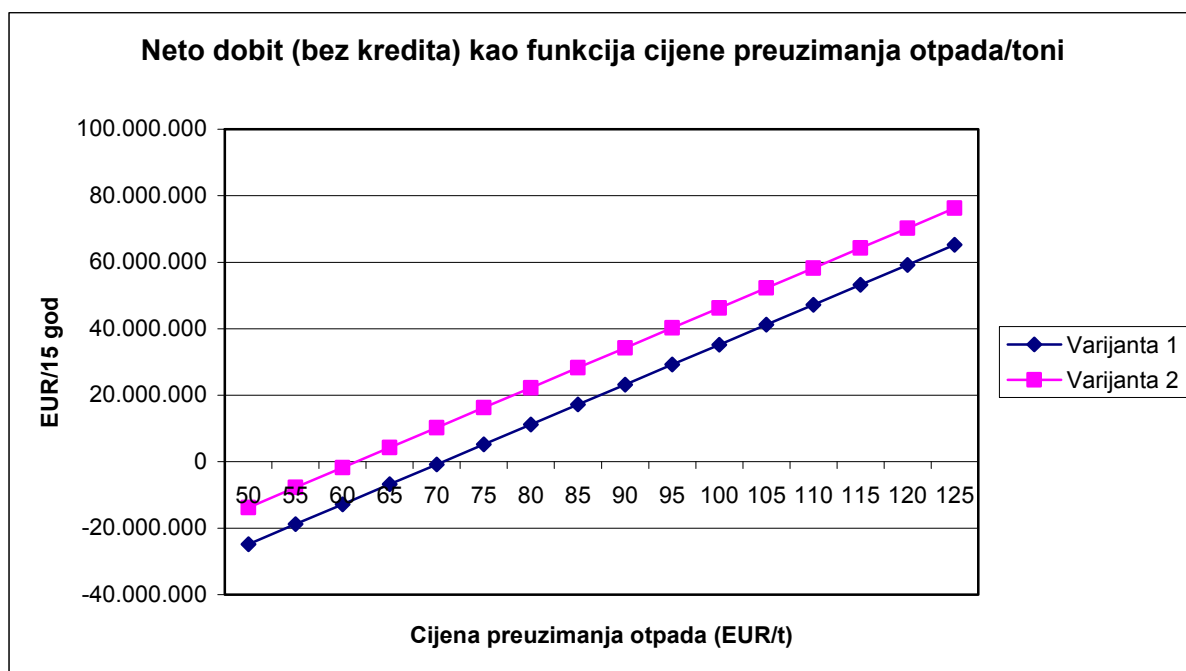
Tablica 25. Kadrovski sastav i godišnje plaće

Zanimanje	Broj (1 smjena)	Bruto godišnja plaća (EUR)
Radnik	15	201.600
Inženjeri	5	84.000
Održavanje	3	50.400
Upravitelj	1	33.600
<b>Ukupno (1 smjena)</b>	<b>24</b>	<b>369.600</b>

Za tri smjene ukupni godišnji troškovi isplate plaća iznose 1.108.000 EUR.

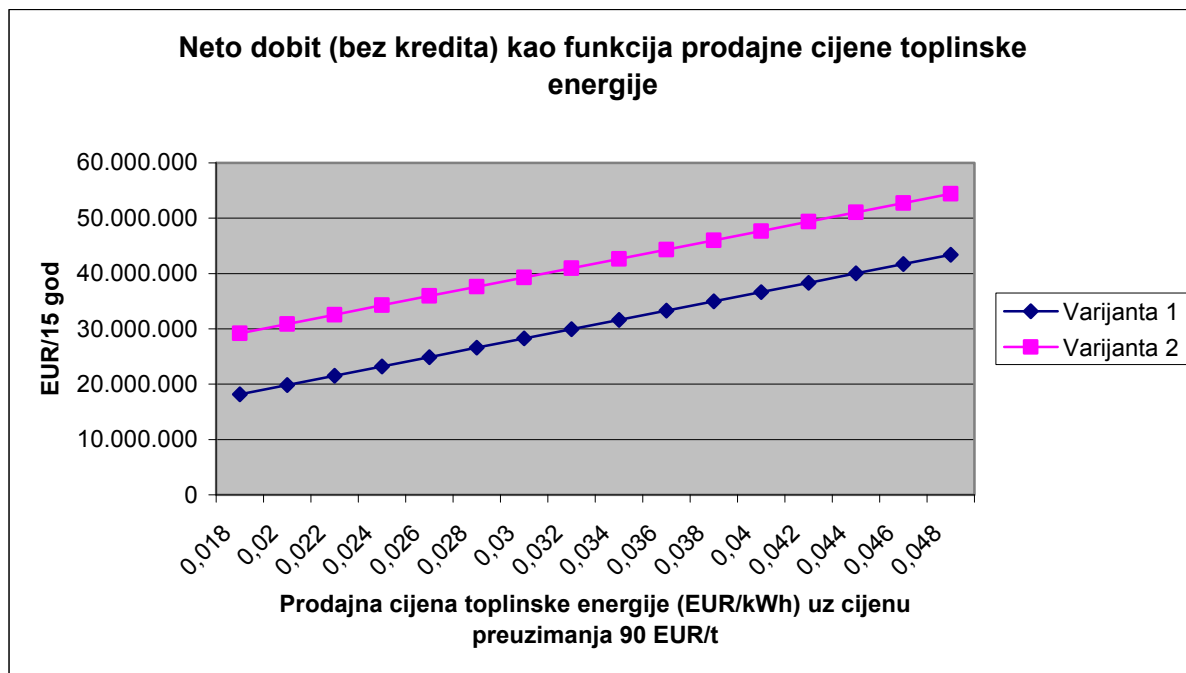
#### 5.4. Analiza osjetljivosti

Analizom osjetljivosti na promjene parametara mogu se predvidjeti određeni problemi koji mogu nastupiti tijekom životnog vijeka postrojenja.



Slika 21. Analiza osjetljivosti (cijena preuzimanja otpada)





Slika 22. Analiza osjetljivosti (cijena toplinske energije)

## **6. ZAKLJUČAK**

Postrojenja za termičku obradu otpada danas nude možda najprihvatljivije rješenje, uz relativno nisku cijenu po okoliš. Ovim radom se nastojalo pokazati kako se problem zbrinjavanja otpada ne smije gledati isključivo kao unosna poslovna prilika. Priroda ne tolerira oportunistički, stoga je od presudne važnosti prikazati problem zbrinjavanja otpada kao vrlo zamršen problem koji obuhvaća mnoge discipline i čije rješenje ne smije biti isključivo novčana dobit.

Tehnologija izgaranja na rešetki trenutno je najrasprostranjenija tehnologija za termičku obradu otpada, a koristi se više od stotinu godina. Snažan razvoj doživjele su metode za pročišćavanje dimnih plinova, što je omogućilo opstanak ove tehnologije u vremenu sve strožih zahtjeva na emisije i utjecaj na okoliš.

Pokazalo se kako ekonomska isplativost analiziranog postrojenja za izgaranje otpada ovisi o uvjetima kreditiranja. Ovi uvjeti mogu biti presudni prilikom odlučivanja o investiranju. Obje razmatrane varijante sustava pročišćavanja dimnih plinova, a naročito varijanta 2, dokazuju kako se bez problema mogu zadovoljiti norme emisija stakleničkih plinova. Varijanta 2, iako inicijalno skuplja, manje utječe na okoliš tijekom eksploatacije uz niže troškove održavanja, te je nakon 25 godina neto sadašnja vrijednost varijante 2 veća od varijante 1.

Model javno-privatnog vlasništva jedno je od mogućih rješenja, budući da su uvjeti kreditiranja povoljniji kada se radi o županijama ili gradovima, koje bi u takvom modelu predstavljale javni dio vlasništva.

Smatram da su postrojenja za termičku obradu otpada u ovom trenutku jedno od mogućih rješenja, koja minimiziraju vlastiti negativni utjecaj na okoliš uz očitu korist. Sutra će se pronaći nova, bolja tehnologija koja će imati bolji omjer koristi i nedostataka. Do tada, treba aktivno pristupiti problemu s tehnologijama koje su nam danas na raspolaganju.

## REFERENCE

- [1] Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European Commission, 2006. (<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)
- [2] <http://www.jaeg.com>
- [3] <http://www.gec.jp>
- [4] Pravilnik o načinima i uvjetima termičke obrade otpada, Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, „Narodne novine“, br. 178/04 i 111/06
- [5] <http://www.aee-vonrollinova.ch>
- [6] <http://www.martingmbh.de>
- [7] <http://www.kepplerseghers.com>
- [8] Studija o utjecaju na okoliš PTTO u gradu Zagrebu, NOVUM/UTW-EPZ, 2006.
- [9] Procjena investicijskih troškova sa komparativnom analizom županijskih i regionalnih koncepata obrade otpada, Brodarski institut d.o.o.
- [10] Case studies on waste minimisation practices in Europe, European Environment Agency, 2002.
- [11] <http://www.cistoca.hr/>
- [12] Achternbosch, M., Richers, U.: Material Flows and Investment Costs of Flue Gas Cleaning Systems of Municipal Solid Waste Incinerators, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2002.
- [13] Tchobanoglous, G., Kreith, F., Handbook of solid waste management, McGraw-Hill Professional, 2002.
- [14] Rübner, K., Haamkens, F., Linde, O., Use of municipal solid waste incinerator bottom ash as aggregate in concrete, European Geosciences Union, 2007.
- [15] Zakon o vodama, Vlada Republike Hrvatske, 1996.
- [16] Johnke, B., Emissions from Waste Incineration
- [17] Uredba o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i pobližim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš ugljikovog dioksida, Vlada Republike Hrvatske, 2007.
- [18] EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook - 2007, European Environment Agency, 2007.

- [19] Uredba o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i pobližim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš oksida sumpora izraženih kao sumporov dioksid i oksida dušika izrađenih kao dušikov dioksid, Vlada Republike Hrvatske, 2007.

## **PRILOG**

Kao dio ovog rada prilaže se i tablični izračun tehno-ekonomske analize za varijante 1 i 2:

- Ulazni podaci
- Tablični izračun za varijantu 1
- Tablični izračun za varijantu 2