

Utjecaj čestica otpadnog pepela ugljena s odlagališta otpada na okoliš

Pribanić, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:574960>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

Utjecaj čestica otpadnog pepela ugljena s odlagališta otpada na okoliš

The Impact of Coal Waste Ash Particles from Landfills on the Environment

SEMINARSKI RAD

Karla Pribanić

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu

(Undergraduate Study of Environmental Science)

Mentor:

Doc.dr.sc. Kristina Pikelj

Komentor:

Dr.sc. Maja Ivanić

Zagreb, 2020.

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. Termoelektrane na ugljen.....	2
2.1. Ugljen.....	3
2.2. Proizvodi izgaranja ugljena (eng. <i>Coal Combustion Products, CCP</i>).....	5
2.2.1. Leteći pepeo.....	6
2.2.2. Reciklirani CCP proizvodi.....	7
3. Spaljivanje komunalnog otpada.....	9
3.1. Otpad nastao spaljivanjem komunalnog otpada.....	11
3.2. MSWI otpad i njihov potencijalni utjecaj na okoliš.....	13
3.2.1. Procjedna voda.....	13
3.2.2. Plin.....	15
3.2.3. Razvijanje topline.....	15
3.2.4. Erozija prašine.....	16
3.2.5. Recikliranje otpadnog pepela.....	17
4. Cilj odlaganja otpadnog pepela.....	20
5. Zaključak.....	22
6. LITERATURA.....	23
7. SAŽETAK.....	26
8. SUMMARY.....	27

1. UVOD

Termoelektrane na ugljen jedan su od glavnih svjetskih izvora električne energije gdje se izgaranjem ugljena kemijskim reakcijama oslobađa energija dostatna za proizvodnju 40% svjetske potrebe za električnom energijom (Petrović, 2019). Nakon svih procesa prije, tijekom i nakon izgaranja ugljena preostaje mnogo otpadnog materijala koji je potrebno prikladno odložiti kako ne bi negativno utjecao na okoliš i ljude. U pripremi za spaljivanje ugljen je prvo potrebno iskopati i očistiti, a nakon spaljivanja preostaju pepeo i šljaka, negoreći otpadni materijal ugljena. Ukoliko se takav otpad neprikladno odloži, oborine mogu uzrokovati procjeđivanje kemijskih elemenata u okolno tlo i podzemne vode, dok vjetar može uzrokovati eroziju, prijenos i taloženje čestica otpadne prašine s odlagališta u okoliš. Time postoji opasnost onečišćenja okoliša i ugrožavanja zdravlja ljudi.

Otpadni pepeo ugljena sadrži leteći pepeo ili eng. *“fly ash”* i šljaku, krupniji otpadni materijal koji se nakuplja na dnu kotla spalionice. Leteći pepeo je opasan otpad i šteti okolišu jer sadrži teške metale i druge štetne tvari. Otpadni pepeo ugljena odlaže se na za to predviđena odlagališta otpada koja pokušavaju minimizirati njegov utjecaj na okoliš.

Recikliranje otpadnog pepela i njegovi proizvodi također predstavljaju opasnost okolišu i ljudima. Zbog sastava otpadnog materijala koji se koristi kao sirovina, proces recikliranja i međudjelovanje recikliranih proizvoda i okoliša mogu istim putem zagaditi površinske i podzemne vode.

Još jedan značajan izvor otpadnog pepela i šljake je spaljivanje komunalnog otpada. Industrijske zemlje sve više spaljuju komunalni otpad kao način kontrole njegovog volumena zbog stalnog porasta proizvodnje otpada diljem svijeta. Volumen komunalnog otpada smanji se za 90% spaljivanjem. Spaljivanje također pretvara kemijsku energiju pohranjenu u otpadu u upotrebljiv oblik, obično u obliku električne energije ili topline (pare). Ova pretvorba se obično naziva pretvaranje otpada u energiju (eng. *waste to energy*, WTE) (Kirby i Rimstid, 1993).

Tema ovog seminara je utjecaj čestica otpadnog pepela ugljena s odlagališta otpada na okoliš. Također se opisuje i otpadni pepeo nastao izgaranjem komunalnog otpada zbog slične prirode tih tipova pepela.

2. Termoelektrane na ugljen

Termoelektrane na ugljen i dalje su jedan od glavnih svjetskih izvora električne energije unatoč naporima da se zamijene obnovljivim izvorima energije. To će i nastaviti biti u idućim desetljećima zbog povećane potražnje za energijom, kako u zemljama u razvoju, tako i u industrijski razvijenim zemljama.

Najveće svjetske termoelektrane imaju kapacitet od 5GW. Od njih 11, sljedećih 7 koriste ugljen kao gorivo; TE Taichung u Tajvanu, TE Tuoketuo, TE Waigaoqiao, TE Guodian Beilun, TE Guohua Taishan i TE Jiaxing u Kini, te TE Bełchatów u Poljskoj. TE Bełchatów u Poljskoj ujedno je i najveća europska termoelektrana, te peta najveća u svijetu ([URL1](#)).

Termoelektrane na ugljen na svjetskoj razini godišnje proizvedu procijenjenih 780 Mt otpadnog pepela ugljena (WWCCPN 2011). Leteći pepeo se skladišti ili odlaže na deponije i lagune, dok se manje od 50% svjetske proizvodnje tog otpada ponovno iskorištava (WWCCPN, 2011).

Pepeo ugljena je opasan otpad jer ima veliki potencijal ispustiti u okoliš elemente koji mogu imati negativan utjecaj na njega. Zbog visokih temperatura tijekom izgaranja, fazne transformacije mineralne tvari ugljena uzrokuju sklonost procjeđivanja elemenata iz originalnog matriksa ugljena u kontaktu s vodom na odlagalištima (Jones, 1995). Tlo zadržava onečišćujuće tvari poput teških metala i soli, ali se one mogu procijediti u podzemne vode, što predstavlja opasnost za zdravlje ljudi i u površinske vode, poput rijeka i jezera, gdje šteti vodenim organizmima. Tako i proizvodi od recikliranog otpadnog pepela ugljena, kao što su cement, beton i građevinski materijal, mogu u svojem sastavu nositi tragove teških metala i soli koji se mogu vremenom ispirati u okoliš ako dođu u kontakt s vodom. Zato je potrebno procijeniti ekološku učinkovitost tih proizvoda prije nego se pošalju na tržište.

2.1. Ugljen

Ugljen je crna ili smeđa sedimentna stijena koja nastaje nakupljanjem organskog materijala (uglavnom biljni materijal, u manjoj količini životinjski) u močvarnom okruženju što dovodi do stvaranja treseta. Treset biva zatrpan okolnim sedimentom i pod utjecajem visoke temperature i tlaka, geokemijskim postupkom koji se naziva pougljenjivanje, organski material se pretvara u ugljen (Miller, 2011).

Ugljen se sastoji od organskog i anorganskog materijala. Organski materijal podrazumijeva prvenstveno ugljik, vodik i kisik, te manje količine dušika i sumpora. Anorganski materijal čini velik broj elemenata u obliku minerala i organski vezanih elemenata (Miller 2011). Mineralne skupine ugljena su; minerali glina, karbonatni minerali, sulfidi, disulfidi, silicijev dioksid i sulfati. Elementi u tragovima se također mogu pojaviti u organskom i anorganskom obliku u ugljenu. Ovisno o području nastanka ugljena, pa čak i u onima iz istog područja (zbog različitih uvjeta u okruženju treseta), zastupljeni su različiti elementi u njegovom sastavu (Rađenović 2006). U **Tablici 1.** Prikazani su sažeti rezultati istraživanja o raspodijeli elemenata u tragovima u ugljenu koje su proveli Querol i sur. (1995). No prema Vejahati i sur. (2010), nema općeg pravila u pojavi tih elemenata kod različitih vrsta ugljena.

Tablica 1. Raspodjela minerala i elemenata u tragovima u ugljenu (Querol i sur., 1995).

Affinity	Mineral Group	Mineral Type	Elements
Inorganic	Clay minerals and feldspars	Kaolinite	Al, Ba, Bi, Cr, Cs, Cu, Ga, K, Li, Mg, Na, Ni, P, Pb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, U, V, Y and rare earth elements
		Montmorillonite	
	Iron sulphides	Pyrite	As, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mo, Ni, Pb S, Sb, Se, Ti, W and Zn
		Spharelite	
	Carbonates	Calcite, Dolomite	Ca, Co and Mn
Sulfates		Ba, Ca, Fe and S	
Heavy minerals		B	
Organic			N, S, Be, B, Ge, V, W and Zr

2.2. Proizvodi izgaranja ugljena (eng. *Coal Combustion Products, CCP*)

Ugljen je zapaljiv material i neobnovljiv izvor energije. Pri njegovom izgaranju, egzotermnim reakcijama ugljik, sumpor i vodik, kao gorivi elementi ugljena, reagiraju s kisikom i tvore odgovarajuće okside uz što se oslobađa energija-toplina koja se kasnije pretvara u električnu energiju. Oksidi koji se ovim reakcijama proizvode su ugljikov monoksid (CO), ugljikov dioksid (CO₂), sumporov dioksid (SO₂) i voda (H₂O). Nakon tih reakcija preostaje negorivi dio ugljena kao otpadni materijal. U njega spadaju leteći pepeo (eng. “*fly ash*”), donji pepeo (eng. “*bottom ash*”), kotlovska šljaka (eng “*boiler slag*”) i ostaci odsumporavanja dimnih plinova (eng. “*flue-gas desulfurization residues*”). Leteći pepeo je sitan, praškasti materijal, većinom sastavljen od silicijevog dioksida (SiO₂), koji doleti u dimnjake pogona i skuplja se filterima. On predstavlja najveći udio CCP-a. Donji pepeo je grubo zrnati materijal koji se nakuplja na dnu kotla. Kotlovska šljaka je staklasti, zrnati materijal - rastopljeni oblik ugljenog pepela. Materijal odsumporavanja dimnih plinova je ostatak procesa reduciranja emisija sumporovog dioksida (SO₂) uz pomoć kalcija (Ca). U njega spadaju čvrsti ostaci sumpora; kalcijev sulfit (CaSO₃ x H₂O) i kalcijev sulfat (gips, CaSO₄ x 2H₂O). Otpadni material izgaranja ugljena potrebno je prikladno odložiti jer može uzrokovati onečišćenje okoliša ili se može koristiti kao sirovina za daljne industrijske procese i proizvode (Speight, 2012).

Izgaranje ugljena uzrokuje promjenu njegovog sastava, što znači da otpadni materijal ugljena ima različit sastav od ugljena prije spaljivanja. To se događa zbog transformacije organskog i anorganskog sastavnog materijala ugljena uslijed visoke temperature izgaranja (≥1000°C). Organski materijal se obično isparava, pa zatim adsorbira na sitne čestice letećeg pepela pri nižim temperaturama. Minerali obično ostanu u pepelu. CCP su općenito bogati elementima u tragovima koji procjeđivanjem mogu dospjeti u okoliš (Vejahati i sur., 2010; Miller, 2011; Speight, 2012).

2.2.1. Leteći pepeo

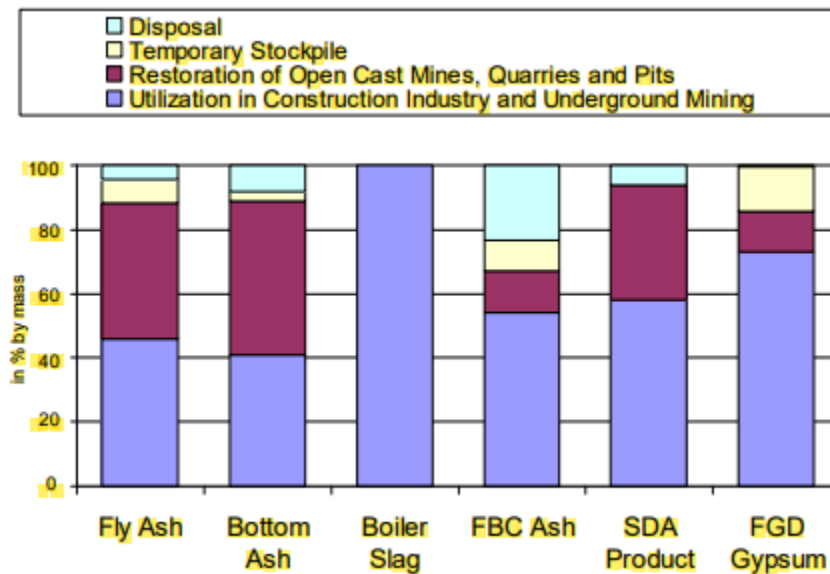
Leteći pepeo je heterogeni materijal zato što elementi u njemu nisu ravnomjerno raspoređeni. Mineralni udio ugljena prolazi procese transformacije tijekom i nakon izgaranja, kao što su raspadanje, hlapljene, stapanje, nakupljanje i kondenzacija (Jones, 1995). Nakon izgaranja se dimni plin hladi i sumpor se, uz druge hlapive elemente (As, B, Hg, Cl, Cr i Se), kondenzira na površini letećeg pepela i oni tvore spojeve različite (obično visoke) topivosti. Najčešće se sumpor povezuje s kalcijem. Rezultat toga je veliki gradijent koncentracije elemenata unutar čestica letećeg pepela (Kukier i sur., 2003) i gradijent ispiranja elemenata vodom. Elementi kondenzirani na površini čestica letećeg pepela su skloniji ispiranju u vodenom okruženju nego što su to elementi u središtu čestica. Kalcij (Ca) i sulfatni ion (SO_4^{2-}) se najviše oslobađaju u procjednu vodu, zatim klor (Cl), natrij (Na) i kalij (K) (Hjelmar, 1990) u manjim količinama. Na kraju slijedi velik broj elemenata u tragovima, čija pokretljivost u vodi uvelike ovisi o pH suspenzije letećeg pepela u vodi (de Groot i sur., 1989). Odnos S i Ca bitno utječe na pH te suspenzije i time na procjeđivanje elemenata iz letećeg pepela (Iquierdo i Querol, 2012).

Elemente u sastavu letećeg pepela dijelimo na glavne i one u tragovima. Glavni elementi su Al, Ca, Fe, Mg, K, Na, Si, S i Ti. Elementi u tragovima su Sb, As, Ba, Be, B, Cd, Cr, Cs, Co, Cu, F, Pb, Mn, Hg, Mo, Ni, elementi rijetkih zemalja (eng. *Rare Earth Elements*, REE), Rb, Se, Tl, Th, W, U, V, Zn (Iquierdo i Querol, 2012). U određenim uvjetima, neki od elemenata u tragovima će se pojaviti u većoj koncentraciji u procjednoj vodi od nekih glavnih elemenata.

Iako je sastav ugljena pokazatelj koji bi se elementi mogli pojaviti u letećem pepelu nastalom njegovim izgaranjem, on ne određuje koncentraciju tih elemenata u letećem pepelu. Ovisno o nizu parametara, kao što su sastav ugljena, temperatura izgaranja, sastav letećeg pepela, postupak ispiranja čestica vodom, mjesto primjene i pH suspenzije letećeg pepela u vodi, određeni elementi kada dođu u kontakt s vodom se mogu procijediti iz odloženog otpadnog pepela u njegov okoliš i onečistiti ga (Iquierdo i Querol, 2012).

2.2.2. Reciklirani CCP proizvodi

Leteći pepeo već se godinama uspješno koristi u proizvodnji cementa, betona i građevinskih materijala, i u manjoj količini zeolita i geopolimera. Najčešće se koristi kao sirovina za klinker u proizvodnji portland cementa (ECOBA). Leteći pepeo je *pozzolanski* materijal, što znači da će se stvrdnuti pri dodiru s vodom, ali tek nakon aktiviranja alkalnim reagensom kao što je vapno (živo vapno (kalcijev oksid, CaO), gašeno vapno (kalcijev hidroksid, Ca(OH)₂)). Ostali CCP-i se također recikliraju. **Slika 1.** uspoređuje postotak iskorištenja i odlaganja CCP-a. Iskorištenje letećeg pepela u građevinskoj industriji je oko 46%, donjeg pepela oko 41%, kotlovska šljaka se u potpunosti iskorištava u izgradnji prometnica kao drenažni sloj, dok se ostaci odsumporavanja dimnih plinova većinski koriste za pjeskarenje i kao agregat u betonu (ECOBA). Eng. *Flue Gas De-Sulfurisation* (FGD) *Gypsum* se u industriji gipsa koristi kao zamjena za prirodni gips i ostatak je odsumporavanja dimnog plina, kao i Eng. *Fluidised.Bed Combustion* (FBC) *Ash* i *Semi-Dry Absorption* (SDA) *Product*.



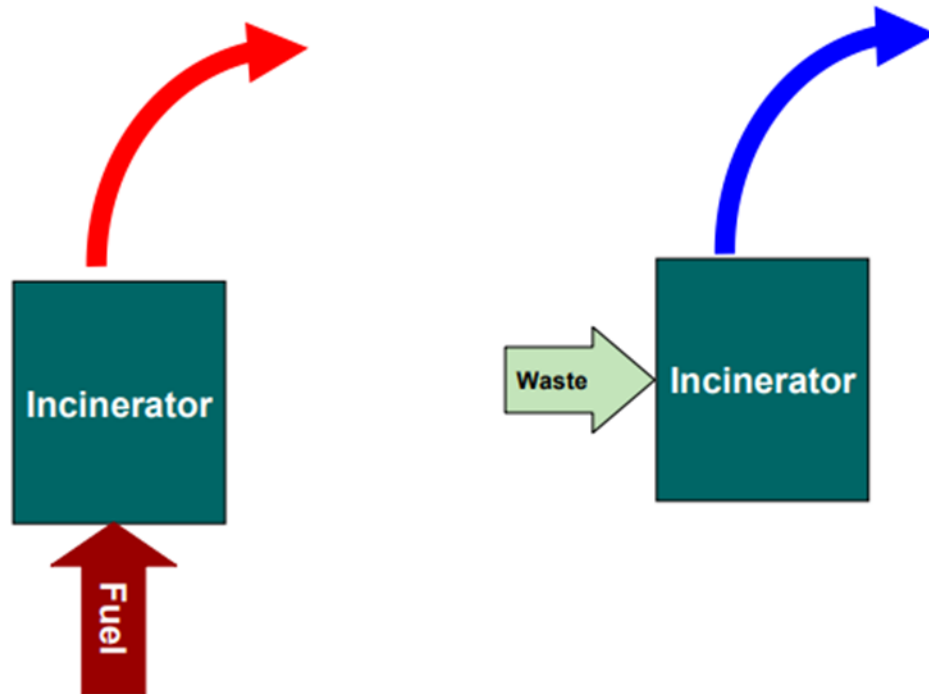
Slika 1. Iskorištenje i odlaganje CCP-a 2001 (EU 15), (ECOBA)

CCP-i se često koriste kao zamjena za prirodne resurse. Ekološki su korisni jer smanjuju potrebu za iskorištavanjem prirodnih resursa, potrošnjom energije i raznim emisijama (npr. CO₂) u atmosferu u proizvodnji sirovine. Uporaba letećeg pepela u cementu umanjuje potrebu za proizvodnjom cementnog klinkera i time se također umanjuje ispuštanje stakleničkih plinova. Za proizvodnju jedne tone cementnog klinkera, cementna industrija ispušta jednu tonu CO₂ u atmosferu, što se u potpunosti zaobiđe upotrebom zamjenske sirovine-letećeg pepela (ECOBA).

Međutim, proizvodi od recikliranog otpadnog pepela ugljena mogu u svojem sastavu nositi tragove teških metala i soli koji se mogu ispirati u okoliš ako dođu u kontakt s vodom. Zato je potrebno poznavati sirovinu koja se koristi i procijeniti ekološku učinkovitost tih proizvoda prije nego se pošalju na tržište.

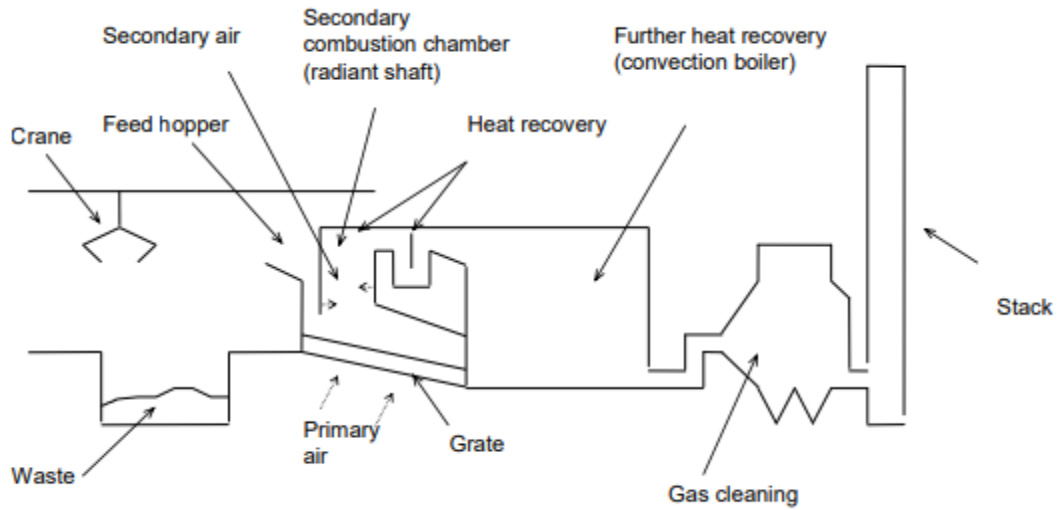
3. Spaljivanje komunalnog otpada

Komunalni otpad je otpad iz kućanstava i komercijalnih organizacija. Sastoji se od mješavine zapaljivih i nezapaljivih materijala kao što su papir, plastika, staklo, hrana, kućanski aparati i slični materijali. Komunalni otpad se spaljuje zbog smanjenja njegovog volumena, uštede na prostoru i cijeni izgradnje i održavanja odlagališta i financijske dobiti putem proizvodnje energije. Energija koja se proizvodi u procesu spaljivanja može se koristiti kao gorivo za drugi proces izgaranja ili za proizvodnju električne energije ([URL2](#)). **Slika 2.** prikazuje procesnu shemu spaljivanja komunalnog otpada.



Slika 2. Procesna shema spaljivanja komunalnog otpada s proizvodnjom energije (lijevo) i bez proizvodnje energije (desno) ([URL2](#)).

Spaljivanje komunalnog otpada provodi se na različite načine pri čemu se koriste različite peći i tehnike izgaranja. **Slika 3.** prikazuje tipičnu spalionicu komunalnog otpada s izgarajućom rešetkom i jedinicom za povrat topline.



Slika 3. Sastavni dijelovi tipične spalionice komunalnog otpada s izgarajućom rešetkom i jedinicom za povrat topline ([URL2](#)).

3.1. Otpad nastao spaljivanjem komunalnog otpada

Procesom spaljivanja komunalnog otpada nastaju različiti čvrsti i tekući otpadni materijali, te plinoviti otpad. Od otpadne mase na mokroj osnovi preostaje samo oko jedna četvrtina čvrstog otpadnog materijala. Ta količina čvrstih ostataka spaljivanja odgovara jednoj desetini početne količine otpada. Tipičan otpad spalionice komunalnog otpada (eng. *Municipal Solid Waste Incinerator*, MSWI) s izgarajućom rešetkom su:

- Leteći pepeo ili eng. *“fly ash”*, sitne čestice u dimnim plinovima nizvodno od jedinica za povrat topline. Uklanja se prije bilo kakve daljnje obrade plinovitih otpadnih voda. Količina letećeg pepela iznosi 1–3% mase mokrog otpada.
- Donji pepeo ili eng. *“bottom ash”* sastoji se od grubo zrnatog materijala neizgorjele organske tvari prikupljene na izlazu iz komore za izgaranje.
- Materijal prosijan kroz rešetku, sitan materijal koji prolazi kroz rešetku i sakuplja se na dnu komore za izgaranje. Prosijani materijal se obično kombinira s donjim pepelom, tako da u većini slučajeva nije moguće odvojiti ta dva tipa otpada. Oni zajedno obično predstavljaju 20-30% mase izvornog mokrog otpada.
- Kotlovska šljaka je staklasti, zrnati materijal - rastopljeni oblik ugljenog pepela. On može predstavljati do 10% mase izvornog mokrog otpada.
- Ostaci kontrole onečišćenja zraka (eng. *Air Pollution Control*, APC) uključuju čestice uhvaćene nakon ubrizgavanja reagensa u jedinice za obradu kiselih plinova prije ispuštanja otpadnih plinova u atmosferu. Ovaj ostatak može biti u krutom, tekućem ili muljevitom obliku, ovisno o tome jesu li za kontrolu onečišćenja zraka korišteni suhi, polusuhi ili mokri postupci. APC ostaci čine 2% do 5% izvornog mokrog otpada (Sabbas i sur., 2003).

Tablica 2. prikazuje raspon koncentracija svih elemenata koje sadrže tipični ostaci spalionice komunalnog otpada (IAWG, 1997). Leteći pepeo i APC ostaci sadrže visoke koncentracije teških metala, soli kao i organskih mikro-onečišćivača. Otpad željeza i drugih metala obično se dobiva iz donjeg pepela i često ponovno koristi u industriji. Brojne europske zemlje pokušavaju maksimalno iskoristiti taj metalni otpad. Ukoliko njegova uporaba nije moguća zbog pravnih ograničenja ili nekih drugih razloga (kao što je dovoljan izvor prirodnih sirovina), ti se ostaci moraju zbrinuti na ekološki održiv način (Sabbas i sur., 2003).

Tablica 2. Raspon koncentracija (mg/kg) svih elemenata koje sadrže tipični ostaci spalionice komunalnog otpada (IAWG, 1997).

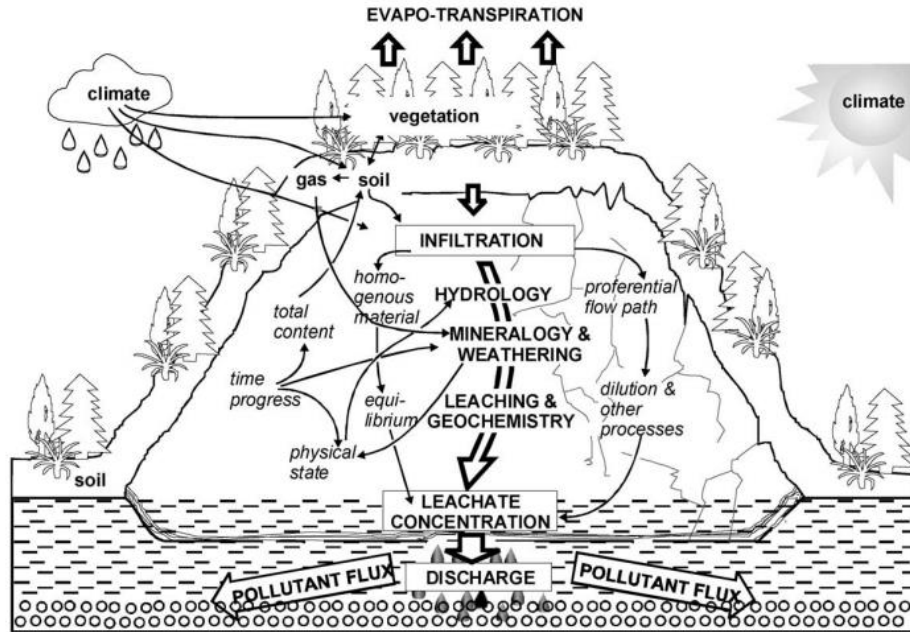
Element	Concentration (mg/kg)			
	Bottom ash	Fly ash	Dry/semi-dry APC residues	Wet APC residues
Al	22,000–73,000	49,000–90,000	12,000–83,000	21,000–39,000
As	0.1–190	37–320	18–530	41–210
Ba	400–3000	330–3100	51–14,000	55–1600
Ca	370–123,000	74,000–130,000	110,000–350,000	87,000–200,000
Cd	0.3–70	50–450	140–300	150–1400
Cl	800–4200	29,000–210,000	62,000–380,000	17,000–51,000
Cr	23–3,200	140–1100	73–570	80–560
Cu	190–8200	600–3200	16–1700	440–2400
Fe	4,100–150,000	12,000–44,000	2600–71,000	20,000–97,000
Hg	0.02–8	0.7–30	0.1–51	2.2–2300
K	750–16,000	22,000–62,000	5900–40,000	810–8600
Mg	400–26,000	11,000–19,000	5100–14,000	19,000–170,000
Mn	80–2400	800–1900	200–900	5000–12,000
Mo	2–280	15–150	9–29	2–44
Na	2800–42,000	15,000–57,000	7600–29,000	720–3400
Ni	7–4200	60–260	19–710	20–310
Pb	100–13,700	5300–26,000	2500–10,000	3300–22,000
S	1000–5,000	11,000–45,000	1400–25,000	2700–6000
Sb	10–430	260–1100	300–1,100	80–200
Si	91,000–308,000	95,000–210,000	36,000–120,000	78,000
V	20–120	29–150	8–62	25–86
Zn	610–7800	9000–70,000	7000–20,000	8100–53,000

3.2. MSWI otpad i njihov potencijalni utjecaj na okoliš

Odloženi MSWI otpad prolazi procese koji na mikrostrukturnoj razini izazvaju niz modifikacija otpada. Na makroskopskoj razini kombinacija različitih procesa uglavnom rezultira proizvodnjom procjednih voda, plina i povišenjem temperature egzotermnim reakcijama. Procjedna voda, plin, erozija prašine s odlagališta i povišena temperatura imaju potencijalno negativni utjecaj na okoliš (Sabbas i sur., 2003).

3.2.1. Procjedna voda

Ispiranje može biti kemijsko i mehaničko. Mehaničko ispiranje odnosi se na uklanjanje otpadnih čestica pepela u suspenziji, dok je kemijsko ispiranje otapanje topivih sastojaka iz čvrste faze u otapalo. Ispiranje nastaje kao posljedica kemijskih reakcija koje se odvijaju između pojedinih otpadnih čestica pepela i vode koja prolazi kroz te čestice (voda je transportni medij zagađivača). Klimatski uvjeti i vegetacija (npr. oborine, sunčevo zračenje, temperatura, isparavanje, evapotranspiracija, vjetar itd.) kao i vrsta i morfologija površine na kojoj se nalazi odlagalište pepela spada među glavne varijable koje treba uzeti u obzir u vodnoj bilanci. Shema utjecaja okoliša na procjeđivanje vode prikazana je na **Slici 4**. Mjesto primjene tada modificira obrazac infiltracije vode kao rezultat fizikalnih i hidroloških karakteristika površinskog sedimenta. Dakle, obrazac infiltracije vode ovisi o homogenosti, poroznosti, propusnosti i prostornom kapacitetu sedimenta kroz koji prolazi, kao i o već postojećim putevima protoka (Sabbas i sur., 2003).



Slika 4. Shematski prikaz vodne bilnce i geokemijskih procesa i čimbenika koji utječu na ispiranje onečišćujućih tvari iz odlagališta otpadnog pepela u okoliš (Sabbas i sur., 2003).

Potencijalni utjecaj ispiranja otpadnih čestica u okoliš uključuje onečišćenje tla, podzemnih voda i ostalih vodenih površina. Do toga može doći tijekom privremenog skladištenja, obrade ili ponovne uporabe, kao i tijekom konačnog odlaganja MSWI otpada. Potrebno je uzeti u obzir ponašanje ispiranja zagađivača, uvjete okoliša u svakoj fazi i njihove varijacije tijekom vremena.

Utjecaj onečišćujućih čestica ovisi o brzini kojom se ispiranje odvija, te vrsti i koncentraciji otopljenih tvari. Elementi i spojevi koji se ispiranjem iz MSWI otpada smatraju potencijalno opasnim onečišćivačima su As, Al, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Br⁻, Cl⁻, CN⁻, F⁻, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻ i SO₄²⁻ (Sabbas i sur., 2003).. Dakle, potrebno je usporediti njihovu koncentraciju u procjednoj vodi sa specifičnim kriterijima kvalitete podzemne vode. Budući da do sada nisu predložene međunarodne smjernice za podzemne vode, primjenjuju se međunarodni kriteriji kakvoće pitke vode (EU Direktiva o pitkoj vodi, 1998 i WHO kriteriji o pitkoj vodi, 1993) sve do donošenja posebne direktive o podzemnim vodama (Sabbas i sur., 2003).

3.2.2. Plin

Proizvodnja plina na odlagalištima MSWI otpada može biti biotske ili abiotske prirode. Nizak udio biorazgradivog organskog ugljika u MSWI otpadu općenito dovodi do proizvodnje znatno niže količine bioplina u usporedbi s plinom odlagališta komunalnog otpada. Suprotno tome, u brojnim studijama su zabilježeni dokazi o značajnom stvaranju abiotskog plina (Sabbas i sur., 2003). Abiotski plin nastaje oksidacijom uz prisutnost vode i elementarnih metala, uključujući Al, Fe i Cu. Prema tome, kao što je prethodno uočeno za proizvodnju procjednih voda, i za proizvodnju plina se moraju uzeti u obzir različiti značajni parametri za ravnotežu vode i kemijska svojstva otpadnog materijala. Aluminijski je glavni sastojak donjeg pepela i također je značajno koncentriran u letećem pepelu i APC ostacima. On se smatra glavnim elementom odgovornim za proizvodnju abiotskog plina zbog svoje visoke topljivosti pri $\text{pH} > 9,5$ i zbog svojeg nižeg redoks potencijala u usporedbi s drugim elementima (Sabbas i sur., 2003). Osim toga, značajan udio aluminijskog u MSWI otpadu je u elementarnom obliku, koji se može podvrgnuti sljedećim redoks reakcijama, što dovodi do stvaranja plinovitog vodika;

$$2\text{Al}^0 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2, \quad \text{Al}^0 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AlOOH} + 1.5 \text{H}_2 \quad \text{i} \quad \text{Al}^0 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 1.5 \text{H}_2.$$

Proizvodnja plina javlja se kod donjeg pepela i APC ostataka kao rezultat hidratacije aluminijskog. Međutim, kemija aluminijske korozije nije u potpunosti razjašnjena zbog varijabilnosti lokalnih uvjeta odlagališta otpada (Sabbas i sur., 2003).

3.2.3. Razvijanje topline

Nekoliko studija je pokazalo da mnoge egzotermne reakcije na mjestima skladištenja donjeg pepela kod odlagališta MSWI otpada mogu uzrokovati povišenje temperature do 90°C (Sabbas i sur., 2003). Toplina se razvija kao rezultat različitih egzotermnih reakcija, poput hidratacije alkalijskih i zemnoalkalijskih oksida, korozije metala i karbonizacije portlandita (kalcij hidroksid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, oksidni mineral) (Sabbas i sur., 2003).

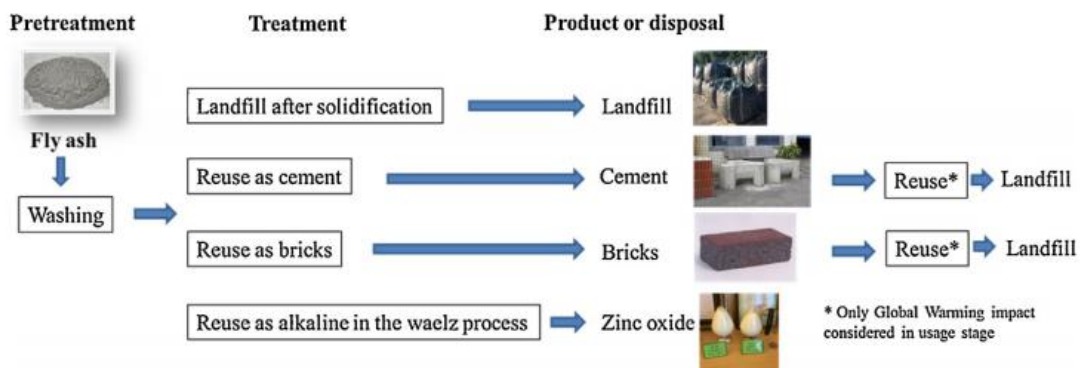
3.2.4. Erozijska prašina

MSWI otpad sadrži sitne čestice veličine do 74 µm koje čine 1–10% donjeg pepela, dok APC ostaci imaju raspodjelu veličine čestica između 0,001 i 1 mm. Čestice sitnog donjeg pepela obično sadrže kloride i sulfatne soli, kao i teške metale poput Pb, Cu i Zn (IAWG, 1997). Sitne čestice koje se lako prenose zrakom dovode do disperzije onečišćujućih tvari, što može dovesti do onečišćenja tla i zdravstvenih rizika za izložene osobe (nezaštićene radnike i javnost). Da bi se umanjila ili spriječila erozijska prašina, donji i leteći pepeo se obično održavaju mokrima (5–15% vlage) i transportiraju u pokrivenim i nepropusnim kamionima (Sabbas i sur., 2003).

3.2.5. Recikliranje otpadnog pepela

Leteći pepeo MSWI ima potencijal za recikliranje jer sadrži velike količine kalcija, silicija i aluminija koji se koriste u proizvodnji cementa, agregata i opeke (Chang i sur., 2009). Također je *pozzolanski* materijal, što znači da će se stvrdnuti pri dodiru s vodom, ali tek nakon aktiviranja alkalnom reagensom kao što je vapno (živo vapno (kalcijev oksid, CaO), gašeno vapno (kalcijev hidroksid, Ca(OH)₂). Međutim, kloridne soli su također jedan od glavnih reakcijskih produkata letećeg pepela MSWI iz uređaja za ubrizgavanje vapna. Vapno neutralizira kisele plinove dimova koji nastaju tijekom spaljivanja otpada. Kloridne soli sprječavaju ponovnu izravnu upotrebu građevinskog materijala zbog kloridne korozije. Stoga leteći pepeo MSWI koji se reciklira za ponovnu upotrebu kao građevinski materijal treba prethodno tretirati pranjem vodom kako bi se koncentracije klorida smanjile ispod dopuštenih razina, ovisno o potrebnim konačnim koracima recikliranja (Huang i sur., 2016).

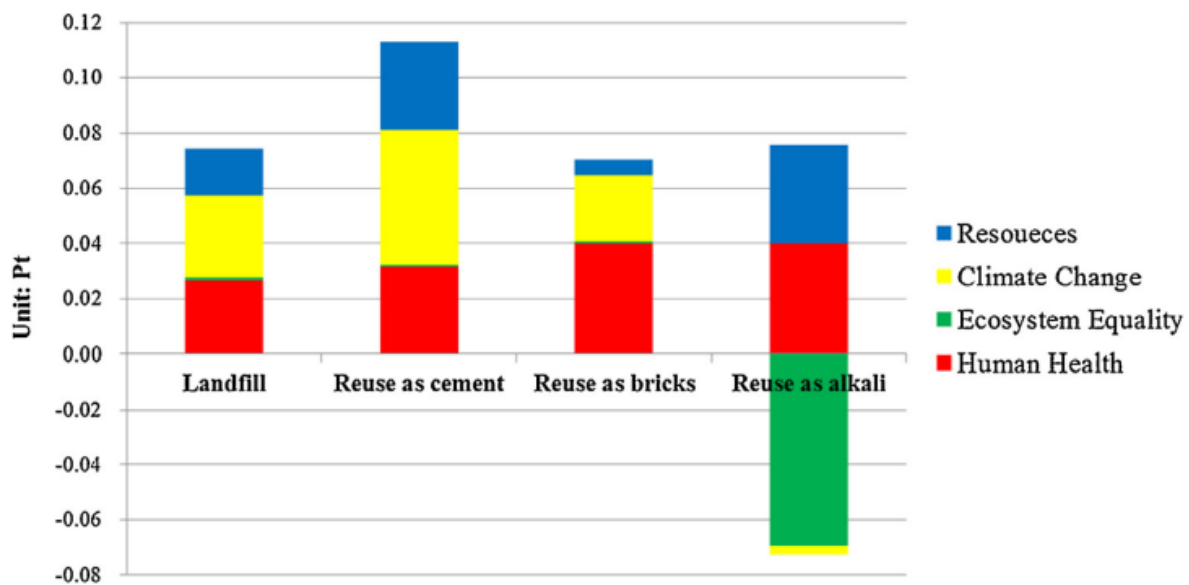
U istraživanju Huang i sur. (2016) u Tajvanu uspoređena su četiri načina ponovnog korištenja letećeg pepela, te je procijenjen njihov utjecaj na okoliš. To su: 1) odlaganje na odlagalište otpada nakon stabilizacije/skrucivanja, 2) ponovna upotreba u cementnoj peći kao dio sirovine, 3) ponovna upotreba kao dio agregata za ciglu i 4) ponovna upotreba kao alkalnog reagensa u *Waelzovom* postupku (**Slika 5.**). U **Tablici 3.** sažeta je potrošnja energije u svakom pristupu, dok **Slika 6.** prikazuje utjecaj sva četiri načina recikliranja na okoliš (Huang i sur., 2016).



Slika 5. Četiri načina ponovnog korištenja letećeg pepela (Huang i sur., 2016).

Tablica 3. Potrošnja energije po jednoj toni letećeg pepela prikazana za sva četiri načina njegovog recikliranja (Huang i sur., 2019).

Scenario	Description	Energy usage/t of fly ash	Amount	Unit	Sources
1	Landfill after solidification	Solidification	3.9	kWh electricity	Operated factory
2	Reuse as cement	Activities on landfill:	551	l diesel	Chen et al. (2010)
		Cement making	0.81	tonne fuel oil	
			3.776	tonne natural gas	
3	Reuse as bricks	Extraction of material	0.707	tonne coal	Siao (2010)
		Brick making	9.278	l diesel	
			33.16	kWh electricity	
			0.021	kg coal	
4	Reuse as alkaline	Waelz kiln	0.45	tonne coal	Operated factory
		ZnO recycling process	75	kWh electricity	
			30	kg oil	
			95	kWh electricity	



Slika 6. Usporedba utjecaja na okoliš za sva četiri načina recikliranja letećeg pepela (Huang i sur., 2019).

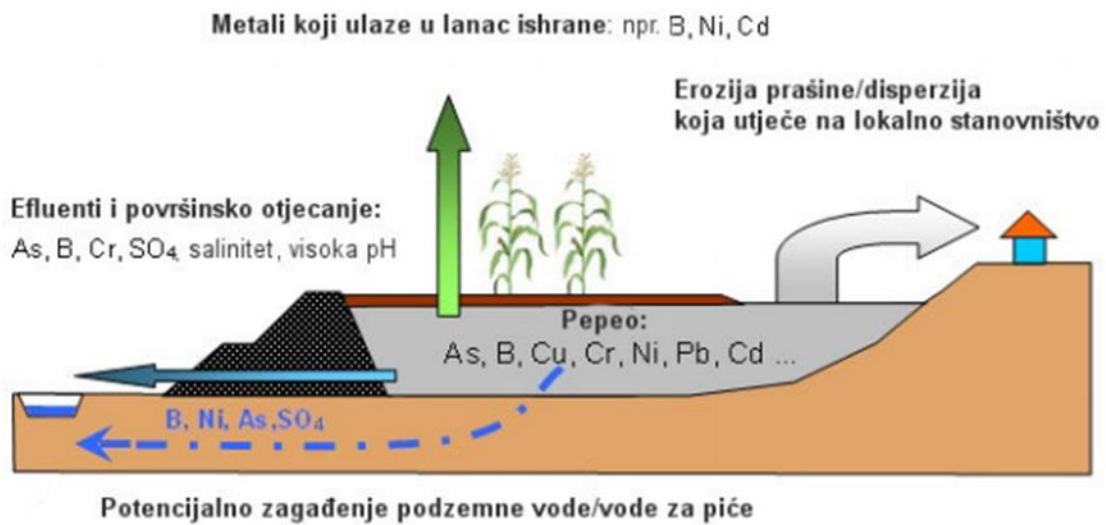
U istraživanju je zaključeno da je ponovna upotreba letećeg pepela kao alkalnog reagensa u *Waelzovom* postupku najiskoristiviji izbor, dok je najmanja iskoristivost kod odlaganja na odlagalište otpada nakon stabilizacije/skrućivanja. U istraživanju je izvršena integrirana procjena nove primjene recikliranog MSWI letećeg pepela kao zamjenskog alkalnog reagensa za *Waelzov* postupak u postrojenju za reciklažu pepela koji koristi elektrolučnu peć (eng. *Electric Arc Furnace*, EAF). Prah iz EAF ima visoki sadržaj teških metala (npr cinka). *Waelzov* postupak jedna je od najučinkovitijih tehnologija za povrat gotovo 90% sadržaja cinka iz EAF praha, primjenjuje se u metalurgiji cinka i namijenjen je obogaćivanju materijala s malim udjelom metala kako bi se dobio koncentrirani cinkov oksid ($ZnO_{\text{konc.}}$, *Waelzov* oksid) ([URL3](#)). Rezultati istraživanja pokazuju da primjena alkalne supstitucije ima najmanji utjecaj na okoliš, jer je recikliranje cinkovog oksida ($ZnO_{\text{konc.}}$) iz EAF pepela ekološki prihvatljivije od iskopa rude cinka. Ekonomski najisplativija opcija među primjenama recikliranog letećeg pepela je njegovo korištenje za izradu cigle zbog veće prodajne cijene. Nakon razmatranja ekološke i ekonomske koristi, recikliranje za izradu cigle je najisplativiji način u odnosu na tri alternative (**Slika 7.**). Iako je ovo istraživanje pružilo informacije o održivom načinu recikliranja letećeg pepela MSWI iz ekoloških i ekonomskih aspekata, ubuduće treba razmotriti i rizik od lošeg utjecaja na zdravlje i društveni konsenzus prihvaćanja proizvoda od letećeg pepela (Huang i sur., 2016).



Slika 7. Eco-BLAC opeka od pepela i prašine proizvedena je uz pomoć alkalno-aktivacijske tehnologije, pri čemu se pepeo kao aluminij-silikat kombinira s alkalnom aktivacijskom otopinom ([URL4](#)).

4. Cilj odlaganja otpadnog pepela

Cilj odlagališta otpadnog pepela je ukloniti nekorisni materijal. To bi bilo poželjno učiniti tako da se osnovni sastojci otpada nakon kemijskih i fizikalnih transformacija vrate u ekološki ciklus. Važan cilj zbrinjavanja otpada je i sprječavanje kratkoročnih ili dugoročnih negativnih utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi. Potrebno je osigurati da se otpadni pepeo odloži na održiv način, tj. bez pretjerane naknadne intervencije (Sabbas i sur., 2003). Kako bi se osiguralo da odlagalište otpadnog pepela trenutno i ubuduće ne šteti okolišu, potrebno je prilagoditi sastavu otpadnog pepela njegovu lokaciju, projektiranje i rad. Odlagališta trebaju biti projektirana na način da umanje potrebne intervencije na odloženi otpad, dakle da aktivni sustavi zaštite okoliša od štetnih emisija otpada zahtijevaju što manje održavanja. Primjer nepoželjne metode odlaganja je zatvoreni sustav odlagališta jer samo odgađa potencijalno onečišćenje okoliša. Moguće opasnosti kratkoročnog i dugoročnog utjecaja otpadnog pepela je rizik od ispiranja i naknadnog ispuštanja potencijalno štetnih tvari, posebno anorganskih soli, metala i elemenata u okoliš (Sabbas i sur., 2003), njihovo zagađenje površinskih i podzemnih voda, te tla uslijed procjeđivanja toksičnih tvari i erozije otpadne prašine. Toksične tvari mogu tim putem dospjeti i do prehrambenog lanca, a pogotovo ako se tlo koje prekriva takvo odlagalište koristi u poljoprivredne svrhe (proizvodnja stočne hrane i hrane za ljudsku ishranu) ([URL5](#)). Putevi onečišćenja i mogućeg zagađenja prikazani su na **Slici 8**. Kod ljudi konzumacija onečišćene vode i hrane i udisanje kontaminiranog zraka može dovesti do teških oboljenja kao što su trovanje teškim metalima, karcinom, defekti kod rasta kostiju novorođenčadi i ostala srčana, plućna, jetrena i bubrežna oboljenja ([URL6](#)).



Slika 8. Putevi onečišćenja i mogućeg zagađenja ([URL5](#)).

5. Zaključak

Brojnim istraživanjima je dokazano kako odlaganje otpadnih pepela ugljena ima često negativan utjecaj na okoliš u kojem se odlaže zbog procjeđivanja teških metala i soli u tlo i vodu. Pošto je proizvodnja električne energije zastupljena čak 40% izgaranjem ugljena (Petrović, 2019) i ne predviđa se smanjenje tog postotka zamjenom održivim izvorima energije, tijekom posljednjih desetljeća radi se na unaprijeđenju integriranih sustava gospodarenja otpadnim pepelom koji se posebno usredotočuju na smanjivanje prijetnji našem zdravlju i okolišu. Obrada ugljena, odlaganje otpadnog pepela na prilagođena odlagališta, iskorištavanje otpadnih produkata izgaranja ugljena i mjere ublažavanja utjecaja otpadnih čestica pepela ugljena na okoliš sastavni su elementi ovih sustava. U te integrirane sustave gospodarenja otpadnim pepelom spadaju procesi koji se provode prije, tijekom i nakon odlaganja otpadnog pepela na odlagališta. U nekim slučajevima još uvijek postoje neke zaostale emisije toksičnih tvari na ekološki neprihvatljivim razinama, što čini aktivne sustave naknadne njege otpada pepela nakon odlaganja prijeko potrebnima. Kako bi se smanjila potreba i za tim sustavima, potrebno je doći do kraćih načina obrade otpadnog pepela koji bi stvarali manje emisija onečišćujućih tvari. Krajnji cilj bi trebao biti umanjeno i kontrolirano ispuštanje onečišćenja u okoliš u neopasnim količinama za njega i zdravlje ljudi bez ikakve naknadne intervencije (Sabbas i sur., 2003) i ponovno korištenje otpadnog pepela s prihvatljivim koncentracijama elemenata za nove proizvode koji ne predstavljaju daljnju opasnost od zagađenja. To zahtjeva duboko razumijevanje sastava ugljena, sastava i ponašanja različitih vrsta otpadnog pepela, okoliša u koje se taj otpad odlaže i njihovog međudjelovanja. Ta saznanja je također potrebno primijeniti u procesima obrade ugljena i projektiranju i radu odlagališta otpada pepela.

Isto vrijedi i za otpadni pepeo nastao spaljivanjem komunalnog otpada i rizike koje uzrokuju metali i soli uslijed procjeđivanja vode kroz taj odloženi otpadni materijal, zračnog prijenosa otpadnih čestica i stvaranja potencijalno opasnih plinova.

6. LITERATURA

Chang CY, Wang CF, Mui DT, Cheng MT, Chiang HL, 2009. Characteristics of elements in waste ashes from a solid waste incinerator in Taiwan. U: *J Hazard Mater*, **165**, 766–773.

de Groot GJ, Wijkstra J, Hoede D, Van der Sloot HA, 1989. Leaching characteristics of selected elements from coal fly ash as a function of the acidity of the contact solution and the liquid/solid ratio. U: Cote PL, Gilliam TM, *Environmental Aspects of Stabilization and Solidification of Hazardous and Radioactive Wastes*. American Society for Testing and Materials, p.p. 170–183.

ECOBA, European Coal Combustion Products Association e.V. <https://www.ecoba.com/>

EU Direktiva o pitkoj vodi, 1998. <https://www.lenntech.com/applications/drinking/standards/eu-s-drinking-water-standards.htm>

Hjelmar O, 1990. Leachate from land disposal of coal fly ash. U: *Waste Management and Research*, **8**, 429-449.

Huang TY, Chiueh PT, Lo SL, 2016. Life-cycle environmental and cost Impacts of reusing fly ash. U: *Resources, Conservation and Recycling*, **123**, 255-260.

doi:10.1016/j.resconrec.2016.07.001

Izquierdo M, Querol X, 2012. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: an overview. U: *International Journal of Coal Geology*, **94**, 54-66. doi:10.1016/j.coal.2011.10.006

IAWG (International Ash Working Group): Chandler AJ, Eighmy TT, Hartle'n J, Hjelmar O, Kosson D, Sawell S.E., van der Sloot H.A., Vehlow J, 1997. Municipal solid waste incinerator residues. U: *Studies in Environmental Sciences*, **67**.

Jones DR, 1995. The leaching of major and trace elements from coal ash. In: *Environmental Aspects of Trace Elements in Coal*, D.J. Swaine and F. Goodarzi, (Eds), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 221-262.

Kirby CS, Rimstid JD, 1993. Mineralogy and Surface Properties of Municipal Solid Waste Ash. U: *Environ. Sci. Technol*, **27**, 652- 660.

Kukier U, Ishak CF, Sumner ME, Miller WP, 2003. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. U: *Environmental Pollution*, **123**, 255-266.

Miller B, 2011. Clean coal engineering technology. Butterworth Heinemann, Burlington, 696 pp.

Petrović M, 2019. Potencijal ispiranja selena i metala iz nepropisno odloženog otpada šljake, pepela I raškog ugljena u naselju Štrmac u Istri, diplomski rad, Prirodoslovno – matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 1-6, 18-20.

Querol X, Fernández-Turiel JL, López-Soler A, 1995. Trace elements in coal and their behaviour during combustion in a large power station. Fuel, **74** (3), 331-343. doi:10.1016/0016-2361(95)93464-

Radenović A, 2006. Inorganic Constituents in Coal. U: Kemija u industriji/Journal of Chemists and Chemical Engineers, **55** (2), 65–71.

Sabbas T, Poletini A, Pomi R, Astrup T, Hjelmar O, Mostbauer P, Cappai G, Magel G, Salhofer S, Speiser C, Heuss-Assbichler S, Klein R, Lechner P, 2003. Management of Municipal Solid Waste Residues. U: Waste Management, **23**, 61-88.

Speight JG, 2012. The Chemistry and Technology of Coal. 3rd Edition. U: Engineering & Technology. Boca Raton. doi:10.1201/b12497

Vejahati F, Xu Z, Gupta R, 2010. Trace elements in coal. U: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – A review. Fuel, **89**, 904-911.

WHO kriteriji o pitkoj vodi, 1993 <https://www.lenntech.com/applications/drinking/standards/who-s-drinking-water-standards.htm>

WWCCPN, 2011. World-Wide Coal Combustion Products Network, <http://www.wwccpn.org/>

Web izvori:

URL1 <https://www.power-technology.com/features/feature-giga-projects-the-worlds-biggest-thermal-power-plants/>

URL2 <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/5-waste/5-c-1-a-municipal/view>

URL3 https://www.researchgate.net/publication/286726050_Metals_recovery_from_furnaces_dust_Waelz_process

URL4 <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-68-2016-11-6-Opeka.pdf>

URL5 <https://dokumen.tips/documents/667897recoal-prirucnik-o-tretmanu-odlagalista-pepela-nabosanskom-jeziku.html>

URL6 <https://www.psr.org/wp-content/uploads/2018/05/coal-ash-hazardous-to-human-health.pdf>

7. SAŽETAK

Termoelektrane na ugljen proizvode velike količine energije, ali i mnogo otpadnog pepela ugljena koji onečišćuje okoliš. Cilj ovog seminara je prikazati utjecaj čestica otpadnog pepela ugljena s odlagališta otpada na okoliš. U seminaru se također opisuju i procesi kroz koje odloženi otpadni pepeo prolazi u međudjelovanju s okolišem, kao i načini recikliranja i ponovne uporabe otpadnog pepela ugljena i njihov posljedični utjecaj na okoliš.

Proizvodnja otpada diljem svijeta je u porastu, a industrijske zemlje se sve više okreću spaljivanju kao jednom od načina upravljanja komunalnim otpadom. Glavna prednost spaljivanja takvog otpada je smanjenje njegovog volumena i potencijalna proizvodnja energije, no otpadni pepeo koji preostaje nakon termičke obrade sadrži onečišćujuće čestice pepela koje su nepogodne za okoliš i ljude.

Tijekom posljednjih desetljeća postignut je važan napredak u integriranim sustavima gospodarenja otpadom. Postoje mjere ublažavanja utjecaja otpada na okoliš koje se posebno usredotočuju na smanjivanje prijetnji našem zdravlju i okolišu. Većinu prijetnji okolišu i zdravlju uzrokuju metali i soli uslijed procjeđivanja vode, zračnog prijenosa čestica i stvaranja potencijalno opasnih plinova. Krajnji cilj savladavanja gospodarenja otpadom bi trebalo biti umanjeno i kontrolirano ispuštanje onečišćujućih tvari u okoliš u neopasnim količinama za njega i zdravlje ljudi bez ikakve naknadne intervencije i recikliranje otpada u nove proizvode koji ne predstavljaju daljnju opasnost onečišćenja.

8. SUMMARY

Coal-fired power plants produce large amounts of energy, as well as a lot of coal ash waste that pollutes the environment. The aim of this seminar is to show the impact of coal ash waste particles from landfills on the environment. It also describes interaction processes between waste ash and the environment, as well as ways of recycling and reusing coal ash and the subsequential impact of these processes and recycled products on the environment.

Waste production around the world is increasing and industrialized countries are turning to incineration as a way of managing municipal waste. The main advantage of incinerating such waste is the reduction of its volume and possible energy production, but the remaining waste after incineration contains coal fly ash particles that are harmful to the environment and people.

During the last decades, important progress has been made in integrated waste management systems. There are environmental mitigation measures that specifically focus on reducing hazards to our health and the environment. Metals and salts cause most threats to the environment and our health due to water seepage, airborne particle emissions and production of potentially toxic gases by which they are spread outside of landfills. The ultimate goal of managing waste is to reduce and control the release of polluting particles into the environment in non-hazardous quantities without any subsequent intervention and recycling waste into new non-hazardous products.