

## Ispitivanje procesa izluživanja sinterovanog i sirovog letećeg pepela iz termoelektrane

Aleksandra Nikolić, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Dr Marina Ilić, dipl.inž.<sup>2)</sup>

Ogromne količine letećeg pepela nastaju svake godine kao nužan otpad pri sagorevanju uglja u termoelektranama. U ovom radu ispitivani su uzorci letećeg pepela iz termoelektrane *Nikola Tesla* iz Obrenovca. Leteći pepeo je sinterovan na temperaturama od 1130 do 1190°C, i ispitivano je izluživanje teških metala: Zn, Cr, Cd, Sr, Pb, Co i Ni korišćenjem GANC testa. Ispitivana je zavisnost izlužene koncentracije teških metala od pH vrednosti, u odnosu na temperaturu sinterovanja. Analiziran je uticaj sinterovane vrste na stepen izluživanja. Rezultati su pokazali da izluživanje teških metala iz sinterovanih uzoraka letećeg pepela prati sledeći trend po koncentracijama:  $Pb > Zn > Sr > Cr > Cd$ , dok su izlužene koncentracije Co i Ni ispod granice detekcije instrumenta. U skladu sa eksperimentalnim rezultatima, može se zaključiti da se sinterovanjem letećeg pepela postiže imobilizacija teških metala u procentu koji je prihvatljiv za životnu sredinu, čime je postignut glavni uslov za primenu sinterovanja.

*Ključne reči:* Leteći pepeo, sinterovanje, teški metali, izluživanje, otpad, istraživanje.

### Uvod

LETEĆI pepeo predstavlja  $\approx 70\%$  ukupne mase ostataka koji se dobijaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije. Proizvodnja letećeg pepela je u stalnom porastu, a troškovi za njegovo odlaganje su veliki jer se staloženi pepeo, po pravilu, odlaže na deponiju s velikim količinama vode.

Korišćenje ili odlaganje letećeg pepela proizvedenog sagorevanjem uglja u termoelektranama ostaje glavni problem u mnogim delovima sveta. Velike količine pepela koje nastaju svake godine, najveću primenu imaju u građevinarstvu gde se koriste za dobijanje cementa, betona, keramike, maltera, veziva, za stabilizaciju kolovoza, izgradnju nasipa, ali i za dobijanje građevinskih elemenata. Dugogodišnja istraživanja mogućnosti iskorišćenja letećeg pepela u građevinarstvu i u druge svrhe pokazala su, da se leteći pepeo može uspešno koristiti, uz važan preduslov - ispitivanje mogućeg izluživanja toksičnih elemenata koji se nalaze u pepelu [1-4].

Metali čija je specifična masa veća od  $5 \text{ g/cm}^3$  spadaju u grupu teških metala. Opasnost leži kako u njihovoj toksičnosti tako i u neuništivosti. Stoga je od najveće važnosti za zaštitu životne sredine pronaći odgovarajući način za kvalitetnu imobilizaciju i bezbedno odlaganje otpada koji sadrži teške metale. Jedan od pogodnih i u svetu priznatih načina imobilizacije teških metala je termički tretman letećeg pepela - sinterovanje [5,6]. Stepem imobilizacije teških metala sinterovanjem određuje se pomoću standarda i testova za izluživanje koji se odvijaju pod uslovima koji su aproksimativno najbliži stvarnim uslovima u prirodi.

Izluživanje je proces koji se dešava kada čvrsti materijal dođe u kontakt sa tečnim medijumom, pri čemu dolazi do

rastvaranja pojedinih komponenti iz čvrstog materijala u većoj ili manjoj meri [7].

Rad je prikazao ispitivanje efekta sinterovanja uzoraka letećeg pepela na proces izluživanja teških metala. U tom smislu ispitano je izluživanje Pb, Co, Cr, Ni, Cd, Zn i Sr iz sirovog i sinterovanog letećeg pepela, korišćenjem standardne metode: GANC (Generalized Acid Neutralization Capacity) test. Rezultati su pokazali u kojoj meri uslovi sinterovanja, kao što su vreme i temperatura sinterovanja, utiču na stepen izluživanja teških metala. Takođe je analiziran uticaj fizičkih i hemijskih faktora (mlevenje, mešanje, pH) na količinu izluživanja.

Veliki ekološki problem Jugoslaviji predstavljaju ogromne količine letećeg pepela (oko 5 miliona tona nastaje svake godine). Ideja ovog rada je bila da pokaže, da je imobilizacija teških metala sinterovanjem moguća, i da se, shodno tome, mogu pronaći nove mogućnosti iskorišćenja pepela.

### Eksperimentalni deo

Prilikom ispitivanja uticaja sinterovanja letećeg pepela na proces izluživanja teških metala, kao materijal je korišćen sirovi leteći pepeo nastao sagorevanjem lignita iz termoelektrane *Nikola Tesla* iz Obrenovca. Sirovi leteći pepeo je prosejan sitom od  $375 \mu\text{m}$  i pripremljen za ispitivanje.

Ostali uzorci za ispitivanje pripremljeni su od sinterovanog letećeg pepela. Količina pepela koja je pripremljena za sinterovanje prvo je mlevena u mlinu i tako pripremljeni materijal je sinterovan u peći *Lenton Thermal Designs*, u *Imperial Collageu* u Londonu, na temperaturama 1130°C, 1150°C, 1170°C i 1190°C.

Ovako pripremljeni sinterovani uzorci letećeg pepela su samleveni u mlinu, a zatim prosejani sitom od  $425 \mu\text{m}$ .

<sup>1)</sup> Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology Brinellv. 32, S-100-44 Stockholm, Sweden

<sup>2)</sup> Institut za opštu i fizičku hemiju, 11000 Beograd, Studentski trg 12/V

Izvršena su ispitivanja izluživanja teških metala Co, Ni, Sr, Cr, Pb, Cd i Zn pomoću GANC testa koji se koristi za ispitivanje izluživanja čvrstih tela u kiselini ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) korišćenjem od 0 - 6 ekvivalenata kiseline po kg čvrstog uzorka. Posle 48 časova kontakta meri se pH vrednost pH-metrom tipa *CENTRON 3100*. Nakon izmerene pH vrednosti analizirani su rastvori na atomskom apsorpcionom spektrofotometru *Perkin Elmer 703*, i određivane su koncentracije teških metala.

### Rezultati i diskusija

Rezultati su pokazali da serije povećanja kiselosti u testovima izluživanja daju potrebne informacije o uspešnosti u stabilizaciji teških metala.

Izmene pH vrednosti, nasuprot ekvivalentima po kg čvrstih uzoraka, definišu alkalno ponašanje uzorka. Što se više ekvivalenata vezivnog rastvora neutrališe, to je veće smanjenje pokretnosti metala. Previše alkalni rastvor može biti štetan [8].

U tabeli 1 prikazane su izlužene koncentracije elemenata iz uzorka sirovog pepela urađene po GANC testu u laboratoriji *Imperial Collegea*. Iz tabele se vidi da je polazna koncentracija nikla i kobalta veoma mala, pa se može očekivati da će stepen izluživanja biti jako mali. Koncentracija Sr u sirovom pepelu je visoka, pa se može direktno videti uticaj sinterovanja na količinu izluživanja.

**Tabela 1.** Izlužene koncentracije iz sirovog pepela po GANC testu [1]

Elementi	Izlužene koncentracije (mg/l)	Izlužene koncentracije (mg/kg suvog uzorka)
Kalcijum (Ca)	169,01	3380,27
Natrijum (Na)	2,41	48,32
Magnezijum (Mg)	0,17	3,45
Kalijum (K)	3,90	78,12
Gvožđe (Fe)	0,04	0,97
Aluminijum (Al)	2,01	40,20
Bor (B)	0,57	11,41
Barijum (Ba)	0,39	7,91
Kadmijum (Cd)	0,008	0,004
Kobalt (Co)	0,000	0,002
Hrom (Cr)	0,26	5,35
Bakar (Cu)	0,003	0,062
Litijum (Li)	0,25	5,03
Mangan (Mn)	0,002	0,04
Nikl (Ni)	0,0008	0,017
Olovo (Pb)	0,60	0,255
Stroncijum (Sr)	2,06	41,37
Titan (Ti)	0,011	0,232
Vanadijum (V)	0,17585	3,52
Itrijum (Y)	0,00265	0,053

U tabeli 2 su prikazane izmerene pH vrednosti i proračunati ekvivalenti kiseline po kilogramu suvog uzorka, za uzorke sinterovane na temperaturama 1130°C, 1150°C, 1170°C i 1190°C.

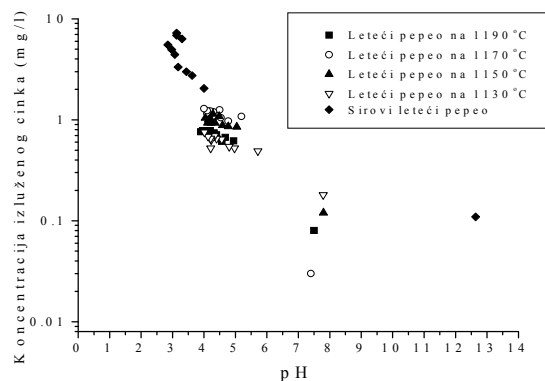
Na sl.1 grafički je predstavljena zavisnost koncentracije izluženog cinka od pH vrednosti. Na istoj slici date su vrednosti za leteći pepeo sinterovan na temperaturama 1190°C, 1170°C, 1150°C i 1130°C, kao i za sirovi leteći pepeo. Ovo je učinjeno radi lakšeg poređenja dobijenih rezultata.

Pri eksperimentalnom radu najveća pažnja je posvećena blago zakiseljenim rastvorima [1,8]. Prethodna istraživanja o izluživanju teških metala iz sinterovanih uzoraka letećeg

pepela pokazuju sledeće pravilnosti: već pri maloj količini dodate kiseline pH vrednost naglo opada i kasnije se, nakon dodavanja veće količine kiseline, lagano i slabo menja [1,16].

**Tabela 2.** Izmerene pH vrednosti i proračunati ekvivalenti kiseline po kilogramu suvog uzorka, za sinterovane uzorke letećeg pepela

Uzorak, broj	Eq/kg	Leteći pepeo na 1130 °C	Leteći pepeo na 1150 °C	Leteći pepeo na 1170 °C	Leteći pepeo na 1190 °C
1	0	7,79	7,80	7,40	7,50
2	0,20	5,71	5,04	5,19	4,94
3	0,40	4,97	4,77	4,77	4,68
4	0,60	4,80	4,59	4,54	4,57
5	1,00	4,56	4,48	4,50	4,40
6	1,60	4,40	4,35	4,32	4,32
7	2,00	4,34	4,28	4,30	4,20
8	2,60	4,23	4,22	4,18	4,10
9	3,00	4,21	4,20	4,20	4,10
10	3,60	4,21	4,12	4,10	3,96
11	4,00	4,13	4,14	4,10	4,40
12	6,00	4,01	4,04	4,00	3,90



**Slika 1.** Zavisnost koncentracije izluženog cinka od pH vrednosti, za uzorke sinterovanog letećeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letećeg pepela

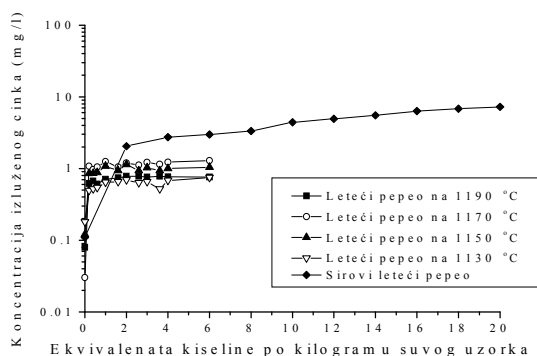
Na sl.1 se vidi da početne pH vrednosti koje imaju najveću vrednost, odgovaraju uzorcima kojima nije dodata kiselina. Za pepeo sinterovan na različitim temperaturama, ta vrednost iznosi  $\approx 7,5$ , a za sirovi leteći pepeo ima najveću vrednost i iznosi 12,64. Generalno gledano, postoji blagi porast pH vrednosti u uzorcima sinterovanim na različitim temperaturama sa istom količinom kiseline i to u pravcu od 1190°C do 1130°C. Uzorci sinterovanog letećeg pepela na 1130°C, u poređenju s drugim uzorcima iste količine kiseline, imaju nešto veću pH vrednost. Ovi uzorci su pri početnoj količini od 0,2 ml sirćetne kiseline pokazali pH vrednost 5,71.

Na sl.1 se vidi da je koncentracija izluženog cinka najveća u uzorcima sirovog letećeg pepela, što je i bila osnovna postavka eksperimentalnog rada. Mineralni udeo u sirovom uglju iznosi 46,75 %, dok je u letećem pepelu 76,95 % [3]. Izlužena koncentracija u zavisnosti od pH vrednosti smanjuje se redom od uzoraka sinterovanih na 1170°C, 1150°C, 1190°C do uzoraka sinterovanih na 1130°C. Najveća koncentracija izluženog cinka za sinterovani leteći pepeo iznosi 1,25 mg/l, dok je najmanja koncentracija za uzorke koji ne sadrže kiselinu 0,49 mg/l. Prethodno pomenuta koncentracija odgovara uzorku sinterovanom na 1130°C. Iz datih podataka može se zaključiti da je sinterovanjem letećeg pepela izvršena

imobilizacija cinka u velikom procentu u odnosu na sirovi uzorak.

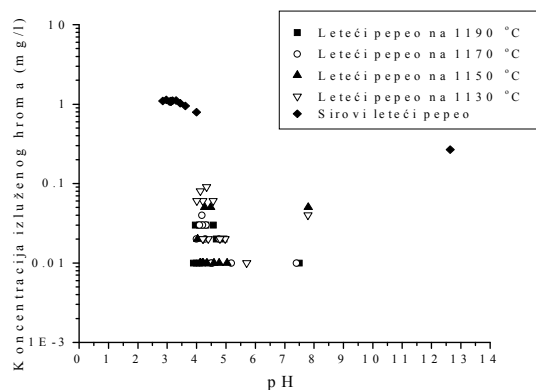
Kriva izluživanja teških metala [7,9,10], ima eksponencijalno rastući oblik. Ova pravilnost može da se vidi i na sl.2 preko odnosa ekvivalenta kiseline i koncentracije. Ekvivalenti su proračunati kao dvostruka vrednost dodate kiseline, pa je npr. ekvivalent kiseline u uzorku kome je dodato 0,5 ml sirćetne kiseline jednak 1 (tabela 2). Na sl.2 za sirovi leteći pepeo jasno se vidi da se trend porasta koncentracije sa ekvivalentima kiseline po kilogramu suvog uzorka (koncentracija 2,048 mg/l i  $Eq/kg=2$ ) i nadalje umereno raste.

Na sl.2 je data zavisnost koncentracije izluženog cinka i ekvivalenta kiseline po kilogramu suvog uzorka. Dijagrami zavisnosti koncentracije i ekvivalenta su dati da bi se prikazalo ponašanje pojedinih teških metala prilikom izluživanja. Na slici se jasnije vidi trend porasta stepena izluženja od 1130°C, 1190°C, 1150°C do 1170°C, kao i očigledan uticaj sinterovanja u pogledu koncentracije izluženog cinka.



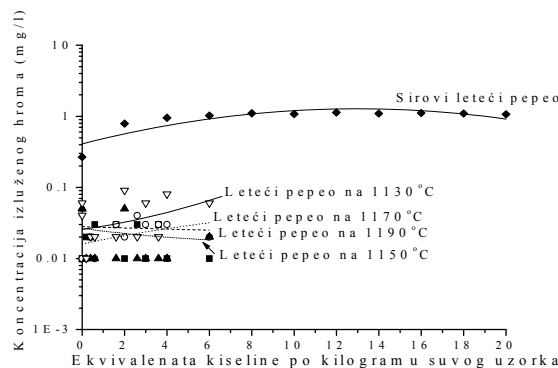
Slika 2. Zavisnost koncentracije izluženog cinka i ekvivalenta kiseline po kilogramu suvog uzorka, za uzorke sinterovanog letećeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letećeg pepela

Na sl.3 je prikazana zavisnost koncentracije izluženog hroma od pH vrednosti. Koncentracije izluženog hroma u sinterovanim uzorcima su veoma male i veliki broj vrednosti iznosi 0,01 mg/l, što je i granica detekcije instrumenta za hrom. Najveća koncentracija izluženog hroma za sinterovani leteći pepeo iznosi 0,09 mg/l a odgovara uzorku sinterovanom na 1130°C. Uzorak sinterovan na 1190°C pokazuje samo blagu zavisnost izluživanja od pH vrednosti, odnosno u uzorcima bez dodatka kiseline i u blago zakiseljenim uzorcima koncentracija izluženog hroma se tek blago povećava i najveća koncentracija iznosi 0,03 mg/l. Na slikama 3 i 4 se vidi, da je sinterovanjem letećeg pepela koncentracija izluženog hroma smanjena u velikoj meri što odgovara propisanim granicama od 5 mg/l prema TCLP testu.



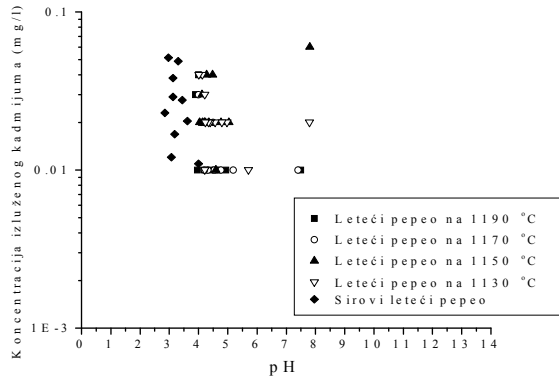
Slika 3. Zavisnost koncentracije izluženog hroma od pH vrednosti, za uzorke sinterovanog letećeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letećeg pepela

Na sl.4 se vidi trend porasta stepena izluženja od 1130°C, 1170°C, 1190°C do 1150°C. Izluživanje uzoraka sinterovanih na 1130°C i 1170°C izraženo je blago eksponencijalno rastućom krivom, odnosno sa dodavanjem veće količine kiseline povećava se izluživanje. Kod uzoraka sinterovanih na 1190°C i 1150°C ta kriva ima umereniji tok.



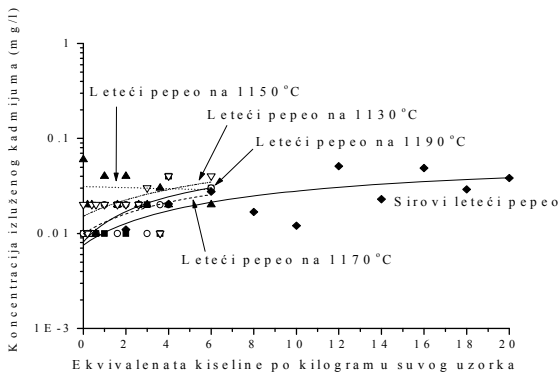
Slika 4. Zavisnost koncentracije izluženog hroma i ekvivalenta kiseline po kilogramu suvog uzorka, za uzorke sinterovanog letećeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letećeg pepela

Na sl.5 je data zavisnost koncentracije izluženog kadmijuma od pH vrednosti. Najveća koncentracija kadmijuma u sirovom letećem pepelu iznosi 0,05 mg/l, a najniža koncentracija iznosi 0,0109 mg/l. Na slici se vidi, da je uspeh u smanjenju koncentracije izluživanja Cd bio neznatan, ali da ta vrednost odgovara propisanim granicama od 1 mg/l po TCLP testu. Sinterovani uzorci pokazali su mali stepen izluživanja, do najmanje merljive koncentracije 0,01 mg/l. Blagi porast izlužene koncentracije sa smanjenjem pH vrednosti, uočljiv je kod svih sinterovanih uzoraka izuzev kod uzorka sinterovanog na 1150°C, gde su primećena manja odstupanja. Uzorci sinterovani na 1130°C i 1150°C pokazali su mali stepen imobilizacije kadmijuma. Ovim primerom je pokazano da TCLP test ograničava dozvoljene izlužene koncentracije teških metala u okviru istraživanja o ponašanju materijala u prirodi.



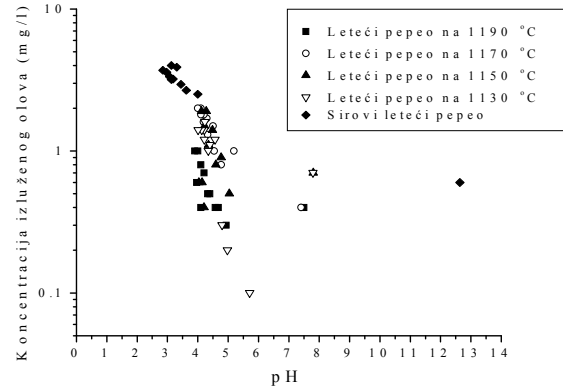
Slika 5. Zavisnost koncentracije izluženog kadmijuma od pH vrednosti, za uzorke sinterovanog letićeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letićeg pepela

Na sl.6 je pokazana zavisnost izlužene koncentracije kadmijuma od ekvivalenata kiseline po kilogramu suvog uzorka. Vide se odstupanja i devijacije koje nastaju najverovatnije zbog stvaranja kompleksa. Uzorci sinterovani na 1130°C i 1150°C pokazali su veći stepen izluživanja od uzorka sinterovanih na 1170°C i 1190°C, što je u skladu sa očekivanim rezultatima, mada su svi uzorci pokazali mali stepen imobilizacije kadmijuma. Na slikama 5 i 6 može se uočiti da se prilikom izluživanja kadmijuma odvijaju procesi koji su odgovorni za njegovo devijantno ponašanje, [7,11]. Može se reći da su mehanizmi kao što je difuzija, ali i rastvaranje i naknadno formiranje kompleksa, odgovorni za ovakvo ponašanje kadmijuma.

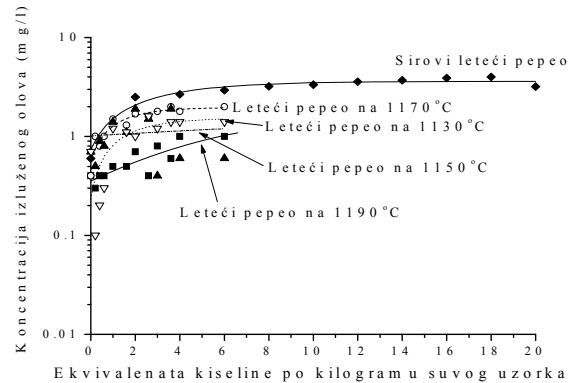


Slika 6. Zavisnost koncentracije izluženog kadmijuma i ekvivalenata kiseline po kilogramu suvog uzorka, za uzorke sinterovanog letićeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letićeg pepela.

Slika 7 prikazuje zavisnost koncentracije izluženog olova od pH vrednosti, gde se vidi da se sinterovanjem smanjuje koncentracija izluženog olova. Uzorci sinterovani na 1130°C, 1150°C i 1170°C pokazali su približno sličan stepen luženja, dok je uzorak sinterovan na 1190°C pokazao najveći stepen imobilizacije olova sa najmanjom koncentracijom od 0,3 mg/l. Uzorak sinterovan na 1170°C, nasuprot očekivanim rezultatima, pokazao je visok stepen izluživanja s najvećom koncentracijom od 2 mg/l.



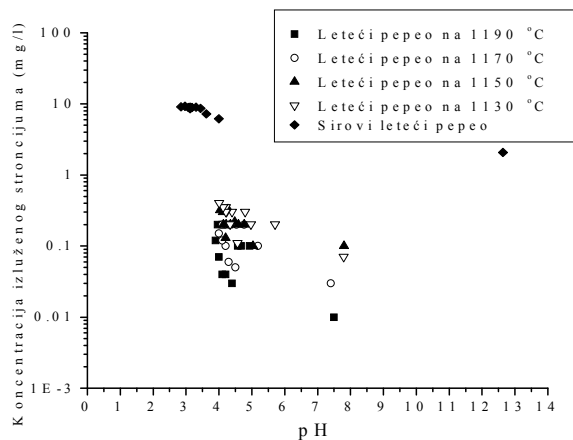
Slika 7. Zavisnost koncentracije izluženog olova od pH vrednosti, za uzorke sinterovanog letićeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letićeg pepela



Slika 8. Zavisnost koncentracije izluženog olova i ekvivalenata kiseline po kilogramu suvog uzorka, za uzorke sinterovanog letićeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letićeg pepela

Na sl.8 je prikazana zavisnost koncentracije izluženog olova od ekvivalenata kiseline, a može da se uoči nepravilnost kod izluživanja uzorka sinterovanog na 1150°C. Pod dejstvom određenih elemenata, njihovih jedinjenja i mehanizama koji izazivaju izluživanje, kriva izluživanja ovog uzorka ima umereno eksponencijalni oblik. Dobijeni rezultati koncentracija izluženog olova odgovaraju propisanim granicama gde, prema TCLP testu [5,12], dozvoljena koncentracija olova iznosi 5 mg/l.

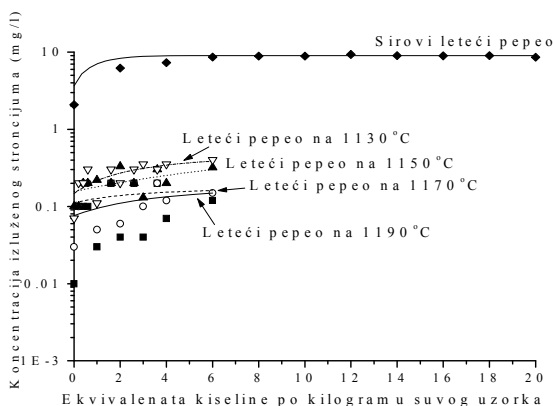
Slika 9 je predstavila zavisnost koncentracije izluženog stroncijuma od pH vrednosti. Tu se vidi da je veliko izluživanje u uzorku sirovog letićeg pepela. Stroncijum često zameni kalcijum u  $\text{CaCO}_3$  u sirovom uglju, gde je u obliku  $\text{SrO}_2$  u letećem pepelu ili kao  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  u rastvoru. Ova jedinjenja su rastvorna u kiselim rastvorima, čime se objašnjava visoka koncentracija izluženog stroncijuma u sirovom letećem pepelu. Stroncijum u sirovom uglju je uglavnom u organskom kompleksu (69,25 %) i u kristalnoj mineralnoj fazi (17,43 %). U letećem pepelu je uglavnom u obliku oksida (59,24 %) dok u kristalnoj mineralnoj fazi zauzima samo 10,64 % [2]. Sa sl.9 jasno se vidi da je najveće izluživanje, kod sinterovanih uzoraka na temperaturi od 1130°C. Može se zaključiti da koncentracija izluživanja stroncijuma opada s porastom temperature sinterovanja. Ovakvi rezultati su očekivani prema podacima iz [1,6], gde se ističe da uzorci sinterovani na 1130°C i 1150°C treba da pokazuju veći stepen izluživanja od uzoraka sinterovanih na 1170°C i 1190°C.



Slika 9. Zavisnost koncentracije izluženog stroncijuma od pH vrednosti, za uzorke sinterovanog letećeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letećeg pepela

Povećavanje temperature sinterovanja, usled površinskih efekata, smanjuje zapreminu otvorenih pora što pokazuje kapacitet apsorpcije vode [1,6,13]. Povećanjem zapremine zatvorenih pora smanjuje se gustina uzorka. Na tako visokim temperaturama dobija se stopljen materijal u kome je mineraloški sastav promenjen u odnosu na početni uzorak. Površina uzorka je staklasta, glatka i sjajna i pokazuje osobine staklo-keramike. Teški metali su vezani u strukturu, a mehanizam koji izaziva izluživanje je difuzija iz uzorka u rastvor. Mehanizam koji izaziva izluživanje kod uzoraka sinterovanih na 1130°C i 1150°C je rastvaranje i difuzija, čime se objašnjava veći stepen izluživanja kod uzoraka sinterovanih na nižim temperaturama.

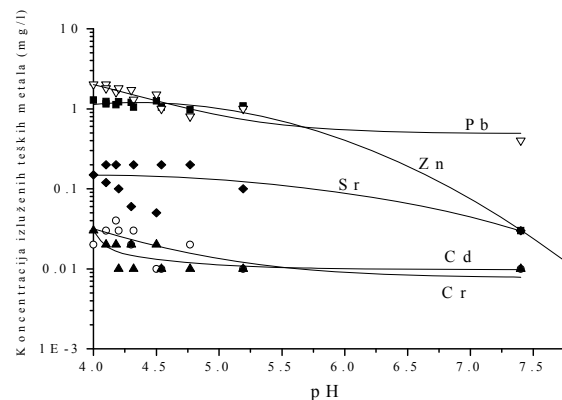
Na sl.10 je prikazana zavisnost koncentracije izluženog stroncijuma od ekvivalentata kiseline. Može da se uoči pravilnost ponašanja sinterovanih uzoraka na različitim temperaturama. Primećuje se, da kriva izluživanja nema čisto eksponencijalno rastući oblik, već da dolazi do skokovitih prelaza koji su u dozvoljenim granicama. Ovakvo ponašanje može da se objasni mehanizmima koji se smenjuju prilikom izluživanja.



Slika 10. Zavisnost koncentracije izluženog stroncijuma od ekvivalentata kiseline po kilogramu suvog uzorka, za uzorke sinterovanog letećeg pepela na različitim temperaturama i za uzorke sirovog letećeg pepela

Na sl.11 je data zavisnost izlužene koncentracije teških metala od pH vrednosti za uzorak sinterovan na 1170°C. Rezultati izluživanja letećeg pepela sinterovanog na 1170°C su izabrani predstavljaju prosečnu sliku izluživanja ispitivanih teških metala, a ujedno i najjasniju zavisnost od pH vrednosti. Na sl.11 može se videti da je daleko najveći

stepen izluživanja olova, mada ne treba izuzeti ni činjenicu da je olovo bilo u velikoj količini u sirovom letećem pepelu. Trend izluživanja teških metala u uzorku sinterovanom na 1170°C može se predstaviti na sledeći način:  $Pb > Zn > Sr > Cr > Cd$ . Ovakav trend izluživanja je u skladu s prezentovanim podacima [1,6,14], kao i činjenica da je najmanje izluživanje u neutralnoj sredini, a da se u baznoj ili kiseljoj sredini izluživanje povećava.



Slika 11. Zavisnost koncentracije izluženih teških metala u uzorku sinterovanom na 1170 °C od pH vrednosti.

Prilikom izrade eksperimentalnog rada, istraživana su i izluživanja kobalta i nikla. Oba metala su pokazala izuzetno mali stepen izluživanja, koji se kretao ispod granice detekcije instrumenta, odnosno ispod 0,1 mg/l, bez obzira na dodatnu količinu sirćetne kiseline [1,15].

## Zaključak

Ispitivan je uticaj sinterovanja letećeg pepela na izluživanje teških metala. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti sledeće:

1. Već pri maloj količini dodate sirćetne kiseline prema GANC testu, u uzorcima se uočava nagli pad pH vrednosti, da bi se posle dodavanja veće količine kiseline, pH vrednost lagano i slabo menjala. Ova pojava ukazuje na uticaj teških metala i/ili njihovih jedinjenja na pH vrednost.
2. Uslovi sinterovanja, koji uključuju vreme i temperaturu sinterovanja, utiču na karakteristike sinterovane vrste i to kako na fizičko-hemijske tako i na mineraloške osobine, čime može da se objasni različit stepen izluživanja teških metala u uzorcima.
3. Izluživanje teških metala iz sinterovanih uzoraka letećeg pepela prati sledeći trend po koncentracijama:  $Pb > Zn > Sr > Cr > Cd$ , dok su izlužene koncentracije Co i Ni ispod granice detekcije instrumenta, odnosno manje od 0,1 mg/l. Može se zaključiti da se sinterovanjem potpuno imobilizuje Co, Ni i Cr, a da se Pb i Cd kreću u okviru dozvoljenih graničnih koncentracija prema TCLP testu. Visok stepen imobilizacije primećen je i kod cinka.
4. U skladu sa eksperimentalnim rezultatima, može se zaključiti da se sinterovanjem letećeg pepela postiže imobilizacija teških metala u procentu koji je prihvatljiv za životnu sredinu, čime je postignut glavni uslov za primenu sinterovanja. Imobilizacija je veća što je temperatura sinterovanja veća, jer se time postiže jače vezivanje teških metala u strukturu materijala.
5. Dati rezultati su dobijeni pomoću GANC testa, a ispitivanja su vršena u statičkim uslovima. U cilju

utvrđivanja dugotrajnog ponašanja materijala pri izluživanju u prirodi, dalja istraživanja bi mogla ići u pravcu ispitivanja izluživanja teških metala i u dinamičkim uslovima, koji simuliraju prirodne uslove realnije od drugih testova.

### Literatura

- [1] ILIĆ,M., CHEESEMAN,C., et all.: Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash. *Fuel*, 2001, vol.80, (rad u štampi).
- [2] WANG,Y., REN,D., ZHAO,F.: Comparative leaching experiments for trace elements in ranj coal, laboratory ash, fly ash and bottom ash. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol.40, p.103-108.
- [3] NEŠIĆ,LJ.: *Proučavanje procesa dobijanja i hidrotermalne obrade portland-cementa sa dodatkom elektrofilitarskog pepela kao sekundarne sirovine*. Magistarski rad, Beograd,1983.
- [4] KNIGHTS,B., JOHNSON, K.E.: Leach Testing of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash and Stabilised Products. *Journal of Waste Management & Resource Recovery*, 1995, vol.2, no.3, p.123-130.
- [5] WANG, K.S., CHIANG,K.Y., et all.: The Characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, vol.59, p.201-210.
- [6] VAN DER SLOOT,H.A., HEASMAN,L., QUEVAUVILLER,PH.: *Harmonization of Leaching/Extraction tests*. Elsevier science B.V., Amsterdam,1997.
- [7] PU,W., ZHANG-ZHAO,G.: *International workshop on utilization of fly ash*. Shanghai Research Institute of Building Sciences, nov. 4-25, 1990.
- [8] ISENBURG,J., MOORE,M.: *Generalized Acid Neutralization Capacity Test, Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes*. 2nd Volume, American Society for testing and materials, Philadelphia, 1992, p.316-377.
- [9] LAMERS,F.J.M., BEERLAGE,M., VAN DER BERG,J.W.: The environmental lquality of the fly ash from Co-combustion. *Waste Materials in Construction*, 2000, p.916-927.
- [10] ILIĆ,M., MILETIĆ,S.: Osnovi upravljanja evrstim otpadom, Institut za ispitivanje materijala, Beograd, 1998.
- [11] ECOBA: *Hard coal fly ash in concrete*. Information bulletin, Essen.
- [12] GARDNER,K.H., THEIS,T.L.: A Dynamic Approach to the Assessment of Leaching behavior. *Waste Materials in Construction*, 2000, p.927-940.
- [13] FYTIANOS, K., TSANIKLIDI,B.: Leachability of heavy metals in Greek fly ash from coal combustion. *Environment International*, 1998, vol.24, no.4, p.477-486.
- [14] KOSSON,D.S., VAN DER SLOOT,H.A., WILES,C.: Leaching properties of untreated and treated residues tested in the USEPA program for evaluation of treatment and utilization technologies for municipal waste combustor residues, Elsevier Science Publishers B.V. *Waste Materials in Construction*, 1991, p.119-134.
- [15] BAYAT,O.: Characterisation of Turkish fly ashes. *Elsevier Science Ltd.*, 1998, vol.77, no. 9/10, p.1059-1066.
- [16] ILIĆ,M., CHEESEMAN,C., et all.: Effect of Ceramic processing on leaching of heavy metals from lignite coal fly ash, (u štampi).

Rad primljen: 18.11.2001.god.

