

# Elektropečna prašina kao vrijedni proizvodni ostatak iz procesa proizvodnje čelika

---

**Rađenović, Ankica; Sofilić, Tahir; Ivančić, Antonio**

*Source / Izvornik:* **Kemija u industriji : časopis kemičara i tehnologa Hrvatske, 2018, 67, 309 - 317**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.15255/KUI.2017.046>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:265062>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-05**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



# Elektropečna prašina kao vrijedan proizvodni ostatak iz procesa proizvodnje čelika

A. Rađenović,\* T. Sofilić i A. Ivančić

Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44 103 Sisak

DOI: 10.15255/KUI.2017.046

KUI-20/2018

Pregledni rad

Prispjelo 13. studenoga 2017.

Prihvaćeno 23. prosinca 2017.

Ovo djelo je dano na korištenje pod  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License



## Sažetak

Iako je elektropečna prašina zbog prisutnosti teških metala svrstana u opasni otpad, može se iskoristiti u razne svrhe, što je prihvatljiviji način njezina zbrinjavanja nego što je odlaganje na za to predviđena odlagališta, čime metali prisutni u prašini ostaju neiskorišteni. U radu je dan pregled nastanka elektropečne prašine, njezinih fizikalno-kemijskih svojstava i moguće uporabe. Imajući u vidu fizikalno-kemijska svojstva prašine i visok sadržaj željeza, veoma je pogodno rješenje njezino vraćanje u matični proces za dobivanje čelika. Dodatno, prašina se može rabiti u industriji neželjeznih metala za dobivanje teških metala kao što je cink te u nekim drugim industrijama (npr. za proizvodnju cementa, keramike, boja, itd.).

## Ključne riječi

Metalurški otpad, elektropečna prašina, zbrinjavanje, uporaba

## 1. Uvod

Okoliš se svakodnevno zagađuje velikim količinama ispušnih plinova, raznim otpadom iz proizvodnih procesa i otpadnim vodama. Metalurška industrija, tj. pogoni za proizvodnju metalurškog koksa, aglomeracije i sinteriranja željezne rude, proizvodnje sirovog željeza i pogoni za proizvodnju čelika kao i termoenergetska postrojenja i prerađivački pogoni također su značajan izvor onečišćenja okoliša. Raznim emisijama u vodu i zrak iz metalurških postrojenja ispuštaju se prašina, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCN, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF, HCl, NH<sub>3</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, teški metali (Hg, Pb, Cr, Ni, Zn, Cd, Cu), cijanidi, fenoli, policiklički aromatski ugljikovodici (engl.: *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH*), poliklorirani bifenili (engl.: *Polychlorinated Biphenyls, PCB*), poliklorirani dibenzo-*p*-dioksini (engl.: *Polychlorinated Dibenzo-*p*-dioxins, PCDD*), poliklorirani dibenzofurani (engl.: *Polychlorinated Dibenzofurans, PCDF*), ulja, masti te ostali opasni i neopasni proizvodni otpad.<sup>1-4</sup> Prašina, nošena dimnim plinovima iz elektropečne peći, koja nastaje pri procesu proizvodnje čelika u čeličanicama i ljevaonicama, ozbiljan je ekološki problem s obzirom na to da sadrži teške metale zbog čega je i svrstana u opasni otpad. Gospodarenje tom vrstom otpada i odabir rješenja za njegovo zbrinjavanje zahtijeva poznavanje njegovih fizikalnih svojstava, udjela teških metala, mineraloških oblika u kojima su oni vezani u elektropečnoj prašini kao i ponašanje u interakciji s okolišem.

## 2. Proizvodnja čelika u elektropečni proizvodni ostaci

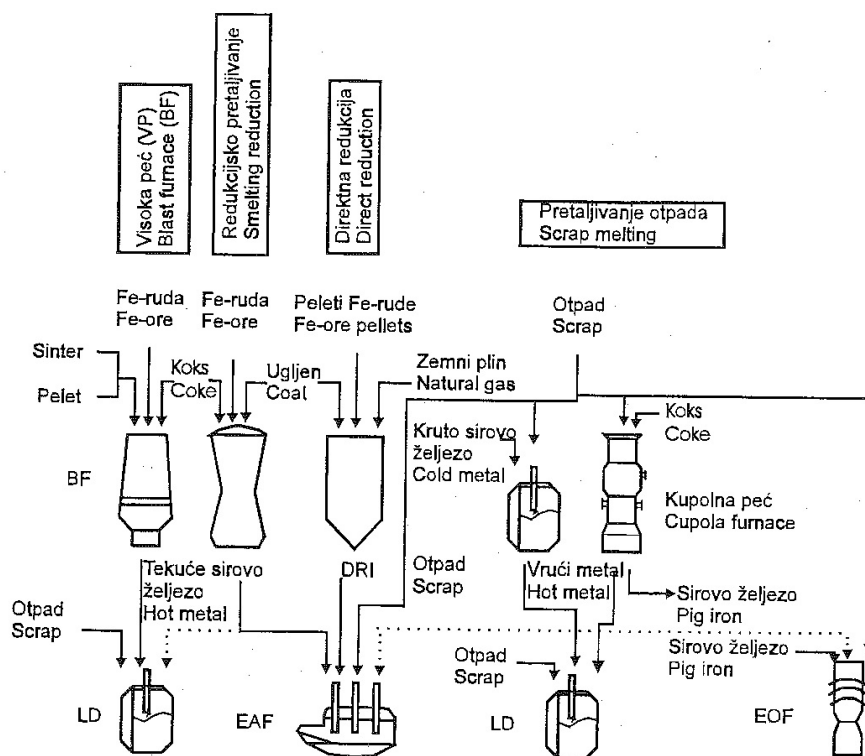
Čelik je željezna legura s najviše 2 % masenog udjela ugljika te drugim korisnim (Mn, Si, Cr itd.) i štetnim (S, P itd.)

primjesama. Danas se čelik uglavnom proizvodi u kisikovim konvertorima, elektrolučnim pećima ili postupcima pretalijavanja. Različiti načini i kombinacije proizvodnje čelika prikazani su na slici 1 i obuhvaćaju sljedeće:<sup>5</sup>

- proizvodnju čelika u integralnim željezarama pri čemu se "koksom metalurgijom" u visokoj peći (BF) dobiva sirovo željezo koje se prevede u čelik u kisikovom konvertoru (LD), a sekundarnom metalurgijom dobiva se čelik željenih svojstava. Pri tome se upotrebljava sinteirana ili peletizirana željezna ruda s nešto recikliranog čeličnog otpada. Zbog niže cijene i veće učinkovitosti u odnosu na ostale postupke proizvodnja čelika u kisikovim konvertorima već je desetljećima jedan od najvažnijih postupaka proizvodnje čelika.
- pretalijavanje čeličnog otpada u elektrolučnoj peći (EAF) i primjena sekundarne metalurgije.
- pretalijavanje čeličnog otpada zajedno sa spužvastim željezom ili nekim od proizvoda direktne redukcije koji su nositelji željeza (DRI, tekuće sirovo željezo itd.), čime se izbjegava "koksna metalurgija" i proizvodnja sirovog željeza u visokoj peći. Taj način je osobito zastupljen u zemljama koje raspoložu zemnim plinom ili nemaju čeličnog otpada ili je njegova cijena visoka. Proizvedeni čelik je visoke kvalitete sa znatno manjim udjelom oligoelemenata.

Proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći u Europskoj uniji (EU) u razdoblju od 2005. do 2015. neznatno se smanjila (tablica 1), dok je u svijetu porasla za gotovo 30 %. Tijekom 2015. godine elektropečnim postupkom proizvedeno je 25,8 % čelika u svijetu, u EU-u 39,4 %, u ostatku Europe 64,6 %, u zemljama Sjeverne Amerike 62,6 %, u zemljama Južne Amerike 30,7 %, a u zemljama Bliskog istoka 91,8 %.<sup>6</sup>

\* Autor za dopisivanje: dr. sc. Ankica Rađenović, redovni profesor  
e-pošta: radenova@simet.hr

Slika 1 – Načini i kombinacije proizvodnje čelika<sup>5</sup>Fig. 1 – Ways and combinations of steel production<sup>5</sup>Tablica 1 – Količine proizvedenog čelika elektropečnim postupkom u razdoblju od 2005. do 2015. godine<sup>6</sup>Table 1 – Quantities of steel produced by electric arc furnace process in the 2005-2015 period<sup>6</sup>

Godina Year	Proizvodnja čelika u elektropeći/t Steel production in the electric arc furnace/t	
	svijet/world	EU
2005.	359.969.000	72.560.000
2006.	396.720.000	83.418.000
2007.	431.466.000	84.708.000
2008.	429.295.000	82.740.000
2009.	356.541.000	61.226.000
2010.	421.750.000	71.147.000
2011.	454.198.000	75.825.000
2012.	448.349.000	70.487.000
2013.	428.808.000	66.292.000
2014.	430.042.000	66.039.000
2015.	408.670.000	65.497.000

Prilikom procesa proizvodnje čelika, okoliš se opterećuje različitim emisijama u zrak, vodu i tlo kao i proizvodnim ostacima koji mogu biti opasni ili neopasni otpad. Svojedobno gotovo svi proizvodni ostaci smatrani su otpadom i kao takvi često su odlagani na vlastitim, uglavnom neuređenim odlagalištima u blizini čeličana. Među tim ostacima posebno se isticala elektropečna troska (šljaka, zgura) kao

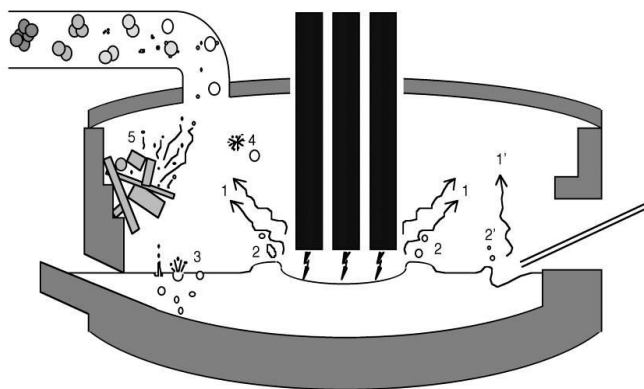
i ogorina, istrošeni vatrostalni materijali, lomljene grafitne elektrode i elektropečna prašina. Tijekom proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći kao najznačajniji proizvodni ostatak nastaje čeličanska troska u količinama od 40 do 270 kg t<sup>-1</sup> sirovog čelika. Prema kemijskom sastavu čeličanska troska sastoji se od oksida kalcija, željeza, silicija, aluminijske, magnezij i mangana povezanih u složene spojeve kalcijevih silikata, alumosilikata i alumoferita.<sup>8-11</sup> Troska se u većoj mjeri smatra neopasnim otpadom iako u slučaju proizvodnje visokolegiranih čelika, kada čelični otpad sadrži teške metale, može biti klasificirana i kao opasni otpad.<sup>12</sup> Prema sadržaju ukupnog željeza, sadržaju oksida silicija, aluminijske, kalcija i magnezij, čeličanska ogorina vrijedna je sirovina i predstavlja kvalitetan željezonošni materijal. Osim u metalurškoj industriji, ogorina se upotrebljava i kao donor željeza pri proizvodnji cementa, kod proizvodnje baterija, kao katalizator, za proizvodnju gnojiva, boja itd.<sup>13</sup> Ostaci istrošenih i slomljenih elektroda čine vrstu otpada koja se naziva grafitni lom i važan je u smislu utjecaja na cijenu proizvodnje čelika.<sup>14</sup> Tijekom popravaka ozida elektropeći nastaje otpad koji čini vatrostalni materijal. Takav otpad najčešće se odlagao na tvornička odlagališta otpada ili se djelomice rabio u procesu proizvodnje čelika kao troskotvorni materijal ili za izradu mješavine za vatrostalno održavanje dijelova proizvodne linije.<sup>7</sup>

### 3. Elektropečna prašina

Elektropečna prašina je, odmah nakon troske, najznačajniji otpad iz procesa proizvodnje čelika; razvrstava se kao opasni otpad jer sadrži teške metale i štetne spojeve

(ključni broj 10 02 07\*). Procjenjuje se da oko 96 % čestica elektropečne prašine pripada skupini lebdećih čestica  $PM_{10}$ .<sup>15,16</sup> Faze i mjesta u procesu proizvodnje čelika kod kojih nastaje elektropečna prašina su sljedeće:

- punjenje peći s čeličnim otpadom i dodatcima (vapno, ugljen...),
- između elektroda i čeličnog otpada, gdje se uspostavlja električni luk koji tali čelični otpad i formira talinu prekrivenu troskom,
- tijekom rafiniranja čelične taline,
- tijekom izlijevanja čelične taline.



Slika 2 – Prikaz mjesta nastajanja prašine u elektropečnoj peći<sup>17</sup>  
Fig. 2 – Dust generation area in an electric arc furnace<sup>17</sup>

U formiranju elektropečne prašine unutar peći sudjeluju čestice oksida oslobođene iz korozijskog sloja s površine čeličnog otpada i dijelovi rasprsnutih kapljica taline koje fizikalno-kemijskim transformacijama i međusobnim

aglomeriranjem tvore konačne čestice elektropečne prašine. Na slici 2 prikazana su mjesta nastajanja prašine u elektropečnoj peći<sup>17</sup> koja su povezana s isparavanjem (1), odvajanjem čestica metalnih oksida s korodirane površine čeličnog otpada (2), rasprskavanjem mješurica CO iz površinskog sloja taline (3) uslijed čega nastaje glavina prašine (oko 60 %), rasprskavanjem kapljica taline u zoni kontakta s oksidirajućom atmosferom iznad taline (4) i pojavom čvrstih čestica za vrijeme dodavanja ugljena i stare elektropečne prašine koja se reciklira (5). Nošena dimnim plinovima, nastala prašina skuplja se u vrećastim ili elektrostatskim filtrima.

### 3.1. Opterećivanje okoliša elektropečnom prašinom

Elektropečna prašina sakupljena čišćenjem dimnih plinova u elektrofiltrima predstavlja samo djelomično riješen problem glede emisija u zrak, dok njezine količine i kemijski sastav pokazuju da se moraju primijeniti cjelovita rješenja za njezino potpuno i konačno zbrinjavanje. S obzirom na to da elektropečna prašina nastaje u procesu proizvodnje čelika elektropečnim postupkom, nameće se pitanje koje su to količine prašine kojima je bio opterećen okoliš. U tablici 1 su podaci o količinama čelika proizvedenog u svijetu i EU-u u razdoblju od 2005. do 2015. godine. Budući da ne postoje potpuni podaci o količinama nastale elektropečne prašine u navedenom razdoblju, one se mogu samo procijeniti. Prema Referentnom dokumentu o najboljim raspoloživim tehnikama zaštite okoliša za proizvodnju željeza i čelika (BREF)<sup>18</sup> po toni proizvedenog čelika elektropečnim postupkom nastaje od 10 do 30 kg prašine. Na temelju toga procijenjene količine nastale prašine u razdoblju od 2005. do 2016. prikazane su u tablici 2. Budući da se radi o količinama koje nisu zanemarive, od iznimne je važnosti poznavati fizikalno-kemijska svojstva elektropečne prašine i naći najpogodnije načine njezina zbrinjavanja.

Tablica 2 – Količine elektropečne prašine nastale pri procesu proizvodnje čelika u elektropečni, razdoblje 2005. – 2016. godine<sup>19</sup>  
Table 2 – Quantities of electric arc furnace dust generated during steel production in the electric arc furnace, 2005-2016<sup>19</sup>

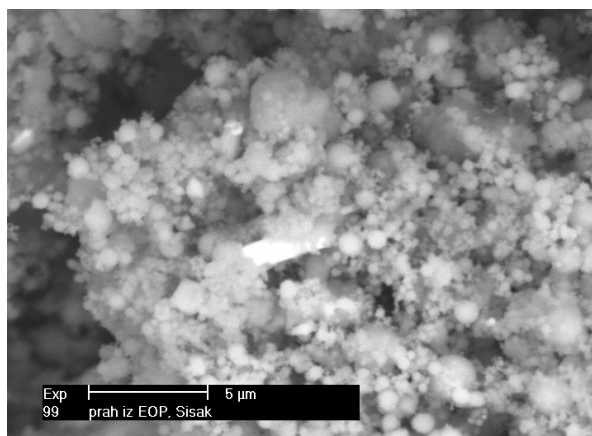
Godina/Year	Elektropečna prašina/ 10 – 30 kg prašine/t čelika Electric arc furnace dust/ 10–30 kg dust/t steel)					
	svijet world/t		EU/t		Hrvatska Croatia/t	
2005.	3.599.690	10.799.070	725.600	2.176.800	730	2190
2006.	3.967.200	11.901.600	834.180	2.502.540	810	2430
2007.	4.314.660	12.943.980	847.080	2.541.240	750	2250
2008.	4.292.950	12.878.850	827.400	2.482.200	890	2670
2009.	3.565.410	10.696.230	612.260	1.836.780	430	1290
2010.	4.217.500	12.652.500	711.470	2.134.410	950	2850
2011.	4.541.980	13.625.940	758.250	2.274.750	960	2880
2012.	4.483.490	13.450.470	704.870	2.114.610	10	30
2013.	4.288.080	12.864.240	662.920	1.988.760	1350	4050
2014.	4.300.420	12.901.260	660.390	1.981.170	1670	5010
2015.	4.086.700	12.260.100	654.970	1.964.910	1220	3660
2016.	4 124 000	12 372 000	648 000	1 944 000	0	0



### 3.2 Fizikalno-kemijska svojstva elektropečne prašine

Čestice elektropečne prašine su tamnosmeđe do crne boje okruglog oblika veličine oko 1  $\mu\text{m}$ .<sup>20</sup> S obzirom na to da je ta prašina opasni proizvodni otpad, prije svega zbog prisutnosti teških metala, njezino izravno odlaganje na tlo nije moguće. Naime, nepropisno odlaganje takve prašine na tlo u krugu čeličana ili na druga neuređena odlagališta opasno je zbog mogućeg prodiranja eluata u tlo i štetnog utjecaja na okoliš. Kako bi se to spriječilo, razvijeni su različiti postupci obrade elektropečne prašine kojima se uklanjaju opasni sastojci ili se prašina rabi kao sekundarna sirovina u metalurgiji ili u nekim drugim industrijskim djelatnostima. Pri karakterizaciji elektropečne prašine kao proizvodnog otpada određuju se različita svojstva (kemijski sastav, fazni sastav, krupnoća zrna, morfološka i radiokemijska ispitivanja itd.).

**Krupnoća zrna.** Elektropečna se prašina pojavljuje u obliku aglomerata sastavljenih od veoma finih pojedinačnih zrna (slika 3). Ovisno o ispitivanom uzorku prašine, krupnoća zrna može dosta varirati, pa se tako u jednom istraživanju autora *Sofilić i sur.* prašina sastoji od zrna promjera manjeg od 1  $\mu\text{m}$ , dok su njihovi aglomerati i preko 200  $\mu\text{m}$ .<sup>21</sup> Rezultati sličnih istraživanja autora *Sofilić i sur.* pokazali su da se prašina najčešće sastoji od aglomerata krupnoće 63 – 90  $\mu\text{m}$  i 100 – 125  $\mu\text{m}$ , dok se najmanje pojavljuje u rasponu 90 – 100  $\mu\text{m}$ .<sup>22</sup> U drugom primjeru<sup>17</sup> neki aglomerati dosežu veličinu i do 1000  $\mu\text{m}$ .



Slika 3 – Elektronski mikrosnimak uzorka elektropečne prašine (uvećanje 6400 $\times$ )<sup>22</sup>

Fig. 3 – SEM micrograph of electric arc furnace dust sample (enlargement 6400 $\times$ )<sup>22</sup>

**Kemijski sastav.** Pri karakterizaciji elektropečne prašine kao i drugih otpada obično se polazi od utvrđivanja njezina kemijskog sastava. Prema ranijim istraživanjima, elektropečna prašina može sadržavati sljedeće elemente:<sup>22–27</sup> 10 – 45 % Fe, 2 – 38 % Zn, 0.40 – 7.00 % Pb, 0.2 – 11 % Cr, 0.01 – 0.30 % Cd, 1 – 5 % Mn, 0.06 – 3 % Cu, 1 – 5 % Si, 1 – 25 % Ca, 1 – 12 % Mg, 0.1 – 1.5 % Al, 0.11 – 2.36 % C, 1.5 – 2.5 % S, 0.29 – 2.31 % Na, 0.06 – 2.31 % K.

**Mineraloški sastav.** S obzirom na to da se sastav elektropečne prašine razlikuje ovisno o vrsti upotrijebljenog čeličnog otpada, kvaliteti čelika koji se proizvodi, tehnološkim uvjetima rada itd., i mineraloški sastav se uvelike može razlikovati. U jednom istraživanju zaključeno je da su najčešće faze u elektropečnoj prašini franklinit ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) i cinkit ( $\text{ZnO}$ ).<sup>28</sup> U drugim istraživanjima utvrđena je prisutnost sljedećih faza:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ , FeO, Fe-met., 2  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , ZnO,  $\text{SiO}_2$  (kvarc), 3  $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ , 4  $\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ .<sup>20,29</sup>

**Radioaktivnost.** Čelični otpad koji se rabi za proizvodnju čelika u svojem kemijskom sastavu može sadržavati i radioaktivne elemente. Radionuklidi koji dospiju u elektropečnu prašinu djeluju radioaktivno tijekom dugog razdoblja, ovisno o vremenu poluraspada svakog pojedinog izotopa. U čeličnom otpadu pojavljuju se  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{60}\text{Co}$ , a uz njih mogu se naći i  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  itd.<sup>30</sup> Istraživanje provedeno na uzorcima prašine nastale u procesima proizvodnje domaćih ugljičnih čelika utvrdilo je prisutnost prirodnih izotopa  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  i umjetnog izotopa  $^{137}\text{Cs}$  u elektropečnoj prašini.<sup>31</sup> Sadržaj tih radioaktivnih tvari bio je ispod graničnih vrijednosti koncentracija aktivnosti ispod kojih se pojedini radionuklidi izuzimaju iz nadzora i zaključeno je da se takva prašina može rabiti kao sirovina u raznim industrijama.

## 4. Uporaba elektropečne prašine

### 4.1. Uporaba elektropečne prašine u procesu proizvodnje čelika

Danas se u nekim svjetskim čeličana prašina zbrinjava iskorištavanjem željezonosnog dijela, njezinom uporabom u elektrolučnoj peći pri proizvodnji čelika. Pri tome ostali prisutni elementi i njihovi spojevi u prašini, kao što su Zn, Pb, Mn, Cr itd., nemaju negativan učinak na kvalitetu čelika a, ako je potrebno, može ih se izdvojiti putem troske. U takvim procesima elektropečna prašina se prije ulaganja u peć miješa s ogorinom, koja povećava udio željeza te koksom ili ugljenom koji služe kao redukcijska sredstva. Jedan od postupaka obrade prašine pogodna za ulaganje u elektropeč je njezino briketiranje, uporabom materijala poput prašine i ogorine uz uporabu reducensa i veziva. Uz briketiranje, primjenjuje se i metoda injektiranja prašine kopljima koja se obično uvode kroz stijenku peći na mjestu granice taline i troske.<sup>20,32–34</sup>

### 4.2 Uporaba elektropečne prašine u metalurgiji neželjeznih metala

S obzirom na kemijski sastav elektropečne prašine i sadržaj metala, razvijeni su tehnološki postupci kojima se metali (Zn, Pb, Cd, Cu, Cr, Ni i Mo) djelomično ili potpuno mogu oporabiti, a dobiveni proizvodi su čisti metali, njihovi oksidi i/ili soli. Prema tehnološkom načinu obrade prašine u svrhu dobivanja u prašini prisutnih metala, primjenjuju se različiti postupci navedeni u tablici 3.

Tablica 3 – Najčešće primijenjeni postupci uporabe elektropećne prašine<sup>7</sup>Table 3 – Most commonly used procedures for reuse of electric arc furnace dust<sup>7</sup>

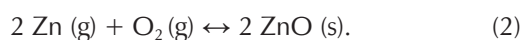
Postupak Procedure	Vrsta procesa Process type	Dobiveni proizvod Product obtained
WAEZL	Pirometalurgija Pyrometallurgy	ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pb- Cl <sub>2</sub> , CdCl <sub>2</sub>
reaktor s plamenom flamereactor	Pirometalurgija Pyrometallurgy	ZnO
DRI	Pirometalurgija Pyrometallurgy	ZnO, Fe <sub>met</sub>
ALLMET	Pirometalurgija Pyrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , Fe/Fe <sub>3</sub> C
STAR	Pirometalurgija Pyrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , Fe <sub>met</sub>
ZIPP	Pirometalurgija Pyrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , Fe <sub>met</sub>
IBDR-ZIPP	Piro-/hidrometalurgija Pyro-hydrometallurgy	ZnO, Fe <sub>metr</sub> , smjesa soli
MRT	Piro-/hidrometalurgija Pyro-hydrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , Fe <sub>metr</sub> , Pb/ Cd <sub>met</sub>
EZINEX	Hidrometalurgija Hydrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , Pb/Cd <sub>met</sub>
ZINCEX	Hidrometalurgija Hydrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , ZnSO <sub>4</sub> , Pb, Cd-smjesa
REZEDA	Hidrometalurgija Hydrometallurgy	Zn <sub>metr</sub> , Fe-oksid, Pb/ Cd <sub>met</sub>

#### 4.2.1 Pirometalurški procesi obrade elektropećne prašine

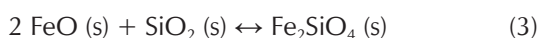
Najčešće primjenjivani tehnološki postupci za obradu elektropećne prašine su pirometalurški procesi od kojih prevladava postupak WAEZL, koji će biti detaljnije opisan u slučaju dobivanja ZnO, odnosno elementarnog cinka.<sup>15,34,35</sup> U dugu, usku rotacijsku peć uvodi se punjenje koje čine mješavina elektropećne prašine, taloga, mulja, koksne prašine i povratne troske iz procesa. Šarža se lagano kreće kroz peć zahvaljujući rotaciji i zagrijava se plinom koji izlazi iz peći u suprotnom smjeru od kretanja šarže. U redukcijskoj zoni ZnO se reducira koksom na temperaturi od oko 1100 °C, a nastali cink isparava prema reakciji:<sup>21,36</sup>



a u reakciji cinkovih para i kisika nastaje cinkit:

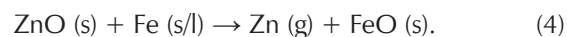


Ako se upotrebljava kiseli topitelj SiO<sub>2</sub>, u reakciji sa željezom nastaje željezov silikat (fajalit):



Ako se upotrebljava bazični topitelj CaO nastao disocijacijom dodanog karbonata, tada u reakciji sa željezovim oksidima iz prašine dolazi do formiranja ferita tipa  $n\text{CaO} \cdot m\text{FeO} \cdot p\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

U tehnološkim procesima obrade elektropećne prašine visokotemperaturnim postupcima u svrhu dobivanja metalnoga cinka javlja se problem u obliku reoksidacije kondenziranih cinkovih para i pomicanja ravnoteže reakcije u jednadžbi (1) ulijevo. Ta reoksidacija se sprječava dodatkom reducensa u suvišku ili se koks kao redukcijsko sredstvo zamjenjuje željezom te se redukcija cinkova oksida odvija prema jednadžbi:



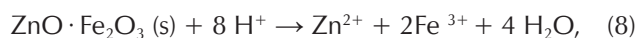
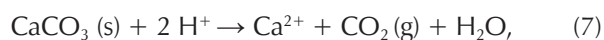
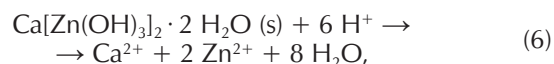
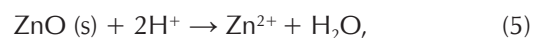
Nastale pare cinka kondenziraju se bez opasnosti od reoksidacijskih procesa, a samo tako dobiven cink odlikuje se većom čistoćom, dok se željezovi oksidi iz nastale troske mogu uporabiti u procesu proizvodnje željeza ili čelika.<sup>21</sup>

Obrada elektropećne prašine pirometalurškim postupcima u svrhu izdvajanja metala ima i svoje nedostatke. Naime, pirometalurški postupci veoma su zahtjevni u smislu potrebne toplinske energije za vođenje procesa, izgradnje sustava otprašivanja i sakupljanja nastalih produkata kao i dodatnih postupaka za njihovo međusobno odvajanje, čišćenje od nepoželjnih primjesa i prilagođavanje postupcima konačnog dobivanja metala u čistom stanju.<sup>21</sup> Također, kako bi postupci u kojima se upotrebljavaju rotacijske peći bili isplativi, oni uglavnom zahtijevaju velike količine elektropećne prašine.<sup>24</sup>

#### 4.2.2 Hidrometalurški procesi obrade elektropećne prašine

Prva postrojenja izgrađena su sedamdesetih godina prošlog stoljeća, a postupak se temeljio na principu izluživanja metala iz elektropećne prašine alkalijama, nakon čega se provodi obrada nastale otopine cinkovim prahom s ciljem uklanjanja drugih teških metala te elektrolize obrađene matične otopine bogate cinkom. Nakon toga razvoj hidrometalurških postupaka bio je usmjeren na postupke luženja sumpornom kiselinom, amonijevim i natrijevim ili kalijevim kloridom.<sup>36-38</sup> Uz te postoji i niz drugih, uglavnom modificiranih procesa u kojima se izluživanje i/ili otapanje provodi drugim sredstvima, npr. octenom kiselinom, amonijevim karbonatom, smjesom alkalijskih i zemnoalkalijskih klorida, željeznim (III) kloridom itd.<sup>7</sup>

Postupak luženja s H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, na temelju prethodno određenog mineraloškog sastava elektropećne prašine i uvjeta luženja s H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na temperaturi od 35 °C, opisan je jednadžbama:<sup>21</sup>



Na taj način otopi se oko 75 % cinka, a zaostali cink je u obliku cinkova ferita (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Osim što se u navedenom procesu ne otapa sav cink, nedostatak je i to što se moraju odvojiti i Ca i Fe iz otopine, kao i prisutnost halogenida

u otopini cinkova sulfata namijenjenih elektrolitičkom izdvajanju cinka. U postupku izluživanja cinka alkalijama prednost je što se ne otapaju željezovi spojevi, ali se cink iz faze cinkova ferita ne može iskoristiti ako prije luženja nije provedeno prženje. Inače, takvi postupci se konstantno unaprjeđuju i njihova primjena je u porastu.

Postupak luženja s NaOH, uz prethodno prženje, prikladan je za uporabu prašine koja u sebi sadrži i natrij, kalij, klor i fluor. Navedeni postupak sastoji se od prženja smjese EP prašine i NaOH pri niskim temperaturama (350 – 450 °C) i otapanja. Prašina se prije miješanja s lužinom opere vodom na temperaturi od 80 °C da bi se uklonili u vodi topljivi halogenidi. Tijekom prženja cinkov ferit i cinkov oksid prevode se u topljivi natrijev cinkat, što je prikazano jednadžbama:<sup>21</sup>



Osim pirometalurških i hidrometalurških, primjenjuju se i kombinirani procesi kao što su postupci MRT i IBDR-ZIPP. U postupku IBDR-ZIPP prašina se zagrijava, cink i olovo oslobađaju se u obliku plinova i skupljaju kao oksidi. Ti oksidi se zatim šalju na navodnjavanje, a nakon toga se izluživanjem dobije visokokvalitetni cinkov metalni prah, koji se nakon obrade u elektropećima lijeva u blokove i prodaje kao visokokvalitetni cink.<sup>39</sup>

### 4.3 Uporaba elektropećne prašine u drugim granama industrije

#### 4.3.1 Uporaba elektropećne prašine u proizvodnji cementa

Inaktivacija teških metala u prašini provodi se njihovom stabilizacijom postupkom solidifikacije, a prašina se uz upotrebu aditiva kao što je portland-cement prevede u novi oblik, te se takav materijal upotrebljava u graditeljstvu za izradu cementa, betona, itd.<sup>21</sup> Jedan od primjera<sup>40</sup> je mješavina portland-cementa kao solidifikatora i elektropećne prašine koja sadrži 6,49 % ZnO, ima specifičnu površinu 8,7 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> i prosječnu krupnoću zrna ~180 μm. Kvaliteta takve mješavine ispitivala se mijenjajući udio prašine od 0 do 85 %, pri čemu je utvrđeno da dodatci portland-cementu do 15 % prašine ne umanjuju čvrstoću ispitivanih uzoraka, a pri ispitivanju ekotoksičnosti tih materijala dobiveni su zadovoljavajući rezultati. Određivanjem sadržaja teških metala u eluatu, dobivene vrijednosti odgovarale su vrijednostima propisanim za neopasni otpad. Na temelju udjela prašine u smjesi i testa ekotoksičnosti materijali dobiveni solidifikacijom elektropećne prašine s portland-cementom razvrstani su na solidifikat (udio prašine 50 – 60 %) i građevinski materijal (udio prašine 5 – 15 %).

Pereira i sur.<sup>41</sup> su za stabilizaciju elektropećne prašine, uz portland-cement, rabili i pepeo ugljena, vapno, visokopećnu trosku i cement s visokim sadržajem aluminija. Salihoglu i Pinarli<sup>42</sup> su proučavali veziva pogodna za sta-

bilizaciju teških metala. Ukoliko je rabljeno samo vapno, cink se stabilizirao, ali stabilizacija olova nije bila moguća. Međutim, ako se uz vapno upotrebljava i portland-cement u omjeru 1 : 1, rezultati stabilizacije i cinka i olova bili su znatno bolji. Vrijednosti eluata i za cink i za olovo bili su niži u usporedbi sa slučajevima kada se kao vezivo rabilo samo vapno ili samo portland-cement. Upotrebom takve smjese veziva može se stabilizirati do 30 % elektropećne prašine. Kao idealnu za stabilizaciju elektropećne prašine navode smjesu sastavljenu od 30 % prašine, 35 % vapna i 35 % portland-cementa. Najvažnijim faktorom kod stabilizacije elektropećne prašine smatraju se konačni pH eluata i obujam neutralizacije kiseline, čime su potvrđeni zaključci iz prijašnjih radova. Šturm i sur.<sup>43</sup> proveli su istraživanje o utjecaju elektropećne prašine u cementu na okoliš. Izrađeno je nekoliko različitih mješavina u kojima je maseni udjel elektropećne prašine iznosio 1; 1,5; 3 i 5 %, te je zaključeno da mješavina sa samo 1 % elektropećne prašine ima najbolja svojstva, dok one s 3 i 5 % imaju znatno lošija svojstva i kao takve nisu pogodne za upotrebu. Testovi ekotoksičnosti provedeni su na mješavini s 1,5 % i dobiveni su zadovoljavajući rezultati, čime je zaključeno da je smjesa s udjelom elektropećne prašine do 1,5 % pogodna za upotrebu, kako u pogledu fizikalno-kemijskih svojstava tako i u smislu utjecaja na okoliš. U radu u kojem je također rabljena mješavina elektropećne prašine i portland-cementa, utvrđeno je da se takva mješavina ne može upotrebljavati u gradnji. Međutim, prethodnim umakanjem prašine u vodu i uklanjanjem lužnatih spojeva, dobiva se cement visoke čvrstoće i poboljšanih karakteristika koji je pogodan za primjenu u graditeljstvu.<sup>35</sup>

#### 4.3.2 Uporaba elektropećne prašine u graditeljstvu

Jedan od postupaka uporabe elektropećne prašine je u izradi betona pri čemu je djelomice zamijenjen cement, smanjena cijena novonastalog betonskog proizvoda, a neki od sastojaka industrijskog otpada dodanih u cement čak i poboljšavaju svojstva betona izrađenih od tako modificiranog cementa.<sup>21</sup> Ti i slični postupci obrade opasnog otpada kemijskom stabilizacijom tj. imobilizacijom teških metala zasnivaju se na svojstvu sličnom svojstvu pucolana da uz dodatak vapna, vode i drugih kemikalija dolazi do adsorpcije i/ili fizičkog blokiranja teških metala u osnovi tog materijala, koju čine kalcijevi alumosilikati. Nastali otvrdnuti materijal može poslužiti u graditeljstvu za izradu građevinskih blokova, žbuke ili se upotrebljava za stabilizaciju nekog drugog opasnog otpada, kao što je npr. pepeo spalionice komunalnog otpada. Dio cementa može se supstituirati elektropećnom prašinom, pri čemu variraju maseni udjel elektropećne prašine od 0,5 do 5 %. Istraživanja Šturma i sur.<sup>43</sup> provedena su na uzorcima u kojima je udjel prašine bio 0 %, 10 %, 15 % i 20 % u odnosu na cement, a ispitivane su vlačna i tlačna čvrstoća betona. Zaključeno je da sa svakim porastom udjela elektropećne prašine raste i čvrstoća betona te je po kvaliteti takav beton jednak tradicionalnoj smjesi pa čak i bolji. Analizom je također utvrđeno da su svi prisutni elementi u dopuštenim granicama te nema opasnosti po okoliš.



#### 4.3.3 Uporaba elektropečne prašine u industriji stakla i staklene keramike

Pri odlaganju opasnog otpada na za to predviđena odlagališta postoji opasnost od prodiranja eluata opterećenih teškim metalima u okoliš. Ostatak nakon spaljivanja otpada također predstavlja novi problem, jer često sadrži dioksin i teške metale, a samim time zahtijeva daljnju obradu. Pokazalo se da su vitrifikacija ili postakljivanje pogodna tehnološka opcija kojom se uspješno smanjuje volumen otpada, učinkovito razgrađuje eventualno prisutna organska komponenta, a što je najznačajnije, opasan otpad se prevodi u postojan neopasan oblik.<sup>35</sup>

Vitrifikacijom se mogu obraditi sve vrste opasnog otpada (otopine, muljevi, prašine, itd.).<sup>44,45</sup> Produkti nastali obradom otpada vitrifikacijom imaju ekonomsku vrijednost i mogu se upotrijebiti za izradu različitih građevinskih elemenata poput opeka, crjepova, cijevi za odvodnju, kame- ne vune te u industriji stakla i staklene keramike.<sup>21</sup> Vitrifikacija se može izvoditi miješanjem prašine s kaolinitom ili nekim drugim materijalom visokog sadržaja  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u rotacijskim pećima pri 1100 – 1200 °C. Kao izvor  $\text{SiO}_2$  može poslužiti i kvarcni pijesak kada se proces vitrifikacije izvodi kod viših temperatura (1400 – 1450 °C). *Kavouras i sur.*<sup>46</sup> primjenjivali su vitrifikaciju za dobivanje inertnih staklenih materijala koji su kasnije toplinskom obradom prevedeni u staklenu keramiku. Elektropečna prašina pomiješana je sa  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{CaO}$  i dobivena su tri različita punjenja koja su zagrijavana 2 h pri 1400 °C, a zatim su naglo hlađena na sobnu temperaturu. Nakon toga staklo je podvrgnuto testovima primjenom odgovarajućih normiranih metoda kako bi se utvrdila njegova ekotoksičnost, pH i specifična provodljivost. Dobiveni rezultati bili su unutar propisanih vrijednosti, pa su ispitane smjese rabljene za dobivanje stabilnih staklenih proizvoda. Ispitivanjima opisanim u drugom radu<sup>47</sup> prašina je pomiješana sa  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  i  $\text{CaCO}_3$  u različitim udjelima, mješavine su kao i u prethodnom radu zagrijavane u elektropeći 2 h pri 1400 °C, a zatim hlađene na sobnu temperaturu. Naknadnim testovima je utvrđeno da su Zn i Pb kao najopasniji metali u prašini uspješno imobilizirani, a nastalo staklo imalo je zadovoljavajuću čvrstoću bez oštećenja.

## 5. Zaključak

Uzimajući u obzir fizikalno-kemijska svojstva elektropečne prašine, njezine vrijedne sastojke i količine u kojima se pojavljuje tijekom procesa proizvodnje čelika, postupak njezina zbrinjavanja može se zamijeniti njezinom uporabom. Većina razvijenih i komercijaliziranih procesa primjenjuju se za uporabu elektropečne prašine, dok se manji dio primjenjuje za inaktivaciju, odnosno stabilizaciju teških metala unutar prašine. Također takvu prašinu je moguće dodati u smjese za proizvodnju cementa, za izradu betona, u industriji stakla, boja, itd. Zbog velikog udjela željeza pogodna je za povratak u proces proizvodnje čelika, čemu prethodi briketiranje prašine ili injektiranje prašine kopljima u elektropeč. U metalurgiji neželjeznih metala razvijeni

su različiti pirometalurški i hidrometalurški postupci kojima se metali (Zn, Pb, Cd, Cu, Cr, Ni i Mo) djelomično ili potpuno mogu oporabiti, a dobiveni proizvodi su čisti metali, njihovi oksidi i/ili soli. Na temelju ispitanih fizikalno-kemijskih svojstava elektropečne prašine moguće je odrediti ekološki i ekonomski najisplativiji način uporabe prašine, čime se ona prevodi iz otpada u vrijednu sirovinu pogodnu za primjenu u raznim industrijskim granama, te se tako može rješavati problem zbrinjavanja tog opasnog otpada.

### Popis kratica i simbola

#### List of abbreviations and symbols

PAH	– policiklički aromatski ugljikovodici – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PCB	– poliklorirani bifenili – Polychlorinated Biphenyls
PCDD	– poliklorirani dibenzo- <i>p</i> -dioksini – Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins
PCDF	– poliklorirani dibenzofurani – Polychlorinated Dibenzofurans
BF	– visoka peć – Blast Furnace
LD	– Linz Donawitz konvertor – Linz Donawitz converter
EAF	– elektrolučna peć – Electric Arc Furnace
DRI	– izravno reducirano željezo – Direct Reduced Iron
EOF	– energetski optimirana peć – Energy Optimizing Furnace
EU	– Europska Unija – European Union
BREF	– referentni dokumenti o najboljim raspoloživim tehnikama – Best Available Techniques Reference Document
WAEZ	– prema imenu izumitelja (nema adekvatne hrvatske inačice ni značenja kratice na engleskom jeziku) – after the inventor's name (there is no adequate Croatian version or meaning of the abbreviation in English)
ALLMET	– prema nazivu tvrtke u SAD – name of USA company
STAR	– napredni reaktor od nehrđajućeg čelika – Stainless-Steel Advanced Reactor
ZIPP	– plazma projekt cink željezo – Zinc Iron Plasma Project
IBDR-ZIPP	– nema adekvatne hrvatske inačice – Iron Bearing Dust Recovery-Zinc Iron Plasma Project
MRT	– tehnologije oporavka metala – Metal-Recovery Technologies
EZINEX	– Engitec ekstrakcija cinka – Engitec Zinc Extraction
ZINCEX	– ekstrakcija cinka – Zinc Extraction



## Literatura References

1. J. O. Nriagu, Global metal pollution: poisoning the biosphere? *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* **32** (1990) 7–33, doi: <https://doi.org/10.1080/00139157.1990.9929037>.
2. M. Holtzer, J. Danko, R. Danko, Possibilities of formation of dioxins and furans in metallurgical processes as well as methods of their reduction, *Metalurgija* **46** (4) (2007) 285–290.
3. T. Sofilić, A. Rastovčan-Mioč, Z. Šmit, Značaj emisije polikloriranih dibenzo-p-dioksina i dibenzofurana od procesa proizvodnje željeza i čelika, *Kem. Ind.* **55** (12) (2006) 511–522.
4. B. J. Alloway, D. C. Ayres, *Chemicals principles of environmental protection*, Sec. Ed. Springer, 1993., str. 12–15.
5. M. Gojić, J. Črnko, S. Kožuh, Proizvodnja čelika u dvadesetom stoljeću, *Kem. Ind.* **51** (7-8) (2002) 317–328.
6. The world steel association, *Steel statistical yearbook*, 2016.
7. T. Sofilić, I. Brnardić, *Održivo gospodarenje otpadom, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški Fakultet Sisak*, 2015.
8. Types of iron and steel slag, <http://www.slg.jp/e/slag/kind.html> (3. 10. 2017.).
9. T. Sofilić, A. Mladenović, U. Sofilić, Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production, *J. Environ. Eng. Landsc.* **19** (2) (2011) 148–157, doi: <https://doi.org/10.3846/16486897.2011.580910>.
10. B. Bradaškja, J. Triplat, M. Dobnikar, B. Mirtič, A mineralogical characterization of Steel-Making Slag, *Mater. Tehnol.* **38** (3-4) (2004) 205–208.
11. M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lindstrom Larsson, B. Bjorkman, Characteristics of steel slag under different cooling conditions, *Waste Manage.* **27** (2007) 1335–1344, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.002>.
12. URL: [http://www.researchgate.net/publication/260980474\\_Iron\\_and\\_Steelmaking\\_Slags\\_Are\\_They\\_Hazardous\\_Waste](http://www.researchgate.net/publication/260980474_Iron_and_Steelmaking_Slags_Are_They_Hazardous_Waste) (3. 10. 2017.).
13. URL: [http://www.ironconsortium.org/assets/files/sief/Uses-Description\\_MillScale\\_20140108.pdf](http://www.ironconsortium.org/assets/files/sief/Uses-Description_MillScale_20140108.pdf) (28. 9. 2017.).
14. URL: [http://www.metallon.com.ar/fotos/1986Electric\\_Furnace\\_Steelmaking.pdf](http://www.metallon.com.ar/fotos/1986Electric_Furnace_Steelmaking.pdf) (28. 9. 2017.).
15. T. Sofilić, Š. Cerjan-Stefanović, Đ. Mandrino, A. Rastovčan-Mioč, B. Mioč, Teške kovine u čeličanskoj elektropečnoj prašini, *Kem. Ind.* **54** (12) (2005) 505–512.
16. Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production, industrial directive 2010/75/EU integrated pollution prevention and control.
17. A. G. Guézennec, J. C. Huber, F. Patisson, P. Sessieq, P. S. Birat, D. Ablitzer, Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles, *Powder Technol.* **157** (2005) 2–11, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.006>.
18. URL: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IS/IS\\_Published\\_0312.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IS/IS_Published_0312.pdf), (4. 9. 2017).
19. URL: <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html> (4. 9. 2017.).
20. T. Sofilić, *Prijedlog zbrinjavanja elektropečne prašine u CMC Sisak d. o. o., Sisak: CMC Sisak d. o. o., 2008.*
21. T. Sofilić, A. Rastovčan-Mioč, Š. Cerjan-Stefanović, Postupanje s elektropečnom prašinom – opasnim metalurškim otpadom, *Ljevarstvo* **46** (4) (2004) 103–113.
22. T. Sofilić, A. Rastovčan-Mioč, Š. Cerjan-Stefanović, V. Novosel-Radović, M. Jenko, Characterization of steel mill electric-arc furnace dust, *J. Hazard. Mat.* **109** (2004) 59–70, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.032>.
23. J. G. M. S. Machadoa, F. A. Brehm, C. A. Moraes, A. C. F. Santos, Vilela, J. B. M. Cunha, Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust, *J. Hazard. Mater.* **136** (2006) 953–960, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044>.
24. S. R. Rao, *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*, McGill University, Montreal, 2006., str. 285–315.
25. D. K. Xia, C. A. Pickles, Caustic roasting and leaching of electric arc furnace dust, *Can. Metall. Q.* **38** (1999) 175–186, doi: <https://doi.org/10.1179/cm.1999.38.3.175>.
26. R. Sekula, M. Wnek, A. Selinger, M. Wrobel, Electric arc furnace dust treatment: investigation on mechanical and magnetic separation methods, *Waste Manage. Res.* **19** (2001) 61–78, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X0101900402>.
27. C. Sikalidis, M. Mitrakas, R. Tsitouridou, Immobilization of electric arc furnace dust toxic elements within the matrix of concrete based products, *Global NEST Journal* **12** (4) (2010) 368–373.
28. C. Z. Rizescu, Z. Baicinschi, E. V. Stolan, A. A. Poinescu, Characterization of steel mill electric-arc furnace dust, in *Advances in waste management*, Valahia University, Targoviste, Romania, 2010., str. 139–143.
29. T. T. Chen, J. E. Dutrizac, D. R. Owens, Mineralogical characterization of EAF dusts from plain carbon steel and stainless steel operations, *Waste Process. Recycl.* **3** (1998) 511–525.
30. M. S. Rahman, B. S. Barua, Md. R. Karim, M. Kamal, Investigation of Heavy Metals and Radionuclide's Impact on Environment due to the Waste Products of Different Iron Processing Industries in Chittagong, Bangladesh, *J. Environ. Prot.* **8** (2017) 974–989, doi: <https://doi.org/10.4236/jep.2017.89061>.
31. T. Sofilić, D. Barišić, U. Sofilić, Monitoring of <sup>137</sup>Cs in electric arc furnace steel making process, *J. Radionucl. Chem.* **284** (2010) 615–622, doi: <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0513-9>.
32. J. Jezierski, K. Janerka, Powder pneumatic injection as a tool for wastes utilization, *Arch. Mater. Sci. Eng.* **36** (2) (2009) 118–124.
33. J. Jezierski, K. Janerka, Selected aspects of metallurgical and foundry furnace dust utilization, *Pol. J. Environ. Stud.* **20** (1) (2011) 101–105.
34. A. Magdziarz, M. Kuznia, M. Bembenek, P. Gara, M. Hryniewicz, Briquetting of EAF dust for its utilisation in metallurgical processes, *Chem. Proc. Eng.* **36** (2) (2015) 263–271, doi: <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0018>.
35. J. A. Araujo, V. Schalch, Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process, *J. Metall. Res. Technol.* **3** (3) (2014) 274–279, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>.
36. D. Stanojević, L. Filipović-Petrović, Doprinos integrisanoj valorizaciji metala u hidrometalurgiji cinka, *Zaštita materijala* **55** (1) (2014) 11–25, doi: <https://doi.org/10.5937/ZasMat1401011S>.
37. M. Cruells, A. Roca, C. Núñez, Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid, *Hydrometallurgy* **31** (3) (1992) 213–231, doi: [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K).
38. URL: [http://www.ams.tuke.sk/data/ams\\_online/1998/number1/mag01/mag01.pdf](http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/1998/number1/mag01/mag01.pdf), (7. 6. 2017.).
39. URL: <http://pyro.co.za/Mintek/Files/1998Assis.pdf> (10. 11. 2017.).

40. F. Škvara, F. Kaštanečnik, I. Pavelkova, O. Šolcova, Y. Maleterova, P. Schneider, Solidification of waste steel foundry dust with Portland cement, *J. Hazard. Mater.* **89** (1) (2002) 67–81, doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00294-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00294-1).
41. C. F. Pereira, M. Rodriguez-Pinero, J. Vale, Solidification/stabilization of electric arc furnace dust using coal fly ash. Analysis of the stabilization process, *J. Hazard. Mater.* **82** (2) (2001) 183–195, doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00359-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00359-9).
42. G. Salihoglu, V. Pinarli, Steel foundry electric arc furnace dust management: Stabilization by using lime and Portland cement, *J. Hazard. Mater.* **153** (2008) 1110–1116, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.066>.
43. T. Šturm, R. Milačić, S. Murko, M. Vahčić, A. Mladenović, J. Strupić Šuput, J. Ščančar, The use of EAF dust in cement composites: Assessment of environmental impact, *J. Hazard. Mater.* **166** (2009) 277–283, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.015>.
44. J. R. Conner, S. L. Hoeffner, A critical review of stabilization/solidification technology, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **28** (1998) 397–462, doi: <https://doi.org/10.1080/10643389891254250>.
45. P. Colombo, G. Brusatin, E. Bernardo, C. Scarinci, Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products, *Curr. Opin. Sol. Stat. Mater. Sci.* **7** (7) (2003) 225–239, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2003.08.002>.
46. P. Kavouras, Th. A. Ioannidis, Th. Kehagias, I. Tsilika, K. Chrisafis, S. Kokkou, A. Zouboulis, Th. Karakostas, EAFD- loaded vitreous and glass- ceramic materials, *J. Eur. Ceram. Soc.* **27** (2007) 2317–2323, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.07.021>.
47. P. Kavouras, T. Kehagias, I. Tsilika, G. Kaimakamis, K. Chrisafis, Glass-ceramic materials from electric arc furnace dust, *J. Hazard. Mater.* **A139** (2007) 424–429, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.043>.

## SUMMARY

### Electric Arc Furnace Dust as a Valuable Production Residue from the Steel Production Process

Ankica Rađenović,\* Tahir Sofilić, and Antonio Ivančić

Although, due to the presence of heavy metals, electric arc furnace dust is classified as hazardous waste, it can be used for various purposes, which is a more acceptable way of disposing it than in a landfill where the metals in the dust remain unused. This paper presents a review of electric arc furnace dust, its physicochemical properties and possible use. With regard to the physicochemical properties of electric arc furnace dust and its high iron content, a very convenient solution is its return to the primary process of steel production. Furthermore, electric arc furnace dust can be used in the non-ferrous metal industry to obtain heavy metals, such as zinc, as well as in some other industries (e.g., cement, ceramics, paint, etc.).

#### Keywords

*Metallurgical waste, electric arc furnace dust, disposal, reuse*

*University of Zagreb, Faculty of Metallurgy  
Aleja narodnih heroja 3  
44 103 Sisak, Croatia*

Review  
Received November 13, 2017  
Accepted December 23, 2017