

Metalurški otpad – izazovi i rješenja za upravljanje

A. Štrkalj,^{a*} Z. Glavaš,^a I. Bulić^{a,b} i M. Lončar^b

^aSveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44 000 Sisak

^bGospodarenje otpadom Sisak d.o.o., Trg Josipa Maderića 1, 44 000 Sisak

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



Sažetak

Metalurška industrija jedan je od značajnijih izvora industrijskog otpada, no velik dio tog otpada može se ponovno iskoristiti umjesto da završi na odlagalištima. Ovaj rad fokusira se na neopasne vrste metalurškog otpada, uključujući visokopećnu trosku i prašinu, čeličansku trosku te otpadnu kalupnu mješavinu. Prikazana su njihova svojstva, način nastanka te mogućnosti primjene u različitim industrijama. Visokopećna i čeličanska troska nalaze široku primjenu u građevinarstvu, cestogradnji i proizvodnji cementa, dok se otpadna kalupna mješavina može upotrebljavati za nasipavanje terena i drugim građevinskim aktivnostima. Osim toga, dokazano je da se ti materijali mogu upotrebljavati za poboljšanje svojstava tla, uključujući njegovu stabilnost, nosivost i plodnost, čime se omogućava njihova primjena u poljoprivredi i ekološkoj sanaciji degradiranih područja. Uporabom tih materijala smanjuje se potreba za eksploatacijom prirodnih resursa, uz istodobno smanjenje negativnog utjecaja na okoliš i potiče održivo gospodarenje otpadom. Umjesto tradicionalnog odlaganja, predloženi su načini valorizacije tih materijala koji doprinose razvoju kružnog gospodarstva i ekološki odgovorne industrijske proizvodnje.

Ključne riječi

Metalurgija, otpad, održivo gospodarenje

1. Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća količina otpada diljem svijeta naglo je porasla, a trend ne pokazuje znakove usporavanja. Taj rast potaknut je različitim čimbenicima, uključujući povećanje broja stanovnika, ubrzanu urbanizaciju, gospodarski razvoj i potrošačke navike. Posebno je izražena brza urbanizacija, osobito u zemljama u razvoju, gdje migracija iz ruralnih područja u gradove stvara sve veći pritisak na urbane centre. Industrijalizacija koja je donijela značajan napredak u proizvodnji i životnom standardu, ujedno je donijela i povećanje količine otpada. Masovna proizvodnja dovela je do upotrebe velikih količina sirovina, što je rezultiralo većim otpadom u svim sektorima. Industrijski sektor ima ključnu ulogu u generiranju otpada, posebice u sektorima kao što su metalurgija, kemijska industrija, automobilska industrija i proizvodnja plastike. Proizvodni procesi često uključuju upotrebu velikih količina resursa, pri čemu nastaje znatna količina otpada, uključujući opasni otpad s potencijalno štetnim kemikalijama.¹

Problematika otpada i njegovo gospodarenje nije važno pitanje samo danas. Naime već u predindustrijskim vremenima otpad, koji je uglavnom nastajao kao posljedica ishrane čovjeka (kosti, otpad biljnog porijekla), probave hrane ili materijala vezanih uz uporabu vatre (drvo, pepeo), odlagao se na tlo, gdje je služio kao kompost za poboljšanje kvalitete tla. Čovjek je još tada nastojao iskoristiti sve što je mogao za ponovnu uporabu, poput kože, perja, krzna i drugih materijala. Razvojem civilizacije, a kasnije i urbanizacije gradovi su donosili posebne uredbe kojima se prisiljavalo i definiralo da je svaka osoba odgovorna za

otpad koji stvara te ga je shodno tome trebala odnijeti van grada uz obvezatno prekrivanje zemljom.²

Tijekom priprema za ulazak u Europsku uniju, ali i danas, gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj prioritetno je pitanje zaštite okoliša i regulirano je različitim zakonskim aktima koji su usklađeni s aktima Europske unije.³ Osim toga, gospodarenje industrijskim otpadom treba imati posebnu važnost jer, uz smanjenje troškova u industrijskom sektoru, također doprinosi smanjenju negativnog utjecaja na okoliš.

S obzirom na to da je metalurška industrija jedan od većih proizvođača otpada, ovaj rad razmatra nekoliko vrsta metalurškog otpada, lokacije njegova nastanka te potencijalne mogućnosti njegove ponovne uporabe.

2. Otpad

Tijekom posljednjih godina predloženo je nekoliko definicija otpada. Zajednička nit koja ih povezuje jest pojam otpada kao materijala koji njegov proizvođač više ne želi. Prema definiciji Europske unije, otpad je "bilo koja tvar ili predmet koji posjednik odbacuje, namjerava odbaciti ili je dužan odbaciti".³ Osnovna podjela otpada je prema mjestu nastanka, pri čemu se dijeli na komunalni i proizvodni otpad. Komunalni otpad obuhvaća otpad iz kućanstava te otpad nastao u proizvodnim i uslužnim djelatnostima, pod uvjetom da je po sastavu i svojstvima sličan otpadu iz kućanstava. S druge strane, proizvodni otpad nastaje tijekom industrijskih, obrtničkih i drugih proizvodnih procesa te se od komunalnog otpada razlikuje po svojem sastavu i svojstvima. Iznimka su ostaci iz proizvodnog procesa koji se ponovno upotrebljavaju u proizvodnji istog proizvođača

* Autor za dopisivanje: prof. dr. sc. Anita Štrkalj
E-pošta: strkalj@simet.unizg.hr

te se ne smatraju proizvodnim otpadom.⁴ Prema Zakonu o gospodarenju otpadom⁵ u Republici Hrvatskoj otpad se prema mjestu nastanka može znatno detaljnije podijeliti, i to na komunalni, industrijski, ambalažni, građevinski, električni i elektronički otpad. Otpad se također može klasificirati prema još nekim kriterijima, uključujući sastav, podrijetlo i opasnost za okoliš i ljude. Prema podrijetlu otpad se dijeli na komunalni, industrijski, građevinski i poljoprivredni otpad. Komunalni otpad nastaje u kućanstvima i sličnim djelatnostima poput restorana, ureda i škola. Industrijski otpad rezultat je industrijskih procesa te često sadrži kemikalije i druge specifične tvari. Građevinski otpad obuhvaća materijale poput betona, cigli, drva i metala koji nastaju tijekom rušenja i izgradnje, dok poljoprivredni otpad uključuje nusproizvode poljoprivredne proizvodnje, poput biljnih ostataka. Prema sastavu, otpad može biti biorazgradiv, plastični, metalni, stakleni ili elektronički. Biorazgradivi otpad uključuje organske tvari, poput ostataka hrane i vrtnog otpada. Plastika je jedan od najproblematičnijih vrsta otpada zbog svoje dugotrajne razgradnje, dok se metalni otpad može reciklirati i ponovno upotrebljavati u proizvodnji. Staklo je lako reciklabilan materijal koji se može neograničeno ponovno obrađivati, dok elektronički otpad (e-otpada) sadrži i opasne i vrijedne materijale, poput olova, žive i zlata. S obzirom na opasnost, otpad se dijeli na opasni i neopasni. Opasni otpad obuhvaća kemikalije, boje, baterije i medicinski otpad, koji mogu predstavljati ozbiljnu prijetnju zdravlju i okolišu. S druge strane, neopasni otpad nema značajne štetne učinke ako se pravilno odloži. Također je moguća i podjela otpada prema svojstvima, pri čemu se otpad razvrstava u tri glavne skupine: opasni, neopasni i inertni otpad. U Republici Hrvatskoj opasni otpad je definiran Uredbom o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada. To je otpad koji, prema svojem sastavu i kategorijama, ima jedno ili više svojstava navedenih u Listi opasnog otpada. Neopasni otpad je onaj koji ne posjeduje niti jedno svojstvo koje bi ga činilo opasnim. Inertni otpad ne podliježe znatnim fizikalnim, kemijskim ili biološkim promjenama. On nije biorazgradiv, topljiv niti zapaljiv, a također ne reagira s drugim tvarima na način koji bi mogao ugroziti zdravlje ljudi, životinja ili biljaka ili uzrokovati povećanje dopuštenih emisija u okoliš.⁶

Proizvodni pogoni različitih industrija neizbježan su dio moderne civilizacije jer, među ostalim proizvode artikle koji ljudima olakšavaju i čine život praktičnijim. Međutim, industrijska proizvodnja istodobno stvara znatne količine biorazgradivog, nereciklirajućeg, pa čak i opasnog industrijskog otpada.

Kao što je već navedeno, industrijski otpad je otpad nastao različitim industrijskim aktivnostima i kao bilo koji drugi otpad definira se kao materijal koji tijekom industrijskog procesa postane beskoristan. Slično kao i komunalni otpad, industrijski otpad može se klasificirati prema agregatnom stanju (čvrsti, polučvrsti i tekući) te na osnovi toksičnosti na opasni i neopasni. Bez obzira o kojoj se podjeli radi, kategorije otpada međusobno su usko povezane kako u pogledu utjecaja na životnu sredinu, tako i u načinu na koji ih pojedinačna industrijska postrojenja proizvode i upravljaju njima. Problemi s industrijskim otpadom postaju sve ozbiljniji, a statistike jasno pokazuju obim tih problema. Prema podacima Svjetske banke, oko trećine industrijskog

otpada nije pravilno zbrinuto ili upravljano. Šokantan je i podatak da samo 2 % ukupnog industrijskog otpada globalno može biti reciklirano, dok ostatak, zbog nedostatka učinkovitih sustava upravljanja, završava na odlagalištima ili u okolišu.⁷

U Velikoj Britaniji nastaje 41,1 milijuna tona industrijskog otpada svake godine, dok američka industrija stvara čak 6 milijardi tona industrijskog čvrstog otpada.⁸ U Sjedinjenim Američkim Državama čak 50 % jezera zagađeno je industrijskim onečišćenjem, što ukazuje na ozbiljan ekološki problem. U zemljama u razvoju situacija je još gora – čak 70 % industrijskog otpada ispušta se bez obrade, čime se ozbiljno ugrožava okoliš i zdravlje ljudi. Otprilike 40 % industrijskog otpada završava na odlagalištima, dok nusproizvodi industrijskih aktivnosti čine polovicu ukupnog otpada proizvedenog globalno. Među najčešćim materijalima koji čine industrijski otpad je papir, što dodatno otežava reciklažu i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Prema podacima Eurostata,⁹ u 2020. godini ukupni otpad koji su u Europskoj uniji proizvele sve gospodarske djelatnosti, kao i kućanstva, iznosio je 2,135 milijuna tona, odnosno 4,815 kg po stanovniku. Od toga, građevinski otpad činio je 37,5 % ukupnog otpada, dok je preostalih 52,5 % obuhvaćalo različite vrste otpada, uključujući industrijski otpad. Važno je napomenuti da se statistike o industrijskom otpadu razlikuju među državama članicama Europske unije, što može odražavati različite gospodarske strukture i aktivnosti. Na primjer, zemlje s većim udjelom industrijskog otpada često imaju razvijene sektore poput rudarstva, vađenja kamena ili intenzivne građevinske aktivnosti.⁸

Iako je udio otpada iz proizvodnih procesa u Europskoj uniji u 2022. iznosio svega 10 %, statistika jasno pokazuje hitnost problema i potrebu za većim naporima u smanjenju industrijskog otpada, njegovom pravilnom zbrinjavanju i reciklaži da bi se spriječilo daljnje zagađenje okoliša i smanjio negativan utjecaj na zdravlje ljudi. Sve industrije moraju preuzeti ekološku odgovornost i učinkovito upravljati svojim otpadom da bi stvorile sigurniju, održiviju budućnost. Tržište gospodarenja otpadom nesumnjivo postaje sve popularnije, a njegova globalna vrijednost mogla bi do 2030. godine dosegnuti 2,5 bilijuna dolara.⁹

2.1. Metalurški otpad

Metalurška industrija obuhvaća procese i tehnologije povezane s proizvodnjom metala da bi se dobili gotovi metalni proizvodi. Ti proizvodi obuhvaćaju različite oblike, poput gredica, blumova, šipki, cijevi, odljevaka i drugih oblika metala koji se dalje upotrebljavaju u raznim industrijama. Proces u metalurškoj industriji uključuju taljenje metala, lijevanje, valjanje i druge metode kojima se sirovine transformiraju u proizvode. Ta industrija ima ključnu ulogu u modernoj ekonomiji, jer proizvodi materijale koji su temelj mnogih drugih industrijskih sektora, uključujući građevinsku, automobilsku, elektroničku, energetska, brodogradilišnu industriju itd.¹⁰

Iako metalurška industrija igra ključnu ulogu u globalnom gospodarstvu, ona također ima značajan utjecaj na okoliš, jer generira velike količine otpada, uključujući trosku, plinove, prašinu, mulj i drugi otpad koji mogu biti štetni za

zrak, vodu i tlo ako se njime ne upravlja pravilno. Iz literature je vidljivo da se metalurški otpad i njegova primjena istražuju čitav niz godina, ali i da se istraživanja nastavlja-ju.^{10–12}

Održivost u toj industriji postala je važna tema, s nagla-skom na reciklažu metalurškog otpada, smanjenje emisija i povećanje energetske učinkovitosti u proizvodnim procesi-ma. Zbog toga u metalurškoj industriji postoji stalna potre-ba za unaprjeđenjem tehnoloških procesa, optimizacijom reciklaže metala i smanjenjem emisije štetnih tvari, čime se poboljšava ekološka održivost i energetska učinkovitost proizvodnje.

U proteklm godinama industrija je također usmjerena na primjenu novih tehnologija za smanjenje negativnog utjecaja na okoliš, uključujući inovacije u reciklaži metala i smanjenju emisije stakleničkih plinova. Uporaba sekun-darnih sirovina, poput recikliranih metala, također je po-stala važan faktor za smanjenje otpada i očuvanje prirod-nih resursa.^{11,12}

S obzirom na to da je metalurški otpad po sastavu i toksič-nosti veoma raznolik, a uvelike ovisi o proizvodnim procesi-ma, kroz ovaj rad istaknute su najčešće vrste neopasnog otpada koji se odnosi na lokacije nastanka te su iznesene potencijalne mogućnosti ponovne uporabe.

2.1.1. Otpad nastao u proizvodnji sirovog željeza u visokoj peći

Proizvodnja sirovog željeza u visokim pećima ključni je proces u metalurškoj industriji u kojem se pri visokim tem-peraturama iz željeznih ruda dobiva sirovo željezo, osnov-na sirovina za proizvodnju čelika. Taj postupak generira nekoliko vrsta otpada u znatnim količinama. Najznačajniji su visokopečna troska i visokopećni mulj.¹³

Visokopečna troska je otpad nastao pri proizvodnji sirovog željeza u visokim pećima i predstavlja smjesu krutih tvari koje nastaju tijekom procesa taljenja željezne rude. Udio troske u ukupnoj masi krutih otpada koji nastaju pri pro-izvodnji sirovog željeza u visokoj peći je iznad 90 %.¹⁴ S obzirom na to da je svjetska proizvodnja sirovog željeza u 2023. godini iznosila 1,309 milijardi tona¹⁴ i da po toni pro-izvedenog sirovog željeza prosječno nastaje 300 – 350 kg troske,¹⁵ jasno je vidljivo da se radi o velikim količinama

materijala. Troska u visokoj peći nastaje kao rezultat ke-mijskih reakcija između željezne rude, troskotvornih kom-ponenti (vapnenac, dolomit), koksa i užarenih plinova u visokoj peći. Koks služi kao gorivo i redukcijско sredstvo koje omogućuje dobivanje željeza iz željezne rude. Dio oksida i minerala iz ruda, zajedno s nečistoćama iz kok-sa, prelaze u trosku. Visokopečna troska ima kompleksan kemijski sastav koji varira ovisno o vrsti i kvaliteti ruda, ka-kvoći koksa i uvjetima u peći, ali obično uključuje: kalcijev oksid, silicijev dioksid, aluminijski oksid, magnezijev oksid, čiji zajednički udio obično iznosi oko 95 %, različite oblike željeznih i manganovih oksida, sumpor i druge komponente (tablica 1).

Visokopečna troska u pravilu ne sadrži toksične kompo-nente i stog aspekta nema negativan utjecaj na okoliš. Me-đutim, potencijalni negativni utjecaj na okoliš može nasta-ti neadekvatnim odlaganjem. U pravilu se troska odlaže na zemljištima koja ponekad nisu adekvatno pripremlje-na. Uslijed oborina spojevi koje se nalaze u troski mogu prodrijeti u tla i izazvati promjene u pH vrijednosti. Mogu dospjeti u vodene tokove te također poremetiti pH, što sve zajedno negativno utječe na ekosustave. Stoga, zbog velike količine, visokopečna troska ipak predstavlja opte-rećenje za okoliš, jer zahtijeva odgovarajuće odlaganje i upravljanje. Upravo su zato mnogi autori istraživali moguć-nosti daljnje upotrebe visokopećne troske. Václavík i sur.¹⁷ istraživali su primjenu finoiznate troske iz visoke peći za Portland cement u proizvodnji betona. Rezultati njihovih istraživanja pokazali su da dodatak visokopećne troske po-boljšava čvrstoću betona. Osim toga, uporaba određenog udjela visokopećne troske umjesto cementa može znatno smanjiti troškove proizvodnje betona. Troska je često jefti-niji materijal od cementa, a njezina uporaba može smanjiti potrebu za skupim resursima i smanjiti troškove transporta i skladištenja. Osim toga, uporaba troske za izradu betona može smanjiti potrebu za odlagalištima, čime se smanjuju troškovi vezani uz zbrinjavanje otpada. Sve te uštede čine proces ekonomičnim i učinkovitim, kako u pogledu sma-njenja troškova proizvodnje, tako i u smanjenju ekološkog otiska.¹³

Nadalje, istraživanja su pokazala da visokopečna troska može biti korisna kao sredstvo za poboljšanje kvalitete tla, osobito zbog svojih svojstava koja uključuju visok udio mi-nerala poput kalcija, magnezija, silikata i drugih korisnih tvari. To joj omogućuje da pozitivno utječe na pH tla, po-

Tablica 1 – Kemijski sastav visokopećne troske¹⁶

Table 1 – Chemical composition of blast furnace slag¹⁶

Komponenta (Component)	SiO ₂	CaO	CaO (slobodni) (CaO (free))	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃
Udio/% (Share/%)	30,5 – 40,8	30,9 – 46,1	0,3 – 2,4	5,9 – 17,6	1,7 – 17,3	0,1 – 4,7	1,5 – 3,8
Komponenta (Component)	MnO	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	S
Udio/% (Share/%)	0,1 – 3,1	0,01 – 0,28	0,1 – 3,7	0,1 – 1,7	0,1 – 1,5	0 – 0,9	0,4 – 2,3

boljša strukturu tla i doprinese povećanju kapaciteta tla za zadržavanje vode, kao i na poboljšanje mikrobiološke aktivnosti. *Lim i sur.*¹⁸ u svojem su istraživanju upotrebljavali visokopećnu trosku kao silikatno gnojivo prilikom uzgoja riže. Rezultati su pokazali da je uzastopna upotreba visokopećne troske kao potencijalnog gnojiva poboljšala fiziikalna i kemijska svojstva tla, ali nije povećala bilo kakvu koncentraciju teških metala u tlu. Nadalje, zaključili su da visokopećna troska smanjuje emisiju CH_4 na rižinim poljima i povećava prinos riže. Slično istraživanje proveli su *Susilawati i sur.*¹⁹ I njihovi rezultati pokazali su da upotreba visokopećne troske kao gnojiva rezultira boljim prinosom i zdravijim biljkama. Nasipavanje terena visokopećnom troskom je područje koje se istražuje zbog mogućnosti uporabe tog materijala u građevinskoj industriji, osobito u stabilizaciji tla, izgradnji cesta i drugih infrastrukturnih projekata. Visokopećna troska ima brojne prednosti u tom kontekstu, jer može poboljšati strukturu tla, povećati nosivost i stabilnost te smanjiti troškove gradnje. Također, takva uporaba može pomoći u smanjenju količine visokopećne troske koja se odlaze na odlagalištima. Mogućnost uporabe visokopećne troske kao materijala za nasipavanje terena proučavao je veći broj autora,^{20–24} a svi s istim zaključcima – visokopećna troska je odgovarajući materijal za tu upotrebu.

Svakako treba naglasiti da su mnoge zemlje u korak s istraživanjima i već primjenjuju tehnologije koje omogućuju ponovnu upotrebu troske kao građevinskog materijala, npr. za proizvodnju cementa, betona, pa čak i u poljoprivredi kao poboljšivača tla. Osim toga, postoje tehnologije za ekstrakciju metala iz troske, čime se dodatno smanjuje količina otpada koji se mora odlagati.

Visokopećni mulj još je jedna vrsta otpada koja nastaje tijekom proizvodnje sirovog željeza u visokoj peći. Taj mulj predstavljaju fine čestice koje se sakupljaju sustavima za čišćenje visokopećnih plinova.^{12,25} Obično je u količini 5,5 do 40 kg t^{-1} sirovog željeza.²⁶ Konvencionalna metoda recikliranja visokopećnog mulja je sinteriranje. Međutim, istraživane su još neke primjene visokopećnog mulja. *Francis*²⁷ je proučavao primjenu visokopećnog mulja koji je u kombinaciji s visokopećnom troskom upotrebljavao u proizvodnji keramike. Rezultati tog istraživanja pokazali su da je keramika dobivena upotrebom tih dvaju otpada iz visoke peći pokazala dobru tvrdoću te je dobiveni materijal potencijalno koristan za razne industrijske primjene. Nadalje, istraživanja pokazuju da se visokopećni mulj može uspješno upotrebljavati kao katalizator selektivne katalitičke redukcije za smanjenje dušikovih oksida,²⁸ za sintezu polialuminij-željeznog klorida,²⁹ ali i kao sredstvo za nasipavanje cesta i u proizvodnji cementa.^{30,31}

2.1.2. Otpad nastao u proizvodnji čelika

Čelik je i danas najviše upotrebljavan metalni materijal. Potrošnja čelika u obliku novih proizvoda po osobi u svijetu u 2023. iznosila je 219 kg.¹⁴ Zbog svojeg značaja, proizvodnja čelika raste iz godine u godinu, uz manje iznimke. U 2023. godini svjetska proizvodnja čelika iznosila je 1,892 milijardi tona.¹⁴ Od toga je 71,1 % proizvedeno u kisikovim konvertorima, a 28,6 % u elektrolučnim pećima.¹⁴

Sirovo željezo iz visoke peći glavna je sirovina za proizvodnju čelika u kisikovom konvertoru.

Proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći omogućuje učinkovitu reciklažu starog željeza i čeličnog otpada, kao glavnih sirovina za proizvodnju čelika u tom agregatu. Međutim, proizvodnja čelika istodobno generira različite vrste otpada (ponajprije trosku) koje treba pravilno zbrinuti da bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš. Kao i kod proizvodnje sirovog željeza u visokoj peći, udio troske u ukupnoj masi krutih otpada koji nastaju pri proizvodnji čelika veći je od 90 %.¹⁴ Tijekom proizvodnje čelika u kisikovim konvertorima u prosjeku nastaje od 100 do 150 kg troske/t čelika, a u elektrolučnoj peći od 110 do 200 kg troske/t čelika, što ukazuje na veliku količinu s obzirom na svjetsku proizvodnju čelika.³²

Troska je otpad koji nastaje tijekom proizvodnje čelika i ima važnu ulogu u rafinaciji, odnosno uklanjanju nečistoća i nepoželjnih elemenata iz čelika, zaštiti metala od oksidacije te poboljšanju energetske učinkovitosti procesa. Osim toga, kontroliran sastav troske smanjuje abraziju vatrostalne obloge agregata za proizvodnju čelika i produljuje njezin vijek. U procesu proizvodnje čelika troska se formira dodatkom vapna.³³ Kalcijev oksid, kao glavna komponenta vapna, veže nečistoće, odnosno nepoželjne elemente iz čelika, poput sumpora i fosfora i prevodi ih u tekuću trosku koja pliva na površini rastaljenog čelika.

Proizvodnja čelika je oksidativni proces. Upuhani kisik dodan u peć oksidira pojedine elemente prisutne u tekućem čeliku, npr. ugljik, silicij, mangan, krom i fosfor, što omogućuje kontrolu kemijskog sastava čelika. Oksidi (npr. oksidi silicija, fosfora, mangana itd.) prelaze u trosku.

Sastav troske varira ovisno o sastavu sirovina i uvjetima u peći, ali glavni kemijski spojevi uključuju: kalcijev oksid koji je ključan za vezanje nečistoća, silicijev dioksid, magnezijev oksid, željezove okside, aluminijski oksid, manganeve okside, fosforni oksid i druge okside ovisno o sastavu upotrijebljenih sirovina (tablica 2). Troska s višim bazicitetom (s više CaO) bolje uklanja sumpor i fosfor te se lakše upotrebljava u daljnjoj preradi.

S obzirom na kemijski sastav i svojstva, čeličanska troska se može upotrebljavati u različite svrhe. Često se upotrebljava u izgradnji cesta zbog svoje izvrsne stabilnosti, trajnosti i drugih korisnih svojstava. Upotrebljava se kao materijal za temelje i podloge, asfaltni betonski agregat, materijal za barijere protiv buke te kao komponenta za uređenje okoliša. S obzirom na stabilnost, mogućnost podnošenja opterećenja, otpornost na klizanje i izdržljivost, čeličanska troska premašuje performanse konvencionalnih agregata. Osim toga, mješavina s asfaltom čini površinu stabilnijom i čvršćom, što je ključno za sigurnost cestovnog prometa.³²

Istražuju se i dodatne mogućnosti upotrebe čeličanske troske, pa tako su *Yildirim i sur.*³⁴ radili procjenu potencijalne primjene čeličanske troske u izgradnji nasipa. Rezultati tog vrlo opsežnog istraživanja ukazuju na moguću primjenu čeličanske troske i u navedenu svrhu. Nadalje, kao alternativa prirodnim agregatima, čeličanska troska pokazala je dobre performanse kao komponenta u proizvodnji cementa. Ima dobru otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, korozije i karbonizacije, što je izvanredna pred-

Tablica 2 – Kemijski sastav troske iz kisikovog konvertora (KK) i elektrolučne peći (ELP)³²

Table 2 – Chemical composition of slag from the basic oxygen furnace (BOF) and the electric arc furnace (EAF)

	Udio komponente / % (Component share / %)									
	CaO	SiO ₂	Fe _x O _y [*]	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	Mn _x O _y [*]	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O + K ₂ O
KK (BOF)	36,53 – 50,7	8,8 – 20,92	8,5 – 33	0,75 – 9,84	2,01 – 10,6	0,05 – 3,0	0,4 – 5,4	0,01 – 1,74	0,2 – 2,44	0 – 0,67
ELP (EAF)	19,4 – 55,21	8,59 – 22,42	4,4 – 46,74	1,29 – 15,1	1,99 – 12,4	0,03 – 1,83	0,3 – 7,9	0 – 0,94	0,04 – 6,16	0,05 – 1,7

* Fe_xO_y se odnosi na Fe, FeO i Fe₂O₃, a Mn_xO_y na MnO i Mn₃O₄.

nost uporabe čeličanske troske kao grubih/finih agregata bez smanjenja trajnosti betona. Uporaba čeličanske troske omogućava dulji vijek trajanja struktura i štedi troškove održavanja tijekom radnog vijeka. Osim toga, uporabom čeličanske troske može se izbjeći prekomjerna eksploatacija visokokvalitetnog pijeska i šljunka.³² Upravo zbog svojih svojstava, *Dong i sur.*³⁵ u svojem istraživanju navode da se čeličanska troska čak može upotrebljavati u betonu visoke gustoće za zaštitu od nuklearnog zračenja.

Prisutnost minerala montmorilonitne gline na ekspanzivnim tlima čini ih problematičnima, jer imaju visoku tendenciju da se promijeni volumen nakon promjene u sadržaju vlage. *Kabeta i sur.*³⁶ dodavali su čeličansku trosku u ekspanzivna tla, što je rezultiralo promjenom većeg broja svojstava takve vrste tla te je nađeno da čeličanska troska poboljšava ekspanzivna svojstva tla za geotehničke primjene.

Pregledom literature vidljivo je da se čeličanska troska u najvećoj mjeri istražuje, ali i upotrebljava u području građevinarstva i cestogradnji. Jedan od razloga za to je svakako velika količina. Međutim, u nešto manjoj mjeri primjenjuje se za obogaćivanje poljoprivrednog tla, budući da obiluje hranjivim tvarima, kao što su fosfor i mikronutrijenti.^{37,38} Također, čeličanska troska ima agronomsku održivost i može se primijeniti za neutralizaciju kiselosti tla u površinskom i podzemnom sloju.³⁹ Studija koju su provodili *Das i sur.*⁴⁰ pokazala je da je dodatak čeličanske troske u tlo poboljšao mikrobnu biomasu tla, aktivnosti enzima tla i obogatio određene bakterijske vrste te su ukazali na potencijalnu pozitivnu ulogu na ekosustav. Osim toga, dodatak čeličanske troske može pridonijeti smanjenju koncentracije teških metala u tlu, smanjenjem metalne pokretljivosti i povezivanjem metala u stabilnije frakcije.⁴¹

2.1.3. Otpad nastao u proizvodnji metalnih odljevaka

Lijevanje metala u jednokratne kalupe jedan je od najčešćih postupaka proizvodnje metalnih odljevaka. U toj tehnici se upotrebljavaju kalupi izrađeni od pijeska, gipsa ili keramike, koji se nakon procesa lijevanja i skrućivanja odljevaka razbijaju da bi se mogli izvaditi odljevci. Najčešće je zastupljeno lijevanje u kalupe napravljene od kalupne mješavine koja se sastoji od kvarcnog pijeska, (udio > 90 %) veziva (bentonitna glina), vode i dodataka koji

joj omogućuju zadržavanje oblika i otpornost na visoke temperature. Tijekom proizvodnje odljevaka, takva kalupna mješavina može se upotrebljavati kroz više ciklusa lijevanja, pri čemu se nakon svakog postupka osvježava i ponovno upotrebljava. Međutim, s vremenom dolazi do degradacije njezinih svojstava – mijenja se granulometrijski sastav, smanjuje vezivna sposobnost, povećava udio sitnih čestica i smanjuje propusnost za plinove, što rezultira neadekvatnim svojstvima kalupa. Kad kalupna mješavina više ne može ispunjavati tehničke zahtjeve za daljnju upotrebu, ona postaje otpadna kalupna mješavina. Procjenjuje se da u svijetu godišnje nastaje oko 100 milijuna tona otpadne kalupne mješavine.⁴² Iako se tradicionalno odlaze na deponije, postoje mogućnosti njezine valorizacije u građevinskoj industriji, pri nasipavanju terena ili kao sirovine za proizvodnju građevinskih materijala. *Saraswati i sur.*⁴³ proveli su eksperimentalno istraživanje u kojem je variran postotak sitnog agregata s otpadnom kalupnom mješavinom da bi se proizveo jeftin i ekološki prihvatljiv beton. Zaključili su da djelomična zamjena materijala otpadnom kalupnom mješavinom utječe na različita svojstva betona u smislu da udio od 60 % otpadne kalupne mješavine povećava tlačnu čvrstoću betona, ali smanjuje otpornost na savijanje (povećanjem postotka dodane otpadne kalupne mješavine). Također je zaključeno da dolazi do smanjenja troškova proizvodnje betona za 3,5 % pri uporabi 60 % otpadne kalupne mješavine, što ujedno pokazuje da proizvedeni beton ima ekonomičniju cijenu. Navedeno istraživanje nije jedino. Više autora^{42,44–46} provodilo je slične studije i svi su donijeli isti zaključak – primjena otpadne kalupne mješavine u građevinskoj industriji daje zadovoljavajuća svojstva betonu te rezultira smanjenjem troškova proizvodnje, kao i smanjenjem eksploatacije pijeska kao prirodnog resursa.

Nadalje, otpadnu kalupnu mješavinu moguće je upotrebljavati kao jedan od agregata u proizvodnji asfaltnih smjesa za cestogradnju. Ceste su glavno sredstvo prijevoza tereta i putnika na svijetu koje nadmašuje željeznice, zračne luke i brodove. Rast cestovne mreže donosi urbanizaciju i socioekonomski razvoj. Izgradnja cesta zahtijeva velike količine prirodnih resursa, poput mineralnih agregata. Istraživanja pokazuju da su fizikalna, kemijska i okolišna svojstva otpadne kalupne mješavine, kao i njezino mehaničko ponašanje u asfaltnoj matrici, slične konvencionalnim agregatima. Općenito, stabilizirana otpadna kalupna mješavina i

zdrobljene stijene pokazali su velike potencijale čvrstoće i izdržljivosti za strukturne slojeve kolnika.^{47,48}

Klimatske promjene donose iznenadne oborine u velikim količinama, što može značajno utjecati na stabilnost nasipa i drenažnih sustava. Otpadna kalupna mješavina je i u tom slučaju pokazala dobra svojstva, te je moguća njezina primjena u izgradnji nasipa, drenažnih sustava i drugih infrastrukturnih objekata. Preporučuje se dodatak 6 % otpadne kalupne mješavine kao zamjene za pijesak, jer upravo u toj količini najbolje ispunjava kriterije koji se postavljaju pri izgradnji nasipa.⁴⁹

Prednost upotrebe otpadne kalupne mješavine je među ostalim i u tome što sadrži visok udio kvarcnog pijeska te ima slična fizikalna svojstva s tlima, uključujući dobru propusnost i brzinu filtracije. Važna komponenta tog otpada je i mineralno vezivo, glina. Sve navedeno ukazuje na mogućnost primjene otpadne kalupne mješavine za poboljšanje strukture tla, povećanje plodnosti i stabilnosti tla, čineći je pogodnom za poljoprivrednu primjenu ili ekološke projekte. Osim toga, otpadna kalupna mješavina može se upotrebljavati kao sastojak u mješavinama gornjeg tla koje se upotrebljava u svrhu uređenja okoliša.⁵⁰

Iz literature je vidljivo da se metalurški otpad i njegova primjena istražuju čitav niz godina, ali i da se istraživanja nastavljaju. Osim gore spomenute primjene metalurškog otpada, prisutan je i velik broj literaturnih navoda^{51–55} koji ukazuju na to da se metalurški otpad, posebice onaj koji uključuje metalne okside i ugljik, može upotrebljavati kao adsorbens za pročišćavanje otpadnih voda zbog nekoliko ključnih svojstava koje posjeduje. Taj tip otpada često ima veliku specifičnu površinu, što je ključno za njegovu učinkovitost u adsorpciji. Veća površina omogućuje veću kontaktnu površinu za interakciju s molekulama u okolini, što povećava njegovu sposobnost apsorpcije štetnih tvari, poput teških metala, organskih zagađivača ili drugih kontaminanata. Nadalje, metalurški otpad često sadrži metalne okside (poput oksida željeza, aluminija, kalcija) i ugljik, koji su poznati kao dobri adsorbensi. Metalni oksidi mogu privući i zadržati ionske kontaminante poput teških metala, dok ugljik može djelovati kao adsorbens za organske spojeve i druge kontaminante. Metalurški otpad može biti podvrgnut aktivaciji, procesima poput kemijske ili toplinske obrade, čime se poboljšava njegova adsorpcijska sposobnost. Aktivacija povećava poroznost i specifičnu površinu materijala, čineći ga učinkovitijim u privlačenju i zadržavanju kontaminanata.⁵⁶

U ovom radu prikazane su mogućnosti primjene nekoliko najčešćih metalurških otpada, odnosno visokopećne troske, čeličanske troske i otpadne kalupne mješavine. Osim tih materijala, metalurški otpad obuhvaća i druge vrste otpada, poput vatrostalnih materijala, prašine iz različitih faza proizvodnje itd. Neki od tih materijala mogu se vratiti u proizvodni proces, čime se smanjuje potreba za novim resursima i doprinosi održivosti proizvodnje. Međutim, dio metalurškog otpada, poput otpada koji sadrži teške metale ili druge opasne komponente, predstavlja prijetnju za okoliš i zdravlje ljudi. Takvi otpadni materijali nisu bili predmet istraživanja u ovom radu, jer njihova obrada zahtijeva specifične metode i tehnologije za sigurno upravljanje i smanjenje njihova utjecaja na okoliš. Međutim, unatoč svojoj

toksičnosti mogu biti izvrsne sirovina pod uvjetom da se s njima rukuje uz sve propisane mjere zaštite. Naime, opasni metalurški otpad kao što je elektropećna prašina, katodni ostatak i još neke vrste otpada nastale pri proizvodnji aluminija i sl. mogu sadržavati visokovrijedne metale koji se mogu izdvojiti hidrometalurškim i pirometalurškim postupcima.⁵⁷

3. Zaključak

Bilo koju proizvodnju, pa tako i metaluršku, nije moguće provesti bez nastanka otpada. Međutim, osnovna načela kojih bi se trebalo pridržavati su smanjenje nastanka otpada, recikliranje i, u konačnici, kao najmanje prihvatljiva opcija, odlaganje.

Uporaba metalurškog otpada predstavlja značajan korak prema održivom gospodarenju resursima i smanjenju negativnog utjecaja metalurške industrije na okoliš. Kroz pregled dostupne literature o različitim vrstama neopasnog metalurškog otpada, poput visokopećne troske, čeličanske troske i otpadne kalupne mješavine, pokazano je da ti materijali imaju široku primjenu u građevinskoj industriji, cestogradnji, poljoprivredi, pa čak i u ekološkoj sanaciji degradiranih područja. Njihova ponovna uporaba u proizvodnji građevinskih materijala, poboljšanju tla i izgradnji infrastrukturnih objekata doprinosi smanjenju potrebe za prirodnim resursima, čime se izravno utječe na očuvanje okoliša i održivo gospodarenje otpadom.

Osim toga, upotreba metalurškog otpada kao alternativnog materijala za proizvodnju cementa, stabilizaciju tla i izgradnju nasipa pokazuje ekonomske prednosti, jer smanjuje troškove proizvodnje i omogućava jeftinije materijale koji su ključni za infrastrukturne projekte. Ekološki gledano, uporaba otpada umjesto njegova odlaganja na odlagalištima smanjuje onečišćenje tla, vode i zraka te smanjuje potrebu za novim zemljištima za odlaganje otpada.

Nadalje, primjena metalurškog otpada kao ekonomski vrlo isplativog adsorbensa ima dvostruku korist – smanjenje njegova odlaganja, ali i pročišćavanje otpadnih, često industrijskih voda.

Iako su te vrste metalurškog otpada neopasne i mogu se učinkovito upotrebljavati, važno je istaknuti da postoji i opasan metalurški otpad koji nije obuhvaćen ovim istraživanjem. Takav otpad, kao npr. prašina koja sadrži teške metale, zahtijeva pažljivije upravljanje i specijalizirane metode obrade. Stoga je u budućim istraživanjima nužno dodatno ispitati mogućnosti obrade i sigurne uporabe opasnog metalurškog otpada da bi se smanjili rizici za ljudsko zdravlje i okoliš.

Općenito, uporaba metalurškog otpada kao sekundarne sirovine za razne industrijske procese doprinosi razvoju kružnog gospodarstva, smanjuje potrebu za novim resursima, a istodobno poboljšava ekološke uvjete. Za potpuni razvoj tog koncepta važno je osigurati daljnja istraživanja o svojstvima različitih vrsta otpada, njihovim prednostima, kao i mogućnostima ponovne uporabe, da bi se osigurala održivost i ekološka odgovornost u metalurškoj industriji.

U konačnici, pravilno upravljanje metalurškim otpadom ključni je korak u smanjenju negativnog utjecaja metalurške industrije na okoliš, čime se doprinosi održivosti industrije i očuvanju okoliša.

Važno je napomenuti da je prije bilo kakve primjene metalurškog otpada potrebno provesti detaljnu analizu njegova sastava i provesti odgovarajuće procjene utjecaja na okoliš da bi se osigurala sigurna i održiva upotreba.

ZAHVALA

Ovo istraživanje financirano je pod pokroviteljstvom Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020. (Naziv projekta: Centar za ljevarstvo-SIMET, Šifra: KK.01.1.1.02.0020).

Literatura References

1. J. Pichtel, Waste management practices: Municipal, Hazardous, and Industrial, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, SAD, 2014.
2. S. Kalambura, Gospodarenje otpadom kroz povijest, Eko revija: glasilo Fonda za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost **1** (2005) 10–11.
3. EU, 2008, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives, OJ L 312, 22.11.2008, pp. 3–30.
4. J. M. Sabata, A. Torras, E. G. Elies, M. Martell, Urban solid waste management, World Association of the Major Metropolises, Barcelona, 2025.
5. Zakon o gospodarenju otpadom, Narodne novine 84/2021.
6. Uredba o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada, Narodne novine 50/2005.
7. F. Woodard, Industrial waste treatment handbook, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2001.
8. URL: <https://www.vlses.com/stay-in-the-know/newsroom/combating-pollution-through-industrial-waste-management/> (3. 3. 2025.)
9. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (3. 3. 2025.)
10. S. R. R. Rao, Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes, Elsevier, Amsterdam, 2006.
11. M. Baláž, Metallurgical Waste, u: Environmental Mechanochemistry, Springer, Berlin, 2021., doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75224-8>.
12. E. Matinde, G. S. Simate, S. Ndlovu, Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices, J. South. Afr. Inst. Min. Metall. **118** (2018) 825–843, doi: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.
13. S. Muhamedagić, Metalurgija gvožđa, knjiga 2, Visoka peć, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2005.
14. URL: <https://worldsteel.org> (16. 4. 2025.)
15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115876> (16. 4. 2025.)
16. URL: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-slag/> (16. 4. 2025.)
17. V. Václavík, V. Dirner, T. Dvorský, J. Daxner, The use of blast furnace slag, Metalurgija **51** (2012) 461–464.
18. J. Y. Lim, Y. G. Kang, K. M. Sohn, P. J. Kim, S. J. C. Galgo, Creating new value of blast furnace slag as soil amendment to mitigate methane emission and improve rice cropping environments, Sci. Total Environ. **806** (2021) 150961, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150961>.
19. H. L. Susilawati, P. Setyanto, A. K. Makarim, K. Inubushi, Effects of steel slag applications on CH₄, N₂O and the yields of Indonesian rice fields: a case study during two consecutive rice-growing seasons at two sites, Soil Sci. Plant Nutr. **61** (2015) 704–718, doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1041861>.
20. G. C. Wang, The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction, Woodhead Publishing, Sawston, UK, 2016.
21. B. A. V. R. Kumar, G. Ramakrishna, Sustainable materials in the production of pavement base and subbase courses, Mater. Sci. Eng. **1025** (2021) 012013, doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1025/1/012013>.
22. Z. Bencze, L. Gáspár, Blast furnace slag in road construction and maintenance, Roads and Bridges **23** (2021) 53–59, doi: <http://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.053>.
23. I. Netinger Grubeša, I. Barišić, A. Fucic, S. S. Bansode, 4 - Application of blast furnace slag in civil engineering: Worldwide studies, u I. Netinger Grubeša, I. Barišić, A. Fucic, S. S. Bansode (ur.), Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction, Elsevier, Amsterdam, 2016., str. 51–56, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100368-8.00004-X>.
24. F. Maghool, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, A. Mohajerani, Engineering and Leachate Characteristics of Granulated Blast-Furnace Slag as a Construction Material, J. Mater. Civ. Eng. **32** (2020) 04020153, doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003212](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003212).
25. Z. Glavaš, N. Dolić, Metalurgija željeza, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak 2014.
26. M. Omran, T. Fabritius, T. Paananen, Effect of Blast Furnace Sludge (BFS) Characteristics on Suitable Recycling Process Determining, JMMCE **5** (2017) 185–197, doi: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2017.54016>.
27. A. A. Francis, Crystallization kinetics of magnetic glass-ceramics prepared by the processing of waste materials, Mater. Res. Bull. **41** (2006) 1146–1154, doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2005.11.002>.
28. S. Liu, W. Zhou, S. Niu, K. Han, Y. Wang, C. Lu, Y. Li, J. Wang, Insight into blast furnace dust for selective catalytic reduction of NO_x: An experimental and DFT study, Fuel **344** (2023) 128006, doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128006>.
29. Y. Zhang, S. Li, X. Wang, X. Li, Coagulation performance and mechanism of polyaluminum ferric chloride (PAFC) coagulant synthesized using blast furnace dust, Sep. Purif. Technol. **154** (2015) 345–350, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.075>.
30. R. Baidya, S. K. Ghosh, U. V. Parlikar, Blast furnace flue dust co-processing in cement kiln – A pilot study, Waste Manag. Res. **327** (2109) 261–267, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X18816791>.
31. R. O. Díaz, A. P. Rojas, G. G. Leon, Use of Blast Furnace Dust in the Production of Asphalt Concrete for Pavements, Performance and Environmental Contribution, J. Sustain. Archit. Civ. Eng. **32** (2023) 224–232, doi: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.32.1.32300>.
32. Z. Ren, D. Li, Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review, Materials **16** (2023) 5841, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16175841>.
33. Z. Pašalić, Metalurgija čelika, Fakultet za metalurgiju i mate-

- rijale, Zenica, BIH, 2002.
34. I. Z. Yildirim, M. Prezzi, Use of Steel Slag in Subgrade Applications. Publication FHWA/IN/JTRP-2009/32., Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN, SAD, 2009, doi: <https://doi.org/10.5703/1288284314275>.
 35. Q. Dong, X. Chen, Recycling and applications of steel slag aggregates, u: Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management, F. Colangelo, R. Cioffi, I. Farina (ur.), Woodhead Publishing, Sawston, UK, 2022., doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821730-6.00026-7>.
 36. W. F. Kabeta, H. Lemma, Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil. Model Earth Syst. Environ. **9** (2023) 4023–4030, doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01734-1>.
 37. I. Akinwumi, Soil Modification by the Application of Steel Slag, Periodica Polytechnica Civil Engineering **58** (2014) 371–377, doi: <http://doi.org/10.3311/PPci.7239>.
 38. B. Monaghan, D. O'Dea, J. Rinklebe, A. Vinu, S. A. Hoang, G. Singh, M. B. Kirkham, N. Bolan, Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review, J. Hazard. Mater. **419** (2021) 126478, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>.
 39. A. C. F. D. Deus, L. T. Büll, C. N., S. M. C. Santos, L. L. Q. Moreira, Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system, Soil Tillage Res. **196** (2020) 104422, doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104422>.
 40. S. Das, H. S. Gwon, M. I. Khan, T. J. Seung, P. J. Kim, Steel slag amendment impacts on soil microbial communities and activities of rice (*Oryza sativa* L.). Sci. Rep. **10** (2020) 6746, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63783-1>.
 41. D. Ning, Y. Liang, Z. Liu, J. Xiao, A. Duan, Impacts of Steel-Slag-Based Silicate Fertilizer on Soil Acidity and Silicon Availability and Metals-Immobilization in a Paddy Soil, PLoS ONE. **11** (2016) e0168163, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168163>.
 42. G. García, R. Cabrera, J. Rolón, R. Pichardo, C. Thomas, Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete, Constr. Build. Mater. **430** (2024) 136460, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136460>.
 43. C. Pathariya Saraswati, K. Rana Jaykrushna, A. Shah Palas, G. Metha Jay, N. Patel Ankit, Application of Waste Foundry Sand for Evolution of Low-Cost Concrete, IJETT **4** (2013) 4281–4286.
 44. R. Siddique, G. Singh, Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing, Resour. Conserv. Recycl. **55** (2011) 885–892, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>.
 45. K. A. Kumar, K. Rajasekhar, C. Sashidhar, Experimental Research on the Effects of Waste Foundry Sand on the Strength and Micro-Structural Properties of Concrete, Civil Engineering Journal **8** (2022) 43–48, doi: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-10-010>.
 46. S. K. Khattra, S. Kumar, Using Waste Foundry Sand As Sustainable Construction Material, Ind. J. Pure App. Biosci. **12** (2024) 72–80, doi: <http://doi.org/10.18782/2582-2845.9095>.
 47. Y. Zhang, T. Sappinen, L. Korkiala-Tanttu, M. Vilenius, E. Juuti, Investigations into stabilized waste foundry sand for applications in pavement structures, Resour. Conserv. Recycl. **170** (2012) 105585, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105585>.
 48. P. O. L. P. Dyer, M. G. Lima, Waste foundry sand in hot mix asphalt: A review, Constr. Build. Mater. **359** (2022) 129342, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129342>.
 49. M. F. Iqbal, Q. F. Liu, I. Azim, Experimental study on the utilization of waste foundry sand as embankment and structural fill, Mater. Sci. Eng. **474** (2019) 012042, doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/474/1/012042>.
 50. M. Božym, Foundry waste as a raw material for agrotechnical applications, Gospod. Surowcami Miner. / Miner. Resour. Manag. **37** (2021) 117–132, doi: <https://doi.org/10.24425/gsm.2021.139744>.
 51. A. Štrkalj, L. Mesek, V. Očelić Bulatović, Z. Glavaš, Adsorpcija Zn(II) iona na metalurškom otpadu, Kem. Ind. **71** (2022) 759–763, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2022.013>.
 52. R. Ji, T. Liu, L. Kang, Y. Wang, J. Li, F. Wang, Q. Yu, X. Wang, H. Liu, H. Guo, W. Xu, Y. Zeng, Z. Fang, A review of metallurgical slag for efficient wastewater treatment: Pretreatment, performance and mechanism, J. Cleaner Prod. **38** (2020) 135076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135076>.
 53. J. Manchisi, E. Matinde, N. A. Rowson, M. J. H. Simmons, G. S. Simate, S. Ndlovu, B. Mwewa, Ironmaking and Steelmaking Slags as Sustainable Adsorbents for Industrial Effluents and Wastewater Treatment: A Critical Review of Properties, Performance, Challenges and Opportunities, Sustainability **12** (2020) 2118, doi: <https://doi.org/10.3390/su12052118>.
 54. I. Šipuš, A. Štrkalj, Z. Glavaš, Removal of Cr(VI) ions from aqueous solution using foundry waste material: Kinetic and equilibrium studies, Can. Metall. Q. **51** (2011) 413–418, doi: <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000033>.
 55. L. Wang, P. Fu, Y. Ma, X. Zhang, Y. Zhang, X. Yang, Steel slag as a cost-effective adsorbent for synergic removal of collectors, Cu(II) and Pb(II) ions from flotation wastewaters, Minerals Eng. **183** (2022) 107593, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107593>.
 56. S. K. Amerkhanova, A. S. Uali, R. M. Shlyapov, D. S. Belgibayeva, Alkali-activated metallurgical slag as a sustainable adsorbent, Bulletin of the University of Karaganda – Chemistry **104** (2021) 117–127, doi: <https://doi.org/10.31489/2021Ch4/117-127>.
 57. P. I. Grudinsky, A. A. Yurtaeva, A. I. Volkov, V. G. Dyubanov, A study on processing of blast furnace dust and sludge using reduction roasting and magnetic separation. Izvestiya, Ferrous Metallurgy **67** (2024) 531–541, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-531-541>.

SUMMARY

Metallurgical Waste – Challenges and Solutions for Management

Anita Štrkalj,^{a*} Zoran Glavaš,^a Ida Bulić,^{a,b} and Mateo Lončar^b

The metallurgical industry is a major source of industrial waste; however, a significant portion of this material can be reused rather than be disposed of in landfills. This paper focuses on non-hazardous types of metallurgical waste, including blast furnace slag and dust, steelmaking slag, and waste foundry sand. Their properties, formation processes, and potential applications across different industries are analysed. Blast furnace and steelmaking slag are widely utilised in construction, road building, and cement production, while waste foundry sand can be used in land reclamation and other construction activities. Research further indicates that these materials can enhance soil properties, such as stability, load-bearing capacity, and fertility, making them suitable for agricultural use and the ecological restoration of degraded land. By repurposing these materials, the demand for natural resource extraction is reduced and environmental impact is minimised, contributing to more sustainable waste management. Instead of relying on traditional disposal methods, this study proposes approaches to valorise these materials, thereby supporting the development of a circular economy and environmentally responsible industrial production.

Keywords

Metallurgy, waste, sustainable management

^a University of Zagreb, Faculty of Metallurgy,
Aleja narodnih heroja 3, 44 000 Sisak,
Croatia

^b Gospodarenje otpadom Sisak d.o.o., Trg
Josipa Maderića 1, 44 000 Sisak, Croatia

Review

Received March 8, 2025

Accepted April 18, 2025