

Smanjenje ugljičnog otiska u metalurškoj praksi: kritične / strateške sirovine i energetska učinkovitost peći

Zdenka Zovko Brodarac¹, Ladislav Lazić¹

¹Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44000 Sisak

Sažetak: Industrijska proizvodnja vođena je zahtjevima za poboljšanjem kvalitete proizvoda i smanjenjem troškova proizvodnje. Unutar ovih zahtjeva cjelovito upravljanje resursima pa tako i energijom igra važnu ulogu. Izazovi zakonodavstva Europske unije i odnedavno političko-ekonomske situacije, povezani s fluktuacijama na tržištu, preusmjerili su pozornost proizvođača na sirovine i energiju. Sirovine se nalaze na početku svih industrijskih lanaca vrijednosti. Kritične (CRM) i strateške sirovine (SRM) nezamjenjivi su ulazni parametar u metalurškoj praksi za širok skup strateških sektora uključujući obnovljivu energiju, digitalnu industriju, svemirski i obrambeni sektor, ali i zdravstveni sektor. Ključ dobre financijske i ekološke prakse ogleda se u energetske učinkovitosti metalurških postrojenja poboljšanjem učinkovitosti iskorištenja goriva. Najveći potrošači energenata u metalurškoj proizvodnji su industrijske peći. Postoje mnoge mogućnosti za optimizaciju energetske učinkovitosti i smanjenje emisije onečišćujućih tvari nastalih izgaranjem goriva. Suočenoš s navedenim izazovima nameće odabir najboljih raspoloživih tehnika (NRT) s obzirom na: performanse, energetske učinkovitost, niske emisije i nisko održavanje, uzimajući u obzir investicijske troškove.

U ovom radu naglasak je na potencijalu smanjenja ugljičnog otiska korištenjem NRT s dva aspekta utjecaja: primjenom sekundarnih sirovina i poboljšanjem energetske učinkovitosti peći u metalurškoj praksi.

Ključne riječi: ugljični otisak, kritične / strateške sirovine, energetska učinkovitost, NRT, metalurgija

1. Metalurgija kroz koncept Industrija 5.0 / Društvo 5.0

Na razvoj metalurgije u Republici Hrvatskoj utječe reprezentativan trokut utjecajnih čimbenika (*Triple Helix*): poslovni sektor, znanstvenoistraživački kapaciteti i javna

politika, koji je u novije vrijeme evaluirao na *Quadruple* s medijskom i kulturološkom javnošću te *Quintuple Helix* s okolišom ili prirodnim okruženjem. Stoga *Quintuple Helix* ima potencijal poslužiti kao analitički okvir za održivi razvoj i društvenu ekologiju, konceptualnim povezivanjem znanja i inovacija s okolišem [1-4]. Održivo znanje je znanje koje se odražava na održivi razvoj kroz “eko-inovacije” i “eko-poduzetništvo”. Pritom, naglasak je na najboljim raspoloživim tehnikama u smislu raspona mogućnosti smanjenja ugljičnog otiska i poboljšanja energetske učinkovitosti u metalurškoj praksi.

Metalurgija kao znanost o dobivanju i primjeni metala i njihovih legura podrazumijeva izučavanje cijelog spektra fenomena, procesa i svojstava. Suvremena metalurgija je specifično polje koje se bavi dizajnom, razvojem i karakterizacijom materijala od onih svakodnevnih koji nas okružuju u našim domovima, radnim mjestima, ali i materijala s posebnim zahtjevima za specifične namjene poput onih za automobilsku ili svemirsku industriju, medicinu, ali i atraktivnu IT industriju. Pritom je važan segment i primjena suvremenih proizvodnih tehnologija uz uvažavanje uporabe i zbrinjavanja otpada te smanjenja emisija iz proizvodnih procesa. Metalurška proizvodnja smatra se jednim od glavnih pokretača razvoja svjetske ekonomije. Proizvodnja metala i metalnih proizvoda u zemljama Europske unije zasniva se na proizvodima visoke kvalitete, inovativnim proizvodima i tehnološkom razvoju te učinkovitosti i iskustvu. Poduzeća iz promatrane djelatnosti prvenstveno moraju usmjeriti svoje proizvodne kapacitete na zemlje Europske unije, što ujedno znači i povećanje razine produktivnosti imovine i radne snage, kako bi se moglo parirati stranoj konkurenciji, a sve uvažavajući ekološki pristup [5-6].

Koncept Industrije 4.0 podrazumijevao je digitalizaciju, automatizaciju i robotizaciju te umrežavanje svih funkcija poduzeća kroz primjenu informacijskih i komunikacijskih tehnologija za upravljanje proizvodnim i poslovnim procesima i pritom stvaranje pametnih tvornica. Osnovni cilj je isticanje na tržištu poboljšanjem kvalitete, snižavanjem troškova i fleksibilizacije proizvodnje. Uz sveprisutno otuđenje, povratak osnovnim načelima izgradnje pravednog i naprednog društva kroz Društvo 5.0 novu transformaciju donosi i Industrija 5.0 koja je više “antinidustrijska”. Europska komisija je u prosincu 2021. godine uvela koncept Industrije 5.0 s jačanjem uloge i većim doprinosom društvu te postavljanjem naglaska i izvan ciljeva učinkovitosti i produktivnosti. Industrija 5.0 postavlja u središte proizvodnog procesa dobrobit radnika (Društvo 5.0.) uz primjenu novih tehnologija s ciljem podizanja prosperiteta društva s prevladavanjem ekonomske komponente i poštivanjem preporuka za proizvodnju u svrhu zaštite bioraznolikosti i smanjenja nepoželjnog utjecaja industrije na klimatske promjene. Industrija 5.0 / Društvo 5.0 podržava model kružne ekonomije / proizvodnje i promovira proizvodne tehnologije koje učinkovitije iskorištavaju prirodne resurse. Takvim pristupom jača se otpornost poslovanja i konkurentnost poduzeća. Digitalizacija društva i gospodarstva intenzivirat će se u tekućem desetljeću, kako u EU-u, tako i na ostalim tržištima u kojima djeluju hrvatska poduzeća. Važan

segment digitalne tranzicije gospodarstva je olakšana primjena naprednih tehnologija te ulaganje u istraživanje, razvoj i inovacije. Inovacija je primjena nove i poboljšane ideje, postupka, dobra, usluge, procesa koja donosi nove koristi ili kvalitetu u primjeni. U širem smislu riječi, inovacija je svaki zahvat kojim se smanjuju ulazni troškovi, a povećava produktivnost, poboljšava kvaliteta proizvoda ili usluga, povećava sigurnost, smanjuje otpad, odnosno svaka mjera koja vodi ka porastu konkurentnosti [7-9]. Napredne tehnologije poput internet stvari (IoT), umjetnu inteligenciju (UI), poslove temeljene na analizi velikih skupova podataka, tehnologiju virtualne i proširene stvarnosti, 3D ispis, strojno učenje, robotiku i sl., sastavni su dio društvenih i gospodarskih aktivnosti stoga mogu transformirati tradicionalne načine poslovanja i potaknuti stvaranje novih proizvoda i usluga.

Primjena koncepta Industrija 5.0 / Društvo 5.0 u metalurgiji iziskuje implementaciju naprednih tehnologija, najboljih raspoloživih tehnika (NRT) u svim segmentima proizvodnje poput valorizacije uloge i učinka kritičnih (engl. *Critical Raw Materials* – CRM) i strateških sirovina (engl. *Strategic Raw Materials* – SRM) te energetskog aspekta proizvodnih procesa. Industrija 5.0 uz suvremene koncepte proizvodnje, automatizaciju i digitalizaciju proizvodnih procesa na osnovu obrade baza podataka rezultata iz znanstvenoistraživačkih i razvojnih aktivnosti omogućava jednostavnu i brzu tranziciju i prilagodbu metalurške prakse Društvu 5.0.

2. Uloga kritičnih i strateških sirovina u metalurgiji

Sastavni dio naprednih tehnologija čine kvantitativno i kvalitativno sirovine bez čije dostupnosti je cijeli lanac vrijednosti doveden u pitanje. Pristup sirovinama ključan je za razvoj i funkcioniranje gospodarstva Europske unije [10-11]. Identificiran je niz neenergetskih i nepoljoprivrednih sirovina koje se smatraju kritičnima zbog njihove velike gospodarske važnosti i izloženosti velikom riziku za sigurnost opskrbe jer je izvor opskrbe koncentriran u nekoliko trećih zemalja. Kritične sirovine imaju ključnu ulogu u ostvarivanju zelene i digitalne tranzicije te s obzirom na njihove primjene u obrambenom i zrakoplovno-svemirskom programu, očekuje se da će u narednim desetljećima potražnja za njima eksponencijalno rasti. Istodobno, povećava se rizik od poremećaja u opskrbi zbog sve većih geopolitičkih napetosti i konkurencije u području sirovina. Ukoliko povećana potražnja ne poluči kvalitetan odgovor u izvorima sirovina i tehnologijama proizvodnje i prerade, ista bi mogla imati negativne posljedice za okoliš i društvo.

Većina kritičnih sirovina su metali, koji se mogu beskonačno reciklirati uz ponekad smanjenje kvalitete. Time se prakticira kružno gospodarstvo u kontekstu zelene tranzicije, dok se istodobno povećava dostupnost kritičnih sirovina i time doprinosi sigurnosti opskrbe. Iako svjedočimo naglom rastu potražnje za kritičnim sirovinama za nove tehnologije, u kojoj će primarno eksploatacija i dalje biti glavni izvor sirovina,

recikliranjem bi se sve više smanjivala potreba za primarnom eksploatacijom i s njom povezani troškovi, ali i posljedice. Pritom je nužno inzistirati na održavanju visoke razine EU kapaciteta za recikliranje preko čvrstog tržišta sekundarnih kritičnih sirovina [12-15]. Međutim, danas su stope recikliranja većine kritičnih sirovina niske, a otpad, nakon završetka životnog vijeka, kao što su baterije, električna i elektronička oprema te vozila šalju se većinom na recikliranje u treće zemlje. Sustavi i tehnologije recikliranja često nisu prilagođeni posebnostima tih sirovina. Inovacije imaju važnu ulogu u smanjenju potrebe za kritičnim sirovinama, smanjenju rizika od nestašice u opskrbi i razvoju tehnologija recikliranja kako bi se na odgovarajući i siguran način vadile kritične sirovine iz otpada. Stoga su nužne europske i nacionalne mjere kružnosti [14-15].

Uredbe EU 1252 i 1735 predviđaju osiguravanje mjera kružnosti kroz strateške i nacionalne programe s ciljem:

- poticanja tehnološkog napretka i učinkovitosti uporabe resursa radi smanjenja očekivanog povećanja potrošnje kritičnih sirovina u EU;
- promicanja sprečavanja nastanka otpada i povećanja ponovne uporabe kao i popravka proizvoda i dijelova s relevantnim potencijalom uporabe kritičnih sirovina;
- povećanja sakupljanja, razvrstavanja i obrade otpada s relevantnim potencijalom uporabe kritičnih sirovina, uključujući viškove metala i usmjeravanja otpada u odgovarajući sustav recikliranja radi maksimalnog povećanja dostupnosti i kvalitete materijala koji se može reciklirati kao ulazni materijal u postrojenjima za recikliranje kritičnih sirovina;
- povećanja uporabe sekundarnih kritičnih sirovina, među ostalim i mjerama kao što su uzimanje u obzir recikliranog sadržaja u kriterijima za dodjelu u vezi s javnom nabavom ili financijskim poticajima za uporabu sekundarnih kritičnih sirovina;
- povećanja tehnološke zrelosti tehnologija recikliranja kritičnih sirovina i promicanja kružnog dizajna, učinkovitosti sirovina te zamjenu kritičnih sirovina u proizvodima i primjenama, uključivanjem mjera potpore u nacionalne istraživačke i inovacijske programe;
- osiguranja uspostavljenih mjera kojima se radnoj snazi omogućuje stjecanje vještina potrebnih za podupiranje kružnosti lanca vrijednosti kritičnih sirovina, uključujući mjere za usavršavanje i prekvalifikaciju;
- promicanja prilagodbe financijskih doprinosa koje proizvođač mora platiti u skladu sa svojim obvezama proširene odgovornosti proizvođača na temelju na-

cionalnog prava, a u skladu s člankom 8. stavkom 1. Direktive 2008/98/EZ, kako bi se na taj način poticalo da proizvodi sadržavaju veći udio sekundarnih kritičnih sirovina oporabljenih iz otpada recikliranog u skladu s relevantnim okolišnim standardima EU;

- poduzimanja potrebnih mjera kojima se osigurava da kritične sirovine koje se izvoze nakon što su prestale biti otpad ispunjavaju relevantne uvjete u skladu s Direktivom 2008/98/EZ i drugim relevantnim pravom EU;
- podupiranja primjene standarda kvalitete EU za postupke recikliranja koji sadržavaju kritične sirovine.

Granice sustava primarnih kritičnih sirovina čine eksploatacija, koncentracija i rafiniranje kao faze životnog ciklusa proizvoda, koji se mogu provesti kroz procese proizvodnje metala iz primarnih i sekundarnih sirovina:

- primarna proizvodnja metala: prijevoz rude, koncentrata i sirovina u vozilima koja su u vlasništvu organizacije; skladištenje rude, koncentrata i sirovina; drobljenje i čišćenje rude; proizvodnja koncentrata sirovine;
- proizvodnja metala iz primarnih i sve više zamjenskih, sekundarnih sirovina: eksploatacija metala, kemijskim, fizičkim ili biološkim postupcima; taljenje; oplemenjivanje metala; čišćenje troske; rafiniranje metala; elektroliza metala; lijevanje; obrada nusproizvoda (troske).

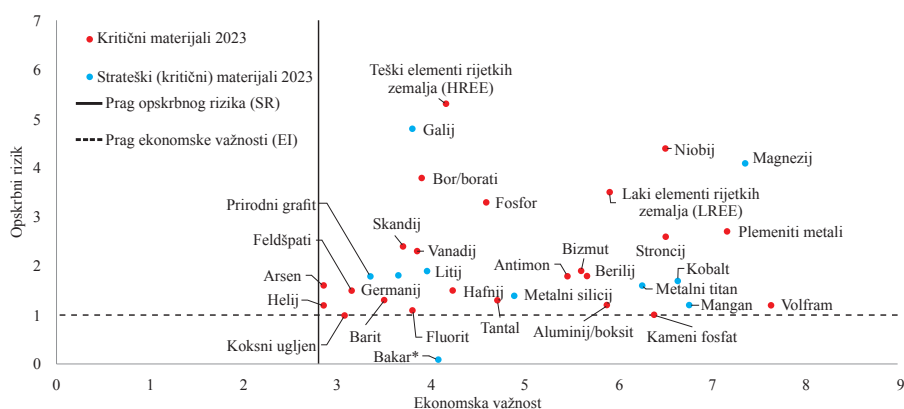
Kritične sirovine (CRM) su one sirovine koje su ekonomski i strateški važne za europsko gospodarstvo, ali imaju visok rizik povezan s njihovom opskrbom. Korišteni u tehnologijama za zaštitu okoliša, potrošačkoj elektronici, zdravstvu, proizvodnji čelika, obrani, istraživanju svemira i zrakoplovstvu, ovi materijali nisu samo “kritični” za ključne industrijske sektore i buduće primjene, već i za održivo funkcioniranje europskog gospodarstva. Važno je napomenuti da ti materijali nisu klasificirani kao “kritični” jer se ti materijali smatraju rijetkima, već su klasificirani kao “kritični” jer postoji nedostatak održivih zamjena, zbog vrlo jedinstvenih i pouzdanih svojstava ovih materijala za postojeće, kao i buduće primjene [18-19]. CRM imaju:

- značajnu gospodarsku važnost za ključne sektore u europskom gospodarstvu, kao što su potrošačka elektronika, ekološke tehnologije, automobilska industrija, zrakoplovstvo, obrana, zdravstvo i čelik;
- visok rizik opskrbe zbog vrlo visoke ovisnosti o uvozu i visoke razine koncentracije postavljenih kritičnih sirovina u pojedinim zemljama.

Osim visokog rizika povezanog s njihovom opskrbom, kritične sirovine toliko su važne jer su “kritične” za mega-sektore EU i za širok raspon komercijalnih i vladinih

aplikacija: zelena tehnologija, telekomunikacije, istraživanje svemira, snimanje iz zraka, zrakoplovstvo, medicinski uređaji, mikroelektronika, transport, obrana i drugi proizvodi i usluge visoke tehnologije. Kao rezultat toga, industrija EU, okoliš te kvaliteta i suvremeni način života ovise o pristupu i korištenju ovih kritičnih sirovina [16-19].

Godine 2023. Europska komisija izradila je svoj peti (5.) popis kritičnih sirovina na temelju kriterija ekonomske važnosti i rizika opskrbe [19]. Jedna od novosti popisa za 2023. godine je uvrštavanje strateških sirovina (SRM). Ova posebna kvalifikacija temelji se na interesu Europske komisije da se usredotoči na one sirovine koje se koriste u strateškim sektorima kao što su obnovljiva energija, digitalne, svemirske i obrambene tehnologije te za one za koje je vjerojatno da će stvoriti rizike opskrbe u bliskoj budućnosti. Ekstrakcija i obrada CRM-a može imati negativne utjecaje na okoliš, ovisno o metodama i procesima koji se koriste, kao i društvene učinke. Najvažnijim sirovinama poput baznih metala kao što su aluminij, bakar, olovo, nikal, kositar i cink trguje se na burzama. U posljednje vrijeme razvoj gospodarstava u nastajanju i širenje ključnih pokretačkih tehnologija diktiraju potražnju za sirovinama. Proizvođači reagiraju na dostupnost CRM i SRM, kao i na fluktuacije cijena stvaranjem zaliha, pregovaranjem o dugoročnim ugovorima ili zaštitom od cijena. Nedavna Studija o kritičnim sirovinama za EU 2023 [19] predstavlja procjenu kritičnih sirovina za EU: 70 sirovina koje se sastoje od 67 pojedinačnih materijala i tri grupe materijala: deset teških (HREE – *Heavy Rare Earth Elements*) i pet lakih (LREE – *Light Rare Earth Elements*) elemenata rijetkih zemalja i pet metala platinske skupine (PGM – *Platinum Group Metals*) i ukupno 87 pojedinačnih sirovina. Rezultati procjene kritičnih sirovina u EU prikazani su grafom na Slici 1 i Tablicom 1 [19].

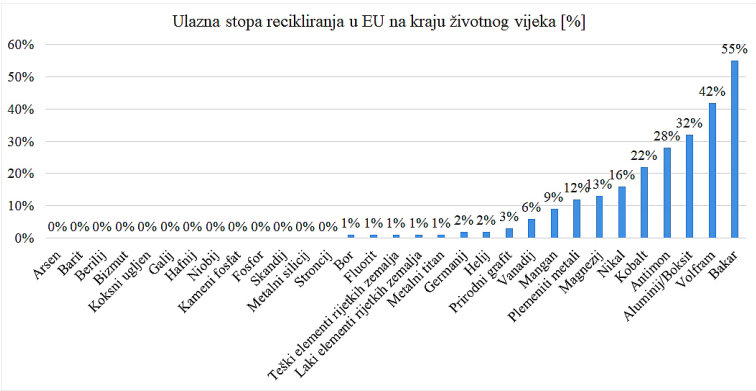


Slika 1: Procjena kritičnih sirovina u EU u 2023. godini [19]

Tablica 1: Kritične sirovine (CRM) i strateške sirovine (SRM) u EU prema procjeni iz 2023. godine [19]

2023 Kritične sirovine CRM		2023 Strateške sirovine (SRM)
Aluminij/boksit	Fluorit	<i>Kobalt</i>
Antimon	Hafnij	<i>Galij</i>
Arsen	Helij	<i>Germanij</i>
Barit	Niobij	<i>Litij</i>
Berilij	Plemeniti metali	<i>Magnezij</i>
Bizmut	Stroncij	<i>Mangan</i>
Bor/borati	Fosfor	<i>Prirodni grafit</i>
Koksni ugljen	Tantal	<i>Metalni silicij</i>
Feldšpati	Skandij	<i>Metalni titan</i>
Kameni fosfat	Volfram	<i>Bakar*</i>
Teški elementi rijetkih zemalja (HREE)	Vanadij	<i>Nikal*</i>
Laki elementi rijetkih zemalja (LREE)		

Od iznimnog je značaja zamjena primarnih sirovina sekundarnima kroz postupke oporabe i recikliranja. EU sve više podiže udio kružnog gospodarstva korištenjem sekundarnih sirovina u ukupnom opsegu proizvodnje, kako je prikazano Slikom 2. Više od 50% legura na bazi željeza, cinka ili platine se reciklira i pokrivaju više od 25% potrošnje u EU [19]. Međutim, sekundarna proizvodnja legura korištenih u tehnologijama obnovljivih izvora energije ili visokotehnološkim aplikacijama, kao što su elementi rijetkih zemalja, galij ili indij, ima samo marginalni doprinos.



Slika 2: Ulazna stopa recikliranja u EU na kraju životnog vijeka (EoL-RIR) [19]

2.1 Smanjenje ugljičnog otiska zamjenom primarnih sirovina sekundarnima istraživanjima kritičnih (CRM) i strateških sirovina (SRM): primjer istraživanja AlSi9Cu3(Fe) i primjena u metalurškoj praksi

Povećanje ulazne stope recikliranja i time smanjenja ugljičnog otiska proizvodnje oslanja se na najbolje raspoložive tehnike (NRT) iz pojedinih sektora proizvodnje željeznih i neželjeznih legura, industrijskim emisijama, ali i obradi otpada [20-28]. Primjeri dobre prakse u metalurškoj proizvodnji u implementaciji kružnog gospodarstva, oslanjaju se na dugogodišnju znanstvenoistraživačku suradnju s gospodarstvom, s ciljem primjene NRT i poboljšanja kvalitete proizvoda. Iz prepoznavanja potreba za visokokvalitetnim istraživanjima i visokom razinom tehnološke spremnosti (TRL6 → TRL9) zajedničkih projekata proizašlo je idejno rješenje, provedba i implementacija Centra za ljevarstvo – SIMET [6]. Usporedno su provedena istraživanja poput zamjene primarnih sirovina sekundarnima s rezultatima na visokoj razini znanstvene i stručne verifikacije [29-35], ali i primijenjena u proizvodnom procesu s ciljem direktnog utjecaja na smanjenje ugljičnog otiska.

Primjer istraživanja AlSi9Cu3(Fe) i primjene u metalurškoj praksi ogleda se u zamjeni primarnih sirovina sekundarnima na bazi aluminijske legure koje prema Studiji pripadaju u skupinu kritičnih materijala [19]. Proučavana je uobičajena primjena sekundarne sirovine u konvencionalnim ljevaonicama koja se oslanja na vlastiti povrat (otpad) kojim se garantira 0% ugljičnog otiska sirovine. Kontrolirane značajke poput kemijskog sastava i razine nečistoća omogućavaju dodavanje veće količine aluminijskog otpada iz povrata u ponovnu proizvodnju aluminijskih legura [36-39]. Ispitivana AlSi9Cu3(Fe) legura primjenjuje se u transportnoj industriji s naglaskom na automobilsku industriju za sigurnosno-kritične komponente zahvaljujući visokoj čvrstoći i istezanju te otpornosti na puzanje, napetosnu i integranularnu koroziju, dobroj zavarivosti, strojnoj obradivosti ali i visokoj žilavosti u toplinski obrađenom stanju. Aluminijske legure općenito su karakterizirane niskom gustoćom zbog čega pronalaze sve veću ulogu u zamjeni masivnijih proizvoda od željeznih legura, a čime doprinose direktno smanjenju mase konačnog proizvoda (automobila). Time se smanjuje ugljični otisak automobila u njegovoj primjeni zahvaljujući smanjenoj energetske potrebi za pogon i upravljanje. Višestruko pretapanje važan je aspekt u produljenju životnog vijeka materijala. Pri konvencionalnoj primjeni određenog udjela sekundarne sirovine u sirovini uočeno je da kemijski sastav legure odgovara zahtjevima normi, ali i uz određena smanjenja mehaničkih svojstava [40-42].

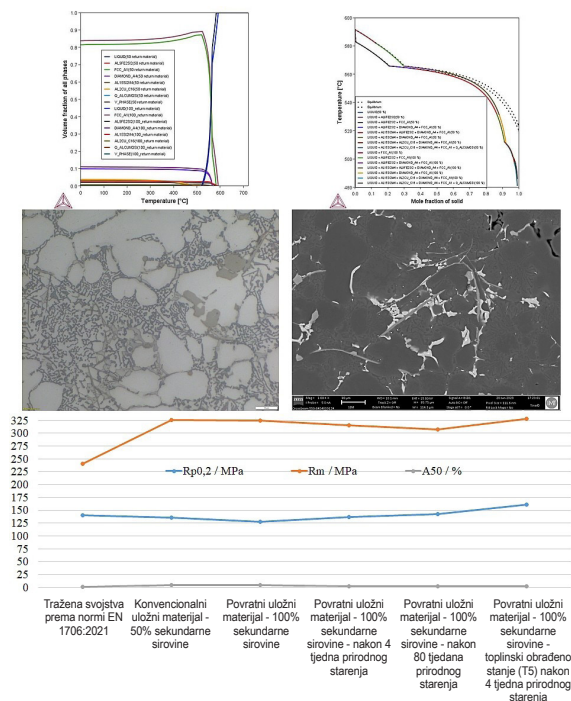
Opseg primjene sirovine na bazi aluminija obuhvaća sektor metalnih i nemetalnih materijala nužnih i neophodnih za proizvodnju trajnih dobara. U skladu s Nacionalnom klasifikacijom djelatnosti (NKD) te Studijom iz 2023. godine, udio primjene aluminijske sirovine prikazan je u Tablici 2.

Tablica 2: Primjena kritične sirovine na bazi aluminija s udjelom u pojedinom NKD sektoru [19]

Vrsta proizvoda	Udio primjene, %	NKD sektor
Građevinarstvo	21	C25 – Proizvodnja gotovih metalnih proizvoda, osim strojeva i opreme
Automobilska industrija	19	C29 – Proizvodnja motornih vozila, prikolica i poluprikolica
Prijevozna sredstva	19	C30 – Proizvodnja ostalih prijevoznih sredstava
Ambalaža	15	C25 – Proizvodnja metalnih proizvoda, osim strojeva i opreme
Inženjerstvo visoke tehnologije	11	C28 – Proizvodnja strojeva i opreme, d.n.
Trajna roba široke potrošnje	5	C25 – Proizvodnja metalnih proizvoda, osim strojeva i opreme
Vatrostalni materijali	3	C23 – Proizvodnja proizvoda od ostalih nemetalnih minerala
Cement	3	C23 – Proizvodnja proizvoda od ostalih nemetalnih minerala
Abrazivi	2	C23 – Proizvodnja proizvoda od ostalih nemetalnih minerala

S obzirom da su konačni proizvodi sigurnosno-kritične komponente, podložni su visokim zahtjevima za svojstva i kvalitetu koji zavise od cjelokupnog procesa lijevanja i skrućivanja od početnog kemijskog sastava koji se direktno oslanja na kvalitetu uložnog materijala (primarne i/ili sekundarne sirovine), obrade taline do kontrole uvjeta odvođenja toplinske energije tijekom lijevanja i skrućivanja. Tijekom procesa skrućivanja dolazi do brojnih termodinamičkih interakcija između elemenata i kao rezultat nastaju brojne faze koje različito utječu na mehanička svojstva konačnog proizvoda. Korelacijom udjela sekundarne sirovine [29, 31], termodinamike procesa skrućivanja [32-33], dobivene mikrostrukture [29, 31, 34] i odgovarajućih mehaničkih svojstava [34] poput čvrstoće i istezanja te potencijalne naknadne toplinske obrade [30] procjenjuje se održivost svojstava i potencijal očuvanja kvalitete proizvoda. Opseg podizanja razine tehnološke spremnosti za punu primjenu u proizvodnji (TRL9) zahtjeva dugotrajna opsežna istraživanja i izradu baze podataka koja omogućava predviđanje ponašanja legure tijekom skrućivanja, traženih svojstava i kvalitete konačnog materijala u odnosu na početne postavke uložnog materijala iz sekundarnih sirovina. Rezultati termodinamičkih, mikrostrukturnih istraživanja legure AlSi9Cu3(Fe) u korelaciji s postignutim mehaničkim svojstvima (čvrstoće i istezanja) upućuju da se sekundarna sirovina u obliku potpuno povratnog materijala, može smatrati kvalitetnim uložnim materijalom s visokim potencijalom recikliranja. Unatoč očekivanom odstupanju od kemijskog sastava, kontrolom procesa skrućivanja postignut je ispravan razvoj mikrostrukture i slijedom navedenog postignute su

visoke vrijednosti ispitivanih mehaničkih svojstava. Time se kritična sirovina u obliku povrata AlSi9Cu3(Fe) legure može smatrati izvrsnim uložnim materijalom bez degradacije svojstava [43]. Prikaz segmenta istraživanja AlSi9Cu3(Fe) legura s uviđom u termodinamičke proračune, dobivene mikrostrukture i postignuta mehaničkih svojstava prikazan je Slikom 3.



Slika 3: Segment istraživanja AlSi9Cu3(Fe) legura s aspekta procjene utjecaja primjene sekundarnih sirovina na održivost kvalitete konačnog proizvoda [43].

3. Mjere i valorizacija energetske učinkovitosti

Metali su od strateške važnosti za digitalnu i zelenu tranziciju, preobrazbu u području energije, materijala i kružnoga gospodarstva te jačanje EU gospodarske otpornosti i neovisnosti i postizanje ciljeva europskog zelenog plana i industrijske strategije [43]. Postizanje tih ciljeva moguće je uz dodatni razvoj održivih domaćih kapaciteta i opskrbe, imajući u vidu rastuću globalnu potražnju, ranjivost lanaca opskrbe i geopolitičku situaciju. Djelotvorne, prilagođene i usklađene mjere nužne su kako bi se osigurala uspostava i primjena najboljih raspoloživih tehnika, čime bi se primjenjivali procesi koji su najučinkovitiji i imaju najmanji mogući učinak na zdravlje ljudi i okoliš.

Jedan od aspekta smanjenja ugljičnog otiska pokriva segment energetske učinkovitosti. Najčešća definicija razine okolišne učinkovitosti povezana s NRT za specifičnu potrošnju energije (energetska učinkovitost) opisuju se sljedećom jednadžbom:

$$\text{specifična potrošnja energije} = \frac{\text{potrošnja energije}}{\text{unos}}$$

pri čemu su:

- potrošnja energije: ukupna količina topline (generirane iz primarnih izvora energije) i električne energije potrošena u relevantnom postupku/relevantnim postupcima, izražena u MJ/godina ili kWh/godina. U slučaju zagrijavanja sirovina potrošnja energije odgovara ukupnoj količini topline (generirane iz primarnih izvora energije) i električne energije potrošenoj u svim pećima u relevantnom postupku/relevantnim postupcima.
- unos: ukupna količina prerađenih sirovina, izražena u t/godina.

Za povećanje opće energetske učinkovitosti industrijskih postrojenja u metalurškoj proizvodnji NRT obuhvaćaju primjenu [25]:

- Plana energetske učinkovitosti i energetske pregledi – Plan energetske učinkovitosti dio je EMS-a i podrazumijeva definiranje i praćenje specifične potrošnje energije za određenu aktivnost/postupke, utvrđivanje ključnih pokazatelja uspješnosti na godišnjoj razini (primjerice MWh/tona proizvoda) te planiranje periodičnih ciljeva poboljšanja i povezanih aktivnosti. Energetski pregledi provode se barem jednom godišnje kako bi se osiguralo ispunjavanje ciljeva plana upravljanja energijom. Plan energetske učinkovitosti i energetski pregledi mogu se uključiti u opći plan energetske učinkovitosti većeg postrojenja (npr. za proizvodnju željeza i čelika);
- Evidenciju energetske bilance – Godišnja izrada evidencije energetske bilance koja sadržava raščlambu potrošnje i proizvodnje energije (uključujući izvoz energije) prema vrsti izvora energije (npr. električna energija, prirodni plin, procesni plinovi iz industrije željeza i čelika, energija iz obnovljivih izvora, uvezena energija za zagrijavanje i/ili hlađenje). To uključuje određivanje energetske granice postupka, informacije o potrošnji energije u pogledu isporučene energije, informacije o energiji isporučenoj iz postrojenja, informacije o protoku energije (npr. Sankey dijagram ili energetska bilanca) kojima se prikazuje kako se energija upotrebljava u postupcima.

Odgovarajućim kombinacijama NRT moguće je polučiti značajan učinak na poboljšanje energetske učinkovitosti u postrojenjima za zagrijavanje i taljenje metala. Poznata je činjenica da je poboljšanje učinkovitosti iskorištenja goriva ključ dobre financijske i ekološke prakse. Kako bi se zadovoljili viši zahtjevi, potrebno je poboljšati postojeće peći optimizacijom energetske učinkovitosti i smanjenjem emisije onečišćujućih tvari u procesu izgaranja goriva. U nastavku, navedene su mogućnosti poboljšanja učinkovitosti sustava procesnog zagrijavanja i taljenja uloška u metalurškim pećima koje koriste fosilna goriva, a koje se mogu se grupirati u pet kategorija [45]:

1. Generiranje topline: govori o opremi i gorivima koja se koriste za zagrijavanje uloška;
2. Zadržavanje topline: opisuje metode i materijale koji mogu smanjiti gubitak toplinske energije u okoliš;
3. Prijenos topline: raspravlja o metodama poboljšanja prijenosa topline na uložak kako bi se smanjila potrošnja energije, povećala produktivnost i poboljšala kvaliteta gotova proizvoda;
4. Oporaba otpadne topline: identificira izvore gubitka energije koji se mogu oporabiti u korisnije svrhe i bavi se načinima za dobivanje dodatne energije;
5. Najbolje raspoložive tehnike: bave se uobičajenim metodama smanjenja gubitka energije u praksi poboljšanjem rukovanja materijalima, učinkovitim slijedom i rasporedom zagrijevnih zona, traženjem učinkovitije kontrole procesa kao i poboljšanjem performansi pomoćnih sustava.

Stvarni operativni problemi peći u metalurškoj praksi mogu se navesti sljedećim redoslijedom: energetska učinkovitost i operativni troškovi, emisije stakleničkih plinova, učinkovitost izgaranja, kontrola emisija, kvaliteta proizvoda, životni vijek i pouzdanost dijelova postrojenja, troškovi održavanja te sigurnost. Unutar ovih zahtjeva energetska učinkovitost igra posebice važnu ulogu.

Prije svega, rješenja za optimizaciju energetske učinkovitosti peći, uz bitno smanjene emisije onečišćujućih tvari, treba tražiti u poboljšanju upravljačkih procesa u pećima s otvorenim plamenom u segmentima:

- Goriva i izgaranje;
- Aerodinamika gorionika i radnog prostora peći;
- Prijenos topline.

S tim u vezi, posebno je važno obratiti pozornost na radne uvjete kao što su: suvišak (pretičak) zraka u procesu izgaranja, kontrola tlaka u peći, obogaćivanje zraka za iz-

garanje goriva kisikom, predgrijavanje zraka za izgaranje goriva, temperatura uloška (na ulazu i ispustu), temperatura i emisivnost plamena, emisivnost ozida peći.

Jednako je važno ispitati mogućnost zamjene postojeće konvencionalne tehnologije izgaranja s takozvanim “naprednim” komercijalno dostupnim tehnikama izgaranja, na primjer, visokotemperaturnim izgaranjem goriva sa zrakom (engl. *High Temperature Air Combustion* – HiTAC) ili izgaranjem goriva s kisikom, s ciljem povećanja energetske učinkovitosti i smanjenja emisije onečišćujućih tvari. U procesu odabira određene tehnologije bitno je voditi računa o isplativosti investicije, odnosno o razdoblju povrata. No, u svakom slučaju, smanjenje potrošnje energije primjenom u praksi odgovarajućih tehnoloških parametara, kao i ulaganje u napredne tehnologije, mogu znatno povećati konkurentnost u metalurškoj proizvodnji.

Posljednjih petnaestak godina na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu provedeno je nekoliko istraživanja s ciljem povećanja energetske učinkovitosti pojedinih peći u metalurškim pogonima u Republici Hrvatskoj. U nastavku su prikazani sažetici nekih primjera rješenja.

3.1 Implementacija nove tehnologije izgaranja na kružnoj peći

Peć s rotacijskom podnicom nazivnog zagrijevnog kapaciteta 27 t/h nalazila se prije valjaonice tipa “pilger” u liniji za proizvodnju bešavnih cijevi. Cilj studije bio je na peći s rotacijskom podnicom, opremljenoj konvencionalnim tehnologijama izgaranja, odabrati napredne komercijalno dostupne tehnike izgaranja prema kojima bi peć trebala raditi kako bi se maksimizirala energijska učinkovitost i minimizirale emisije onečišćujućih tvari, uzimajući u obzir isplativost investicije, odnosno razdoblje povrata [46].

Ponuđena rješenja zamjene postojećeg sustava izgaranja bile su tri pristigle komercijalne ponude s tri različite tehnologije izgaranja:

- Novi visokobrzinski gorionici s novim centralnim rekuperatorom (engl. *High Speed Flame Burners*);
- Regenerativni bezplameni gorionici (engl. *Self-regenerative Flameless Burners*);
- Bezplameni gorionici za izgaranje prirodnog plina kisikom (engl. *Flameless Oxy-fuel Natural Gas Burners*).

Analiza isplativosti pojedinih ponuda provodila se usporedbom sljedećih čimbenika kao pokazatelja energijske učinkovitosti sustava: učinkovitost izgaranja, raspoloživa toplina i ušteda goriva, uzimajući u obzir emisije štetnih tvari u okoliš.

Za izračun korištena je sljedeća metodologija:

- izmjerena je potrošnja goriva po satu u trenutnom stanju te temperatura zraka za izgaranje i višak zraka u procesu izgaranja;
- godišnja potrošnja goriva odgovara potrošnji goriva po satu pomnoženoj s godišnjim brojem radnih sati peći, koji se zatim pomnoži s cijenom goriva;
- na isti način je izračunata godišnja potrošnja kisika pri izgaranju kisikom;
- izračunate su postotne uštede goriva ostvarene predgrijavanjem zraka te su utvrđene godišnje uštede goriva primjenom pojedinih tehnologija izgaranja;
- rok povrata investicije je određen usporedbom troška investicije i dodatnih troškova s godišnjom uštedom goriva.

Analiza je pokazala da regenerativni bezplameni gorionici kao i bezplameni gorionici izgaranja s kisikom pokazuju vrhunske karakteristike izgaranja u zagrijevnim industrijskim pećima s otvorenim plamenom u smislu visoke energijske učinkovitosti, ravnomjerne raspodjele toplinskog toka i niske emisije NO_x . Međutim, primjena kisika bila bi opravdana samo ako bi bilo potrebno dodatno smanjiti emisiju CO_2 , znatnije ispod dopuštenih graničnih vrijednosti.

3.2 Mogućnosti niske potrošnje energije u pećima za taljenje i održavanje aluminijских legura

Energetska učinkovitost ljevaoničkih peći za taljenje aluminija znatno je niža nego kod većine drugih pećnih agregata, posebice zbog niske emisivnosti konvencionalnog vatrostaalnog materijala na radnoj temperaturi peći, kao i niske emisivnosti aluminija i niske toplinske vodljivosti rastaljenog aluminija.

Glavni problemi u procesu taljenja aluminija u ljevaoničkoj praksi su sljedeći:

- inherentno niska energetska učinkovitost aluminija i konvencionalnih vatrostaalnih materijala na radnim temperaturama peći;
- rekuperacija je otežana zbog onečišćenih izlaznih plinova;
- kontaminacija rastaljenog aluminija oksidom.

Budući da u Republici Hrvatskoj postoji nekoliko peći za taljenje aluminijских legura u linijama za lijevanje, od iznimne je važnosti razmotriti moguća rješenja za pove-

ćanje energetske učinkovitosti u postojećim pećima [47]. Posebno se ističe važnost održavanja pogonskih uvjeta poput:

- održavati peć nepropusnom, s minimalnim otvaranjem vrata za ulaganje uloška i otvora za promatranje;
- koristiti automatsku kontrolu tlaka u peći. Treba održavati blago pozitivan tlak (0,05 - 0,25 mm stupca vode) kako bi se spriječio ulaz okolišnog zraka;
- koristiti kvalitetan regulator omjera zrak/gorivo. Peć bi trebala raditi s dovoljnim suviškom zraka kako bi se osiguralo gotovo potpuno izgaranje goriva. Količina suviška O₂ na najnižoj razini također je potrebna kako bi se smanjilo stvaranje neizgorjelih ugljikovodika, a istovremeno i H₂ kao jednog od glavnih produkata izgaranja u uvjetima nepotpunog izgaranja tj. manjka O₂. Naime, sloj troske na površini taline lakše je ukloniti nego apsorbirani vodik iz aluminija;
- izbjegavati udaranje mlazova plamena ili vrućih plinova izgaranja izravno na površinu rastaljenog aluminija;
- analizirane su i prednosti pojedinih konstrukcijskih rješenja;
- zamjena svoda kupole obložene standardnim vatrostalnim materijalom sa suvremenim vatrostalnim materijalima na bazi keramičkih vlakana;
- zamjena konvencionalnih načina zagrijavanja s gorionicima s otvorenim plamenom s keramičkim plinskim uronjenim gorionicima, koji omogućuju proces taljenja potopljenim izgaranjem (engl. Submerged Combustion Melting Process – SCMP).

3.3 Poboljšanje energetske učinkovitosti peći za taljenje aluminija povećanjem emisivnosti obzida peći

U visokotemperaturnim pećima, kao što je peć za taljenje aluminija, radijacijski prijenos topline često dominira tako da je udio konvektivnog prijenosa topline relativno malen (5 do 10%) zbog malih brzina strujanja plinova izgaranja. Prijenos topline zračenjem u peći ovisi o temperaturi plamena, temperaturi uloška, emisivnosti plamena, emisivnosti uloška te temperaturi i emisivnosti obzida. Površinska emisivnost rastaljenog aluminija kreće se od 0,004 do 0,550, a sloj troske formiran na površini rastaljenog aluminija, koji se sastoji od aluminijevog oksida, ima emisivnost od 0,11 do 0,19. U praksi je prirodni plin često zadani izbor kao gorivo u industrijskim pećima, premda zbog svog niskog omjera ugljik / vodik rezultira niskom emisivnošću produkata izgaranja koja je, ovisno o temperaturi i suvišku zraka, obično na razini 0,25 [48].

Sve to dovodi do lošeg prijenosa topline zračenjem na površinu uloška. Stoga, u usporedbi s nekim drugim dizajnom peći, peć je dizajnirana da to kompenzira tako što ima visok omjer površine svoda i taline kako bi se intenzivirao prijenos topline na talinu. Iz toga slijedi da je od velike važnosti povećati emisivnost vatrostralnog materijala svoda peći. Često se pretpostavlja da vatrostralni materijali imaju emisivnost od oko 0,9. Međutim, u slučaju većine konvencionalnih vatrostralnih materijala emisivnost značajno opada s porastom temperature, tako da je na primjer obično manja od 0,5 na 1000 °C. Obloge od keramičkih vlakana također mogu imati nisku emisivnost od 0,5-0,6 pri visokim temperaturama. Međutim, treba imati na umu da keramička vlakna imaju puno manju mehaničku čvrstoću od tradicionalnih materijala na bazi šamota.

Jasno je da je u ovom slučaju emisivnost vatrostralne stijenke od velike važnosti. Jedno od rješenja za postizanje visoke emisivnosti je nanošenje visokoemisivnog premaza. U tom slučaju, emisivnost vatrostralne stijenke ostaje između 0,85 i 0,95 do temperatura iznad 1650 °C. Naime, kada se premaz visoke emisivnosti nanosi na vatrostralni materijal u visokotemperaturnoj peći, energija zračenja od plinova izgaranja kao i konvektivna energija od atmosfere peći apsorbira se površinom premaza i ponovno zrači na hladnije dijelove zida peći, gdje je temperatura stijenke peći viša od uloška u peći.

Model jedinstvene plinske zone (engl. *The Single Gas Zone Model*) korišten je za analizu utjecaja emisivnosti vatrostralne obloge na prijenos topline, a time i na energetska učinkovitost kao i na potrošnju goriva u peći za dva slučaja promatrana na početku i na kraju procesa taljenja [49]:

- uporabom konvencionalnog vatrostralnog materijala;
- uporabom konvencionalnog vatrostralnog materijala s visokoemisivnim premazom.

Na temelju dobivenih rezultata razvidno je da je toplinski tok od plinova izgaranja i stijenki na uložak, u razdoblju od početka do kraja procesa taljenja, kod visokoemisivnog premaza u odnosu na konvencionalnu vatrostralnu oblogu povećan u rasponu od 10,7% do 14,1%. To znači da se vrijeme taljenja skraćuje za otprilike 12%. Očekuje se da će se isto toliko smanjiti potrošnja goriva jer se energetska učinkovitost povećava u intervalu od 0,6% do 0,9%.

6. Zaključak

U kontekstu klimatskih promjena, iscrpljivanja prirodnih resursa i izazova upravljanja otpadom u složenoj geopolitičkoj situaciji, EU nastoji usvojiti asertivnu, kooperativnu i održivu trgovinsku politiku, definiranu kao “otvorena strateška autonomija”. Ključno načelo je osiguravanje otpornosti u strateškim opskrbnim lancima i sektorima što uključuje obnovljive izvore energije, digitalne tehnologije, mobilnost, svemirske i obrambene tehnologije. Ključnim dokumentima potiče se kružno gospodarstvo – model za optimizaciju ekonomske i ekološke učinkovitosti i recikliranje materijala. Regulatorni okvir za ubrzavanje implementacije i povećanje konkurentnosti energetske tehnologije s nultom neto stopom emisija pretpostavlja razvoj “kružnog energetskog sustava” koji naglašava resursno učinkovitu proizvodnju i korištenje recikliranih kritičnih sirovina “u petlji” s ciljem istovremenog ublažavanja utjecaja na okoliš i smanjenja ovisnosti o njihovom uvozu. Brojni primjeri smanjenja ugljičnog otiska uz primjenu NRT proizašli iz suradnje znanstvenika s Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i gospodarskih dionika iz polja metalurgija. Ishod komplementarnih istraživanja prema konceptu Industrija 5.0 / Društvo 5.0 rezultirao je višestrukim ekonomski opravdanim optimizacijama korištenja resursa – kritičnih (CRM) i strateških sirovina (SRM), poboljšanjem energetske učinkovitosti, zadržavanjem niske emisije onečišćujućih tvari i niskih troškova održavanja uz poboljšanje funkcionalnih svojstava konačnih proizvoda.

Zahvala

Istraživanje je provedeno u okviru Institucijskog projekta: *Dizajn i karakterizacija inovativnih inženjerskih legura* (FPI-124-ZZB); infrastrukturnih međunarodnih projekata: *Centar za ljevarstvo – SIMET* (KK.01.1.1.02.0020) i *VIRTULAB — Integrirani laboratorij za primarne i sekundarne sirovine* (KK.01.1.1.02.0022) financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija 2014.–2020.

7. Literatura:

- [1] Carayannis, E.G.; Barth, T.D.; Campbell, D.F.: The Quintuple Helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation, *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, **1** (2012) 2, <https://doi.org/10.1186/2192-5372-1-2>
- [2] Rame, R.; Purwanto, P.; Sudarno, S.: Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future, *Innovation and Green Development*, **3** (2024) 100173, <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173>

- [3] Barata, J.; Kayser, I.: Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future, *Procedia Computer Science*, **219** (2023) 778-788
- [4] van Erp, T.; Pereira Carvalho, N. G.; Gerolamo, M.; Gonçalves, R.; Malý Rytter, N. G.; Gladysz, B.: Industry 5.0: A new strategy framework for sustainability management and beyond, *Journal of Cleaner Production*, **461** (2024) 142271, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142271>
- [5] Zovko Brodarac, Z.: Advancement of the scientific-research potential of the Faculty of Metallurgy through the implementation of infrastructure projects, *Engineering Power*, **17** (2022) 3, 2-6, <https://hrcak.srce.hr/302297>
- [6] Zovko Brodarac, Z.; Unkić, F.; Srećec, Lj.; Filipović, A.: Centar za ljevarstvo – SIMET kao temelj razvoja metalske industrije Republike Hrvatske, *Godišnjak 2020. Akademije tehničkih znanosti Hrvatske*, ur. Andročec V., Mrša V., Rogale D., Zagreb: Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 2021, 249-264
- [7] Rousseau, F.; Nominé, A.; Zavašnik, J.; Cvelbar, U.: Is alloying a promising path to substitute critical raw materials?, *Materials Today*, 2025, In press, Corrected proof, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.01.015>
- [8] Masoomi, B.; Ghasemian Sahebi, I.; Ghobakhloo, M.; Mosayebi, A.: Do industry 5.0 advantages address the sustainable development challenges of the renewable energy supply chain?, *Sustainable Production and Consumption*, **43** (2023) 94-112, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.018>;
- [9] Horn, S.; Turunen, T.; Saukkonen, S.; Nylén, E-J.; Sorvari, J.: Circular economy solutions for magnetic resonance imaging–Mitigation of environmental impacts and critical raw material use, *Resources, Conservation & Recycling*, **215** (2025) 108095, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108095>
- [10] Baldassarre, B.; Carrara S.: Critical raw materials, circular economy, sustainable development: EU policy reflections for future research and innovation, *Resources, Conservation & Recycling*, **215** (2025) 108060, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108060>
- [11] Koese, M.; Parzer, M.; Sprecher, B.; Kleijn, R.: Self-sufficiency of the European Union in critical raw materials for E-mobility, *Resources, Conservation & Recycling*, **212** (2025) 108009, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108009>
- [12] Uredba (EU) 2021/1056 o uspostavi Fonda za pravednu tranziciju, 24.6.2021., Službeni list Europske Unije, 30.6.2021.
- [13] Provedbena odluka komisije (EU) 2022/2110 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT) za industriju prerade neobojenih metala u skladu s Direktivom 2010/75/EU o industrijskim emisijama, 11.10.2022., Službeni list Europske Unije, 4.11.2022.
- [14] Uredba (EU) 2024/1252 o uspostavi okvira za osiguravanje sigurne i održive opskrbe kritičnim sirovinama i o izmjeni uredbi (EU) br. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 i (EU) 2019/1020, 11.4.2024., Službeni list Europske unije, 3.5.2024.
- [15] Uredba (EU) 2024/1735 o uspostavi okvira mjera za jačanje europskog ekosustava za proizvodnju tehnologija s nultom neto stopom emisija i izmjeni Uredbe (EU) 2018/1724, 13.6.2024., Službeni list Europske unije, 28.6.2024.

- [16] Draghi, M.: The future of European competitiveness, Part A: A competitiveness strategy for Europe 9.9.2024., https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [17] Draghi, M.: The future of European competitiveness, Part B: In-depth analysis and recommendations, 9.9.2024, https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [18] European Comission, EU principles for sustainable raw materials, Publications Office of the European Union, 2021, ISBN 978-92-76-40054-7 DOI: 10.2873/09707, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/47815>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [19] Grohol, M.; Veeh, C.: *Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report*, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [20] Provedbena odluka komisije (EU) 2022/2110 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT) za industriju prerade nebojenih metala u skladu s Direktivom 2010/75/EU o industrijskim emisijama, 11.10.2022., Službeni list Europske unije, 4.11.2022.
- [21] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/196475, JRC131649, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [22] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013, doi:10.2791/97469, JRC 69967, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [23] Provedbena odluka komisije (EU) 2016/1032 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT-i) za industrije obojenih metala u skladu s Direktivom 2010/75/EU, 13.6.2016., Službeni list Europske unije, 30.6.2016.
- [24] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the main Non-Ferrous Metals Industries, EUR 28648, doi:10.2760/8224, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [25] Direktiva 2010/75/EU o industrijskim emisijama (integrirano sprečavanje i kontrola onečišćenja), 24.11.2010., Službeni list Europske unije, 17.12.2010.
- [26] JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installations; EUR 29261 EN; doi 10.2760/344197, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25
- [27] Provedbena odluka komisije (EU) 2018/1147 o utvrđivanju zaključaka o najboljim raspoloživim tehnikama (NRT-i) za obradu otpada, na temelju Direktive 2010/75/EU, 10.8.2018., Službeni list Europske unije, 17.8.2018.
- [28] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control); EUR 29362 EN; Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018; ISBN 978-92-79-94038-5, doi:10.2760/407967, JRC113018 <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>, *Pristupljeno*: 2025-02-25

- [29] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Medved, J.; Burja, J.: Investigation of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Livarski vestnik*, **71** (2024) 3, 127-140
- [30] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Burja, J.; Šetina Batič, B.; Stanić, D.; Folta, M.: Influence of heat treatment on microstructure of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Abstract / Proceedings book 64th IFC Portoroz 2024*, Križman, A.; Bührig-Polaczek, A.; Medved, J., et al. (ur.), Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, 2024, 1-10
- [31] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Medved, J.; Burja, J.: Investigation of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Conference proceedings 63rd IFC Portoroz 2023*, ur. Križman, A., Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, 2023, 10, 1-9
- [32] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Stanić, D.; Folta, M.: Solidification of remelted AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Book of abstracts 7th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC7)*, ur. Kučerik, J.; Šiler, P.; Rotaru, A., Brno: SITECH, Rumunjska, 2023, 134-134
- [33] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Stanić, D.; Folta, M.: Quality assessment of the AlSi9Cu3(Fe) alloy with regard to recycling ratio, *Congress Proceedings - MME SEE 2023. 5th Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe*, Beograd: Association of Metallurgical Engineers of Serbia (AMES), 2023, 251-256
- [34] Zovko Brodarac, Z.; Stanić, D.; Folta, M.; Kozina, F.: Influence of remelting on mechanical properties of AlSi9Cu3(Fe) alloy, *74th WFC_E-Abstract Book*, Busan: The World Foundry Organization, Korea Foundry Society, 2022, 1-0437, 1-2
- [35] Zovko Brodarac, Z.; Stanić, D.; Folta, M.; Kozina, F.: Recycling potential of AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Conference proceedings 61st IFC Portoroz 2021*, ur. Križman, A.; Mrvar, P.; Medved, J. et al., Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, 2021, 24, 1-8
- [36] Taylor, J. A.: Iron-containing intermetallic phase in Al-Si based casting alloys, *Procedia Materials Science*, **1** (2012) 19-33
- [37] Zolotarevsky, V. S.; Belov, N. A.; Glazoff, M. V.: *Casting Aluminum Alloys*, 1st Edition. Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2007
- [38] Mahfoud, M.; Prasada Rao, A. K.; Emadi, D.: The role of thermal analysis in detecting impurity levels during aluminum recycling, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **100** (2010) 847-851
- [39] Sencakova, L.; Vircikova, E.: Life cycle assessment of primary aluminium production. *Acta Metallurgica Slovaca*, **13** (2007) 3, 412-419
- [40] Kuchariková, L.; Tillová, E.; Bokuvka O.: Recycling and properties of recycled aluminium alloys used in the transportation industry, *Transport Problems*, **11** (2016) 117-122
- [41] Kasínska, J.; Bolibruchová, D.; Marek, M.: The Influence of Remelting on the Properties of AlSi9Cu3 Alloy with Higher Iron Content, *Materials*, **13** (2020) 575, <https://doi.org/10.3390/ma13030575>
- [42] Cagala, M.; Bruška, M.; Lichý, P.; Beno, J.; Špirutová, N.: Influence of aluminium-alloy remelting on the structure and mechanical properties, *Materials and Technology*, **47** (2013) 239-243

- [43] Zovko Brodarac, Z.; Kozina, F.; Stanić, D.; Folta, M.; Medved, J.; Burja, J.: Influence of remelting on AlSi9Cu3(Fe) alloy properties, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025, <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14198-5>, *In press*
- [44] Direktiva (EU) 2024/1785 o izmjeni Direktive 2010/75/EU o industrijskim emisijama (integrirano sprečavanje i kontrola onečišćenja) i Direktive Vijeća 1999/31/EZ o odlagalištima otpada, 24.4.2024., Službeni list Europske unije, 15.7.2024.
- [45] Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry, Third Edition, U.S. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy Washington, D.C.20585-0121, https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/proc_heat_sourcebook.pdf *Pristupljeno: 2025-02-25*
- [46] Lazić, L.; Brovkin, V.; Varga, A.; Kizek, J.: Implementing a New Combustion Technology on the Rotary Hearth Furnace, *Acta Metallurgica Slovaca Conference*, **2** (2011) 1, 118-125
- [47] Lazić, L.; Varga, A.; Kizek, J.; Brovkin, V.: Opportunities for Low Energy Consumption in the Furnaces for Melting of Aluminium Alloys, *Proceeding Book of 12th International Foundrymen Conference: Sustainable Development in Foundry Materials and Technologies*, ur. Dolić, N.; Glavaš, Z.; Zovko Brodarac, Z., Sisak, University of Zagreb Faculty of Metallurgy, 2012, 226-235
- [48] Lazić, L.; Cerinski, D.; Baleta, J.; Lovrenić-Jugović, M.: Impact of Excess Air on Energy Efficiency of Industrial Open-flame Furnaces, *Proceedings 26th International Conference Ecological Truth and Environmental Research – EcoTER'18*, ur. Šerbula, S., Bor: University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, 2018, 462-467
- [49] Lazić, L.; Lovrenić-Jugović, M.; Grubišić, Ž.: Application of high emissivity coating in foundry aluminium melting furnaces, *Proceedings Book 15th International Foundrymen Conference: INNOVATION - The Foundation of Competitive Casting*, ur. Dolić N.; Zovko Brodarac Z., Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2016, 151-159