https://doi.org/10.15255/KUI.2026.030
KUI-43/2026
Pregledni rad
Prispjelo 15. lipnja 2026.
Prihvaćeno 29. srpnja 2026.

Proizvodnja zelenog čelika i zaštita okoliša

M. Gojić,[a] *S. Kožuh*,[b] *S. Šolić*[c] i *V. Tropša*[a]

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

[a] Sveučilište Sjever, Trg Dr. Žarka Dolinara 1, 48 000 Koprivnica
[b] Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44 000 Sisak
[c] Sveučilište obrane i sigurnosti "Dr. Franjo Tuđman", Odjel politehnike, Ilica 256 b, 10 000 Zagreb

Sažetak

Čelik je najznačajniji metalni materijal čija proizvodnja kontinuirano raste tijekom 20. i 21. stoljeća. U razdoblju od 2000. do 2025. godine proizvodnja sirovog čelika u svijetu povećana je 2,2 puta (od 850 Mt do 1,880 Gt). Današnja proizvodnja čelika odvija se pomoću bazičnih kisikovih konvertora (engl. *basic oxygen furnace* – BOF) (70,4 %) i elektrolučnih peći (29,1 %). Proces proizvodnje čelika praćen je visokom potrošnjom metalnih i nemetalnih sirovina, energije, vode itd., što ima znatan utjecaj na okoliš. Proizvodnja željeza i čelika ima značajan utjecaj na emisiju stakleničkih plinova, posebice na emisiju CO_2. Tijekom 2023. godine u svijetu je emitirano 1,92 t CO_2/t sirovog čelika. Ovisno o rabljenom koksu za redukciju rude željeza industriji željeza i čelika može se pripisati od 7 do 9 % ukupne emisije CO_2. U ovom radu prikazani su proizvodnja sirovog čelika u svijetu kao i izazovi povezani s proizvodnjom "zelenog" čelika uključujući smanjivanje emisije stakleničkih plinova. Navedeni su glavni izvori polutanata u industriji željeza i čelika. Također su analizirane moguće opcije za dekarbonizaciju proizvodnje željeza i čelika. Pristupi za proizvodnju "zelenog" čelika odvijaju se u više smjerova. Najprije se nastoji primijeniti što veći stupanj recikliranja čelika uporabom čeličnog otpada kao i veća uporaba proizvoda direktno reduciranog željeza. Prikazani su razvoj i postupno uvođenje novih tehnologija proizvodnje "zelenog" vodika za potrebe redukcije rude željeza u visokoj peći, nove tehnologije proizvodnje direktno reduciranog željeza kao i tehnologije za "hvatanje", skladištenje i iskorištavanje CO_2.

Ključne riječi

Čelik, zaštita okoliša, emisija CO_2, vodik

1. Uvod

Prekomjerna uporaba fosilnih goriva za potrebe industrijalizacije i urbanizacije jedan je od glavnih uzroka emisije stakleničkih plinova, klimatskih promjena i globalnog zagrijavanja. Oko 70 % emisija CO_2 povezano je s proizvodnjom energije, prometom i industrijom, zbog čega raste potreba za održivim i niskougljičnim tehnologijama.[1–16]

Čelik je najvažniji konstrukcijski metalni materijal i čini približno 95 % ukupne svjetske proizvodnje metala.[2–4] Njegova proizvodnja porasla je s 28,3 Mt 1900. godine na približno 1,88 Gt 2025. godine.[5] Međutim, proizvodnja željeza i čelika zahtijeva velike količine sirovina, energije i vode te je odgovorna za približno 7 – 9 % globalnih emisija CO_2. Tijekom 2023. godine prosječna emisija iznosila je 1,92 t CO_2 po toni proizvedenog sirovog čelika.

Povećana svijest o zaštiti okoliša, zajedno s ciljevima definiranim Pariškim sporazumom i Europskim zelenim planom, potaknula je razvoj koncepta "zelenog" čelika.[9] Cilj je smanjiti emisije stakleničkih plinova primjenom održivijih tehnologija i učinkovitijom uporabom resursa. Najvažniji pristupi uključuju povećanje udjela recikliranog čeličnog otpada, veću primjenu elektrolučnih peći,[7] uporabu direktno reduciranog željeza,[4] razvoj tehnologija hvatanja i iskorištavanja CO_2 te djelomičnu zamjenu fosilnih goriva vodikom i biougljenom.[12–16]

Posebna se pozornost posvećuje uporabi vodika kao reducensa u proizvodnji željeza. Iako redukcija željeznih oksida vodikom omogućuje značajno smanjenje emisije CO_2, riječ je o endotermnom procesu koji zahtijeva dodatni unos energije te mijenja toplinsku ravnotežu unutar visoke peći. Zbog toga se vodik trenutačno smatra važnim dopunskim, a ne potpunim zamjenskim reducensom u postojećim proizvodnim sustavima.

U ovom radu prikazani su trendovi svjetske proizvodnje čelika te suvremene mjere i tehnologije razvoja "zelenog" čelika usmjerene na povećanje stupnja recikliranja, smanjenje potrošnje fosilnih goriva, veću uporabu obnovljivih izvora energije i smanjenje emisija stakleničkih plinova.

2. Današnji postupci proizvodnje čelika

Metalurška industrija, posebice industrija željeza i čelika, su visoko intenzivni ugljični procesi. Čelik se danas proizvodi koksnim i tzv. bezkoksnim metalurškim postupcima. Koksni metalurški postupci su višefazni i uključuju dobivanje koksa iz kamenog ugljena, pripremu rude željeza, proizvodnju bijelog sirovog željeza u visokim pećima te proizvodnju čelika u BOF-u. Za 1 t čelika iz BOF-a treba oko 1400 kg rude željeza, 800 kg ugljena, 120 kg čeličnog otpada i 300 kg vapnenca.[1]

Bezkoksni metalurški postupci za proizvodnju čelika uključuju pretaljivanje čeličnog otpada s dodatkom i bez dodatka direktno reduciranog željeza u elektrolučnim pećima.

* Autor za dopisivanje: prof. dr. sc. Mirko Gojić
E-pošta: mgojic@unin.hr

Za 1 t elektročelika treba oko 1036 kg čeličnog otpada, 28 kg vapnenca, 21 kg nositelja ugljika (ugljen antracit, direktno reducirano željezo), 4 kg prirodnog plina i 3 kg elektroda.[17] Oko 5 % ukupne svjetske proizvodnje čelika dobije se u elektrolučnim pećima dodatkom direktno reduciranog željeza. Taj način proizvodnje čelika posljednjih godina dobiva sve više na značenju zbog nekoliko prednosti: velike fleksibilnosti u proizvodnom asortimanu i energetske učinkovitosti, niže kapitalne investicije i operativnih troškova, zadovoljavajuće produktivnosti itd.

Proizvodnja sirovog željeza u visokoj peći je reduktivan složeni proces uz odvijanje niz reakcija, od kojih su najvažnije indirektna i direktna redukcija. Kad se u visoku peć kroz sapnice uvodi predgrijani zrak, dolazi do intenzivne egzotermne reakcije kisika i ugljika iz krutoga koksa, pri čemu nastaje ugljikov dioksid[17]:

$$O_2 + C_{koks} \rightarrow CO_2. \quad (1)$$

Dobiveni CO_2 zbog izrazito visokih temperatura (oko 2200 °C) postaje nestabilan i reagira s ugljikom iz koksa (tzv. Boudouarova reakcija):

$$CO_2 + C_{koks} \rightarrow 2CO. \quad (2)$$

Nastali CO djeluje kao reducens, odnosno veže kisik iz oksida željeza (Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO), pri čemu se oslobađa željezo: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$. Redukcija s CO naziva se indirektna redukcija rude željeza, a odvija se u gornjem dijelu visoke peći (kod temperatura nižih od 1000 °C):

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2. \quad (3)$$

Direktna redukcija rude željeza odvija se u donjem dijelu visoke peći prema jednadžbi:

$$FeO + C_{koks} \rightarrow Fe + CO. \quad (4)$$

U visokoj peći odvija se i niz sekundarnih kemijskih reakcija pri čemu dolazi do uklanjanja vlage, termičke razgradnje karbonata, nastajanja troske, odsumporavanja itd. Izlučivanje CO_2 iz $CaCO_3$ i $MgCO_3$ odvija se pri temperaturama oko 800 °C. Pri temperaturama 1500 – 1600 °C apsorpcijom spojeva željeza, mangana, silicija, magnezija, aluminija i drugih metala nastaje troska kao sporedni visokopećni proizvod.

Proizvodnja čelika u BOF-u je višefazni postupak. Prva faza je proizvodnja bijelog sirovog željeza iz pripremljenih ruda željeza u visokim pećima, a druga faza je konverzija sirovoga željeza u čelik oksidacijom primjesa tehničkim kisikom. Za razliku od proizvodnje sirovog željeza proizvodnja čelika u BOF-u je oksidativan proces. Osnovne kemijske reakcije u proizvodnji čelika jesu reakcije oksidacije ugljika, silicija, mangana, fosfora, reakcija uklanjanja sumpora (odsumporavanje) te reakcije dezoksidacije (uklanjanje kisika). Oksidacijom ugljika iz sirovog željeza s otopljenim kisikom u talini nastaju CO i CO_2:

$$C + O \rightarrow CO \quad (5)$$

$$CO + 2O \rightarrow CO_2. \quad (6)$$

Proizvodnja čelika u elektrolučnim pećima temelji se primarno na pretaljivanju čeličnog otpada s dodatkom ili bez dodatka proizvoda direktno reduciranog željeza. Osnovna sirovina za proizvodnju čelika u elektrolučnoj peći je čelični otpad, a kao uložak u određenom udjelu (uglavnom za naugljičenje) mogu se rabiti rastaljeno ili kruto sirovo željezo i proizvodi direktne redukcije. Radi uštede potrošnje električne energije, za intenzifikaciju procesa i naknadno izgaranje CO dodaje se i tehnički kisik pri čemu nastaje CO_2, ali u znatno manjim količinama nego kod kisikovih konvertora. Osnovna emisija tijekom izrade čelika u elektrolučnoj peći su elektropećna prašina, isparljivi organski spojevi, CO, CO_2, NO_x, dioksini i furani.

Proizvodnja čelika u svijetu u 21. stoljeću je u stalnom porastu, a od 2000. do 2025. godine povećana je 2,2 puta (tablica 1). Od ukupne svjetske proizvodnje čelika u 2025. godini (1,880 Gt) oko 51,1 % je proizvedeno u Kini, dok je u državama EU-a (27) proizvedeno 125,8 Mt (6,7 % svjetske proizvodnje). Unutar država EU-a oko 28,6 % čelika je proizvedeno u Njemačkoj (35,4 Mt), dok su ostali značajniji proizvođači čelika u EU-u Italija (21 Mt), Španjolska (11,3 Mt) i Francuska (10 Mt).[5] Najveći porast proizvodnje čelika u razdoblju 2000. – 2025. (tablica 2) ostvaren je u Kini (7,5 puta) i Indiji (6,1 put). Iz tablice 3 može se vidjeti osjetno povećanje proizvodnje čelika u državama Azije (Kina, Indija, Japan, J. Koreja) uz znatan pad udjela proizvodnje čelika u državama EU-a s 19,2 % udjela u svjetskoj proizvodnji tijekom 2000. godine na 6,9 % u 2024. godini. Iz toga proizlazi da je najveća odgovornost za smanjenje emisije CO_2 na azijskim državama, posebice na Kini, u kojoj se tijekom 2024. godine 89,9 % čelika proizvelo tzv. koksnom metalurgijom, tj. u BOF-u . Za manju emisiju CO_2 potrebno je proizvoditi sve više elektročelika uz uporabu što više direktno reduciranog željeza (tablica 4), čija je proizvodnja u razdoblju 2000. – 2024. porasla 3,4 puta, s 42,52 Mt na 144,10 Mt (tablica 5). Najveći proizvođači direktno reduciranog željeza u svijetu u 2024. godini su: Indija (54,8 Mt), Iran (34,1 Mt), Rusija (8 Mt), Egipat (7,1 Mt), Saudijska Arabija (6,9 Mt), Meksiko (4,7 Mt) itd. Od država EU-a direktno reducirano željezo proizvode samo Njemačka i Švedska u zanemarivim količinama (0,1 Mt u 2024. godini).

Tablica 1 – Proizvodnja čelika u svijetu u razdoblju od 2000. do 2025. godine, Mt[5]
Table 1 – Steel production from 2000 to 2025, Mt[5]

Godina Year	2000.	2005.	2010.	2015.	2020.	2021.	2022.	2023.	2024.	2025.
Proizvodnja Production	850	1148	1435	1627	1885	1963	1890	1892	1885	1880

Tablica 2 – Deset država najvećih proizvođača čelika u svijetu za 2000. i 2025. godinu, Mt[5]
Table 2 – Ten largest steel-producing countries worldwide in 2000 and 2025, Mt[5]

Redni broj Rank	Država Country	2000.	Redni broj Rank	Država Country	2025.
1.	Kina, China	127,2	1.	Kina, China	960,8
2.	Japan	106,4	2.	Indija, India	164,8
3.	SAD, USA	101,1	3.	SAD, USA	81,9
4.	Rusija, Russia	59,1	4.	Japan	80,6
5.	Njemačka, Germany	46,3	5.	Rusija, Russia	67,9
6.	Južna Koreja, South Korea	43,1	6.	Južna Koreja, South Korea	62,26
7.	Ukrajina, Ukraine	31,4	7.	Turska, Türkiye	38,1
8.	Brazil	27,9	8.	Njemačka, Germany	35,4
9.	Indija, India	26,9	9.	Brazil	33,4
10.	Italija, Italy	26,7	10.	Iran	31,9

Tablica 3 – Udio proizvodnje sirovog čelika po državama i/ili geografskim područjima, %[5]
Table 3 – Share of crude steel production by country and/or geographical region, %[5]

Država i/ili regija Country and/or region	2000.	2014.	2024.
Kina China	15,1	49,1	53,3
EU	19,2	9,4	6,9
Japan	12,5	6,6	4,5
Sjeverna Amerika North America	15,9	7,2	5,6
Ostali u Aziji Others in Asia	11,5	7,4	7,9
Rusija+CIS+Ukrajina Russia+CIS+Ukraine	11,5	6,3	4,6
Indija India	3,1	5,2	7,9
Ostali u Europi Others in Europe	5,5	3,0	2,4
Ostali Others	5,7	5,8	6,9

CIS države: Rusija, Bjelorusija, Kazahstan, Kirgistan, Tadžikistan, Armenija, Azerbajdžan, Moldavija, Turkmenistan i Uzbekistan
CIS countries: Russia, Belarus, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Armenia, Azerbaijan, Moldova, Turkmenistan, and Uzbekistan

Tablica 4 – Prosječni udio emisije CO_2 po pojedinim postupcima proizvodnje čelika, t CO_2/t sirovog čelika[5]
Table 4 – Average share of CO_2 emissions by steel production process, t CO_2/t crude steel[5]

Postupak Process	BF-BOF	DRI-EAF	ČO-EAF Scrap-EAF
Emisija CO_2 CO_2 emission	2,32	1,43	0,70

BF-BOP: Visoka peć-bazični kisikov konvertor/Blast furnace – basic oxygen converter
DRI-EAF: Direktno reducirano željezo-elektrolučna peć/Direct reduced iron-electric arc furnace
Scrap-EAF: Čelični otpad-elektrolučna peć/Scrap-electric arc furnace

Tablica 5 – Proizvodnja direktno reduciranog željeza za razdoblje od 2000. do 2024. godine, Mt[5]
Table 5 – Production of direct reduced iron in the period from 2000 to 2024, Mt[5]

Proizvodnja/ godina Production/ year	2000.	2005.	2010.	2015.	2020.	2024.
Svijet, World	42,52	56,68	72,02	75,98	106,20	144,10
EU	0,58	0,55	0,57	0,65	0,50	0,10

3. Zagađenje okoliša pri proizvodnji čelika

Proizvodnja čelika značajno opterećuje okoliš emisijama stakleničkih plinova (ponajprije CO_2), dušikovih oksida, NO_x, hlapljivih organskih spojeva, lebdećih čestica, dioksina, furana te drugih štetnih tvari.[18] Nečistoće iz sirovina te upotrijebljena energija na bazi ugljika pri proizvodnji željeza i čelika doprinose nastajanju navedenih spojeva. Ti polutanti značajno utječu na ljudsko zdravlje, klimatske promjene, kvalitetu ekosustava te sirovinske i energetske resurse. Navedeni polutanti nastaju i kod niza faza procesa proizvodnje čelika, kao što su punjenje agregata za proizvodnju čelika (ulaganje sirovina), taljenje, oksidacija ugljika i primjesa, izlijevanje troske i lijevanje čelika. S ekološkog stajališta zagađivači pri proizvodnji čelika mogu se podijeliti u tri kategorije: zagađivači vode, tla i zraka.[19]

3.1. Zagađenje vode

Zagađenje vode počinje već od koksiranja ugljena pa sve do plastične prerade kontinuirano lijevanih čeličnih poluproizvoda. Primarno se to odnosi na nastajanje mulja i otpadnih voda bogatih različitim zagađivačima (policiklični aromatski ugljikovodici, cijanidi, amonijak, nepotrošene kiseline i benzeni), kao i na procese valjanja čeličnih poluproizvoda te dekapiranja, odnosno kemijske pripreme površine čeličnih poluproizvoda.

Ti kontaminatori sadrže i teške metale poput Ni, Pb, Cr, As, Cd itd. Pri proizvodnji čelika emitiraju se tvari kao što su pepeo, prašina i ugljični materijali koji sadrže policikličke aromatske ugljikovodike koji nastaju pri nepotpunom izgaranju ili pirolizi organskih materijala, posebice kod proizvodnje čelika u elektrolučnim pećima gdje se pretaljuje nepredgrijani čelični otpad. Cijanidi nastaju primarno kod koksiranja ugljena i pri proizvodnji sirovog željeza u visokoj peći kao posljedica kompleksnih kemijskih reakcija uslijed interakcije ugljika, vodika, dušika i alkalnih metala kod visokih temperatura u temperaturnom području 2000 – 2300 °C. Amonijak se može emitirati u različitim fazama proizvodnje čelika, primjerice pri pretaljivanju čeličnog otpada s povišenim sadržajem dušika, pri čemu je uvođenje plinovitog NH_3 u talinu učinkovitije za apsorpciju dušika nego primjena plinovitog dušika, kao i u procesima površinske obrade čelika, poput nitriranja.

3.2. Zagađenje tla

Primarni izvori zagađenja tla pri proizvodnji čelika potječu od uporabe fosilnih goriva kao što su ugljen i koks te od teških metala i emisije dioksina i furana. Teški metali poput As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn mogu kontaminirati tlo. Emisija dioksina i furana posebice je prisutna kod proizvodnje čelika u elektrolučnim pećima. Jasno da ti polutanti imaju negativan utjecaj na zdravlje ljudi, klimatske promjene, kvalitetu ekosustava itd. Metalurški otpad iz industrije čelika, kao što su troska, prašina, mulj zahtijevaju ozbiljan tretman jer u sebi imaju niz kemijskih komponenti.[20] Taj otpad sadrži polutante kao što su olovo, dioksini i različite tvari poput Al_2O_3, kloridi, vapno (CaO), sumpor, SiO_2, što može dovesti do zagađenja okoliša. Oslobađanje toksičnih komponenti iz čeličanske troske tijekom njezine oporabe može biti štetno za okoliš i ljudsko zdravlje. Čeličanska troska je općenito polutant koji je teško skladištiti i deponirati. Deponiranje nusproizvoda iz proizvodnje čelika na otvorenome predstavlja ekološku opasnost. Osim toga visoka koncentracija troske u tlu ima negativan utjecaj na bakterije u tlu i može dovesti do smanjenog rasta biljaka. Vapno može dovesti do kontaminacije tla odlaganjem neobrađene vapnom bogate troske. To može negativno utjecati i na podzemne vode. Oslobađanje fluoritnog praha (CaF_2) u tlo povećava pH vrijednost tla i otapa organske tvari, što može biti štetno za mikroorganizme i korijenski sustav biljaka.

3.3. Zagađenje zraka

Zagađenje zraka uslijed proizvodnje čelika uključuje emisije lebdećih krutih čestica (promjer čestica od 2,5 do 10 μm), CO_2, CO, SO_2, SO_x, NO_x itd. Doprinos zagađenju daje i koksiranje ugljena, pri čemu se oslobađaju štetne tvari kao što su aromatski ugljikovodici, isparljivi organski spojevi, benzeni i dioksini. Koksiranje je visokotemperaturno isplinjavanje (suha destilacija) kamenog ugljena pri temperaturi 950 – 1200 °C. Pritom isparuje vlaga, izlazi zrak iz kojeg kisik reagira s ugljikom i dušikom, pa nastaju CO_2 i NH_3. Sumpor se izdvaja u obliku SO_2 i SO_x, a izdvajaju se i plinoviti ugljikovodici koji se raspadaju na metan, etilen i benzen. Nastaju i pare teških alifatskih ugljikovodika koji pri višim temperaturama prelaze u aromatske. Za vrijeme priprema ili oplemenjivanja ruda željeza prženjem, sinteriranjem i peletizacijom također se oslobađa CO_2.[21] Proces sinteriranja kao vrlo važan proces pripreme rude potroši oko 9 – 12 % ukupne energije u proizvodnji željeza i čelika, što ukupno doprinosi oko 12 % ukupnoj emisiji stakleničkih plinova u proizvodnji željeza i čelika. Za proizvodnju "zelenog" čelika nužno je rabiti sirovine koje će dati najmanju količinu polutanata u okoliš.[21] Izlaganje Fe-prašini, SiO_2 i drugim česticama može dovesti do respiratornih smetnji, smanjene funkcije pluća te akutnih i kroničnih problema zaposlenika. Dodatno, tijekom proizvodnje čelika u elektrolučnim pećima nastaju dioksini i furani koji su visokotoksični spojevi.

4. Tehnologije za proizvodnju "zelenog" čelika

Proizvodnja "zelenog" čelika uključuje uporabu tehnologija s ciljem smanjenja zagađenja okoliša u usporedbi s tradicionalnim načinom proizvodnje čelika.[22] Jedna od takvih tehnologija su postupci direktne redukcije koji uključuju primjenu prirodnog plina ili vodika za redukciju rude željeza, što je energetski i ekološki prihvatljivije. Drugi pristup je primjena elektrolučnih peći u kojima se upotrebljava električna energija za pretaljivanje čeličnog otpada uz što veći udio produkata direktne redukcije. Primjena takvih tehnologija štedi mnogo energije i smanjuje emisiju stakleničkih plinova (posebice CO_2). Uporaba alternativnih i obnovljivih izvora energije potiče održivost proizvodnje čelika i poboljšava kvalitetu dobivenog čelika. Primarni cilj je uporaba čišćih energetskih izvora, što doprinosi manjoj ovisnosti o fosilnim gorivima. Osim toga, nastoje se razviti napredne tehnologije za "hvatanje" i skladištenje CO_2 da bi se što manje ispuštao u atmosferu.[11,23] "Zelena" tehnologija proizvodnje čelika pruža brojne prednosti: smanjenje emisija na bazi ugljika, uštedu resursa, otvara nove gospodarske mogućnosti i povećava "sutra" konkurentnost.[24] Unatoč svojem potencijalu "zelena" tehnologija proizvodnje čelika ima nekoliko izazova i ograničenja: visoku početnu investiciju, tehnološke barijere, opseg industrijske proizvodnje i integracija s postojećim proizvodnim tehnologijama izrade čelika.

4.1. Proizvodnja čelika postupcima na bazi vodika

Ti postupci uključuju uvođenje vodika u proizvodnju sirovoga željeza, direktno reduciranog željeza i čelika da se smanji emisija plinova na bazi ugljika. To je primarno jer se značajno smanjuje doprinos globalnoj emisiji CO_2. Kod konvencionalne proizvodnje sirovog željeza u visokoj peći

reakcije redukcije rude željeza navedene u jedn. (1) – (4) pokazuju da ugljik reagira s kisikom te nastaje metalno željezo te plinoviti CO i CO_2. Primjenom vodika kao reducensa umjesto ugljika iz koksa u visokoj peći nastaje vodena para:

$$Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O \quad (7)$$

$$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O. \quad (8)$$

Zamjenom prirodnog plina pri proizvodnji direktno reduciranog željeza s vodikom bitno će se smanjiti negativan utjecaj na okoliš. Na taj način se dobiva kruto, tzv. "spužvasto željezo". Proces se odvija pri 750 – 900 °C. Vodik reagira kao plin reducens s Fe-rudom i konvertira je u metalno željezo. Tad se direktno reducirano željezo upotrebljava u elektrolučnoj peći za dobivanje čelika. To znači da se s vodikom najprije dobije direktno reducirano željezo koje se ulaže u elektrolučnu peć i u konačnici se dobiva čelik.

Plinoviti vodik može se dobiti na više načina, primarno iz prirodnog plina. Danas se globalno godišnje dobiva oko 75 % vodika iz prirodnog plina. Oko 6 % svjetskog prirodnog plina se potroši za proizvodnju vodika. Drugi postupak dobivanja tzv. "zelenog" vodika je pomoću elektrolize vode. Trenutačno se manje od 0,1 % "zelenog" vodika u svijetu dobiva elektrolizom vode primjenom obnovljivih izvora energije.

Dobivanje direktno reduciranog željeza vodikom rezultira s više od 60 % manje emisije CO_2 u usporedbi s tradicionalnom koksnom metalurgijom. Istraživačka studija pokazala je da se pristupom uporabe "zelenog" vodika za dobivanje direktno reduciranog željeza može smanjiti do 90 % emisije stakleničkih plinova.[25] Učinkovitost tog procesa ovisi o nekoliko čimbenika: čistoći rude željeza, procesnim parametarima i uvođenju "zelenog" vodika u proces redukcije. Optimizirajući parametre, kao što su temperatura i tlak, može se povećati stupanj metalizacije. Unatoč postojanju potencijala za značajno smanjenje emisija u proizvodnji čelika, postoje brojni izazovi na industrijskoj i tehnološkoj razini te u osiguravanju dostupnosti velikih količina "zelenog" vodika. Snažna politička potpora na razini država kao i očekivani tehnološki napreci trebali bi postupno pripomoći prijelazu na procese na bazi vodika, da bi se u potpunosti realizirale prednosti redukcije rude željeza s vodikom.

Unatoč znatnom porastu proizvodnje direktno reduciranog željeza od 2000. godine na današnju globalnu proizvodnju od 144,1 Mt u 2024. godini (tablica 5) direktno reducirano željezo predstavlja sirovinu samo za oko 7,6 % današnje globalne proizvodnje čelika. Nužan je brži rast proizvodnje i primjene proizvoda direktno reduciranog željeza kao sirovine za proizvodnju čelika. No još su prisutni brojni tehnološki izazovi u primjeni vodika za proizvodnju čelika, kao što su gubitak topline zbog endotermne reakcije redukcije rude željeza vodikom, osiguravanje dovoljnih količina vodika niže cijene, potreba za visokokvalitetnom Fe-rudom (65 % Fe) itd.

4.2. Tehnologija "hvatanja" i skladištenja CO_2

Tehnologija "hvatanja" i skladištenja CO_2 (tzv. CCS-tehnologija, engl. *Carbon capure and storage*) primjenjuje se za smanjenje negativnog utjecaja emitiranog CO_2 u atmosferu. Kod CCS tehnologije CO_2 se "hvata" iz čeličana velikih kapaciteta te transportira i skladišti. CCS tehnologija može značajno pripomoći ublažavanju klimatskih promjena. Istraživan je koncept utjecaja primjene biomase kao goriva te primjena CCS tehnologije na 30 najvećih europskih čeličana.[23] Utvrđeno je da se primjenom CCS tehnologije značajno smanjuje emisija CO_2 (do 20 %). Međutim to dovodi u stvarnosti i do velikih dodatnih troškova što znatno povećava cijenu čelika. CCS tehnologija je još u početnoj fazi razvoja i povećava zabrinutost zbog mogućeg ekološki štetnog utjecaja injektiranja velikih količina CO_2 u podzemne šupljine i/ili oceane.

CCS tehnologijom, pored skladištenja CO_2, ugljik se može oporabiti za proizvode u drugim industrijama, npr. za proizvodnju plastike, betona ili biogoriva (tzv. CCUS tehnologija, engl. *Carbon capture utilisation and storage*). CCUS tehnologija ("hvatanje", skladištenje i iskorištavanje CO_2 u drugim industrijama) dugoročno, iako je danas skupa i treba razvoj infrastrukture za širu primjenu, pruža prihvatljivo rješenje na odgovarajućim mjestima i tehnologija je koja obećava. Geološke lokacije koje se mogu koristiti za skladištenje CO_2 mogu biti podzemni duboki slani vodonosnici ili već iskorištene naftne i plinske bušotine koje moraju biti locirane najmanje 1 km pod zemljom.[25] CO_2 se može transportirati i skladištiti injektiranjem pod tlakom u duboka oceanska dna (1 – 3 km) primjenom sprovodnih cijevi, brodova i morskih platformi. S obzirom na to da oceani zauzimaju oko 70 % površine Zemlje, značajan su potencijal za skladištenje CO_2 iz urbanih sredina. Međutim porast koncentracije CO_2 može zakiseliti morsku vodu i narušiti "morski život". Osim toga, učinkovito skladištenje CO_2 zahtijeva specifične geološke uvjete, što je npr. rijetko u državama poput Kine. Unatoč brojnim protivljenjima zbog visoke cijene i još nepotpuno dokazane, u širem industrijskom opsegu učinkovitosti, CCS tehnologija čini se da je obećavajuća. No čak i najoptimističnije prognoze za brže širenje primjene čiste energije pokazuju da fosilna goriva neće tako brzo (barem narednih nekoliko desetljeća) iščeznuti ili nestati. Niz je razloga za to, no najvažniji je da države koje imaju naftu i ugljen neće tako lako pristati na brži prijelaz na "zelenu" agendu jer je previše uloženih sredstava u infrastrukturu i opremu za eksploataciju i potrošnju fosilnih goriva. S druge strane, EU, koja je svjetski najveći zagovornik "zelene" agende, danas je realno manje važan globalni čimbenik u proizvodnji čelika (6,9 % svjetske proizvodnje čelika u 2024. godini, tablica 3), jer odlučujuću ulogu i najveću odgovornost imaju najveći proizvođači čelika: Kina, Indija, SAD, itd. (tablica 2).

Karbonizacija troske (dodavanje CO_2 trosci) može pomoći "hvatanju" CO_2 iz zraka, što predstavlja doprinos smanjenju stakleničkih plinova. Dodatno, karbonizacija troske može poboljšati mehanička i fizikalna svojstva produkata iz troske namijenjene za cestogradnju tako da povećava tlačnu čvrstoću i smanjuje propusnost vode. Nadalje, pro-

ces karbonizacije troske može olakšati oporabu čeličanske troske kao korisnog materijala za različite industrije uključujući industriju cementa i betona.

4.3. Dobivanje "zelenog" čelika na osnovi vodikove plazme

U austrijskoj čeličani Voestalpine u Donawitzu testira se dizajn i razvoj tehnologije proizvodnje sirovog čelika bez CO_2 emisije na osnovi vodikove plazme.[18] Jednu elektrodu (anoda) čini rastaljena kupka, a druga elektroda (katoda) je šuplji grafit. Vodikova plazma stabilizirana argonom izgara između elektroda i oksidira ulazni material (Fe-ruda), a nastali plinovi kontinuirano pune katodu. Taj proces je održiv jer dopušta proizvodnju sirovog čelika bez emisije CO_2. Proces se odvija u jednom koraku, a vodikova plazma se upotrebljava za odvajanje željeza od pratećeg kisika u rudi željeza (reakcija redukcije), a onda u sljedećoj fazi slijedi pretaljivanje. To je tzv. redukcijsko taljenje vodikovom plazmom. U tom procesu vodik se s jedne strane upotrebljava za redukciju rude željeza, dok se njegova energija iz plazma faze iskorištava za taljenje metalnog željeza u specijalno dizajniranoj elektrolučnoj peći na istosmjernu struju. Prednost primjene vodika kao reducensa je što nastaje samo vodena para kao nusprodukt reakcije redukcije, te se stoga uobičajena emisija CO_2 kod proizvodnje sirovog željeza može potpuno izbjeći.

Za razliku od proizvodnje čelika u klasičnoj elektrolučnoj peći tim se postupkom provode redukcija i taljenje jedno za drugim, tj. uzastopno, te se tako mogu rabiti nisko- i srednjekvalitetne rude željeza, koje čine 85 % svjetskih rezervi rude. Iskorištenje takvih rezervi na industrijskoj razini smanjit će ekonomske troškove usporedno uz dobivanje čelika bez CO_2 otiska, što čini glavnu prednost i opravdanje investicija u razvoj novih tehnologija.

4.4. Elektroliza rastaljenih oksida

Tzv. "Boston metal postupak" nudi izradu čelika pomoću elektrokemijskog procesa koji se može nazvati elektrolizom rastaljenog oksida.[22] Kod tog postupka ruda željeza se zagrije na 1600 °C primjenom električne energije u rastaljenoj otopini elektrolita i razlaže se na željezo i kisik. Taj je postupak operativan kod visokih temperatura, obično iznad 1600 °C, gdje rastaljeni oksid djeluje kao elektrolit i izvor iona metala. Na dnu reaktora taloži se željezo, a kao sporedni proizvod nastaje samo kisik. U postupku se upotrebljava električna energija za olakšanje redukcije rude željeza te učinkovito odvaja željezo od kisika bez potrebe za reducensom na bazi ugljika što se primjenjuje kod tradicionalnih postupaka proizvodnje čelika. U veljači 2025. godine tim je postupkom proizvedeno oko 1 t čelika.[26] Postupak je još u razvojnoj fazi s prednostima i nedostacima. Prednosti su da nema emisije CO_2 i može se upotrebljavati energija iz alternativnih izvora, dok su nedostaci rad na nižoj temperaturi, visoka početna investicija i operativna složenost postupka.

5. Izazovi kod proizvodnje "zelenog" čelika

Ukupno gledano, za "zelenu" proizvodnju čelika postoje brojne barijere koje uključuju povećane proizvodne troškove, još veću potrebu za energijom, tehnološke i infrastrukturne izazove itd.[28,29] Budući da proizvodnja "zelenog" čelika zahtijeva naprednu tehnologiju i opremu, visoke troškove, veću primjenu inovacija, više istraživačko-razvojnih projekata i energije, zelena agenda nije realno izvediva za brojne države u razvoju ili za oko 30 % država u svijetu koje ionako imaju financijskih poteškoća. Stoga te države imaju nižu motivaciju za tu ideju i one će vjerojatno, bar u skorije vrijeme, nastaviti proizvoditi čelik tradicionalnim postupcima.

Prelazak na "zelenu" proizvodnju čelika bitno povećava cijenu izrade čelika, ali odgađanje tog pristupa u budućnosti će biti još skuplje. Implementiranje novih ili suvremenijih proizvodnih tehnologija i infrastrukturni troškovi vezani s proizvodnjom i transportom novih energetskih izvora (npr. "zelenog" vodika) zahtijevaju znatne investicije. Činjenica je da prijelaz na procese direktne redukcije s vodikom zahtijeva znatne investicije u infrastrukturu i tehnologiju, što se ne može adekvatno financijski brzo vratiti kroz dobit zbog visokih operativnih troškova i potrebe za većom ulaznom energijom. Oslonac na obnovljive izvore energije za proizvodnju "zelenog" vodika mogao bi negativno utjecati na stabilnost cijene energije ili njezinu dostupnost, posebice u područjima gdje je manja održivost energetskih izvora. Politike država trebaju poduprijeti kompanije za prelazak na zelenu agendu. To je važno jer će "zeleni" čelik, uz doprinos očuvanja okoliša, postati profitabilan tek nakon duljeg razdoblja.

Unatoč ekološkim prednostima još su brojni izazovi za postizanje značajnog tržišnog udjela "zelenog" čelika. Najprije, prijelaz s primarne proizvodnje čelika u BOFu na "zeleniju" tehnologiju, kao što je izrada čelika u elektrolučnim pećima i na procese redukcije vodikom, spor je ili se uopće ne odvija, posebno kod novih velikih svjetskih proizvođača čelika koji nevoljko smanjuju ili napuštaju proizvodnju čelika u BOF-u.

Tehnološki izazovi u proizvodnji "zelenog" čelika su višeslojni. Gledano s tehnološke strane, činjenica je da je koks jedino gorivo koje pri proizvodnji sirovog željeza u visokoj peći ispunjava četiri osnovne funkcije: osiguravanje dovoljne količine topline, redukciju rude željeza, nauglji-čavanje sirovog željeza i osiguravanje propusnosti plinova kroz visoku peć. S druge strane, vodik dijelom osigurava toplinu i redukciju rude željeza, dok ne može naugljičiti sirovo željezo i ne osigurava propusnost plinova kroz visoku peć. Također treba napomenuti da bi to moglo dovesti i do većih koncentracija otopljenog vodika u čeliku, koji je inače nepoželjan, jer povišeni sadržaj vodika može uzrokovati različite oblike korozijskih oštećenja čeličnih proizvoda tijekom uporabe, kao što je npr. vodikova krhkost.

Usvajanje tehnologija za proizvodnju "zelenog" čelika je neophodno ali je nužno riješiti dobivanje "zelene" električne energije u industrijskom mjerilu s prihvatljivom cijenom. Nadalje, unatoč njihovu potencijalu postupci

direktne redukcije zasnovani na vodiku su osjetljivi i na operativne parametre kao što je tlak plina, što može negativno utjecati na učinkovitost vodika.

Današnja CO_2 koncentracija u atmosferi (420 ppm) je oko 50 % veća nego u predindustrijsko doba (280 ppm), dok je u 1990. godini iznosila 350 ppm.[27] Ako se želi ograničiti globalno zatopljenje za 1,5 i 2 °C, mora se što skorije ići na nultu emisiju ugljika. No nužno je realno suočavanje s nastalim izazovima te reinvestiranje u gotovo svim sektorima našeg modernog života.

Razina troškova zamjene ugljena, odnosno koksa, vodikom povećava cijenu čelika oko 1/3, ali se očekuje da će se u nadolazeće vrijeme današnja visoka cijena dobivanja "zelenog" vodika smanjiti kad bude implementirana industrijska proizvodnja vodika u velikim količinama. Proizvodna potreba za vodikom za punu dekarbonizaciju čeličanske industrije zahtijeva porast proizvodnje električne energije oko 20 %.

Za dekarbonizaciju proizvodnje sirovog željeza potrebna je zamjena reducensa (ugljik iz koksa/ugljikov monoksid) s drugim plinom (prirodni plin ili vodik) koji bi trebao dovesti do niže ili nulte emisije CO_2. Uporabom prirodnog plina kojeg inače ima dovoljno, ali mu je cijena vrlo promjenjiva, ovisno od regije do regije u svijetu, iako primarno sadrži metan (CH_4) koji je spoj ugljika i vodika, djelomično bi se dekarbonizirao proces dobivanja sirovoga željeza, tj. smanjila bi se emisija CO_2 jer bi u tom slučaju nastajala i vodena para. Zbog toga bi primjena vodika u velikim količinama mogla omogućiti potpuno dekarbonizaciju procesa proizvodnje sirovog željeza. Međutim dekarbonizacija postupaka proizvodnje vodikom ima niz izazova: nedovoljnu količinu vodika, visoku cijenu itd. Većina današnjih postupaka dobivanja tzv. "sivog" vodika (koji se upotrebljava za proizvodnju amonijaka ili u preradi nafte) je postupcima koji u kojima se upotrebljava prirodni plin, a time se također emitira CO_2 kao sporedni proizvod. Tzv. "zeleni" vodik potreban je za proizvodnju željeza i čelika, koji se može dobiti razlaganjem vode na vodik i kisik elektrolizom pomoću električne energije.[30,31] Za 1 t čelika potrebno je oko 50 kg H_2, a za 1 kg H_2 potrebno je 50 – 55 kWh električne energije, što bi automatski značilo i veću potrebu za proizvodnjom električne energije oko 20 % za današnju razinu proizvodnje čelika u Njemačkoj. To bi znatno povećalo cijenu čelika, možda čak 20 – 30 %.[26]

Tri su glavna pokretača za pripomoć prelasku s ugljena na "zeleni" vodik u industriji čelika: povećanje cijene proizvođačima čelika za emisije CO_2, velika industrijska proizvodnja vodika (što će sniziti cijenu opreme za elektrolizu) te daljnje smanjenje cijene obnovljivih izvora energije. Na primjer, procjenjuje se da bi povećanje cijene emisije CO_2 iznad 60 eura po t CO_2 učinilo vodik najekonomičnijom opcijom.[27]

Danas se "zeleni" vodik elektrolizom proizvodi u relativno malim postrojenjima kapaciteta oko 2 MW. Ako bi se ta proizvodnja odvijala na opremi većeg kapaciteta (npr. do 90 MW), to bi dovelo do većih količina vodika, doprinijelo bi nižoj cijeni investicije (oprema za elektrolizu) te bi smanjilo cijenu vodika 60 – 80 %. Cijena električne energije dobivena iz vjetroelektrana mogla bi biti niža 50 % u 2030. godini u usporedbi s 2017. godinom.[27] Kombinirani utjecaj cijene investicije i smanjenje cijene električne energije trebao bi smanjiti cijenu proizvodnje vodika 60 % do 2030. godine.

Cjelokupni pravodobni i koordinirani prijelaz s ugljena, odnosno koksa, na vodik u industriji proizvodnje čelika zahtijevat će i koordinirano političko djelovanje vlada država najvećih proizvođača čelika i veću međusobnu međunarodnu suradnju, povećanje cijene goriva koja su nositelji ugljika i istodobno smanjenje cijene "zelenog" vodika. Današnja proizvodnja i potrošnja "zelenog" vodika je premala i preskupa. Postrojenja se mogu instalirati koristeći prirodni plin ili mješavinu prirodnog plina i vodika dok se ne ostvare uvjeti za povećanje dovoljnih kapaciteta za proizvodnju "zelenog" vodika. Očekuje se da će se i cijene drugih obnovljivih izvora energije (vjetar, solar) nastaviti smanjivati u naredna dva desetljeća.

Prelazak industrije čelika s ugljena, odnosno koksa, na vodik nije samo tehnološki već i financijski izazov, što bi moglo utjecati na put izrade čelika na regionalnoj i globalnoj razini.[28–30] Povijesno gledano, svojedobno lak pristup ugljenu bio je važan kriterij za određivanje lokacije čeličanskih postrojenja. Čeličane su često građene blizu domaćih nalazišta ugljena. U Europi priobalna područja često imaju povoljnije uvjete za generiranje energije iz vjetroelektrana, dok južna područja imaju povoljnije uvjete za dobivanje solarne energije. U Švedskoj i Norveškoj jeftini hidropotencijali pogoduju proizvodnji vodika. Druga opcija je proizvodnja vodika iz solarne energije u južnoj Europi ili Sj. Africi, a otpremati je industrijskim potrošačima u centralnu i zapadnu Europu. Za dekarbonizaciju europske industrije čelika u konačnici je nužno partnerstvo s državama gdje su povoljniji uvjeti za dobivanje energije iz obnovljivih izvora.

Kao novi oblik goriva, vodik će također dovesti do promjena u načinu ili putu transporta između proizvođača i potrošača. Vodik će trebati proizvoditi u velikim količinama izravno u blizini velikih potrošača kao što su čeličane pod uvjetom da je moguća i dovoljno snažna električna umreženost i spojivost. Vodik se također može proizvoditi na lokacijama s dostupnim velikim količinama relativno jeftine električne energije i zatim transportirati cjevovodima od velikih proizvođača do velikih potrošača, a u manjoj mjeri i cestovnim ili željezničkim prijevozom. Također se može injektirati u postojeću mrežu plinovoda za prirodni plin kod umjerene koncentracije do 12 %. Ta je opcija posebno zanimljiva za područja gdje će proizvodnja vodika premašivati potrebe. Vodik se, kao i druga goriva i kemijski plinovi, mora tretirati s dužnom pažnjom. Za uvođenje nužnih velikih količina vodika u industrije kao što je industrija čelika potrebni su i novi sigurnosni protokoli.

Osim primjene vodika za dekarbonizaciju postupaka proizvodnje čelika alternativni pristupi su: kombinacija tradicionalnih čeličana koje emitiraju CO_2 s tehnologijom "hvatanja" ugljika i naknadno njegovo iskorištenje ili skladištenje (CCS tehnologija) te postupak direktne elektrolize rude željeza za koji je još prerano.[11] Zbog brojnih tehničkih poteškoća koje treba riješiti kod direktne elektrolize rude željeza procjenjuje se da bi kod tog postupka moglo trebati oko 40 puta više električne energije po toni čelika.[26]

6. Zaključak

Čelik je i nadalje će ostati najvažniji metalni materijal. Njegova je proizvodnja u posljednjih 25 godina znatno porasla (2,2 puta) i taj će se trend i nadalje nastaviti. "Zeleni" čelik kao inovativno rješenje u industriji čelika razvija se s ciljem smanjenja emisije stakleničkih plinova i što manjeg negativnog utjecaja na okoliš. Pored usavršavanja postojećih postupaka s ciljem smanjivanja emisije stakleničkih plinova može se očekivati razvoj i uvođenje novih tehnologija u industrijskom obimu koje će moći osigurati "zeleni" vodik u dovoljnim količinama po prihvatljivijoj cijeni, ali i razvoj novih tehnologija za "hvatanje", skladištenje i iskorištavanje CO_2. Unatoč prednostima i nedostacima "zeleni" čelik je neizbježan dio budućnosti, a izbjegavanje ili odgađanje njegova usvajanja dovest će samo do daljnjeg narušavanja okoliša. Prelazak na postupke proizvodnje "zelenog" čelika vjerojatno će biti postupan jer još uvijek postoje brojne barijere (financijske, tehnološke, infrastrukturne, lobističke za fosilna goriva itd.). Ne samo metalurgija željeza i čelika nego sve ostale industrije trebaju upotrebljavati što više alternativnih izvora energije. Taj je pristup danas strategija mnogih razvijenih država, a troškovi koji se sad ulažu u "zeleni" čelik su beznačajni u usporedbi s troškovima koji će nastati u budućnosti za obnavljanje uništenog ili oštećenog okoliša. Države u razvoju će se susretati s izazovima u usvajanju "zelenog čelika" zbog financijskih ograničenja i primjene nenaprednih tehnologija. Pomak prema "zelenom" čeliku je i potpora održivom razvoju. Današnja proizvodnja "zelenog" vodika je zanemariva jer nema usvojenih tehnologija za masovniju industrijsku proizvodnju, no postoje i druge brojne barijere kao što je velika potrošnja električne energije za proizvodnju "zelenog" vodika, teškoće sa skladištenjem i transportom vodika, vodik može izazvati tzv. vodikovu krhkost u sprovodnim cijevima itd. Zamjena ugljena s vodikom čini se ipak izglednom opcijom za dekarbonizaciju proizvodnje čelika. Dok će početna cijena čelika rasti, očekuje se da će se cijena proizvodnje "zelenog" vodika znatno smanjivati što se skorije vodik počne masovno proizvoditi. Za osiguranje korisnog doprinosa u smjeru postizanja nulte-emisije do 2050. godine u državama članicama EU-a iskustva koja će trebati steći iz prvih većih industrijskih pilot-projekata bit će od velike koristi. Ti pilot-projekti će pružiti optimizaciju efikasnosti i sigurnosti te tehnologije krajem ovog i početkom narednog desetljeća. S toga stajališta cijena "zelenog" vodika će se vjerojatno smanjivati toliko da će proizvodnja čelika na bazi vodika biti "sutra" i ekonomski prihvatljiva.

Literatura
References

1. *T. R. Sarker, D. Z. Ethen, S. Nanda*, Decarbonization of Metallurgy and Steelmaking Industries Using Biochar: A Review, Chem. Eng. Technol. **47** (12) (2024) 1–12, doi: https://doi.org/10.1002/ceat.202400217.
2. *M. Gojić, J. Črnko, S. Kožuh*, Proizvodnja *čelika* u dvadesetom stoljeću, Kem. Ind. **51** (7-8) (2002) 317–328, doi: https://doi.org/10.15255/KUI.2001.050.
3. *M. Gojić*, Razvoj metalurgije i proizvodnje *čelika* u Republici Hrvatskoj, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sveučilište Sjever Koprivnica, Zagreb-Sisak-Koprivnica, 2024., str. 149–249.
4. *M. Gojić, I. Ivanić, D. Knežević*, Svjetska proizvodnja *čelika* u razdoblju od 2000. do 2020. godine, Kem. Ind. **71** (7-8) (2022) 497–506, doi: https://doi.org/10.15255/KUI.2022.009.
5. URL: https:/worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024 (1. 3. 2026.)
6. *D. J. Horst, P. P. A. Júnior*, Sustainability of the Steel Industry: A Systematic Review, Bioint. Res. Appl. Chem. **13** (6) (2023) 1–16, doi: https://doi.org/10.33263/BRIAC136.525.
7. *V. Vidyashree, A. M. Sheriff*, Environmental Impact of Steel Production and its Challenges in Achieving Sustainability, Journal of Visual and Performing Arts **5** (6) (2024) 2795–2800, doi: https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.16.2024.3402.
8. URL: https://www.consilium.europa.eu/hr/infographics/paris-agreement-eu/ (2. 4. 2026.)
9. *A. Ehrenberg*, The Steelmaking Transformation Process and Its Consequences for Slag Utilization, Steel Res. Int. **96** (2025) 2400234, doi: https://doi.org/10.1002/srin.202400234.
10. *A. Nurdiawati, F. Tahir, I. N. Zaini, S. G. Al-Ghamdi*, Prospective environmental and economic assessment of green steel production in the Middle East, Resour. Conserv. Recycl. **219** (2025) 108277, doi: https://org/10.1016/j.resconrec.2025.108277.
11. *D. Mauro*, Carbon Capture and Storage in the Biofouling Tubeworm Ficopomatus Enigmaticus, J. Environ. Sci. Eng. A **13** (2024) 128–135, doi: https://doi.org/10.17265/2162-5298/2024.04.003.
12. *Y. Chen, H. Zuo*, Review of hydrogen-rich ironmaking in blast furnace, Ironmak. Steelmak. **48** (6) (2021) 749–768, doi: https://org/10.1080/03019233.2021.1909992.
13. *F. Patisson, O. Mirgaux, J. P. Birat*, Hydrogen steelmaking. Part 1: Physical chemistry and process metallurgy, Mater. Tech. **109** (2021) 303, doi: https://doi.org/10.1051/mattcech/2021025.

14. *V. Shatokhy*, Modelling of the effect of hydrogen injection on blast furnace operation and carbon dioxide emissions, Int. J. Miner. Metall. Mater. **29** (10) (2022) 1851–1861, doi: https://doi.org/10.1007/s12613-022-2474-8.
15. *C. Lan, Y. Hao, J. Shao, S. Zhang, R. Liu, Q. Lyu*, Effect of H_2 on Blast Furnace Ironmaking: A Review, Metals (12) (2022) 1864, doi: https://doi.org/10.3390/met12111864.
16. *M. Ren, W. Liu, J. Zhao, C. Zou, L. Ren, H. Wu, J. Zhao,* Effect of hydrogen friction in co-injection gas on combustion characteristics of the raceway in low carbon emission blast furnace, Int. J. Hydrogen Energy **48** (2023) 11530–11540, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhhydene.2022.06.106.
17. *M. Gojić*, Metalurgija čelika, Sveučilite u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2006., str. 130–156.
18. *H. Koohestani, M. Majidi*, A review on green steel; introduction, benefits and challenges of the steelmaking industry, Ironmak. Steelmak. **52** (4-5) (2025) 1–16, doi: https://doi.org/10.1177/03019233251345982.
19. *D. A. I. Varvara, C. Aciu,* Metallurgical Wastes as Resources for Sustainability of the Steel Industry, Sustainability **14** (2022) 5488, doi: https://doi:org/10.3390/su14095488.
20. *Z. Glavaš, N. Dolić*, Metalurgija željeza, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2014., str. 14–26.
21. *Z. Fucheng, H. Lukuo, X. Ying*, Prospects for green steelmaking technology with low carbon emissions in China, Carbon Energy **6** (2024) e456, doi: https://doi.org/10.1002/cey2.456.
22. *H. V. Gouthami*, A Review on Green Steel Technology Manufacturing Towards Net-zero, IJRPR-Int. J. Res. Publ. Rev. **12** (2024) 2240–2243, doi: https://doi.org/10.55248/gengpi.5.1224.3525.
23. *H. Mandova, P. Patrizio, S. Leduc, J. Kjärstad, C. Wang, E. Wetterlund, F. Kraxner, W. Gale*, Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage, J. Clean. Prod. **218** (2019) 118–129, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.247.
24. *M. Rimini, A. Corneille, D. Gu, M. Yamin*, Hydrogen in steel: Addressing emissions and dealing with overcapacity, OECD Science, Technology and Industry, Policy papers, March 2025, No. 174, https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/03/hydrogen-in-steel_f4d15f-8d/7e2edc69-en.pdf (5. 4. 2026.)
25. *I. Tomljenović,* Geokemijsko modeliranje otapanja CO_2 u dubokim slanim vodonosnicima-utjecaj na kemijski sastav slojne vode, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko–naftni fakultet, Zagreb, 2017., diplomski rad, str. 1–58.
26. URL: https://www.technologyreview.com/2025/03/12/1113130/green-steel-boston-metal/ (1. 3 2026.).
27. *C. Kurrer*, The potential of hydrogen fordecarbonising steel production, STOA Panel for the Future Science and Technology, EPRS, December 2020. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_EN.pdf (10. 5. 2026.)
28. *P. Cavaliere*, Barriers to Steel Decarburization, Steel Res. Int. (2026) 1–23, doi: https://doi.org/10.1002/srin.202501317.
29. *D. Fuhrlaender, B. Vermeulen, C. Schnuelle*, Green hydrogen transformation of the iron and steel production system: An integrated operating concept for system-internal balance, lower emissions, and support for power system stability, Appl. Energy **381** (2025) 125104, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy/2024.125104.
30. *E. Spatolisano, A. Trinca, D. Flagiello, G. Vilardi*, Green Hydrogen Production for Decarbonizing of Steel Industry: Energy and Economic Assessment of Electrolysis and Ammonia Cracking Systems, Energies **19** (3) (2026) 717, doi: https://doi.org/10.3390/en19030717.

SUMMARY

Production of Green Steel and Environmental Protection

Mirko Gojić,[a] *Stjepan Kožuh*,[b] *Sanja Šolić*,[c] and *Vlado Tropša*[a]

Steel is the most important metallic material, and its production has continuously increased throughout the 20th and 21st centuries. Between 2000 and 2025, global crude steel production has more than doubled, from 850 Mt to 1.880 Gt. Today, steel is produced primarily using basic oxygen furnaces (BOFs) (70.4 %) and electric arc furnaces (29.1 %). The steelmaking process is characterised by high consumption of metallic and non-metallic raw materials, energy, water, and other resources, with a significant impact on the environment. Iron and steel production contributes substantially to global greenhouse gas emissions, particularly CO_2 emissions. In 2023, the global average emission amounted to 1.92 t CO_2/t of crude steel produced. Depending on the amount of coke used for iron ore reduction, the iron and steel industry accounts for approximately 7–9 % of total global CO_2 emissions. This paper presents global trends in crude steel production and discusses the challenges associated with the production of green steel, including the reduction of greenhouse gas emissions. The major sources of pollutants in the iron and steel industry are identified, and possible options for decarbonizing iron and steel production are analysed. Approaches to green steel production are being developed along several pathways. Efforts are focused on maximising steel recycling through the increased use of steel scrap, as well as expanding the use of direct reduced iron (DRI). This paper also reviews the development and gradual implementation of new technologies for the production of green hydrogen for iron ore reduction in blast furnaces, as well as emerging technologies for direct reduced iron production. In addition, technologies for CO_2 capture, storage and utilisation are presented and discussed.

Keywords
Steel, environmental protection, CO_2 emission, hydrogen

[a] *University North, Trg Dr.* Žarka *Dolinara 1, 48 000, Koprivnica, Croatia*
[b] *University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Aleja narodnih heroja 3, 44 000 Sisak, Croatia*
[c] *Dr. Franjo Tuđman Defense and Security University, Department of Polytechnics, Ilica 256 b, 10 000 Zagreb, Croatia*

Review
Received June 15, 2026
Accepted July 29, 2026