https://doi.org/10.63356/stes.ing.2026.002 УДК 502.131.1:621.383.51

ZELENI VODONIK U FUNKCIJI DEKARBONIZACIJE GRAĐEVINSKOG SEKTORA – STUDIJA SLUČAJA TRANSFORMACIJE DILINGER ČELIČANE

Autor: MARIJA MALIĆ, Sara Malinović
e-mail: marija.malic@student.aggf.unibl.org
Mentor: prof. dr Igor Jokanović
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Uvod: Rad analizira dekarbonizaciju proizvodnje čelika primjenom zelenog vodonika na primjeru Dillinger željezare i njenog Power4Steel projekta, sa osvrtom na implikacije za građevinski sektor.

Cilj: Analizirati tehničku izvodljivost i ekonomsku opravdanost Power4Steel projekta, kvantifikovati smanjenje emisija i povećanje potrošnje energije, te ocijeniti doprinos dekarbonizaciji građevinskog sektora.

Materijal i metode: Korišćena je studija slučaja Dillinger željezare. Podaci su prikupljeni iz primarnih i sekundarnih izvora, a analiza je sprovedena kroz komparativnu analizu BF-BOF i DRI-EAF procesa, uz dodatni stehiometrijski proračun.

Rezultati: Literaturni podaci ukazuju na 90–95% smanjenje emisija CO_2 primjenom DRI-EAF procesa uz zeleni vodonik, dok proračun u ovom radu, na osnovu konkretnih vrijednosti emisija od 1.921 kg CO_2/t za BF-BOF i 339 kg CO_2/t za DRI-EAF, pokazuje smanjenje od 82,4%. DRI-EAF zahtijeva 8–10 puta veću potrošnju električne energije. Stehiometrijski proračun potvrdio je potrošnju H_2 od 54,1 kg/t Fe. Zeleni čelik je 30–54% skuplji (600–850 €/t). Dillinger planira proizvodnju od 2028. i klimatsku neutralnost do 2045. uz investiciju od 4,6 milijardi €. CBAM analiza pokazuje da tradicionalni čelik ima trošak od 46.82 €/t, a zeleni nema.

Zaključak: Power4Steel je tehnički izvodljiv i omogućava značajno smanjenje emisija, ali donosi izazove (endotermnost, 8–10 puta veća potrošnja struje, veća potrošnja vode). Iako je zeleni čelik trenutno skuplji, CBAM i EU ETS ga očekivano čine konkurentnim do 2030. Projekat je ključan za održivu transformaciju građevinskog sektora u Evropi.

Ključne riječi: zeleni vodonik; dekarbonizacija; čelik; DRI-EAF; Power4Steel; građevinski sektor; Dillinger

UVOD

Klimatske promjene, uzrokovane prvenstveno emisijom ugljen-dioksida već se ispoljavaju kroz globalni porast temperatura, podizanje nivoa mora i sve češće ekstremne vremenske događaje. Koncentracija CO_2 u atmosferi je dostigla 420 ppm u 2023. godini, što je najviši nivo u posljednjih 800 000 godina (1). Povećanje koncentracije CO_2 u atmosferi pojačava efekat staklene bašte, izazivajući globalno zagrijavanje i posljedično dovodi i do otapanja ledenih masa i širenja okeana, uzrokujući podizanje nivoa mora.

Prema podacima *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2), globalna prosječna temperatura porasla je za 1,1°C u periodu od 2011. do 2020. u odnosu na devetnaesti vijek. Podizanje nivoa mora ugrožava čitave gradove poput Venecije, dok su toplotni talasi u Evropi samo krajem juna 2026. godine, prema podacima WHO-a (3), odnijeli više od 10 000 života. Ove promjene predstavljaju jednu od najvećih prijetnji savremenom društvu,

zbog čega je smanjenje emisija CO_2 postalo ključni cilj globalnih klimatskih politika, a ostvarenje tih ciljeva nužno u svim sektorima ljudske djelatnosti. Građevinski sektor tu igra veliku ulogu jer troši ogromne količine energije i sirovina, pa tako učestvuje sa oko 37% u ukupnoj svjetskoj emisiji CO_2, prema podacima Međunarodne agencije za energiju (4).

Najveći dio te emisije potiče od proizvodnje osnovnih materijala, naročito čelika i cementa i stakla, ali i od ogromne količine fosilnih goriva koja se koriste u njihovoj proizvodnji. Današnja glavna tehnologija proizvodnje čelika zasniva se na visokim pećima i metalurškom koksu, što je izuzetno štetno za klimu, jer se za svaku tonu proizvedenog čelika na ovaj način u atmosferu se ispušta između 1,8 i 2,0 tona CO_2 (5). Čelik je odgovoran za otprilike 7 do 9% globalne emisije, a s obzirom na to da se godišnje proizvede više od 1,8 milijardi tona čelika, jasno je da bez promjene tehnologije nećemo moći ispuniti ciljeve Pariskog sporazuma (6). Ovim sporazumom potpisnice se obavezuju da ograniče globalno zagrijavanje na 2°C u odnosu na devetnaesti vijek. Da bi se to postiglo, neophodno je drastično smanjiti emisiju u svim sektorima, a posebno u onima koji su najveći zagađivači, poput građevinarstva i industrije čelika. Oslanjanje na uvoz fosilnih goriva, posebno iz politički nestabilnih regiona, pokazalo se kao ozbiljna ranjivost Evropske unije, te je pitanje energetske nezavisnosti od sve većeg značaja. Iako se tranzicija ka obnovljivim izvorima nameće kao logično rješenje, oni donose novi problem, nestalnost. Sunčevo zračenje i brzina vjetra su vremenski i prostorno promjenjivi, a skladištenje energije još uvijek nije dovoljno razvijeno da bi se ovi izvori mogli koristiti kao pouzdana osnova energetskog sistema. Zato se zeleni vodonik sve više spominje, ne samo kao rješenje za dekarbonizaciju industrije, već i kao dopuna energetskom sistemu u trenucima kada obnovljivi izvori zakažu, čime se istovremeno smanjuje zavisnost od uvoza fosilnih goriva i povećava energetska nezavisnost Evrope. Zeleni vodonik se dobija elektrolizom vode pomoću energije iz obnovljivih izvora i može u potpunosti zamijeniti koks kao redukcijsko sredstvo. U procesu direktne redukcije željeza on preuzima ulogu ugljen-monoksida, ali umjesto CO_2 kao nusproizvod nastaje samo voda u obliku vodene pare. Na taj način moguće je smanjiti emisiju u proizvodnji čelika za više od 90%, što je ogroman iskorak za cijelu metaluršku industriju.

Dillinger čeličana je postavila ambiciozne ciljeve dekarbonizacije kroz projekat Power-4Steel. Do 2028. godine planiraju početak proizvodnje niskougljeničnog čelika pod brendom PURE STEEL+ u novim postrojenjima za direktnu redukciju željeza (DRI) i dodatnu obradu željeza u lučnim elektičnim pećima (EAF), dok bi do 2030. godine emisija trebalo da bude smanjena za 55% u odnosu na referentnu godinu. Konačni cilj je potpuna klimatska neutralnost do 2045. godine, uz postepeno gašenje svih visokih peći i prelazak na proizvodnju zasnovanu na zelenom vodoniku, čija se puna upotreba očekuje do 2029. godine. Važno je naglasiti da ovaj prelazak neće biti trenutan, Dillinger je predvidio prelaznu fazu u kojoj će se u DRI procesu koristiti mješavina plina i zelenog vodonika, sa postepenim povećanjem udjela vodonika od početnih 20% do 100% do 2029. godine. Ovaj pristup omogućava stabilnu proizvodnju i smanjuje operativni rizik dok se ne izgradi potpuna infrastruktura za snabdijevanje zelenim vodonikom, a istovremeno već u prvoj fazi donosi značajno smanjenje emisija u odnosu na tradicionalni proces. Cilj ovog rada je da na osnovu trenutno dostupnih naučnih i tehničkih podataka analizira kako se ovi ciljevi mogu ostvariti, sagledavajući tehničke, ekonomske i logističke izazove koje takva transformacija donosi. U radu će biti sagledane šire implikacije ove tranzicije za održivo građevinarstvo, naročito kada je riječ o dostupnosti zelenog čelika kao ključnog materijala za buduću infrastrukturu. Osnovna hipoteza ovog rada je da je Dillingerov Power4Steel projekat, uprkos značajnim tehničkim i ekonomskim izazovima, izvodljiv model za dekarbonizaciju teške industrije, te da predstavlja ključni preduslov za održivu transformaciju građevinskog sektora u Evropi uz istovremeno jačanje njene energetske nezavisnosti.

MATERIJAL I METODE

U ovom radu je korištena studija slučaja kao primarna metodološka strategija, jer omogućava analizu jednog reprezentativnog primjera industrijske transformacije koja je još uvijek u toku. Za predmet istraživanja odabrana je Dillinger željezara i njen projekt „Power4Steel". Odabir je zasnovan na aktuelnosti projekta, s obzirom na to da je jedan od prvih i revolucionarnih projekata u Evropi koji integriše zeleni vodonik u industrijsku proizvodnju čelika u punom obimu. Ovo ga čini pogodnim za analizu tehničkih i logističkih izazova s kojima će se suočavati slični projekti u budućnosti, jer Dillinger proizvodi debele čelične limove koji se koriste u mostogradnji, vjetroturbinama i drugim infrastrukturnim projektima.

Podaci korišteni u radu su prikupljeni iz primarnih i sekundarnih izvora. Primarni izvori uključuju zvanične web stranice Dillinger čeličane, godišnji izvještaj kompanije za 2024. godinu, saopštenje za javnost od 15. marta 2026. godine o potpisivanju ugovora s kompanijom Verso Energy, te tehničku specifikaciju DRI postrojenja objavljenu na zvaničnoj web stranici. Sekundarni izvori obuhvataju dokumente Evropske unije, poput European Green Deal-a (EGD), REPowerEU plana i Uredbe o mehanizmu za ugljenično prilagođavanje na granici (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM izvještaje Međunarodne agencije za obnovljivu energiju (International Renewable Energy Agency – IRENA), posebno studiju „Water for Green Hydrogen-global water stress analysis" iz 2023. godine, publikacije Hydrogen Europe-a, te relevantne naučne radove. Poseban doprinos pružili su materijali sa Ljetne škole o zelenom vodoniku održane u Saarbrückenu jula 2026. godine, među kojima su predavanja o termodinamičkim aspektima proizvodnje željeza. Korišteni su i novinski članci koji prate razvoj Dillingerovog projekta, kao i naučni radovi o DRI tehnologiji i zelenom čeliku.

Analiza podataka je sprovedena kroz nekoliko metoda. Pregled literature je omogućio postavljanje teorijskog okvira za razumijevanje tradicionalne proizvodnje čelika u visokim pećima, tehnologija elektrolize i karakteristika DRI+EAF procesa. Analiza javno dostupnih podataka je podrazumijevala prikupljanje i sistematizaciju kvantitativnih i kvalitativnih informacija o Dillingerovom projektu, uključujući tehničke specifikacije, vremenske okvire i ekološke ciljeve. Komparativna analiza korištena je za poređenje tradicionalnog procesa proizvodnje čelika s novim DRI+EAF procesom koji koristi zeleni vodonik. Poređenje je izvršeno na osnovu nekoliko parametara: hemijskih reakcija i stehiometrijskih odnosa, energetskih zahtjeva, vrste i količine ulaznih sirovina i emisija CO_2. Poređenje je izvršeno tabelarno, što omogućava brzi uvid u ključne razlike između dva procesa.

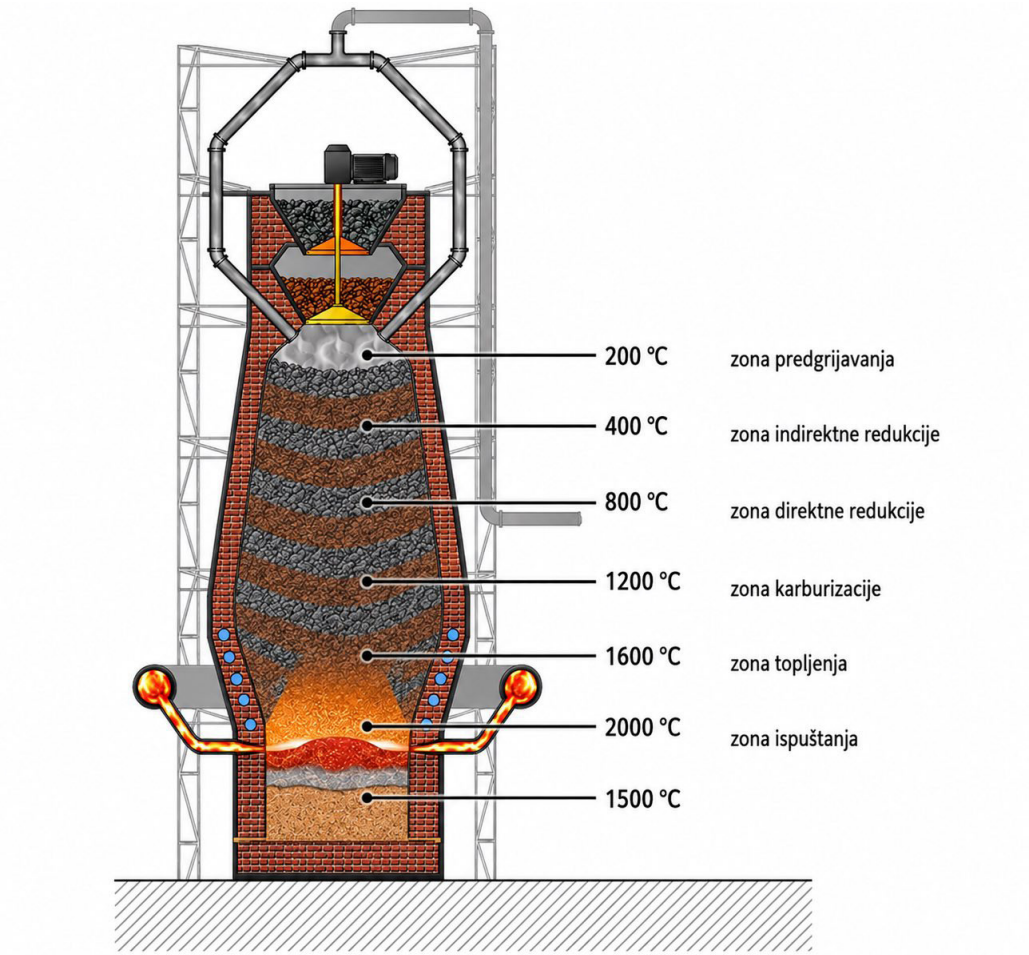
Prilikom interpretacije rezultata, potrebno je uzeti u obzir određena ograničenja. Rad se zasniva isključivo na javno dostupnim sekundarnim izvorima podataka. S obzirom na to da je projekt „Power4Steel" još uvijek u fazi izgradnje, s predviđenim puštanjem u rad 2029. godine, određeni podaci nisu konačni; stvarni operativni troškovi, pouzdanost opreme i tačne emisije mogu se razlikovati od planiranih vrijednosti. Analiza se oslanja na trenutni regulatorni okvir Evropske unije, uključujući EU ETS, CBAM i REPowerEU, a promjene u politici i regulativi tokom implementacije projekta mogle bi značajno uticati na ekonomsku opravdanost projekta. Dillinger se nalazi u regionu Saarland, koji ima specifične geografske i industrijske karakteristike, blizinu francuske granice, postojeću industrijsku infrastrukturu, dostupnost radne snage i podršku lokalnih vlasti, što možda nije primjenjivo na druge regije ili zemlje koje planiraju slične projekte. Rad se fokusira isključivo na zamjenu ugljenika vodonikom u procesu redukcije željeza, dok drugi važni aspekti dekarbonizacije čelične industrije, poput korištenja obnovljive energije za elektrolizu, reciklaže otpada ili upotrebe biomase, nisu detaljno analizirani. Podaci korišteni u radu su prikupljeni do jula 2026. godine, a s obzirom na dinamičnost industrije zelenog vodonika i čelika, noviji podaci mogli bi ponuditi dodatne analize i produbiti uvide izne-

sene u ovom radu. Studija pruža relevantan uvid u izazove i prilike dekarbonizacije teške industrije primjenom zelenog vodonika, te predstavlja vrijedan doprinos razumijevanju ove teme u kontekstu održivog građevinarstva.

TEORIJSKA OSNOVA

Tradicionalna proizvodnja čelika (BF-BOF)

Većina današnjeg čelika se proizvodi u visokim pećima koje su prikazane na slici 1 koristeći koks kao redukciono sredstvo. Koks sagorijeva u prisustvu kiseonika, pri čemu nastaje ugljen-monoksid, koji zatim redukuje željeznu rudu (7).



Slika 1. Visoka peć

Promjena entalpije, mjera ukupne energije sistema, ukazuje na sposobnost reakcije da se sama zagrije ili da bude zagrijana dovođenjem dodatne toplote. Endotermnu reakciju koja zahtijeva dovođenje toplote iz okoline karakteriše pozitivna promjena entalpije dok negativna promjena entalpije, označava egzotermnu reakciju pri kojoj se toplota oslobađa u okolinu. Entalpija reakcije određuje su na osnovu podataka iz NIST-JANAF Thermochemical Tables (8). Za pojedinačna jedinjenja korištene su vrijednosti standardne entalpije

stvaranja, $\Delta f H^{\circ}$, pri standardnoj temperaturi od 298,15 K i standardnom pritisku od 0,1 MPa, kako je navedeno u JANAF tabelama. Na osnovu ovih tabličnih vrijednosti i primjenom Hessovog zakona, entalpije ispitivanih reakcija izračunate su kao razlika zbira entalpija stvaranja produkata i zbira entalpija stvaranja reaktanata, prema izrazu:

$$\Delta_r H^0 = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}(\text{produkti}) - \sum_j \nu_j \Delta_f H_j^{\circ}(\text{reaktanti}) \quad [1]$$

Osnovne hemijske reakcije i njihove entalpije su iz jednačine [1]:

$$\Delta_r H^0 = 2(-110{,}5) - (2 \cdot 0 + 0) = -221 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$2C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)} \quad \Delta H^0_{298K} = -221 \text{ kJ/mol} \quad [2]$$

$$\Delta_r H^0 = [2(0) + 3(-393{,}5)] - [(-824{,}2) + 3(-110{,}5)] = -24{,}8 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$Fe_2O_{3(s)} + 3CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + 3CO_{2(g)} \quad \Delta H^0_{298K} = -24{,}8 \text{ kJ/mol} \quad [3]$$

Prva reakcija (jednačina [2]) je egzotermna i obezbjeđuje toplotu neophodnu za odvijanje procesa, dok druga (jednačina [3]) predstavlja ključni korak redukcije željezne rude do elementarnog željeza. Međutim, upravo iz ove druge reakcije proizilazi osnovni ekološki problem tradicionalne metalurgije, za svaki mol proizvedenog željeza nastaje 1,5 mol CO_2. Ova činjenica čini tradicionalnu čeličanu jednim od najvećih industrijskih zagađivača i glavnim akterom u emisiji gasova staklene bašte.

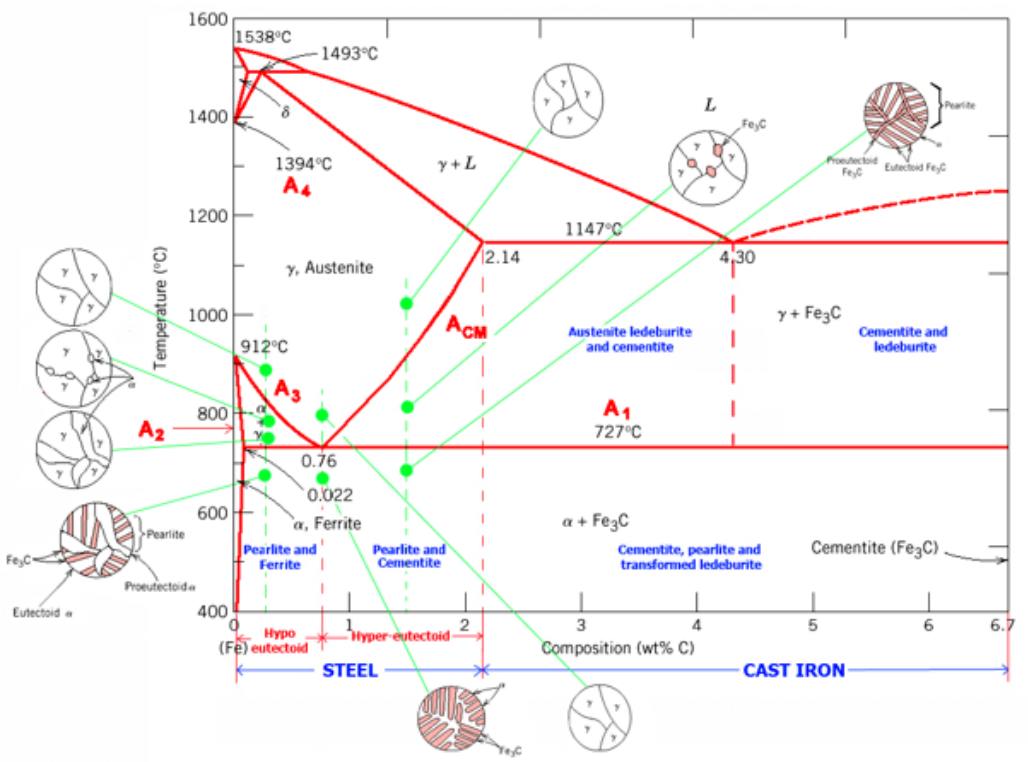
Pored osnovnih reakcija, u visokoj peći odvija se i veoma važna sporedna reakcija, karburizacija željeza (7). Željezo reaguje sa ugljen-monoksidom pri čemu nastaje cementit Fe_3C, što je prikazano sljedećom jednačinom [4] :

$$\Delta_r H^{\circ} = [23{,}8 + (-393{,}5)] - [3(0) + 2(-110{,}5)] = -148{,}7 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$3Fe_{(s)} + 2CO_{(g)} \rightarrow Fe_3C_{(s)} + CO_{2(g)} \quad \Delta H^0_{298K} = -148{,}7 \text{ kJ/mol} \quad [4]$$

Ova reakcija dovodi do stvaranja sirovog gvožđa (livenog gvožđa) koje sadrži previše ugljenika, znatno više nego što je dozvoljeno za čelik. Zbog toga se sirovo gvožđe mora naknadno prerađivati u kiseoničnim konverterima ili električnim pećima, kako bi se sadržaj ugljenika snizio na ispod 2% i dobio materijal sa odgovarajućim mehaničkim svojstvima.

Fazni dijagram željezo-ugljenik, prikazan na Slici br. 2, od suštinskog je značaja za razumijevanje strukture i svojstava dobijenog materijala. Fazni dijagram povezuje temperaturu, udio ugljenika i mikrostrukturu tako što za svaku tačku, definisanu sa %C i temperaturom, prikazuje koje su faze stabilne. To znači da inženjer na osnovu udjela ugljenika i odabrane temperature može predvidjeti hoće li konačna mikrostruktura biti duktilna, balansirana ili tvrda, čime direktno kontroliše mehanička svojstva čelika. Ovaj dijagram omogućava metalurzima da kontrolišu proces hlađenja i tako postignu željene mikrostrukture, koje direktno određuju čvrstoću, žilavost i tvrdoću čelika. Iako je tradicionalni proces u visokoj peći tehnološki dobro razvijen i decenijama dokazano efikasan, količina ugljen-dioksida koja se oslobađa danas predstavlja ozbiljan izazov i osnovni motiv za razvoj alternativnih, ekološki prihvatljivijih metoda proizvodnje čelika, poput direktne redukcije vodonikom.



Slika 2. Fazni dijagram željezo-ugljenik (9)

Ključni problem dekarbonizacije visokih peći leži u činjenici da ugalj obavlja dvije funkcije istovremeno. Osnovna funkcija je da sagorijevanjem koksa proizvodi toplotu potrebnu za održavanje temperature u peći. Druga je da služi i kao redukciono sredstvo koje veže kiseonik iz željezne rude. Ove dvije uloge su u tradicionalnom procesu nerazdvojivo povezane, što znači da se jednostavnom zamjenom jednog dijela koksa ne može postići značajnije smanjenje emisija bez promjene tehnologije. Ovo termodinamičko ograničenje predstavlja glavni razlog zašto je potrebno razviti potpuno nove metode.

Zeleni vodonik kao alternativno redukciono sredstvo

Zeleni vodonik, proizveden elektrolizom vode pomoću energije iz obnovljivih izvora, nudi rješenje za ova ograničenja. U procesu direktne redukcije željeza, vodonik preuzima ulogu redukcijskog sredstva umjesto ugljen-monoksida. Hemijska reakcija glasi (7) :

$$\Delta_r H^\circ = [2(0) + 3(-241{,}8)] - [(-824{,}2) + 3(0)] = +98{,}8\ \text{kJ mol}^{-1}$$

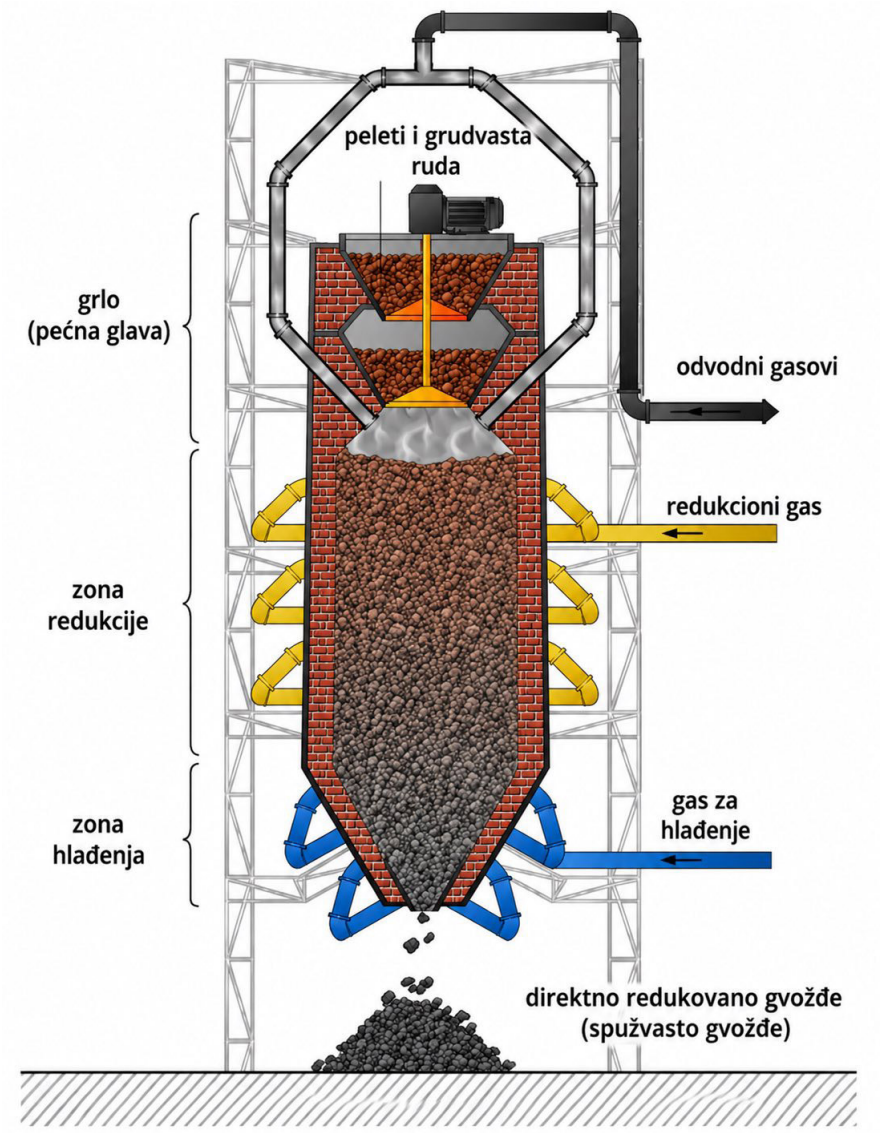
$$Fe_2O_{3(s)} + 3H_{2(g)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + 3H_2O_{(g)} \qquad [5]$$

Za razliku od tradicionalnog procesa, ovdje nema emisije CO_2, nusproizvod je vodena para. Zeleni vodonik tako omogućava gotovo potpunu dekarbonizaciju procesa redukcije željeza, ali zahtijeva potpuno drugačiju tehnološku infrastrukturu. Trenutno stanje tehnike je na nivou od 10 MW (10), dok su za industrijske potrebe potrebna postrojenja na nivou GW. Snaga jedne velike vjetroturbine je 10 MW i dovoljna je za pogon probnog elektrolizera koji dnevno može da proizvodi oko dvije tone zelenog vodonika, dok je 1 GW snaga cijele termoelektrane i predstavlja industrijski nivo potreban za napajanje

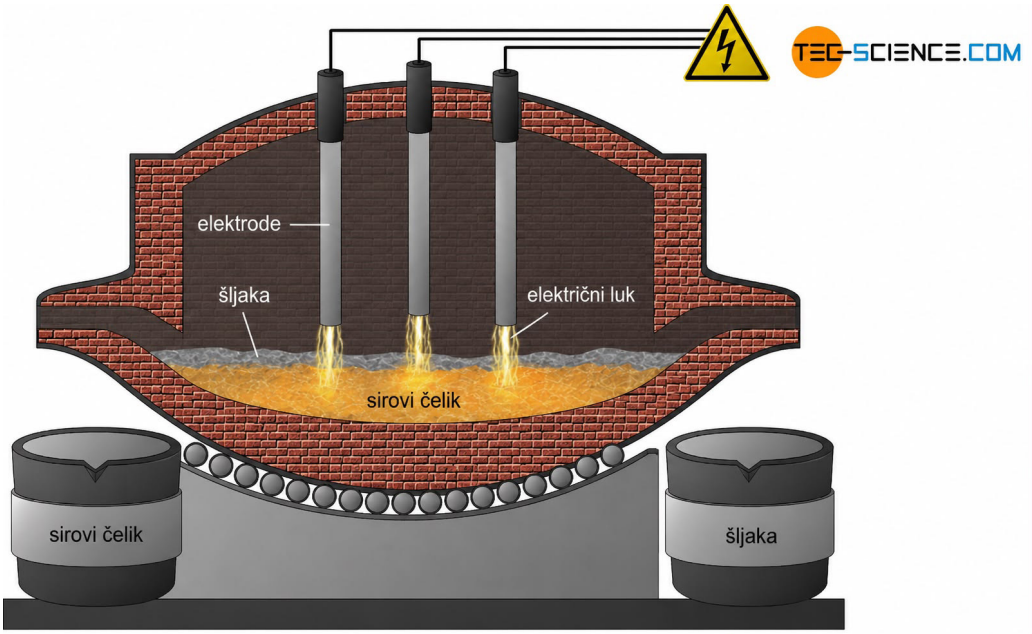
velike čeličane, što je otprilike 100 puta više od trenutnih demonstracionih postrojenja. Osim toga, elektroliza vode, kao osnovni proces proizvodnje zelenog vodonika, odvija se kroz dvije polureakcije: na anodi se odvija oksidacija hidroksidnih jona pri čemu nastaje kiseonik, dok se na katodi vodonikovi joni redukuju do molekularnog vodonika.

Direktna redukcija željeza (DRI)

Direktna redukcija željeza, prikazana na Slici br. 3, u kombinaciji s električnom lučnom pećи, prikazanoj na Slici br. 4, predstavlja ključnu tehnologiju za korištenje zelenog vodonika u proizvodnji čelika, a upravo ovaj tehnološki koncept čini osnovu za transformaciju čeličane Dillinger.



Slika 3. Peć za direktnu redukciju (7)



Slika 4. Peć za direktnu redukciju (7)

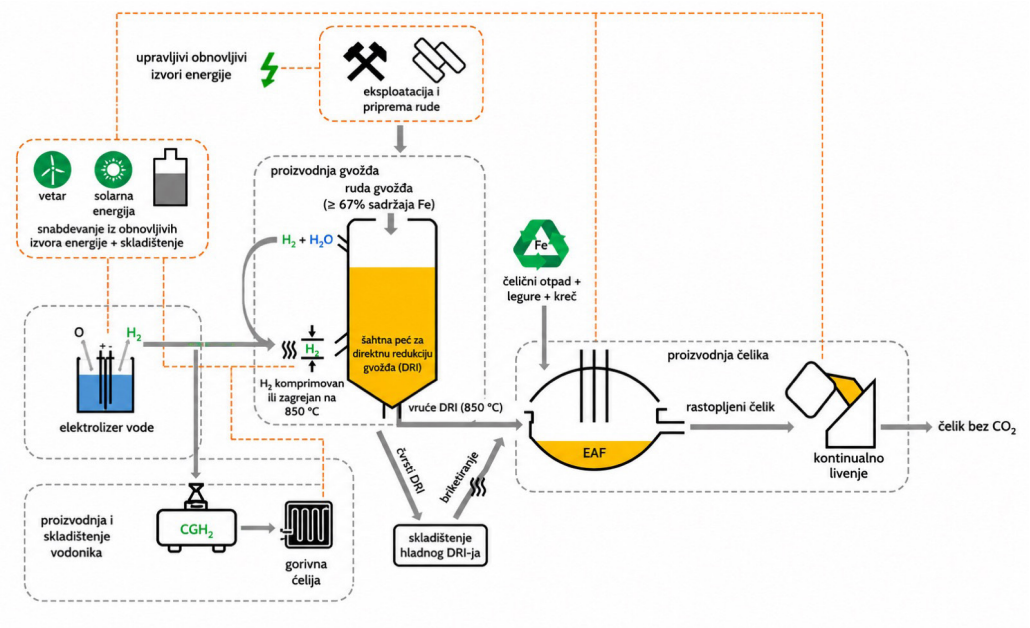
Za razliku od tradicionalnih visokih peći koje koriste koks kao redukcijsko sredstvo, DRI proces omogućava korištenje vodonika za redukciju željezne rude, pri čemu se odvija hemijska reakcija [5]. Osnovna prednost ove reakcije je u tome što umjesto ugljen-dioksida, nusproizvod redukcije postaje vodena para, čime se direktne emisije CO_2 praktično eliminišu. Međutim, sa termodinamičke tačke gledišta, ovaj proces donosi i određene izazove. Naime, standardna entalpija reakcije redukcije hematita vodonikom iznosi približno +98,8 kJ/mol što znači da je reakcija endotermna, za razliku od egzotermne redukcije ugljen-monoksidom koja se odvija uz oslobađanje toplote od, 24,8 kJ/mol prema sljedećoj reakciji:

$$Fe_2O_{3(s)} + 3CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + 3CO_{2(g)} \quad [3]$$

Ova endotermnost zahtijeva dodatni unos toplote u proces, što se nadoknađuje korištenjem električne energije u električnoj lučnoj peći za topljenje dobijenog, direktno redukovanog željeza.

Istraživanja pokazuju da je ukupni energetski unos u procesu direktne redukcije složen balans faktora koji uključuju brzine hemijskih reakcija, difuzionu dinamiku i generisanje entropije. Više temperature ubrzavaju reakcije redukcije, ali istovremeno dovode do značajnih promjena zapremine i razvoja defekata u kristalnoj rešetki. Važno je napomenuti da čelik proizveden čistim vodonikom ne sadrži ugljenik, što povećava njegovu tačku topljenja, pa je naknadno dodavanje ugljenika neophodno za optimizaciju procesa topljenja u EAF. Nakon topljenja u EAF, sirovi čelik se podvrgava sekundarnim metalurškim postupcima radi dodatnog prečišćavanja i podešavanja konačnog hemijskog sastava. Uprkos ovim termodinamičkim i tehnološkim izazovima, DRI + EAF putanja prikazana na Slici br. 5, omogućava smanjenje emisija CO_2 za više od 90% u odnosu na tradicionalni put

visoke peći i kiseoničkog konvertera, što je u skladu sa planovima Dillingera da zamijeni postojeće visoke peći.



Slika 5. DRI + EAF putanja (11)

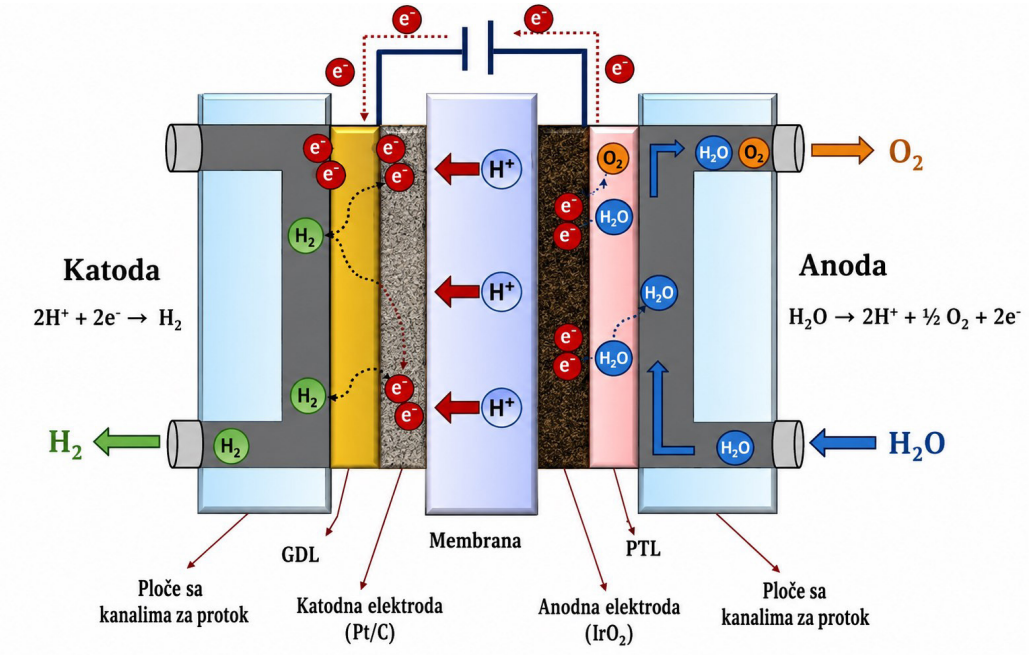
Tehnologije dobijanja i elektrolize vodonika

Za proizvodnju zelenog vodonika, koji je neophodan za dekarbonizaciju čelične industrije, koriste se različite tehnologije elektrolize vode. Svaka od njih ima specifične karakteristike, prednosti i nedostatke koji određuju njenu primjenu u različitim industrijskim kontekstima. Osnovne tehnologije elektrolize su PEM elektroliza, alkalna elektroliza i AEM elektroliza.

PEM elektroliza (Proton Exchange Membrane)

PEM elektroliza, prikazana na Slici br. 6, predstavlja naprednu tehnologiju za proizvodnju zelenog vodonika koja se zasniva na korištenju čvrste polimerne membrane kao elektrolita. Princip rada se zasniva na dvije polureakcije: na anodi se voda oksidacijom pretvara u kiseonik, protone i elektrone, dok na katodi protoni prolaze kroz membranu i spajaju se s elektronima gradeći molekularni vodonik (12). PEM elektroliza nudi niz značajnih prednosti, kompaktan dizajn, brz odgovor na promjene opterećenja (što je čini idealnom za rad sa obnovljivim izvorima poput solarne i vjetroenergije) i visoku gustinu struje koja omogućava veću produktivnost po jedinici površine. Međutim, prednosti su praćene i značajnim izazovima. Zahtijeva se izuzetno čista voda (provodljivosti manje od 0,0556 μS/cm), što podrazumijeva skupe sisteme za prečišćavanje. Dodatni izazov predstavlja oslanjanje na plemenite metale kao katalizatore, iridijum na anodi i platina na katodi su neophodni, ali su izuzetno rijetki, skupi i njihova proizvodnja je geografski ograničena. Istraživanja se stoga intenzivno bave smanjenjem udjela plemenitih metala ili pronalaženjem alternativnih materijala. Uprkos ovim izazovima, PEM elektroliza se zbog

svoje fleksibilnosti, visoke efikasnosti i čistoće proizvedenog vodonika smatra najperspektivnijom tehnologijom za proizvodnju zelenog vodonika u energetskoj tranziciji.



Slika 6. PEM elektroliza (13)

Alkalna elektroliza (AWE)

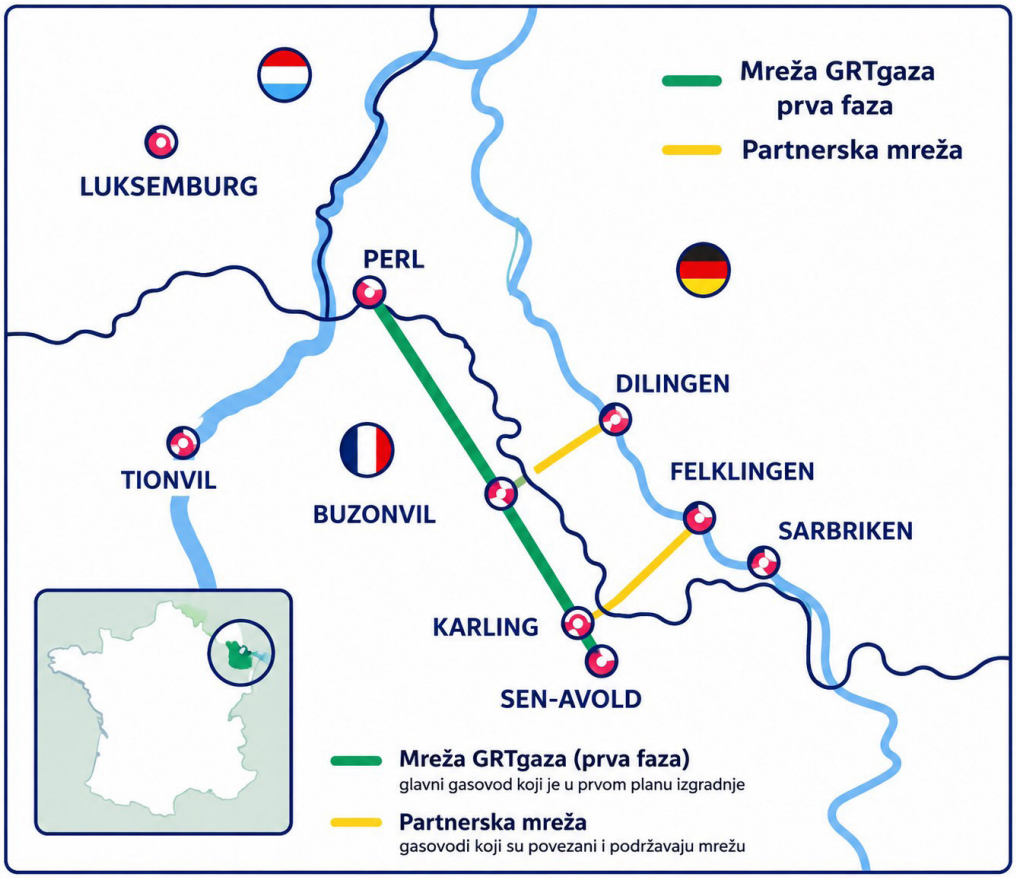
Alkalna elektroliza predstavlja najstariju tehnologiju, koja se u industrijskim razmjerama koristi već decenijama. Ona koristi tečni alkalni elektrolit, najčešće rastvor kalijum-hidroksida, i nije osjetljiva na manje nečistoće u vodi kao PEM elektroliza, što je čini praktičnijom za primjenu u uslovima koji nisu idealni (14). Njena izdržljivost i dug vijek trajanja čine je pouzdanim rješenjem za industrijsku primjenu. Alkalna elektroliza ima manju gustinu struje i sporiji odziv na promjene opterećenja, što je čini manje pogodnom za rad sa povremenim i promjenljivim izvorima energije, poput vjetra i sunca. Radi na nižim gustinama struje, što zahtijeva veće površine elektroda i veće dimenzije postrojenja za isti kapacitet proizvodnje.

AEM elektroliza (Anion Exchange Membrane)

AEM elektroliza predstavlja hibridni pristup koji nastoji da kombinuje prednosti PEM i AWE tehnologija. Koristi membranski elektrolit poput PEM tehnologije, ali sa anjonskom izmjenom, što omogućava korištenje jeftinijih katalizatora koji ne sadrže plemenite metale (15). Ova tehnologija još uvijek je u fazi razvoja i istraživanja, ali obećava značajno niže troškove proizvodnje i veću efikasnost u odnosu na postojeća rješenja. Ako se očekivani napredak ostvari, AEM elektroliza bi mogla predstavljati tehnološki preokret koji će omogućiti širu primjenu zelenog vodonika, ne samo u čeličnoj industriji već i u drugim sektorima. Međutim, potrebna su dalja istraživanja i pilot projekti kako bi se potvrdila njena dugoročna stabilnost i komercijalna održivost prije masovne industrijske primjene.

Izbor Dillingera

Dillinger je zajedno sa matičnom Stahl-Holding-Saar grupom, sklopio dugoročni ugovor sa francuskom kompanijom Verso Energy za snabdijevanje zelenim vodonikom. Ugovor je potpisan u julu 2025. godine i predviđa godišnju isporuku od najmanje 6 000 tona vodonika u periodu od deset godina, s početkom isporuke 2029. godine. Proizvedeni vodonik će se iz postrojenja CarlHYng u francuskom Carlingu transportovati do Dillingerove željezare putem prekogranične cjevovodne mreže mosaHYc, kao što je prikazano na Slici br. 7. Za proizvodnju tog vodonika, kompanija Verso Energy će koristiti PEM elektrolizu, pri čemu će prva faza projekta CarlHYng imati instalirani kapacitet od 70 MW, sa planom postepenog proširenja na ukupno 300 MW. PEM tehnologija odabrana je zbog svoje fleksibilnosti i sposobnosti brzog prilagođavanja promjenjivim opterećenjima, što je ključno za rad sa obnovljivim izvorima energije.



Slika 7. MosaHYc Ruta za transport zelenog vodonika do Dillingera (16)

REZULTATI

U ovom poglavlju su prikazani rezultati komparativne analize tradicionalnog procesa proizvodnje čelika u visokoj peći sa kiseoničnim konverterom, BF-BOF i naprednog procesa direktne redukcije željeza u kombinaciji sa električnom lučnom peći, DRI+EAF, koji koristi zeleni vodonik kao redukciono sredstvo.

Uporedni pregled tehnoloških parametara

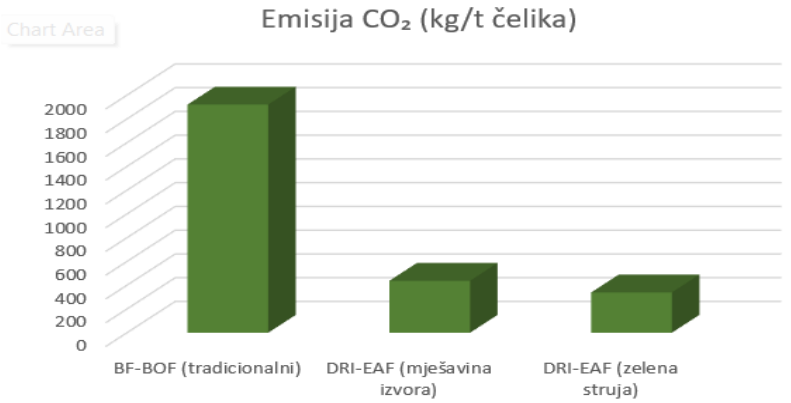
U Tabeli br. 1. je prikazan uporedni pregled ključnih parametara za dva analizirana procesa proizvodnje čelika.

Parametar	Visoka peć (BF-BOF)	DRI + EAF	Razlika
Emisija CO_2 (t CO_2/t čelika)	1,8 - 2,3	0,1 - 0,4	90-95% manje
Potrošnja električne energije (MWh/t)	0,35 - 0,60	3,5 - 4,8	8-10 puta veća
Toplotni zahtjevi DRI reaktora	egzotermna	endotermna	
Potrošnja uglja/koksa (kg/t)	400-500	0	Eliminisano
Potrošnja vode (m^3/t)	Referentna	Veća (zbog elektrolize)	
Cijena proizvodnje (€/t)	400-550	600-850	30-54% skuplje

Tabela 1. Uporedni pregled ključnih parametara za dva analizirana procesa proizvodnje čelika

Emisije ugljen-dioksida

Rezultati analize emisija CO_2 pokazuju da tradicionalni BF-BOF proces emituje između 1,8 i 2,3 tone CO_2 po toni proizvedenog sirovog čelika (17). Konkretno, podaci navode emisiju od 1 921 kg CO_2/t za BF-BOF putanju (18). Ove emisije direktno su povezane sa potrošnjom uglja i koksa, koja iznosi 400–500 kg po toni čelika.
Nasuprot tome, proces DRI-EAF uz korištenje zelenog vodonika može omogućiti smanjenje emisija CO_2 i do 90–95% (19), zavisno od tehnoloških uslova i razmatranog scenarija proizvodnje, uz eliminisanje upotrebe uglja i koksa kao redukcionih sredstava. Emisije variraju u zavisnosti od izvora električne energije , uz korištenje zelene struje, emisije iznose 339 kg CO_2/t, dok uz korištenje mješavine izvora mogu iznositi i do 437 kg CO_2/t (20).



Grafik 1. Emisija CO_2 (kg/t čelika)

Energetski zahtjevi

Analiza energetskih zahtjeva pokazuje značajne razlike između dva procesa. Prema istraživanjima, DRI-EAF proces troši 3,72 do 4,80 MWh električne energije po toni tekućeg čelika, pri čemu najveći dio otpada na elektrolizu vode za proizvodnju vodonika (21). Tabela br. 2. prikazuje detaljniji pregled energetskih parametara. Na osnovu stehiometrije reakcije [5] direktne redukcije hematita vodonikom izvršen je proračun teorijske potrošnje vodonika za proizvodnju 1 tone željeza. Koristeći molarne mase:

$$M(\mathrm{Fe}) = 55{,}85\ \mathrm{g/mol}, \quad M(\mathrm{H_2}) = 2{,}016\ \mathrm{g/mol}$$

iz stehiometrijskog odnosa 2 mola Fe (111,7 g) zahtijeva 3 mola H_2 (6,048 g), slijedi:

$$m(\mathrm{H_2}) = \frac{1000 \times 6{,}048}{111{,}7} = 54{,}1\ \mathrm{kg\ H_2/t\ Fe} \qquad [6]$$

Upoređivanjem sa podatkom iz literature od 53,7 kg H_2/t Fe, dobijeno je odstupanje od svega 0,7%, što potvrđuje konzistentnost proračuna i opravdava korištenje literaturnih vrijednosti u daljoj analizi.

Parametar	BF-BOF	DRI+EAF
Električna energija (MWh/t)	0,35-0,60	3,72-4,80 (21)
Toplota za redukciju Fe_2O_3 (MJ/t)	-24,8 (egzotermna)	+878,4 (endotermna) (37)
Potrošnja H_2 (kg/t Fe)	0	53,7 (21)
Energetska efikasnost sistema (%)	62,2	34,3 (22)

Tabela 2. Energetski parametri po toni čelika

Potrošnja vode

Potrošnja vode predstavlja dodatni izazov za proces proizvodnje zelenog čelika. Elektrolizeri zahtijevaju približno devet litara čiste dejonizovane vode po kilogramu proizvedenog vodonika. Takođe, u DRI procesu nastaje značajna količina vodene pare, oko 540 kg po toni DRI (19).

Ekonomski parametri

Analiza ekonomskih parametara pokazuje da je proizvodnja zelenog čelika trenutno skuplja od tradicionalne. Prema podacima iz literature, cijena proizvodnje DRI-EAF čelika veća je za 30–54% u odnosu na BF-BOF proces (20) (22). Ovo je prvenstveno posljedica visokih troškova proizvodnje zelenog vodonika i većih investicionih troškova za DRI i EAF postrojenja. Međutim, regulatorni okviri EU, značajno će uticati na ove ekonomske odnose. EU ETS (Sistem trgovine emisijama) uvodi cijenu na emisije CO_2. Kompanije koje emituju CO_2 moraju posjedovati odgovarajući broj emisijskih dozvola, pri čemu jedna dozvola uglavnom odgovara emisiji jedne tone CO_2. Dio dozvola proizvođači čelika trenutno dobijaju besplatno, ali se njihov broj postepeno smanjuje. Zbog toga će proizvođači tradicionalnog čelika morati kupovati sve veći broj dozvola za svoje emisije, što povećava troškove proizvodnje. CBAM mehanizam (Mehanizam za ugljenično prilagođavanje na granici) uvozni ekvivalent EU ETS, od 2026. godine naplaćuje uvoz čelika na osnovu ugrađenih emisija CO_2, čime se uvozu nameće isti trošak ugljenika kao i domaćoj proizvodnji i sprečava preseljenje proizvodnje u zemlje sa slabijim klimatskim propisima. Ovi mehanizmi će povećati cijenu tradicionalnog čelika, smanjujući konkurentsku prednost

BF-BOF procesa (20). Proračun CBAMa se vrši prema sljedećoj formuli [7] (23):

$$CBAMtrošak(€/t) = [SEE\,(tCO_2/t) - (Benchmark(tCO_2/t) \times Phase - InRate)] \times EUAcije \quad [7]$$

SEE (Specifične ugrađene emisije) predstavlja stvarne direktne emisije CO_2 po toni proizvoda i preuzete su iz Tabele br. 1, za BF-BOF čelik iznose 1 921 tCO_2/t, a za Dillingerov DRI-EAF zeleni čelik 0,339 tCO_2/t. Benchmark je referentna vrijednost emisija koju je odredila EU na osnovu 10% najefikasnijih postrojenja, koja za BF-BOF iznosi 1 370 tCO_2/t, a za DRI-EAF 0,481 tCO_2/t (24). Phase-In Rate je faktor uvođenja od 97,5% za 2026. godinu, koji se primjenjuje na benchmark kako bi se ublažio početni finansijski teret i koji se postepeno povećava do 100% do 2034. godine. EUA cijena je tržišna cijena dozvole za emisiju jedne tone CO_2, koja za prvi kvartal 2026. godine iznosi 80 €/tCO_2.

CBAM za tradicionalni čelik :

$$C_{CBAM,\,BF\text{-}BOF} = [1{,}921 - (1{,}370 \times 0{,}975)] \times 80 = 46{,}82\ €/t \quad [8]$$

CBAM za zeleni čelik:

$$C_{CBAM,\,DRI\text{-}EAF} = [0{,}339 - (0{,}481 \times 0{,}975)] \times 80 = -1048\ €/t \quad [9]$$

Građevinski sektor

Da bi se kvantifikovao uticaj prelaska na zeleni čelik na građevinski sektor, izvršena je analiza tri tipična građevinska projekta: čelični lučni most raspona 100 metara (1500 tona čelika), vjetroturbina snage 5 MW (250 tona čelika) i poslovna zgrada od 10 spratova (2000 tona čelika). Proračun se zasniva na razlici u emisijama između tradicionalnog BF-BOF čelika (1,921 tCO_2/t) i zelenog DRI-EAF čelika (0,339 tCO_2/t), što daje uštedu od 1,921–0,339=1,582 tone CO_2 po toni čelika. Rezultati pokazuju da bi most od 100 metara ostvario uštedu od $1500 \times 1{,}582 = 2373$ tone CO_2, što čini

$$\frac{0{,}339 * 1500}{1{,}921 * 1500} * 100 = 17{,}6\ \%.$$

Na osnovu upoređenih vrijednosti emisija od 1.921 kg CO_2/t za BF-BOF i 339 kg CO_2/t za DRI-EAF proces, izračunato relativno smanjenje emisija iznosi 82,4%, odnosno, zeleni čelik zadržava samo 17,6% emisija tradicionalnog čelika. Ovaj rezultat se odnosi na konkretne vrijednosti korištene u proračunu i ne predstavlja opštu vrijednost smanjenja emisija za sve tehnološke varijante DRI-EAF procesa. Vjetroturbina od 5 MW uštedjela bi 395 tona CO_2, dok bi poslovna zgrada od 10 spratova ostvarila uštedu od 3164 tone CO_2. Ove uštede se ostvaruju isključivo zamjenom tradicionalnog čelika zelenim čelikom, bez ikakvih promjena u projektnim rješenjima ili tehnologiji izgradnje. Prikazane uštede se odnose na emisije povezane sa proizvodnjom potrebnih količina čelika, a ne na ukupan ugljenični otisak analiziranih građevinskih projekata. Iako primjena zelenog čelika omogućava izračunato smanjenje emisija od 82,4% po toni čelika, smanjenje ukupnih emisija pojedinačnog projekta zavisi od udjela čelika u njegovom ukupnom ugljeničnom otisku (npr. kod mostova čini oko 45% otiska, kod zgrada 15–20%, a kod vjetroturbina 50–60%). Zbog toga se na osnovu sprovedenog proračuna ne može apsolutno pouzdano utvrditi jedinstveni procenat smanjenja ukupnih emisija građevinskih projekata. Na osnovu analize ušteda u emisijama samog materijala, može se zaključiti da Dillingerov PURE STEEL + čelik, čija se proizvodnja očekuje od 2028. godine, ima potencijal da značajno doprinese dekarbonizaciji građevinskog sektora. Budući da je završni čelični proizvod po svojim mehaničkim svojstvima, dimenzijama i standardima kvaliteta potpuno identičan tradicio-

nalnom čeliku, njegova ugradnja, zavarivanje, montaža i svi drugi građevinski postupci na gradilištu ostaju nepromijenjeni, pa se ne očekuju nikakvi dodatni izazovi, prekvalifikacije radnika niti prilagođavanja opreme.

Dillinger Power4Steel projekat

Dillinger je kroz Power4Steel projekat postavio ambiciozne ciljeve dekarbonizacije. U Tabeli br. 3. prikazani su ključni ciljevi i planirani rokovi.

Cilj	Rok	Opis
Početak proizvodnje niskougljeničnog čelika	2028.	Puštanje u rad novih DRI i EAF postrojenja (17)
Smanjenje emisija za 55%	2030.	U odnosu na referentnu godinu (25)
Potpuna upotreba zelenog vodonika	2029	Zamjena koksa u DRI procesu
Klimatska neutralnost	2045	Potpuno gašenje visokih peći (38)

Table 3. Ciljevi dekarbonizacije Dillinger kroz Power4Steel

Projekat uključuje izgradnju postrojenja za direktnu redukciju kapaciteta 2 miliona tona i dvije električne lučne peći ukupnog kapaciteta 3,5 miliona tona na lokacijama u Dillingenu i Völklingenu (25). Ukupna investicija iznosi 4,6 milijardi evra, od čega je 1,7 milijardi evra obezbijeđeno kroz finansijski paket uz podršku njemačke savezne vlade i vlade Saarlanda.

DISKUSIJA

Analiza smanjenja emisija CO_2

Literaturni podaci (19) ukazuju na mogućnost smanjenja emisija CO_2 do 90–95% primjenom DRI-EAF tehnologije uz korištenje zelenog vodonika, zavisno od tehnoloških uslova i izvora energije. Međutim, proračun sproveden u ovom radu, na osnovu konkretnih vrijednosti emisija za dva upoređena procesa, pokazuje smanjenje od 82,4%. Razlika između ovog rezultata i navedenih literaturnih procjena je posljedica različitih polaznih pretpostavki i vrijednosti emisija korištenih u poređenju. Osnovni razlog smanjenja leži u hemijskoj reakciji pri kojoj umjesto CO_2 nastaje vodena para. Preostale emisije od 339 do 437 kg CO_2/t (20) (18) potiču od električne energije koja se koristi za elektrolizu, ako ona nije u potpunosti iz obnovljivih izvora, te od topljenja u električnoj lučnoj peći. Za Dillinger, ovo bi značilo smanjenje od približno 2,5 do 3 miliona tona CO_2 godišnje, što predstavlja značajan doprinos klimatskim ciljevima EU (20).

Energetski aspekti – toplotni zahtjevi kao ključni izazov

Rezultati pokazuju značajno veću potrošnju električne energije u DRI + EAF procesu (3,72–4,80 MWh/t) u poređenju sa BF-BOF procesom (0,35-0,60 MWh/t) (21) (22). Ovo povećanje je očekivano i prvenstveno je posljedica energije potrebne za elektrolizu vode. Međutim, važno je istaknuti toplotne zahtjeve procesa direktne redukcije vodonikom. Za razliku od tradicionalne redukcije ugljen-monoksidom koja je egzotermna (ΔH = -24,8 kJ/mol), redukcija vodonikom je endotermna i zahtijeva dovođenje toplote. Prema termodinamičkim proračunima, za proizvodnju jedne tone željeza vodonikom potrebno je 878,4 MJ toplote .

Dillinger će morati da optimizuje iskorištenje otpadne toplote iz EAF-a kako bi smanjio potrebu za dodatnim grijanjem DRI reaktora. Energetska efikasnost DRI-EAF sistema (34,3%) značajno je niža od BF-BOF sistema (62,2%) (22), što ukazuje na prostor za optimizaciju. Na temperaturama od 900 do 1100°C, vodonik pokazuje 30–50% veću efikasnost od CO kao redukciono sredstvo, pri čemu se prednost redukcije vodonikom povećava sa porastom temperature (26).

Treba istaknuti da dodatna električna energija ne dolazi iz fosilnih izvora, već isključivo iz obnovljivih izvora, što je zagarantovano RFNBO sertifikacijom koja zahtijeva da se vodonik proizvodi isključivo korištenjem obnovljive energije (27), što znači da se za potrebe elektrolize grade novi kapaciteti iz sunca, vjetra i vode, a ne da se energija preusmjerava iz postojeće mreže. Upravo je to razlog zašto je projekt CarlHYng lociran u Francuskoj, koja raspolaže sa značajnim kapacitetima nuklearne i obnovljive energije, a sam projekat je prepoznat kao od strateškog značaja za Evropsku uniju (28). Drugim riječima, dodatna energija koja se troši za proizvodnju vodonika ne povećava emisije CO_2, već ih zamjenjuje, umjesto uglja kao redukcionog sredstva, koristi se vodonik čija se energija dobija iz čistih izvora, čime se postiže upravo onaj cilj zbog kojeg se cijela transformacija i pokreće: smanjenje ugljeničnog otiska čelične industrije.

Pored toga, sa energetske tačke gledišta, analiza je pokazala da DRI + EAF proces zahtijeva osam do deset puta veću količinu električne energije po toni proizvedenog čelika u odnosu na tradicionalni proces. Ovo povećanje je prvenstveno posljedica ogromnih energetskih potreba elektrolize vode za proizvodnju vodonika. Iako ovo na prvi pogled djeluje kao značajan nedostatak, važno je sagledati širi kontekst. Električna energija koja se koristi u Dillingerovom procesu dolazi iz obnovljivih izvora, što znači da se emisije pomjeraju sa tačke proizvodnje čelika na tačku proizvodnje električne energije, ali uz mogućnost potpune dekarbonizacije čitavog lanca ako se osigura zelena struja. Dillinger je upravo zbog toga sklopio dugoročni ugovor sa kompanijom Verso Energy, koja će proizvoditi zeleni vodonik koristeći PEM elektrolizu pogonjenu obnovljivom energijom. Odabir PEM tehnologije se pokazao opravdanim zbog njene fleksibilnosti i sposobnosti brzog prilagođavanja promjenjivim opterećenjima, što je ključno za rad sa povremenim izvorima poput solarne i vjetroenergije.

Izazov vode

Povećana potrošnja vode predstavlja dodatni izazov. PEM elektroliza zahtijeva izuzetno čistu vodu (provodljivosti manje od 0,0556 μS/cm), što podrazumijeva skupe sisteme za prečišćavanje poput reverzne osmoze i dejonizacije. Elektrolizeri troše devet litara čiste vode po kilogramu vodonika, a u DRI procesu nastaje 540 kg vodene pare po toni DRI (19). Iako ukupna potrošnja raste, studije pokazuju da povećanje udjela obnovljive energije djelimično kompenzuje dodatne potrebe zbog ušteda od eliminacije rudarenja i prerade fosilnih goriva (29). Za Dillinger, ovo podrazumijeva razvoj strategija za efikasno upravljanje vodnim resursima, potencijalno korištenje tretiranih otpadnih voda i implementaciju sistema za reciklažu vode.

Ključni problem je što se regija Saarland suočava sa sve većim izazovima u pogledu vodnih resursa. Prema podacima njemačkih vlasti, Saarland spada u regione s najizraženijim promjenama usljed klimatskih promjena. Vlada Saarlanda je prepoznala ozbiljnost situacije i pokrenula izradu „Master plana za sigurno vodosnabdijevanje do 2040. godine" (Masterplan „Zukunftssichere Wasserversorgung im Saarland 2040") (30). Stoga, Dillinger će morati razviti strategije za efikasno upravljanje vodenim resursima, potencijalno korištenje tretiranih otpadnih voda i reciklažu vode. Međutim, ovaj lokalni problem s vodom ne mora predstavljati ograničavajući faktor za Dillingerovu tranziciju. Prema njemačkoj

nacionalnoj strategiji za zeleni vodonik planira se izgradnja trasnacionalnog cjevovodnog sistema za transport zelenog vodonika širom Njemačke, H2-Startnetz, što znači da bi se sam vodonik za DRI-EAF proces mogao proizvoditi u regijama bogatijim vodom i povoljnijim uslovima za elektrolizu, a zatim cjevovodom dopremati u Saarland. Ovim se potpuno zaobilazi pitanje lokalne oskudice vode i ne dovodi u pitanje proizvodnja zelenog čelika.

Pored toga, projekat Power4Steel donosi i značajne logističke izazove, naročito kada je riječ o transportu vodonika. Transport vodonika od proizvodnog postrojenja CarlHYng u francuskom Carlingu do Dillingerove željezare biće omogućen prekograničnom cjevovodnom mrežom mosaHYc, što predstavlja primjer uspješne evropske saradnje u izgradnji infrastrukture za vodonik.

Ekonomska opravdanost i finansiranje

Rezultati pokazuju da je zeleni čelik trenutno skuplji od tradicionalnog, cijena mu je veća za 30 do 54% (22). Tradicionalni čelik košta 400 do 550 evra po toni, dok zeleni čelik košta 600 do 850 evra po toni. Postoji nekoliko razloga zbog kojih je proizvodnja zelenog čelika skuplja. Elektroliza zahtijeva ogromne količine električne energije, a cijena zelene struje, od sunca i vjetra, još uvijek nije dovoljno niska. PEM elektrolizeri su skupi jer koriste plemenite metale poput iridijuma i platine. Takođe, izgradnja potpuno novih DRI i EAF postrojenja zahtijeva ogromna ulaganja. Dillinger ulaže 4,6 milijardi eura u Power4Steel projekat (25) (17). Iako je zeleni čelik danas skuplji, zbog primjene ekonomskih mjera (EU ETS i CBAM) očekuje se da će se razlika u cijeni smanjivati do 2030. godine. Pored tehnoloških i energetskih izazova, na tržišni položaj proizvođača čelika u Evropskoj uniji utiče i CBAM, mehanizam kojim se od 2026. godine postepeno uvode troškovi povezani sa emisijama CO_2 pri uvozu određenih proizvoda, uključujući čelik. U pojednostavljenom proračunu prikazanom u ovom radu, za primjer uvoza tradicionalnog BF-BOF čelika je dobijen dodatni trošak od približno 46,82 €/t, dok za čelik sa emisijama od 0,339 t CO_2/t, koje odgovaraju razmatranom DRI-EAF procesu, proračun ne pokazuje pozitivnu CBAM obavezu. Negativna vrijednost dobijena proračunom ne predstavlja mogućnost ostvarivanja finansijskog prihoda, već se tumači kao odsustvo dodatne CBAM obaveze. Budući da se CBAM primjenjuje na uvoz u EU, a ne na proizvođače unutar EU, ova razlika može posredno poboljšati konkurentski položaj Dillingera u odnosu na uvezeni čelik sa većim emisijama, ali ne predstavlja njegov direktan finansijski prihod. Prikazani proračun ukazuje na značaj troškova povezanih sa emisijama CO_2 za konkurentnost različitih tehnologija proizvodnje čelika. CBAM može smanjiti cjenovnu prednost uvezenog čelika sa većim intenzitetom emisija, ali sam po sebi ne dokazuje ukupnu ekonomsku konkurentnost zelenog čelika. Ona zavisi i od troškova proizvodnje vodonika, cijene električne energije, investicionih troškova i budućeg razvoja tržišta emisijskih jedinica. Zbog toga se smanjenje razlike u troškovima proizvodnje do 2030. godine može posmatrati kao mogući razvojni scenario, ali ne i kao izvjestan ishod.

Istovremeno, proizvođači koji nastave da koriste tradicionalni BF-BOF čelik suočiće se sa sve većim CBAM i EU ETS troškovima, koji će njihov proizvod činiti sve skupljim i manje konkurentnim na evropskom tržištu. Za razliku od Dillingera koji ulaže u tranziciju, ove kompanije rizikuju gubitak tržišnog udjela i propuštanje prilike da se pozicioniraju kao lideri u održivoj proizvodnji, što će ih dugoročno koštati više nego sam proces dekarbonizacije.

Zbog napretka tehnologije, očekuje se da će cijena elektrolizera padati, da će elektroliza postati efikasnija i da će cijena zelene struje nastaviti da opada. Ovo će direktno smanjiti cijenu zelenog vodonika, a time i zelenog čelika.Dillinger je već osigurao 1,7 milijardi evra finansiranja za Power4Steel projekat (17). Ovo pokazuje da investitori vjeruju u isplati-

vost projekta, uprkos tome što je zeleni čelik trenutno skuplji. Ukoliko se ostvare očekivana smanjenja troškova proizvodnje zelenog vodonika i električne energije, Dillinger bi zahvaljujući ranijim ulaganjima u novu tehnologiju mogao steći povoljniji položaj na tržištu. Transformacija Dillingerove proizvodnje na zeleni čelik ima dalekosežne implikacije za građevinski sektor, koji učestvuje sa oko 37% u ukupnim svjetskim emisijama CO_2. Dillinger proizvodi debele čelične limove koji su ključni materijal u mostogradnji, izgradnji vjetroturbina, visokim zgradama i drugoj infrastrukturi, te će početak proizvodnje niskougljeničnog čelika pod brendom PURE STEEL + od 2028. godine omogućiti građevinskim kompanijama da značajno smanje ugljenični otisak svojih projekata. Korištenje zelenog čelika u konstrukcijama može smanjiti emisije u građevinskom sektoru za 10–15% po projektu, što je posebno značajno s obzirom na to da građevinski materijali čine najveći dio emisija u ovoj industriji. Evropska unija kroz Direktivu o energetskim svojstvima zgrada sve više zahtijeva smanjenje ugljeničnog otiska u građevinarstvu, što dodatno podstiče potražnju za zelenim čelikom. Na taj način, Dillingerov Power4Steel projekat ne predstavlja samo industrijsku tranziciju, već i ključni preduslov za održivu transformaciju cjelokupnog građevinskog sektora u Evropi, omogućavajući gradnju sa znatno manjim uticajem na klimu.

Situacija na Zapadnom Balkanu

Dok se u Evropi vode diskusije o tranziciji ka zelenom čeliku, na Balkanu postoje dva potpuno različita puta. U Srbiji, željezara u Smederevu (HBIS Group) i dalje radi na tradicionalnu tehnologiju visoke peći (BF-BOF) sa kapacitetom od oko 2 miliona tona godišnje, pri čemu najveći dio proizvodnje plasira na tržište EU (31). Međutim, nove zaštitne mjere EU i CBAM ozbiljno ugrožavaju njen izvoz, a procjenjuje se da bi godišnji CBAM trošak mogao iznositi između 150 i 220 miliona evra (32), što je čini izuzetno ranjivom na rastuće cijene ugljenika. S druge strane, u regionu se sve više ulaže u zelene tehnologije, Albanija gradi prvu MIDA (EAF) fabriku u Evropi u Elbasanu sa investicijom od 150 miliona evra, kapacitetom od 700.000 do 750.000 tona godišnje i emisijama blizu nule (33). U Crnoj Gori slovenački SIJ Group iskazuje interesovanje za preuzimanje Željezare Nikšić što bi omogućilo održivu proizvodnju (34), dok Hrvatska (ABS Sisak) već koristi EAF tehnologiju fokusiranu na reciklažu i energetsku efikasnost (35). Najoštriji primjer posljedica neprilagođavanja jeste Bosna i Hercegovina, odnosno željezara Zenica, čija je proizvodnja čelika obustavljena u aprilu 2026. godine, ne kao rezultat ekološke vizije, već ekonomske neodrživosti, jer se nije uspjela prilagoditi novim tržišnim i regulatornim uslovima (36). Ove investicije i kontrastni primjeri jasno pokazuju da transformacija nije utopija, već ekonomska nužnost, čelik iz regiona dolazi iz ovih željezara, a njegovo porijeklo i proces proizvodnje direktno određuju njegovu cijenu i konkurentnost na tržištu EU. Zato je ključno da se zemlje regiona, pa i BiH, uključe u ovu tranziciju, kroz podršku investicijama, razvoj zelene energije i prilagođavanje novim regulatornim okvirima, kako ne bismo samo posmatrali kako naše željezare postaju istorija.

Na kraju, primjer Dillingera jasno ukazuje da je tranzicija ka zelenom čeliku ne samo ekološka, već i ekonomska nužnost. Zemlje Zapadnog Balkana, uključujući Bosnu i Hercegovinu, moraju hitno prilagoditi svoje industrijske politike kako bi izbjegle gubitak konkurentnosti na tržištu EU. To podrazumijeva podršku investicijama u DRI-EAF tehnologije, razvoj obnovljivih izvora energije i prilagođavanje CBAM mehanizmu, kako bi se izbjegao scenarij gašenja poput Željezare Zenica.

ZAKLJUČAK

Na osnovu studije slučaja Dillingerovog projekta Power4Steel, može se zaključiti da prelazak sa tradicionalnog BF-BOF procesa na DRI-EAF tehnologiju uz korištenje zelenog vodonika predstavlja tehnički ostvariv pristup značajnom smanjenju emisija CO_2, koje prema literaturnim podacima u povoljnim uslovima može dostići 90–95%, dok je za konkretne vrijednosti analizirane u ovom radu izračunato smanjenje od 82,4%. Iako endotermna priroda redukcije vodonikom zahtijeva dodatno dovođenje toplote, taj se izazov prevazilazi korištenjem zelene električne energije u električnoj lučnoj peći za topljenje direktno redukovanog željeza. Iako DRI+EAF proces zahtijeva osam do deset puta veću potrošnju električne energije, korištenjem obnovljivih izvora, kroz ugovor sa kompanijom Verso Energy i PEM elektrolizu, omogućava se potpuna dekarbonizacija lanca.

Ekonomski, zeleni čelik je trenutno skuplji za 30 do 54%, 600–850 €/t u odnosu na 400–550 €/t, prvenstveno zbog visokih troškova elektrolize i investicije od 4,6 milijardi evra. Mehanizmi EU ETS i CBAM postepeno povećavaju troškove emisija za tradicionalni čelik, čime se očekuje da će se razlika u cijeni između zelenog i tradicionalnog čelika smanjivati do 2030. godine. Zahvaljujući ranoj transformaciji, Dillinger bi do tada mogao steći značajnu tržišnu prednost.

Primjena niskougljeničnog čelika može značajno doprinijeti dekarbonizaciji građevinskog sektora, naročito kod objekata sa velikom potrošnjom čelika. Izvršeni proračun je pokazao da, za upoređene vrijednosti emisija, smanjenje jeste povezano sa proizvodnjom čelika i iznosi oko 82,4%, dok smanjenje ukupnog ugljeničnog otiska građevinskog projekta zavisi od udjela čelika i drugih izvora emisija. Projekat Power4Steel stoga predstavlja značajan primjer potencijala industrijske dekarbonizacije, čiji će se stvarni tehnički, ekološki i ekonomski rezultati moći pouzdanije ocijeniti nakon početka eksploatacije novih postrojenja.

Literatura

1. India TPTo. The Print. [Online].; 2025. Available from: https://theprint.in/india/atmospheric-co2-levels-reach-800000-year-high-in-2023-world-meteorological-organization-report/2553854/.
2. Paulina A., Gabriel B., Katherine C., & Wiliam C. Climate Change 2023: Synthesis Report. World Meteorological Organization, The Intergovernmental Panel on Climate Change; 2023.
3. Reuters, The Weather Network. [Online].; 2026 [cited 2026 7 17. Available from: https://www.theweathernetwork.com/en/news/weather/severe/europe-recorded-10-000-excess-deaths-during-late-june-heatwave-data-show.
4. UNEP. UNEP. [Online].; 2026. Available from: https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/facts-about-climate-emergency.
5. Association WS. World Steel Association. [Online].; 2025. Available from: https://worldsteel.org/climate-action/climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel/.
6. United Nations Climate Change. [Online].; 2015 [cited 2026 8 19. Available from: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf.
7. TEC-SCIENCE. TEC-SCIENCE. [Online].; 2018 [cited 2026 7 26. Available from: https://www.tec-science.com/material-science/steel-making/blast-furnace-process/.
8. NIST-JANAF Thermochemical Tables. [Online].; 2026 [cited 2026 7 16. Available from: https://janaf.nist.gov/.
9. Velling A. Factory. [Online].; 2020 [cited 2026 7 23. Available from: https://fractory.com/iron-carbon-phase-diagram/.
10. South Australian Green Hydrogen Study. Melbourn; 2017.
11. A D. Nature COmmunications. 2023 May.
12. Bin S. High-pressure proton exchange membrane water electrolysis: Current status and challenges in

hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 2024 May; 67: 390–405.
13. Bekaert. [Online]. [cited 2026 7 22. Available from: https://www.bekaert.com/en/hydrogen-generation/hydrogen-electrolysis-technology/pem.
14. Kumar SS. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy Reports. 2022 Nov; 8: 13793–13813.
15. Bekaert. [Online]. [cited 2026 7 22. Available from: https://www.bekaert.com/en/hydrogen-generation/hydrogen-electrolysis-technology/aem.
16. [Online]. [cited 2026 8 7. Available from: https://www.natrangroupe.com/en/medias/press-releases/mosahyc-first-cross-border-hydrogen-transport-network-france-germany.
17. Team SE. Eurometal. [Online].; 2026.
18. Bethlehem-Seidel S. [ESTEP Spring Dissemination Event].; 2025. Available from: https://www.estep.eu/assets/Events/2025/Spring-Diss-event-2025/Session-3/1_Power4Steel-with-MemKoWI-ESTEP-spring-Dissemination-2025-6-5-Krakow-sess3-1st-for-pdf.pdf.
19. Finn M. OXMAINT. [Online].; 2026 [cited 2026 Avgust 5. Available from: https://oxmaint.com/industries/steel-plant/green-steel-hydrogen-dri-eaf-production-guide.
20. Communications N. Nature Communications. [Online].; 2025. Available from: https://www.nature.com/articles/s41467-025-64440-9/figures/3.
21. Immonen J., Weingaertner D., Ketkaew J., & Prasher R. Process intensification and comparison of electrolytic hydrogen green steel plants for industrial decarbonization. Journal of Cleaner Production. 2025 Jaanuar; 490.
22. Jiuju C, Wenqiang S, Qiang Y, Jianjun W, Yuhang Z. Chinamet. [Online].; 2025. Available from: https://www.chinamet.cn/gt/en/article/doi/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20250257.
23. Carbon Chain. [Online].; 2026 [cited 2026 8 29. Available from: https://learn.carbonchain.io/en/articles/13132740-how-to-calculate-cbam-costs.
24. Steelorbis. [Online].; 2025 [cited 29 8 2026. Available from: https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/eu-cbam-committee-votes-to-accept-benchmark-and-default-emission-values-1424207.htm.
25. Saarstahl. Saarstahl. [Online].; 2025. Available from: https://en.saarstahl.com/news/press-releases/next-milestone-on-the-path-to-climate-neutral-steel-production-eur-1-7-billion-financing-package-for-power4steel-successfully-secured/?id=19950.
26. Zhou M., Ai L., Hong L., Sun C., Yuan Y., & Tong S. Comparison of Microstructures of Magnetite Reduced by H2 and CO under Microwave Field. Hydrogen—The New Energy Vector for the Transition of Industries "Hard to Abate"). 2023 Jul.
27. Netherlands Entreprise Agency. [Online].; 2025. Available from: https://english.rvo.nl/topics/waterstof/certificate-green-hydrogen.
28. LEFEBVRE S. VERSO ENERGY awarded funding under the Connecting Europe Facility (CEF) Energy. Paris; 2026. Available from: https://verso.energy/wp-content/uploads/2026/02/PR-CEF-CarlHYng-EN.pdf.
29. Conte M. Investigating the economic and environmental. In ; 2022; Milan: IOP Conference Series:Earth and Environmental Science.
30. | Ministerium für Umwelt KMAuV. Saarland. [Online].; 2025. Available from: https://www.saarland.de/mukmav/DE/aktuelles/aktuelle-meldungen/2025/wasser/q1/pm_2025-01-15_masterplan-wasser.
31. RTS. RTS. [Online].; 2026. Available from: https://rts.rs/lat/vesti/ekonomija/5988529/zelezara-smederevo-celik.html.
32. BalancingEnergy. BalancingEnergy. [Online].; 2026. Available from: https://balancing.energy/cbam-cost-exposure-and-compliance-execution-in-eu-serbia-industrial-supply-chains/.
33. Panorama. Panorama. [Online].; 2025. Available from: https://www.panorama.com.al/kurum-internation-investon-150-milione-euro-per-prodhim-celiku-te-gjelber/.
34. Gore VC. Vlada Crne Gore. [Online].; 2025. Available from: https://www.gov.me/clanak/zeljezara-ponovo-u-fokusu-investitora-sij-group-u-crnoj-gori.
35. Danieli Automation. [Online].; 2024. Available from: https://www.dca.it/en/news/danieli-innovaction-meeting-two-more-and-last-plant-visits_12_898.htm.
36. Maksimović D. Deutsche Welle. [Online].; 2026. Available from: https://www.dw.com/bs/kraj-%C4%8Delika-u-bih-zeni%C4%8Dki-gigant-na-koljenima/a-76920138.
37. Bhaskar A., & Assadi M, Somehsarei HN. Supplementary material.; 2020. Available from: https://zenodo.org/records/3951012/files/Supplementary_material.pdf.
38. Dilinger. Geschäftsbericht 2024. Dillingen/Saar:, AG der Dillinger Hüttenwerke; 2024.

GREEN HYDROGEN IN THE FUNCTION OF DECARBONIZATION OF THE CONSTRUCTION SECTOR - A CASE STUDY OF THE TRANSFORMATION OF THE DILLINGER STEEL PLANT

Author: MARIJA MALIĆ, SARA MALINOVIĆ
e-mail: marija.malic@student.aggf.unibl.org
Mentor: Full Prof. Igor Jokanović
Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, University of Banja Luka

Introduction: The paper analyzes steel production decarbonization using green hydrogen through a case study of Dillinger's Power4Steel project, with implications for the construction sector.

The Aim: To analyze the technical feasibility and economic viability of Power4Steel, quantify emission reductions and energy increases, and assess the project's contribution to construction sector decarbonization.

Material and Methods: A case study of Dillinger was used. Data were collected from primary and secondary sources. Analysis included a comparative analysis of BF-BOF and DRI-EAF processes, with an additional stoichiometric calculation.

Results: Literature data indicate 90-95% CO_2 emission reduction using DRI-EAF with green hydrogen, while the calculation in this paper, based on specific emission values of 1,921 kg CO_2/t for BF-BOF and 339 kg CO_2/t for DRI-EAF, shows a reduction of 82.4%. DRI-EAF requires 8-10 times higher electricity consumption. Stoichiometric calculation confirmed H_2 consumption of 54.1 kg/t Fe. Green steel is 30-54% more expensive (600-850 €/t). Dillinger plans production from 2028 and climate neutrality by 2045 with an investment of €4.6 billion. CBAM analysis shows traditional steel has a cost of 46,82 €/t, while green steel has none.

Conclusion: Power4Steel is technically feasible with significant emission reduction, but presents challenges (endothermicity, 8-10 times higher electricity, higher water consumption). Although green steel is currently more expensive, CBAM and EU ETS are expected to make it competitive by 2030. The project is crucial for the sustainable transformation of Europe's construction sector.

Keywords: green hydrogen; decarbonization; steel; DRI-EAF; Power4Steel; construction sector; Dillinger