

Trpimir Kujundžić, Tomislav Korman,
Ruža Purkić, Magdalena Perić
Zagreb

MOGUĆNOST PRIMJENE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE PRI EKSPLOATACIJI ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

UDK: 622.35:620.92

Rukopis primljen za tisak: 4. 4. 2025.

Klesarstvo i graditeljstvo, Pučišća

Izvorni znanstveni članak

Original scientific paper

U skladu sa strategijom razvoja Republike Hrvatske i težnjom k energetskej tranziciji na čiste energije, u potrazi za zelenom energijom budućnosti primjenjivom u rudarstvu, analizira se mogućnost primjene alternativnih izvora energije. S obzirom na to da hrvatska energetska strategija prepoznaje vodik i njegovu upotrebu u strategiji razvoja transporta u periodu do 2030. godine u cilju smanjenja emisija ugljičnog dioksida, uspoređen je vodik s drugim pogonskim energijama, dizelskim gorivom i električnom energijom. Opisane su metode proizvodnje vodika, one već razvijene i one u eksperimentalnoj fazi. Napravljen je pregled dosadašnjih dostignuća u rudarskim tvrtkama u svijetu koje nastoje implementirati svjetska nastojanja k dekarbonizaciji gospodarstva i redukciji emisija ugljičnog dioksida. Analizira se mogućnost primjene obnovljivih izvora energije pri eksploataciji arhitektonsko-građevnog kamena.

Ključne riječi: rudarstvo; energija; arhitektonski građevni kamen

UVOD

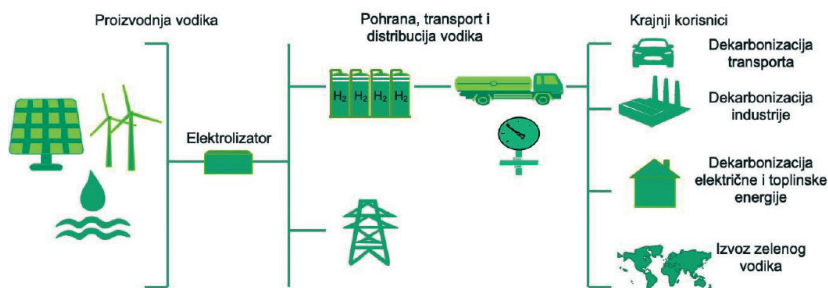
Republika Hrvatska (HR) posljednjih godina ulaže značajne napore u smanjenje emisija CO₂ iz energetskog sektora i gospodarstva. S obzirom na to, teži se razvoju proizvodnje energije iz obnovljivih izvora energije (OIE), kao i povećanju energetske učinkovitosti. Cilj je Hrvatske da do 2030. godine 36,6 posto električne energije u bruto neposrednoj potrošnji bude iz obnovljivih izvora. U taj postotak ulazi i povećanje OIE-a u segmentima prometa te grijanja i hlađenja. Energetska strategija HR (*Narodne novine*, broj 25/20), kao i Niskougljična strategija HR (*Narodne novine*, broj 63/21), predviđa smanjenje emisija stakleničkih plinova u iznosu od oko 74 posto u 2050. godini u odnosu na emisije iz 1990. godine. Pored navedenoga, Energetska strategija HR prepoznaje vodik kao alternativno gorivo te predviđa njegovu uporabu u prijevozu s ciljem ostvarenja gore navedenih ciljeva. Vodik kao alternativno gorivo te mogućnosti njegove uporabe u prometu s ciljem smanjenja emisija CO₂ predviđen je također Strategijom prometnog razvoja

Republike Hrvatske za razdoblje od 2017. do 2030. godine (*Narodne novine*, broj 84/17.) i Nacionalnim okvirom politike za uspostavu infrastrukture i razvoj tržišta alternativnih goriva u prometu (*Narodne novine*, broj 34/17.). Sljedeći zakoni reguliraju mogućnosti korištenja vodika:

- Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o biogorivima za prijevoz (*Narodne novine*, broj 52/21.) – predviđeno je uvođenje vodika na tržište HR. U skladu s tim Zakonom obveznik stavljanja na tržište biogoriva, odnosno OIE-a u prijevozu obavezan je izvještavati o uporabi vodika kao alternativnog goriva na tržištu.
- Zakon o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva (*Narodne novine*, broj 120/16.) – definirane su tehničke specifikacije za mjesta za opskrbu vozila vodikom.

Hrvatska strategija za vodik (*Narodne novine*, broj 40/22) temelji se na četiri glavne smjernice razvoja gospodarstva zasnovanog na vodikom kako slijedi:

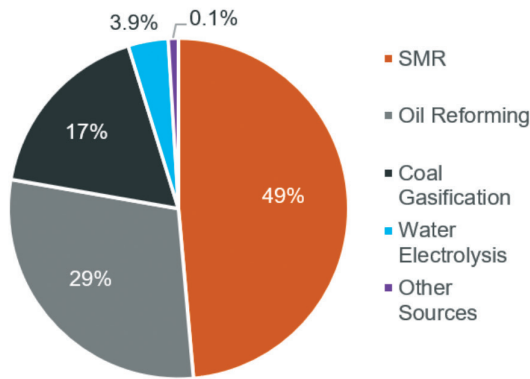
1. Proizvodnja vodika – omogućiti proizvodnju „zelenog“ vodika koja će se prvenstveno orijentirati na njegovu proizvodnju s niskim udjelom ili bez emisija CO₂.
2. Skladištenje i transport vodika – prenamjena postojeće naftno-plinske cjevovodne infrastrukture za transport vodika u dugoročnom razdoblju. U kratkoročnom razdoblju očekuje se da će mjesta proizvodnje biti na mjestima potrošnje za potrebe industrijskih procesa.
3. Korištenje vodika – omogućavanje korištenja vodika u industriji, poljoprivredi i sl., kao i razvoj uporabe vodika u transportu osiguravanjem poticaja za kupnju vozila i plovila na vodik.
4. Obrazovanje, istraživanje i inovacije – osiguravanje inovacija, razvoja i komercijalizacije novih tehnologija u proizvodnji „zelenog“ vodika te njegova sigurnog korištenja i transporta.



Slika 1. Shema proizvodnje i korištenja vodika
(Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine, NN 40/22)

Upotreba vodika u kemijskim procesima i gorivim lancima poznata je već niz godina, a prvi motori s unutrašnjim sagorijevanjem pogonjeni su vodikom već prije 200 godina. Na slici 2 prikazana je svjetska proizvodnja vodika ovisno o primijenjenoj metodi.

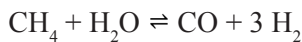
Global Hydrogen Production by Method



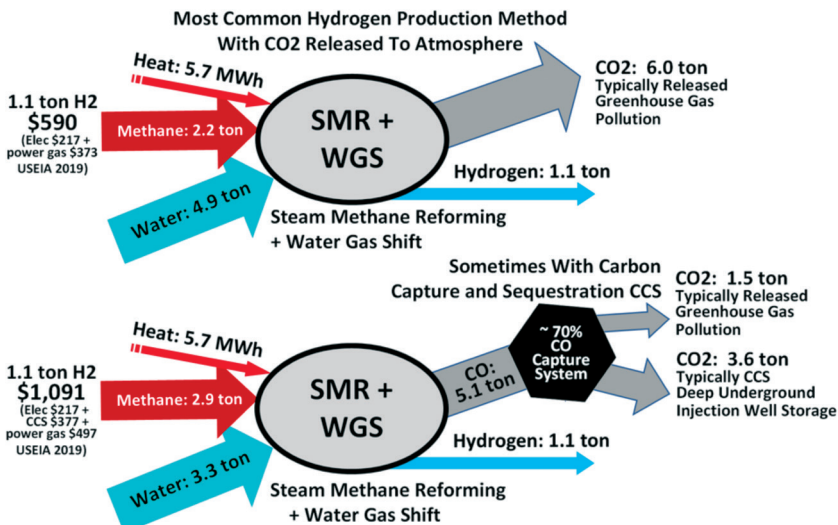
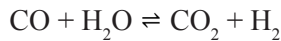
(Dincer & Acar, 2015)

Slika 2. Svjetska proizvodnja vodika (Dincer & Acar, 2015.)

Iz slike je vidljivo da se u svijetu 49 posto vodika dobiva reformacijom metana vodenom parom. Taj proces prikazan je sljedećom relacijom:

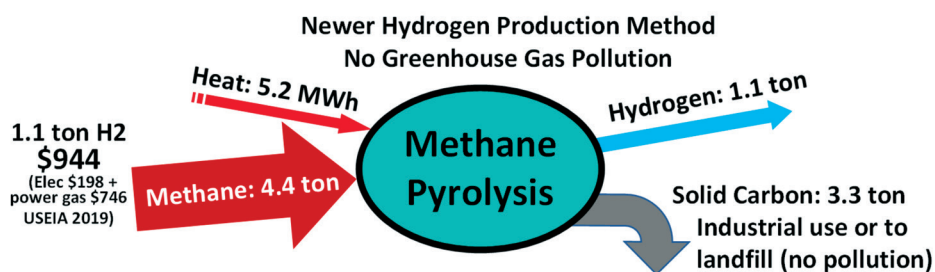


Ta reakcija izuzetno je endotermična odnosno zahtijeva dovođenje velike količine topline pa je tako za reformaciju oko 2 tone metana potrebno otprilike 6 MWh topline, a sa 5 tona vode dobije se jedna tona vodika, ali i velika količina ugljičnog monoksida. Da bi se smanjila količina ugljičnog monoksida, primjenjuje se reakcija ugljičnog monoksida s vodom pri čemu se izdvaja dodatna količina vodika a ugljični monoksid pretvara se u ugljični dioksid:



Slika 3. Reformacija metana vodenom parom i skladištenje CO₂

Osim reformacijom metana vodenom parom, vodik se iz metana može proizvoditi pirolizom; na slici 4. shematski je prikazan taj proces. Iz otprilike 4 tone metana uz dovođenje 5 MWh topline dobije se 1 tona vodika i tri tone ugljika pri čemu nema izdvajanja ugljičnog dioksida. Cijena tako proizvedenog vodika manja je od proizvodnje reformacijom metana vodenom parom uz skladištenje ugljičnog dioksida.



Slika 4. Shematski prikaz proizvodnje vodika pirolizom metana

Oko 4 posto svjetske proizvodnje vodika dobiva se elektrolizom vode. To je postupak u kojem se prolaskom električne energije iz vode izdvaja kisik i vodik. Elektroliza vode učinkovita je 70-80 posto (20-30 posto gubitka konverzije), dok parna reformacija prirodnog plina ima toplinsku učinkovitost između 70 i 85 posto (Kalamaras et al., 2013.). Očekuje se da će električna učinkovitost elektrolize doseći 82-86 posto prije 2030. godine.

Fotoelektroliza jest jedan od obnovljivih načina proizvodnje vodika, koji pokazuje obećavajuću učinkovitost i cijenu, iako je još uvijek u fazi eksperimentalnog razvoja (Hamelinck & Faaij, 2002.). Trenutno je to najjeftiniji i najučinkovitiji način proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora. Fotoelektroda jest poluvodički uređaj koji apsorbira sunčevu energiju i istovremeno stvara potreban napon za izravnu razgradnju molekule vode na kisik i vodik. Reakcija ovisi o vrsti poluvodičkog materijala i intenzitetu sunca koje proizvodi gustoću struje od 10 do 30 mA/cm². Pri ovim gustoćama struje, napon potreban za elektrolizu približno je 1,35 V.

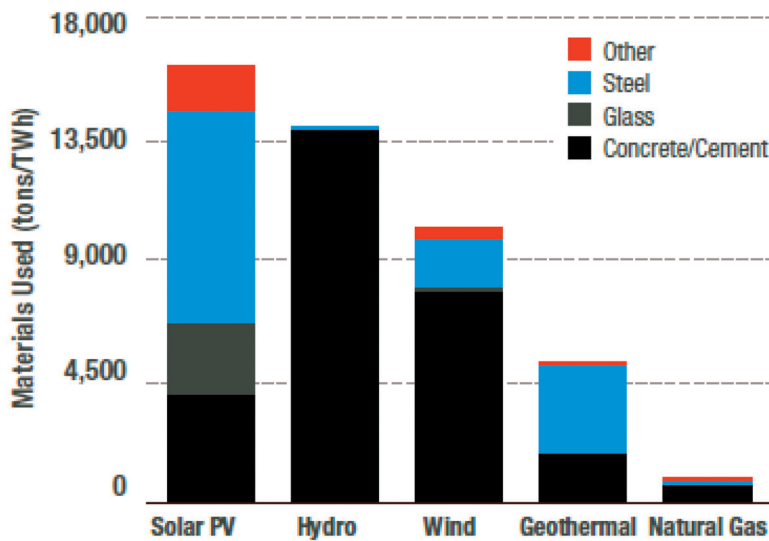
Biološki vodik može se proizvesti u bioreaktoru za alge (Hemschemeier et al., 2009.). U kasnim 90-im godinama 20. stoljeća otkriveno je da će alge, ako im se uskrati sumpor, prijeći s proizvodnje kisika, odnosno normalne fotosinteze, na proizvodnju vodika. Čini se da je proizvodnja sada ekonomski izvediva prelaskom granice od 7-10 posto energetske učinkovitosti (pretvorba sunčeve svjetlosti u vodik) (Melis, T., 2008.) s brzinom proizvodnje vodika 10-12 ml po litri kulture na sat (Jenvanitpanjakul, P., 2010.).

Bez obzira na to što je trenutno glavna svjetska proizvodnja vodika reformacijom metana izuzetno karbonski intenzivna, vodik je trenutno najvjerojatnije ključan čimbenik u dekarbonizaciji upotrebe energije i određenih kemijskih i mineralnih procesa. No, da bi vodik značajno pridonio prelasku na čistu energiju, mora se koristiti tzv. „zeleni“ vodik, vodik proizveden elektrolizom vode pogonjenom

obnovljivim izvorima energije. Proizvodnja velikih količina vodika obnovljivim izvorima energije, za sada, nije nimalo laka, ali ni jeftina.

Sukladno strategiji Europske unije za vodik (Europska komisija COM (2020.) 301 final), cijena vodika koji je proizveden iz fosilnih goriva trenutno iznosi oko 1,5 eura po kilogramu, ne uzimajući u obzir cijenu otpuštenog CO₂ u atmosferu (ova cijena ovisi o cijeni prirodnog plina te je podložna promjenama). Ako uz proizvodnju vodika omogućimo i hvatanje otpuštenog CO₂, onda je ta cijena oko 2 eura po kilogramu. Cijena proizvodnje obnovljivog vodika, odnosno proizvodnje vodika elektrolizom vode korištenjem električne energije iz OIE-a trenutno je oko 2,5 do 5,5 eura po kilogramu.

To je vidljivo i iz analize M.P. Millsa (2020.) gdje je kao primjer naveo da zamjena energije proizvedene jednom turbinom pogonjenom prirodnim plinom (veličine jedne stambene kuće) koja daje 100 MW električne energije (što je dovoljno za 75.000 domova) zahtijeva najmanje 20 vjetrenih turbina, svaka veličine kao washingtonski spomenik (u republici Hrvatskoj prosječne su visine oko 130 m), zauzimajući otprilike 26 kvadratnih kilometara zemljišta (Landon, S., 2017.). Isto tako, izgradnja vjetroelektrana zahtijeva enormne količine uobičajenih materijala kao što su beton, čelik i stakloplastika, kao i manje uobičajenih materijala uključujući rijetke metale poput disprozija i neodimija (slika 5).



Slika 5. Zahtjevi za građevnim materijalom za izgradnju različito pogonjenih elektroenergetskih postrojenja (Mills, M. P., 2020.)

Međutim, Mills navodi da nije kritično povećanje potražnje za uobičajenim materijalima (beton, staklo, željezo) premda je njihova proizvodnja u isto vrijeme vrlo energetska zahtjevna, već da je ključni izazov u lancu opskrbe i opterećenju okoliša u radikalnom povećanju zahtijevanih količina širokog spektra minerala.

Aktualni scenarij Svjetske banke vezano uz primjenu čistih energija predviđa povećanje od 1000 do 4000 posto u opskrbi s neodimijem u nadolazećim dekadama. U svijetu se trenutno otkopava 7000 tona neodimija koji je jedan od ključnih elemenata u proizvodnji električnih sustava za vjetroelektrane. Za proizvodnju poluvodiča u solarnim panelima za proizvodnju električne energije, rudarenje indija morat će se povećati za 8000 posto. Da bi bilo jasnije što znači to povećanje potražnje za materijalima potrebnima za proizvodnju zelene energije, Mills navodi primjer materijala potrebnog za izradu jedne automobilske električne baterije. Jedna takva baterija teška je otprilike 454 kg i za njezinu izradu potrebno je otkopati, transportirati i oplemeniti 226.796 kg ruda i otkrivke, a to je oko 20 puta više od 11.340 kg nafte koju potroši motor s unutarnjim sagorijevanjem kroz životni vijek automobila. U vezi s tim, ali nevezano za baterije, električni sustav električnog automobila treba 300 posto više bakra u usporedbi s konvencionalnim automobilom.

USPOREDBA VODIKA S DRUGIM GORIVIMA

Veliki izvori emisije ugljičnog dioksida u rudarstvu predstavljaju transport i oplemenjivanje mineralnih sirovina. Dok je problem dekarbonizacije transporta relativno „lako“ riješiti, put dekarbonizacije oplemenjivanja mineralnih sirovina, koja je povezana sa znatnom emisijom topline, prašine i ugljičnog dioksida, znatno je slabije definiran. Usporedbu vodika kao goriva u rudarstvu je potrebno razmatrati u odnosu na pogonske energije koje se najviše koriste.

Brojne su i poznate prednosti dizelskog goriva; ima veliku energetska gustoću, manipulacija je njime laka i relativno sigurna, a njegova upotreba nudi vrijednu fleksibilnost rudarskoj mehanizaciji. Potreban je značajan napredak u tehnologiji da bi „zeleni“ vodik (proizveden obnovljivim izvorima energije – sunce, vjetar...) postao cjenovno konkurentan dizelu. Do prije nekoliko godina nije se moglo ni zamisliti da bi cijena električne energije dobivene fotoelektričnim solarima bila niža od električne energije dobivene izgaranjem ugljena, međutim, u današnje vrijeme na tom području dolazi do značajnog napretka.

Dizel je ipak, opterećen emisijom stakleničkog plina i njegova buduća upotreba nije u skladu s nastojanjem rudarskih tvrtki u svijetu za postizanjem nulte emisije do 2050. godine ili čak i prije. Primjere takvih nastojanja susrećemo u razvojnim stremljenjima poznatih svjetskih rudarskih tvrtki: Broken Hill Proprietary (BHP), Fortescue Metal Group Ltd. (FMG), Anglo American i Glencore.

Tvrtka BHP nabavlja baterijske električne lokomotive za transport željezne rude od površinskih kopova u Zapadnoj Australiji do luke Port Hedland. S obzirom na topografiju terena kojim prolazi pruga, istražiti će se i mogućnost rekupeativnog kočenja, odnosno proizvodnje električne energije i njezina skladištenja prilikom kočenja punih vlakova pri vožnji na nizbrdici prema luci. Uvođenjem električnih baterijskih lokomotiva planira se smanjiti emisija stakleničkih plinova na godišnjoj razini za 30 posto.

Australska tvrtka FMG u suradnji s tvrtkom Liebherr razvija prototip baterijskog električnog dampera nosivosti 240 tona. U damper će biti ugrađena baterija teška 15 tona, dugačka 3,6 m, široka 1,6 m i debljine 2,4 m s kapacitetom od 1,4 MWh te vremenom punjenja od svega 30 minuta. To je dio strategije dekarbonizacije tvrtke u cilju eliminacije fosilnih goriva iz njihovih površinskih kopova željezne rude s ukupnom vrijednosti investicija od 6,2 milijarde dolara, što uključuje zamjenu flote dampera pogonjenih dizelskim gorivom damperima pogonjenima električnim baterijama i zelenim vodikom.

Britanska multinacionalna rudarska tvrtka Anglo American plc sa sjedištem u Londonu najveći je svjetski proizvođač platine, s oko 40 posto svjetske proizvodnje, kao i veliki proizvođač dijamanta, bakra, nikla, željezne rude i ugljena za proizvodnju čelika. Tvrtka je 2022. godine predstavila i počela s testiranjem najvećeg rudarskog dampera pogonjenog vodikom u svojem rudniku platine Mogalakwena u Južnoj Africi. U suradnji s tvrtkom First Mode, Komatsuov dizelski pogonjen damper 930E-4 opremili su hibridnim pogonom s vodikovim gorivim člancima i električnim baterijama umjesto motora s unutarnjim izgaranjem. U originalu, Komatsuov damper teži 220 tona, ima nosivost 290 tona i troši oko 134 litre dizelskog goriva na sat. Naknadno opremanje samo jednog od ovih kamiona pogonskim agregatom koji radi na vodik umjesto na dizel, smanjila se emisija ugljičnog dioksida za 2700 tona godišnje – otprilike isto kao da bi se 700 dizelskih osobnih automobila sklonilo s ceste. Plan Anglo Americana bio je naknadno opremiti takvim hibridnim pogonom još 40 dampera u Mogalakweni do oko 2024. godine – a pogonili bi se zelenim vodikom proizvedenim u lokalnoj solarnoj elektrani – i na kraju uvesti sustav na ostatak od približno 400 dampera za prijevoz u njihovoj globalnoj floti. Zajedno s drugim aspektima programa FutureSmart Mining,TM ove promjene imaju za cilj smanjiti emisije stakleničkih plinova Anglo Americana za 30 posto do 2030. i postići ugljičnu neutralnost do 2040. godine.

Međunarodna kompanija Glencore sa sjedištem u Švicarskoj ima u svojem sastavu arktičke rudnike nikla Raglan na sjeveru Kanade. Raglan rudnici imaju u svojem sastavu tri podzemna rudnika iz kojih se godišnje iskopa 1,5 milijuna tona rude nikla. U 2020. godini u tim je rudnicima iskopano 39.230 t nikla, 8988 t bakra i 827 t kobalta. Glencore je četvrti po veličini proizvođač nikla na svijetu. Kanadska je vlada u okviru projekta energetske diverzifikacije sjevera zemlje sufinancirala uvođenje obnovljive energije u dizelske autonomne električne mreže, spajanjem najsuvremenijih tehnologija pohrane i naprednog kontrolera na vjetroturbinu arktičkog razreda, na lokaciji Glencoreovih arktičkih rudnika. Projekt je povezoao vjetroturbinu s inovativnim sustavom skladištenja električne energije konfiguriranim u troslojnoj arhitekturi. Tri razine sastoje se od: brzog prijelaznog zamašnjaka za filtriranje velikih varijacija snage vjetra kratkog trajanja; Li-Ion baterija za pokretanje dizelskih generatora ili gorivih članaka za pomoć pri prijelazu; i elektrolizatora s vodikovom gorivim člankom s membranom za izmjenu protona, kako bi se smanjio gubitak energije vjetra tijekom duljih vremenskih

razdoblja. Kombinacija baterije i zamašnjaka uspješno je neutralizirala fluktuacije snage vjetra bez uključivanja sigurnosnih mehanizama dizelske električne mikromreže rudnika. Vjetroturbina je također postigla 97,3 posto raspoloživosti od postavljanja 2014. godine, zamjenjujući 3,4 milijuna litara dizelskog goriva i smanjivši ispuštanje stakleničkih plinova za 9110 tona tijekom 18 mjeseci. Tijekom 20-godišnjeg životnog vijeka vjetroturbine, projekt ima za cilj postići uštede procijenjene na 41 milijun američkih dolara u gorivu, radu i održavanju, čineći Glencoreove RAGLAN rudnike ekonomski otpornijima na kolebanja cijene nikla.

U skladu s tim nastojanjima, vodik se zapravo ne natječe s dizelskim gorivom nego s drugim alternativnim pogonskim energijama primjenjivima u rudarskom transportu koje također rezultiraju nultom emisijom stakleničkih plinova. Upotreba dizelskog goriva u velikim mobilnim rudarskim kamionima generira 30 do 50 posto (a ponegdje i do 80 posto) emisije stakleničkih plinova u rudnicima. Električni kamioni pogonjeni vodikovim gorivim člancima riješili bi taj problem, ali bi to također bilo moguće postići baterijskim električnim kamionima (s baterijama napunjenima iz obnovljivih izvora) sa ili bez dodatnog napajanja iz trolej mreže. Prema tome neophodno je usporediti električna rudarska vozila s gorivim člancima pogonjenima vodikom s električnim vozilima pogonjenima punjivim baterijama.

Neupitno je da električna vozila pogonjena punjivim električnim baterijama imaju prednost u odnosu na električna vozila pogonjena gorivim člancima kod lakih vozila gdje su nosivost i doseg manji problem. Prosječni automobil dnevno se vozi manje od 40 km, što nikako nije slučaj kod velikih rudarskih kamiona koji su u upotrebi cijeli dan, svaki dan bez zaustavljanja. I osim toga je svaki dodatni kilogram baterije, kilogram mineralne sirovine koji se ne može prevesti.

Bez obzira na to što su električna vozila s gorivim člancima skuplja za implementaciju, prikladnija su za dugolinijski prijevoz u odnosu na vozila s baterijama zbog većeg radijusa doseg. Ostale prednosti vozila s vodikovim gorivim člancima su eliminacija dizelskih čestica, manja buka, manja emisija topline i kraće vrijeme punjenja.

POTROŠNJA ENERGIJE I UGLJIČNI OTISAK U EKSPLOATACIJI I OBRADI ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Ukupna količina energije potrebna za dobivanje arhitektonsko-građevnog kamena predstavlja zbroj energije utrošene u pojedinim fazama. Prva faza odnosi se na eksploataciju, odnosno energiju utrošenu na vađenje i manipulaciju blokova. Druga faza uključuje transport sirovine do postrojenja za obradu i oblikovanje. Treća, ujedno i energetski najzahtjevnija faza, obuhvaća rezanje, oblikovanje i završnu obradu kamena.

Prema istraživanju Gazija i sur. (2012.), pri eksploataciji mramora dijaman-tnom žičnom pilom utrošak energije iznosi oko 75 kWh po bloku, odnosno 6,25 kWh/m³. Međutim, stvarna potrošnja energije tijekom eksploatacije znatno je veća jer uključuje energiju potrebnu za manipulaciju i transport blokova, kao i

energiju za pomoćne uređaje poput kompresora i pumpi. Prema podacima Alshboul i Alzoubija (2008.), ukupna energija utrošena na vađenje blokova u kamenolomima kreće se od 14 kWh do 20 kWh po 1 m² ploča.

Na temelju dostupnih podataka iz 17 studija o utjecaju na okoliš eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena u RH za period od 2016. do 2023., prosječna potrošnja dizelskog goriva za zahvate u navedenom periodu iznosi prosječno 533 kt, odnosno 167 kt po zahvatu. Posljedično, procjenjuje se da novi zahvati generiraju oko 2,6 kt CO₂ ekvivalenta godišnje, odnosno 1 kt CO₂ ekvivalenta po zahvatu (Vujeva, 2024.). Specifična potrošnja dizelskog goriva po zahvatu iznosi prosječno 23,68 kg/m³, dok je ugljični otisak 86 kg/m³ CO₂ ekvivalenta. U usporedbi s ukupnim emisijama stakleničkih plinova u Hrvatskoj, eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena čini manje od 0,009 posto ukupnih emisija.

Primjena obnovljivih izvora u eksploataciji arhitektonsko-građevnog kamena ima veliki potencijal budući da većina mehanizacije za rezanje i dobivanje blokova upravo koristi električnu energiju kao primarni izvor. Tu prednost mogu iskoristiti kamenolomi koji imaju pristup električnoj mreži, što, međutim, često nije slučaj.

Potrošnja energije za transport blokova od kamenoloma do postrojenja za obradu i preradu primarno ovisi o udaljenosti. Primjerice, za prijevoz na 30 km potrebno je 140 kWh po bloku, odnosno 8 kWh/m³ (Gazi et al., 2012.). Alshboul i Alzoubi (2008.) ističu da specifična potrošnja energije za transport varira između 0,8 i 1,6 kWh/t/km. Nastojanja za smanjenje potrošnje energije i emisija usmjerena su uglavnom na povećanje učinkovitosti dizelskih motora, dok su strojevi pogonjeni obnovljivim izvorima energije još uvijek u eksperimentalnoj fazi i uglavnom dostupni većim rudarskim tvrtkama.

Faza obrade i prerade kamena energetski je najzahtjevnija, pri čemu ukupna potrošnja energije može značajno varirati ovisno o dimenzijama finalnog proizvoda, načinu obrade te fizikalno-mehaničkim svojstvima obrađivanog kamena. Prema Alqadi i sur. (2023.), u pogonima s mjesečnim kapacitetom od 2000 m² ploča, prosječna potrošnja električne energije iznosi 11.000 kWh, odnosno oko 5 kWh/m². Traverso i sur. (2010.) navode da potrošnja energije pri obradi talijanskog mramora iznosi 324,4 kWh/m³ za piljene ploče i 492,2 kWh/m³ za polirane pločice, dok se kod grčkog mramora kreće između 100 i 160 kWh/m³ za piljene ploče te od 300 do 700 kWh/m³ za polirane ploče (Gazi et al., 2012.).”

U obradi kamena, piljenje blokova u ploče predstavlja energetski najzahtjevniji proces. Gazi i sur. (2012.) navode da potrošnja energije pri piljenju blokova gaterima iznosi 693,7 kWh po bloku, odnosno 58,4 kWh/m³, dok monolame za oblikovanje blokova troše 106,9 kWh po bloku, odnosno 8,91 kWh/m³. Osim toga, ustanovljeno je da potrošnja energije za poliranje ploča iznosi 1,13 kWh/m², dok strojevi za profiliranje rubova troše 2,25 kWh/m².

Budući da je faza obrade i oblikovanja iznimno energetski zahtjevana, intenzivno se radi na povećanju energetske učinkovitosti i primjeni obnovljivih izvora

energije. U tom kontekstu, sve se češće koriste frekvencijski pretvarači za regulaciju brzine motora, servokontrolirani radni organi za poliranje koji optimiziraju potrošnju energije dinamičkim prilagodavanjem pritiska, energetske učinkoviti kompresori s promjenjivom brzinom te sustavi za iskorištavanje otpadne topline i vode.

Pogoni za preradu također su pogodni za korištenje energije iz obnovljivih izvora, budući da se najčešće radi o halama s velikom natkrivenom površinom, što omogućuje postavljanje fotonaponskih ploča i smanjenje udjela električne energije iz tradicionalnih izvora.

TRANSFORMACIJA RUDARSKOG SEKTORA U HRVATSKOJ KROZ OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE

U sektoru rudarstva i građevinarstva cementna industrija ima najveći udio u emisiji stakleničkih plinova. Ukupne emisije iz cementne industrije čine čak 8 posto globalnih emisija CO₂, stoga je razumljivo da upravo taj sektor najviše ulaže u zelenu tranziciju (Andrew, 2018.). Ovaj trend slijede i hrvatske tvrtke, a u pojedinim su segmentima i predvodnice u zelenoj tranziciji.

Jedan od vodećih primjera jest tvrtka CEMEX Hrvatska d.d., koja je na globalnoj razini pokrenula inicijativu 'Budućnost na djelu' s ciljem smanjenja emisija CO₂ i povećanja energetske učinkovitosti. Plan predviđa smanjenje emisija CO₂ za 40 posto po toni cementnog proizvoda u odnosu na 1990. godinu, te smanjenje ugljičnog udjela u betonu za 35 posto. Dugoročni cilj je do 2050. godine postići proizvodnju ugljično neutralnog betona, pri čemu će ključnu ulogu imati povećanje udjela čiste električne energije na 55 posto (Cemex, 2025.).

Osim toga, tvrtka aktivno provodi projekte energetske učinkovitosti, uključujući izgradnju fotonaponskih elektrana. U sklopu ranijih projekata povećana je energetska učinkovitost pogona Sv. Juraj, gdje je instalirana solarna elektrana snage 300 kW, koja godišnje proizvede 460 MWh električne energije.

Tvrtka nastavlja s prijelazom na obnovljive izvore kroz tri nova projekta solarnih elektrana. Planirana je izgradnja solarnih elektrana u cementarama Sv. Juraj (Kaštel Sućurac) i Sv. Kajo (Solin), kao i u proizvodnom pogonu Podsused (Zagreb). Na krovovima svojih objekata Cemex će instalirati solarne elektrane ukupne snage 6,34 MW. U cementari Sv. Juraj predviđena je izgradnja fotonaponskog sustava snage 3,79 MW, dok će u cementari Sv. Kajo biti postavljen sustav od 2,14 MW. U proizvodnom pogonu Podsused planirana je instalacija solarne elektrane snage 0,41 MW (Cemex, 2025.).

Još jedan značajan primjer primjene obnovljivih izvora energije u rudarstvu u Hrvatskoj jest tvrtka Holcim, koja već godinama aktivno radi na smanjenju ugljičnog otiska i povećanju udjela obnovljivih izvora energije. Holcim Hrvatska d.o.o. predvodi zelenu tranziciju te je do 2023. godine smanjio emisije CO₂ (opseg 1) po toni cementa za 35 posto u odnosu na 1997. godinu. Tvrtka je dio energije iz tradicionalnih izvora zamijenila obnovljivim izvorima, a u okviru rekonstrukcije



Slika 6. Shematski prikaz hvatanja ugljika u tvornici u Koromačnu (Holcim, 2025.).

dotrajale kotlovnice, ugradila je fotonaponsku elektranu kojom je predviđena godišnja ušteda od oko 18.000 kWh električne energije (Holcim, 2025.).

Tvrtka nastavlja s aktivnim radom na zelenoj tranziciji putem projekta „KODECO net zero“ (Bogdan, 2024.). Njegovom realizacijom Holcim će postati prvi proizvođač ugljično neutralnog cementa u Hrvatskoj i jedan od prvih u Europi. Projekt obuhvaća hvatanje ugljika u tvornici u Koromačnu te njegov pomorski transport do skladišta na Mediteranu (Carbon Capture and Storage, CCS), a završetak izgradnje planiran je do kraja 2028. (slika 6). Time će se značajno doprinijeti postizanju klimatskih ciljeva Hrvatske, uz planirano sigurno skladištenje 3,67 milijuna tona CO₂ u sljedećih deset godina. Projekt će omogućiti smanjenje emisija stakleničkih plinova za 107 posto u odnosu na referentni scenarij.



Slika 7. Fotonaponska elektrana u proizvodnom pogonu pilane Kamen d.d. Pazin (Kamen Pazin, 2025.)

Zelena tranzicija obuhvatila je i sektor arhitektonsko-građevnog kamena, a primjer dobre prakse predstavlja tvrtka Kamen d.d. Pazin. U sklopu projekta „Povećanje energetske učinkovitosti i korištenje obnovljivih izvora energije u proizvodnom pogonu pilane Kamen Pazin, tvrtka je instalirala fotonaponsku elektranu ukupne snage 253,80 kW.

Elektrana proizvodi energiju iz obnovljivih izvora i priključena je na postojeći sustav (slika 7.). Glavni cilj projekta jest smanjenje potrošnje energije za 30,24 posto u proizvodnom pogonu te za 76,39 posto u mehaničkoj radionici tvrtke Kamen d.d. Pazin, u usporedbi s potrošnjom prije njegove provedbe. Također, projekt ima za cilj povećati udio obnovljivih izvora energije u bruto potrošnji za 1.152.818,01 kWh godišnje te smanjiti emisiju CO₂ za 603,29 tona godišnje.

Uz postavljanje fotonaponske elektrane, projekt uključuje i niz mjera za smanjenje energetske potrošnje, poput modernizacije sustava rasvjete uvođenjem energetski učinkovitijih rješenja, kompenzacije jalove energije, ugradnje sustava za frekventnu regulaciju brzine motora, zamjene postojećih kompresora suvremenim i učinkovitijim vijčanim kompresorima te postavljanja dizalica topline za grijanje i hlađenje proizvodnog pogona.

ZAKLJUČAK

Primjena obnovljivih izvora energije u sektoru eksploatacije i obrade arhitektonsko-građevnog kamena ključan je korak prema održivijem rudarstvu. Tvrtke poput Holcim (Hrvatska) d.o.o., CEMEX Hrvatska d.d. i Kamen d.d. Pazin prednjače u implementaciji zelenih tehnologija i strategija održivog poslovanja. Njihova ulaganja u solarnu energiju, modernizaciju proizvodnih postrojenja te projekte hvatanja i skladištenja ugljika pokazuju da je moguće uskladiti industrijsku proizvodnju s ciljevima zaštite okoliša. Primjena fotonaponskih sustava na krovovima industrijskih objekata, prelazak na strojeve s gorivim člancima pogonjenima vodikom ili primjena električnih vozila pogonjenima punjivim baterijama samo su neki od primjera kako se može smanjiti ugljični otisak sektora. Međutim, unatoč svim pozitivnim aspektima zelene energije, postoje značajna ograničenja koja otežavaju njihovu implementaciju i potpunu dekarbonizaciju sektora.

Jedan od ključnih problema jest nepouzdanost obnovljivih izvora energije, osobito solarne i energije vjetra, koje ovise o vremenskim uvjetima. Kamenolomi i proizvodni pogoni zahtijevaju stabilnu i kontinuiranu opskrbu električnom energijom, što u mnogim slučajevima nije moguće bez oslonca na tradicionalne izvore energije poput fosilnih goriva. Dodatni izazov predstavlja infrastruktura s obzirom na to da se brojni kamenolomi i proizvodni pogoni nalaze u udaljenim mjestima bez pristupa električnoj mreži. Iako solarne elektrane mogu smanjiti troškove energije, njihova isplativost često ovisi o poticajima i subvencijama, što postavlja pitanje dugoročne ekonomske održivosti bez potpore države ili EU-fondova.

Primjena vodika u strojevima s gorivim člancima ima veliki potencijal, no za sada je još uvijek u eksperimentalnoj fazi. Hrvatska strategija za vodik prepoznala

je njegovu važnost i prednost u odnosu na fosilna goriva. Međutim, kako bi vodik imao ključnu ulogu u tranziciji prema čistoj energiji, potrebno je koristiti tzv. „zeleni“ vodik, koji se dobiva elektrolizom vode uz korištenje obnovljivih izvora energije. Trenutačno, proizvodnja velikih količina takvog vodika predstavlja značajan tehnički i ekonomski izazov, budući da je proces složen i zahtijeva visoka ulaganja. Rudarska djelatnost i industrija morat će stoga pronaći ravnotežu između ekološke odgovornosti i realnih tehnoloških i ekonomskih ograničenja.

LITERATURA

1. Alqadi, S. B.; Alamleh, D.; Eldin, I. N. & Eldin, H. N. (2023.): „A comparative life cycle energy and green house emissions of natural and artificial stone-manufacturing phase“. *Results in Engineering*, 18, 101055.
2. Andrew, R. M. (2018.): „Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2017“. *Earth System Science Data*, 10(4), 2213-2239.
3. Anglo American (2022.): *Anglo American unveils a prototype of the world's largest hydrogen-powered mine haul truck – a vital step towards reducing carbon emissions over time*, URL, <https://www.angloamerican.com/media/press-releases/2022/06-05-Datum pristupa 14. 5. 2024>.
4. Bogdan, A. (2024.): „Projekt hvatanja i trajnog skladištenja CO₂“. *Građevinar*, 76(07.), 675-679.
5. C. N. Hamelinck and A. P. C. Faaij (2002.): „Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass“, *Journal of Power Sources*, vol. 111, no. 1, pp. 1–22.
6. Cemex (2025.): <https://www.cemex.hr/buducnost-na-djelu-u-brojevima> (datum pristupa 11. 2. 2025.).
7. *Cost reduction and performance increase of PEM electrolyzers* (PDF). fch.europa.eu. *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*. Datum pristupa 14. 5. 2024.
8. Dincer, I. & Acar, C. (2015.): „Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability“. *International journal of hydrogen energy*, 40(34), 11096.
9. Gazi, A.; Skevis, G. & Founti, M. A. (2012.): „Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant“. *Journal of cleaner production*, 32, 10-21.
10. Hemschemeier, Anja; Melis, Anastasios; Happe, Thomas (2009.): „Analytical approaches to photobiological hydrogen production in unicellular green algae“. *Photosynthesis Research*. 102 (2–3): 523–40. doi:10.1007/s11120-009-9415-5.
11. Holcim (2025.): <https://www.holcim.hr/mediji-i-tisak/objave-za-medije/najnovije-objave-za-medije/article/solarni-paneli-u-tvornici-cementa> (Datum pristupa 15. 2. 2025.).
12. Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine, *Narodne novine*, broj 40/22.
13. ITM – Hydrogen Refuelling Infrastructure (2017.): (PDF). level-network.com. Datum pristupa 14. 5. 2024.
14. Jenvanitpanjakul, Peesamai (2010.): *Renewable Energy Technology And Prospect On Biohydrogen Study In Thailand* (PDF). Steering Committee Meeting and Workshop of APEC Research Network for Advanced Biohydrogen Technology. Taichung: Feng Chia University.

15. Kalamaras, Christos M.; Efstathiou, Angelos M. (2013.): *Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments*". Conference Papers in Energy. 2013: 1–9.doi:10.1155/2013/690627. Datum pristupa 14. 5. 2024.
16. Kamen d.d.. 2025., URL <https://www.kamen.hr/hr/eu-projekt/> (Pristupljeno: 2025-11-2)
17. Landon Stevens, „The Footprint of Energy: Land Use of U.S. Electricity Production,” *Strata*, June 2017.
18. Melis, T. (2008.): *Maximizing Light Utilization Efficiency and Hydrogen Production in Microalgal Cultures*. DOE Hydrogen Program, 2008 Annual Progress Report.
19. Mills, M. P. (2020.): *Mines, minerals, and “green” energy: a reality check*. Manhattan Institute, New York, SAD.
20. NPROXX (2021.): *Cleaning up the future of mining. Hydrogen Truck Case Study | First Mode*, <https://www.nproxx.com/case-study-hydrogen-powered-mine-truck-for-anglo-american-mine/> Datum pristupa 3. 5. 2023.
21. Odluka o donošenju nacionalnog okvira politike za uspostavu infrastrukture i razvoj tržišta alternativnih goriva u prometu. *Narodne novine*, broj 34/17.
22. Odluka o donošenju strategije prometnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje od 2017. do 2030. godine. *Narodne novine*, broj 84/17.
23. Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, *Narodne novine*, broj 25/20.
24. Strategija niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu. *Narodne novine*, broj 63/21.
25. Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu. Europska komisija COM(2020) 301 final, Bruxelles, 8. 7. 2020.
26. TUGLIQ Energy Co. (2016.): Glencore RAGLAN Mine Renewable Electricity Smart-Grid Pilot Demonstration. Glencore <https://tugliq.com/wp-content/uploads/2019/09/2016-11-11-tugliq-raglan-public-report-en.pdf> (datum pristupa 11. 5. 2024.).
27. Vujeva, I. (2024.): *Ugljični otisak rudarskih zahvata eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena u Hrvatskoj u prvih 10 godina članstva u Europskoj uniji: analiza studija utjecaja zahvata na okoliš: završni rad (Završni rad)*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:144507>

THE POSSIBILITIES FOR THE USE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY IN THE EXPLOITATION OF STONE FOR ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

S u m m a r y

In accord with the developmental strategy of the Republic of Croatia and its aspiration for a transition to clean energy, in search of a green energy for the future applicable in mining, the possibilities for the use of alternative sources of energy are analysed. In view of the fact that the Croatian energy strategy is cognisant of hydrogen and its use in the transportation development strategy up to the year 2030, the aim being to reduce carbon dioxide emissions, hydrogen is compared with other forms of motive power, those using diesel and electricity. Methods for the production of hydrogen are discussed, those already feasible and those in the experimental phase. A review is given of achievements made to date in extraction industry firms worldwide in their endeavours to decarbonise the economy and reduce carbon dioxide emissions. The possibilities for the employment of renewable sources of energy in the extraction of architectural and construction industry stone are analysed.

Key words: extraction industry; energy; stone for architecture and construction