

Upotreba vodika kao alternativnog pogonskog goriva u rudarstvu

Purkić, Ruža

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:671664>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij Rudarstvo

**UPOTREBA VODIKA KAO ALTERNATIVNOG POGONSKOG GORIVA U
RUDARSTVU**

Završni rad

Ruža Purkić

R4270

Zagreb, 2022. godina



KLASA: 602-01/22-01/65
URBROJ: 251-70-11-22-2
U Zagrebu, 14.09.2022.

Ruža Purkić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/65, URBROJ: 251-70-11-22-1 od 27.04.2022. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

UPOTREBA VODIKA KAO ALTERNATIVNOG POGONSKOG GORIVA U RUDARSTVU

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

UPOTREBA VODIKA KAO ALTERNATIVNOG POGONSKOG GORIVA U RUDARSTVU

Ruža Purkić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U potrazi za gorivom budućnosti primjenjivim u rudarstvu, razmatra se vodik. Opisane su metode dobivanja vodika, one već razvijene i one u eksperimentalnoj fazi. Uspoređen je vodik s drugim pogonskim gorivima, dizelom i električnom energijom, te je objašnjena modifikacija standardnog dizelskog motora u dualni motor pogonjen i dizelom i vodikom te je uspoređen s dizelskim motorom. Navedena je problematika proizvodnje i financiranja rudarskih projekata koji uključuju vodikov pogon. Napravljen je i pregled dosadašnjih dostignuća po tvrtkama koje se bave primjenom vodika u rudarstvu.

Ključne riječi: rudarstvo, alternativna goriva, vodik, dekarbonizacija, gorive ćelije
Završni rad sadrži: 24 stranice, 8 slika, 12 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentori: Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF
Ocjenjivači: Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Mario Klanfar, izvanredni profesor RGNF

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. METODE PROIZVODNJE VODIKA.....	2
2.1. Reformiranje prirodnog plina	2
2.2. Elektroliza vode	3
2.3. Rasplinjavanje ugljena.....	3
2.4. Rasplinjavanje biomase	4
2.5. Pretvorba biomase posredništvom mikroorganizama.....	5
2.6. Termokemijski ciklusi razdvajanja vode	5
3. USPOREDBA VODIKA S OSTALIM GORIVIMA	6
3.1. Usporedba vodika s dizelom.....	6
3.2. Usporedba pogona vodikom s baterijskim pogonom	6
4. USPOREDBA UČINKOVITOSTI DIZELSKIH MOTORA S MOTOROM POGONJENIM VODIKOM	8
5. BUDUĆNOST PRIMJENE VODIKA KAO GORIVA U RUDARSTVU	11
5.1. Financiranje projekata	11
5.2. Vodik i rudnici virtualni simpozij (<i>Hydrogen and Mines Virtual Summit</i>).....	11
5.2.1. Fortescue Metals Group.....	12
5.2.2. Anglo American.....	12
5.2.3. Hitachi.....	12
5.3. Napredak postignut u rudarstvu na polju uporabe vodika kao pogonskog goriva... 13	
5.3.1. Anglo American.....	13
5.3.2. Fortescue Metals Group (FMG)	15
5.3.3. Copper Mountain Mining	16
6. ZAKLJUČAK	18
7. POPIS LITERATURE	20

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Elektrolizer proizvođača Nel (“Nel Hydrogen” 2022)	3
Slika 4-1. Emisija NO _x u ppm u odnosu na različite količine zamjene vodikom u postocima pri opterećenju motora od 40% i 1400 okretaja po minuti (Mirica i dr., 2015)	9
Slika 4-2. Emisija NO _x u ppm u odnosu na opterećenje motora u postocima za dizel, dodavanje vodika bez EGR-a i s 10% i 20% EGR-a (Hoang i Pham, 2020)	10
Slika 5-1. Rudnik platine Mogalakwena, Limpopo, Južnoafrička Republika (“Anglo American South Africa” 2022)	14
Slika 5-2. Najveći hibridno pogonjeni kamion vodikom i električnim baterijama (Mining.com, 2022.)	15
Slika 5-3. Bušilica za minske bušotine (International Mining, 2022.)	16
Slika 5-4. Kop Copper Mountain (Mining.com, 2022)	17
Slika 5-5. Komatsu 980E- 5 (“Komatsu”, 2022)	17

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	MPa	tlak
t	°C	temperatura
P	kW	snaga
Q	l/min	protok fluida

1. UVOD

Rudarstvo se u prošlosti, baš kao i danas, smatralo onečišćujućim zanimanjem. Razlozi takvog stava danas su uglavnom s ekološkog aspekta, naime poznato je da je rudarski sektor jedan od najvećih uzročnika emisija ugljičnog dioksida. Europska Unija, ali i ostatak svijeta, želi postići dekarbonizaciju u što kraćem vremenskom periodu, u najvećoj mogućoj količini. Kao i svi ostali sektori gospodarstva, i rudarstvo se mora razvijati i težiti potpunoj dekarbonizaciji.

Potaknuta problemima s kojima se susrećemo trenutno u rudarstvu (visoka emisija ugljičnog dioksida, velika potražnja i potrošnja energije i logistički problemi kod skladištenja goriva), a i znatiželjom i težnjom za promjenama, odlučila sam istražiti mogućnosti napretka i razvoja novih tehnologija u rudarstvu uporabom vodika kao alternativnog pogonskog goriva. Cilj je utvrditi metode proizvodnje vodika, one u široj primjeni i one u razvoju, usporediti vodik s drugim gorivima i usporediti dizelske motore s vodikovim kako bismo znali prednosti i mane njegove uporabe u rudarstvu. Također ću se osvrnuti na postojeće pomake u rudarstvu kad je u pitanju uporaba vodika i istražiti mogućnosti daljnjeg razvoja i primjene u budućnosti. Smatram da je vodik vrlo obećavajuće gorivo i ima široke mogućnosti primjene ne samo u rudarstvu, nego i u svim drugim sektorima i aspektima ljudskog života. Nadam se da ću kroz pisanje ovog rada i proučavanje literature naučiti više i potvrditi svoje stavove.

2. METODE PROIZVODNJE VODIKA

Vodik ne postoji kao zaseban spoj u atmosferi, iako je dostupan u velikim količinama. Moguće ga je dobiti kemijskim postupcima izdvajanja iz njegovih spojeva, kao što su voda, fosilna goriva, vodikov sulfid i slični spojevi (Shadidi i dr., 2021).

Većina vodika danas se dobiva iz pretvorbe prirodnog plina. Neke od metoda proizvodnje vodika su već dobro poznate, neke tek u razvoju, a neke nove će se, sigurno, razviti tek u budućnosti. U ovom radu, osvrnuti ćemo se na sljedeće metode: reformiranje prirodnog plina, elektroliza vode, rasplinjavanje ugljena, rasplinjavanje biomase, pretvorba biomase posredništvom mikroorganizama i termokemijski ciklusi razdvajanja vode.

Valja napomenuti da bi vodik, kako bi se napravio značajan doprinos prelazu na zelenu energiju, trebao dolaziti iz procesa koji koriste obnovljive izvore energije i ne stvaraju ugljikove spojeve kao među/ nusproizvod (Weiss i Klotz, 2020). Neke od metoda koje ćemo obraditi su upravo takve, dok druge nisu iako svejedno i uporabom vodika proizvedenog takvim metodama, doprinosi se dekarbonizaciji.

2.1. Reformiranje prirodnog plina

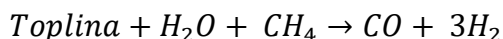
Ova je metoda relativno jeftina i trenutno se njome proizvodi preko 90% svjetskog vodika.

Metoda se bazira na endotermnoj reakciji koja koristi metan i vodenu paru i tako troši toplinu. Proces se izvodi pod tlakom od 3 do 25 bara uz prisustvo katalizatora čime se metan spaja s vodenom parom i tvori vodik, ugljikov monoksid i male količine ugljikovog dioksida. Na sličan se način proizvode i etanol, propan i benzin.

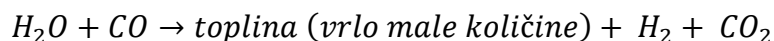
Da bismo proveli ovu metodu, najprije je potrebno proizvesti ugljični monoksid reakcijom vodene pare i metana. Zatim reagiraju ugljični monoksid i vodena para uz katalizator kako bi proizveli više vodika. Na kraju se iz plinske pare odvajaju ugljični dioksid i druge primjese kako bi se dobio čisti vodik.

Tekstom su opisane sljedeće kemijske reakcije:

- a) Reakcija reformiranja metana:



- b) Reakcija između ugljičnog monoksida i vodene pare:



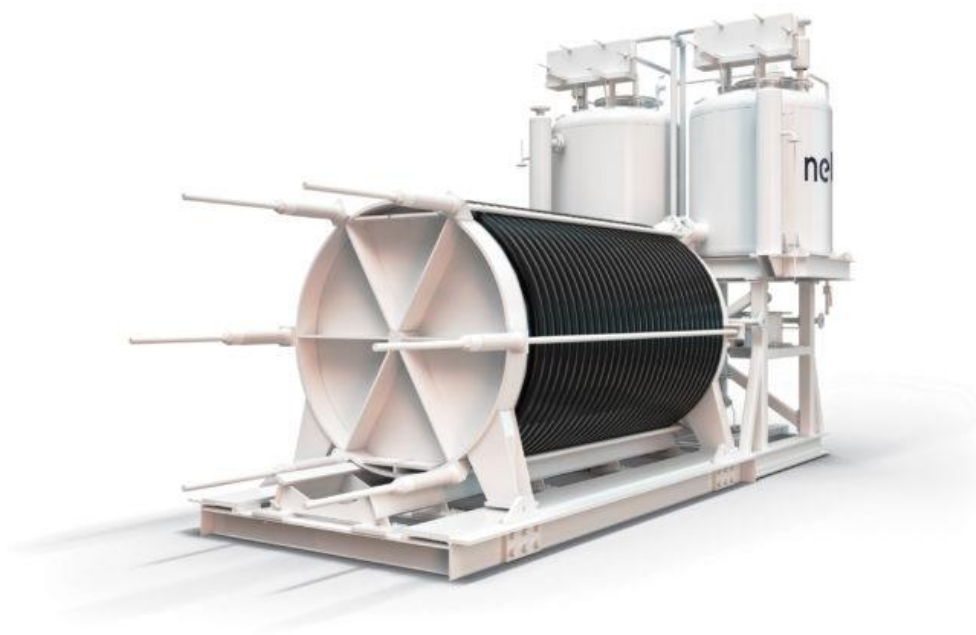
2.2. Elektroliza vode

Elektroliza vode, za razliku od reformiranja prirodnog plina, kao nusproizvod, ne proizvodi spojeve ugljika, a vodik može proizvesti koristeći obnovljivu i nuklearnu energiju, zbog čega je ekološki vrlo prihvatljiva. Vodik se dobiva razdvajanjem vode na kisik i vodik koristeći električnu energiju.

U elektrolizeru se elektroni odvajaju na anodi (oksidacija) i na katodi (redukcija). Na anodi se pojavljuje kisik, a na katodi vodik.

Električna energija potrebna za proces odvajanja može se dobiti iz na primjer, energije vjetra koji je obnovljivi izvor. Korištenjem energije vjetra, a i energija iz drugih obnovljivih izvora, možemo proizvesti vodik bez ugljikovih spojeva čime ne stvaramo efekt staklenika.

Za proizvodnju vodika elektrolizom vode, u rudarstvu se najčešće koriste elektrolizeri tvrtke Nel.



Slika 2-1. Elektrolizer proizvođača Nel (“Nel Hydrogen” 2022)

2.3. Rasplinjavanje ugljena

Rasplinjavanje ugljena je, kao i reformiranje prirodnog plina, relativno jeftina metoda, zbog čega su one uhodane industrijske metode proizvodnje vodika.

Ugljen je sastavljen od ugljične komponente nastale razlaganjem ostataka biljaka u davnoj prošlosti i mineralnih komponenata koje dolaze iz tla u kojem se ugljen nalazio. Ugljična komponenta sadrži pet glavnih elemenata; ugljik, vodik, kisik, sumpor i dušik.

Kako bismo razumjeli proces rasplinjavanja, prvo moramo objasniti proces izgaranja. Izgaranje je potpuna oksidacija ugljena koji stvara toplinu i ugljični dioksid- proizvod koji ne može dalje oksidirati pa ne gori. Međutim kod rasplinjavanja ne pokušavamo postići potpunu oksidaciju, već ugljenu dodajemo rasplinjavač. Metoda ne proizvodi energiju, endotermna je reakcija, pa u praksi zahtjeva dodavanje topline. Zbog toga ugljen može gorjeti kao gorivo.

Proizvodnja vodika iz ugljena započinje parcijalnom oksidacijom s dodanim kisikom, čime dobivamo ugljični dioksid gorenjem. No, tako se ne stvara dovoljno topline da bi ugljen izgorio u potpunosti, već samo onoliko koliko je potrebno da se započne rasplinjavanje. Proizveden ugljični dioksid koristi se kao rasplinjavač, koji daljnjom reakcijom s ugljikom u ugljenu i dodatkom topline, stvara ugljični monoksid. Ugljični monoksid zatim reagira s dodanom vodenom parom, čime dobivamo vodik i ugljični dioksid.

2.4. Rasplinjavanje biomase

Biomasa se ne rasplinjava tako brzo kao ugljen jer stvara dodatne spojeve vodika i ugljika u smjesi plinova, pogotovo kad nema kisika. Zbog toga proces zahtjeva dodani korak kojim se ti spojevi rastavljaju pomoću katalizatora.

Sadržaj i složenost biomase jako varira, a celuloza je jedna od njenih najvažnijih komponenti.

Superkrično rasplinjavanje vodom je obećavajuća hidrotermalna metoda za dobivanje plinovitih, tekućih i krutih bio-produkata bogatih vodikom i bio-ulje pri visokim temperaturama i tlakovima. Pokušava se postići superkrično stanje vode ($t > 374^{\circ}\text{C}$, $p > 22,1 \text{ MPa}$), vrlo blizu kritične točke jer u tom stanju voda lagano hidrolizira prirodne polimere biomase.

Gdje su: t – temperatura u stupnjevima Celzija ($^{\circ}\text{C}$)

p – tlak u mega Paskalima (MPa)

2.5. Pretvorba biomase posredništvom mikroorganizama

Metoda koristi sposobnosti mikroorganizama da konzumiraju i razgrade biomasu i otpuštaju vodik. Dugoročno gledano, ova metoda ima mogućnost komercijalno proizvoditi vodik, ovisno u kojem se smjeru bude razvijala.

Kao organska materija potrebna za konzumaciju mikroorganizama, mogu se koristiti rafinirani šećeri, kukuruzna stočna hrana ili otpadna voda. Metode bazirane na razgradnji mikroorganizama ne koriste svjetlost pa se često nazivaju i „Tamna fermentacija“.

Mikroorganizmi stvaraju vodik izravno, u procesu izravne fermentacije vodika i mogu rastaviti vrlo složene spojeve na mnoštvo različitih načina. Enzimi mogu spojiti nusprodukte iz nekih od načina na koji mikroorganizmi rastavljaju složene spojeve, da proizvedu vodik.

Za proizvodnju vodika koristeći sposobnosti mikroorganizama, koriste se mikronske elektrolitičke ćelije. To su uređaji koji stvaraju vodik kombinirajući energiju i protone koji su dobiveni razlaganjem organske materije, uz pomoć malih količina električne struje.

Ova metoda je još uvijek u razvoju, znanstvenici pokušavaju pronaći jeftinije organske materijale i određuju najpogodniju vrstu mikroorganizama, kako bi najjeftinije i najefikasnije proizveli najveće količine vodika. Metoda je vrlo obećavajuća.

2.6. Termokemijski ciklusi razdvajanja vode

Termokemijski ciklusi razdvajanja voda sastoje se od nekoliko kemijskih procesa koji koriste energiju topline da proizvedu vodik i kisik iz vode.

Za izravno razdvajanje vode u jednom koraku, potrebna je temperatura viša od 2000 °C. Postojeća oprema nije bila otporna na tako visoke temperature, pa je započeto istraživanje razdvajanja vode u više ciklusa, pri manjim temperaturama. Ciklusi se istražuju i razvijaju unutar zadnjih pedeset godina, unutar različitih kategorija, s razvitkom različitih tehnologija opisanih različitim brojem ciklusa i najvišim temperaturama rada (Shadidi i dr., 2021).

3. USPOREDBA VODIKA S OSTALIM GORIVIMA

Da bi razumjeli kako prelazak na vodik kao gorivo utječe na rudarstvo, koje su mu mane i prednosti u odnosu na pogonska goriva koja su najčešće zastupljena danas u rudarstvu, usporedit ćemo vodik s dizelom i baterijama na temelju složenosti procesa transporta i utjecaja na dekarbonizaciju (Weiss i Klotz, 2020).

3.1. Usporedba vodika s dizelom

Dizel je gorivo koje ispunjava gotovo sve rudarske zahtjeve. Može proizvesti mnogo energije, lagano je i relativno sigurno za korištenje, te pruža fleksibilnost za rad rudarskih operatera. Da bi vodik postao ekonomski povoljniji od dizela, tehnologija proizvodnje se mora još puno unaprjeđivati. Očekuje se da je to moguće ostvariti u budućnosti.

Međutim, dizel kao gorivo ima veliku manu, koja svakim danom postaje sve veća, on naime izgaranjem stvara puno plinova koji stvaraju efekt staklenika. Upravo zbog toga, dizel ima nesigurnu ulogu čak i u rudarstvu, koje također želi postići nula emisija stakleničkih plinova do 2050. Možemo zaključiti da se zbog nesigurne budućnosti dizela (u smislu njegove uporabe i raširenosti), vodik zapravo ne natječe s dizelom, već s drugim mogućnostima za transport materijala koje ne emitiraju stakleničke plinove.

Trenutno, gorivo korišteno za pogon velike mobilne rudarske opreme, stvara 30-50% (a može i do 80%) emisija I. stupnja na radilištu. Vodikom dobivenim u procesima u kojima je korišten obnovljivi izvor energije, pogonjena električna vozila bi otklonila te emisije baš kao i električna vozila s baterijskim pogonom punjenim obnovljivim elektricitetom. Zato je nužno, možda i bitnije, usporediti vodikov pogon s baterijskim pogonom.

3.2. Usporedba pogona vodikom s baterijskim pogonom

Poznato je da je baterijski pogon u prednosti u odnosu na vodikov za laka vozila jer mu nosivost i prijeđeni put ne stvaraju veliki problem. Rudarski strojevi rade cijeli dan, svaki dan bez stajanja, a svaka baterija koju bi morali nositi je dodatna težina koja oduzima kapacitet transporta mineralne sirovine. Dakle, što je veća težina baterija, manje se mineralne sirovine može transportirati.

Vodikom pogonjeni električni transportni strojevi, iako su skuplji, pogodniji su za duži transport jer pružaju veći domet nego baterijski pogonjeni strojevi, što je ključni kriterij kod

odabira vozila za dulji transport. Također, vodikom pogonjeni strojevi ne otpuštaju dizelove zagađujuće čestice, stvaraju manje buke, manje topline, te im je potrebno manje vrijeme punjenja u odnosu na baterijski pogonjene strojeve (Weiss i Klotz, 2020).

4. USPOREDBA UČINKOVITOSTI DIZELSKIH MOTORA S MOTOROM POGONJENIM VODIKOM

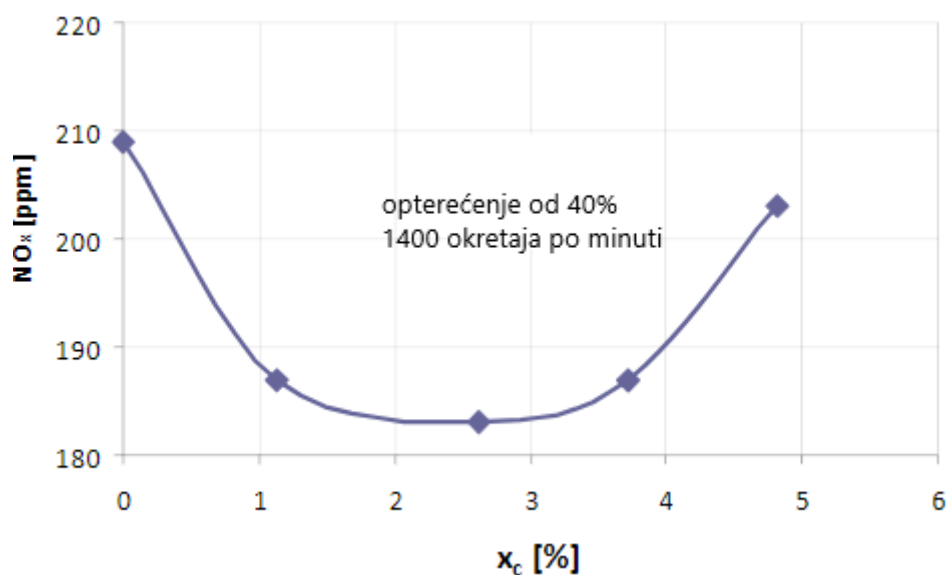
Pošto su dizelski motori najzastupljeniji kod rudarskih strojeva, nužno je usporediti baš dizelski motor s motorom pogonjenim vodikom kako bismo mogli razumjeti bitne razlike i prednosti koje promjena pogonskog goriva može donijeti rudarstvu.

Zbog visoke samozapaljivosti vodika, on teško može biti korišten kao samostalno gorivo u dizelskom motoru. Najbolja metoda za korištenje vodika u dizelskim motorima je dodati vodik dizelu, gdje se on pali plamenom iniciranim samozapaljenjem dizela. Također, u tom slučaju dobijemo homogeniju smjesu zraka i vodika što osigurava sva potrebna stanja za siguran rad motora; pouzdano paljenje vodika i efikasno izgaranje.

Provedeno je istraživanje na motoru s kompresijskim paljenjem pogonjenim vodikom. Određeni parametri izgaranja se mijenjaju dodavanjem/ zamjenom određenih količina vodika u dizelskom motoru; pri malim postocima zamjene dizela vodikom, maksimalni tlak pomalo raste zbog bržeg izgaranja smjese goriva i zraka i zbog smanjenja odgode samozapaljenja dizela. Povećanjem postotka zamjene dizela vodikom, u malim se motorima naglo povećava maksimalni tlak i stopa rasta maksimalnog tlaka zbog smanjenja količine dizela i povećanja odgode samozapaljenja. Toplinska se efikasnost povećava s povećanjem udjela vodika u smjesi goriva, pri istom opterećenju i brzini motora (kao što je i kod samo dizela), zbog poboljšanja procesa izgaranja goriva; vodik ima veliku difuzivnost, smjesa vodika i zraka je homogena i vodik ima bolja svojstva izgaranja, što omogućava manje trajanje procesa izgaranja.

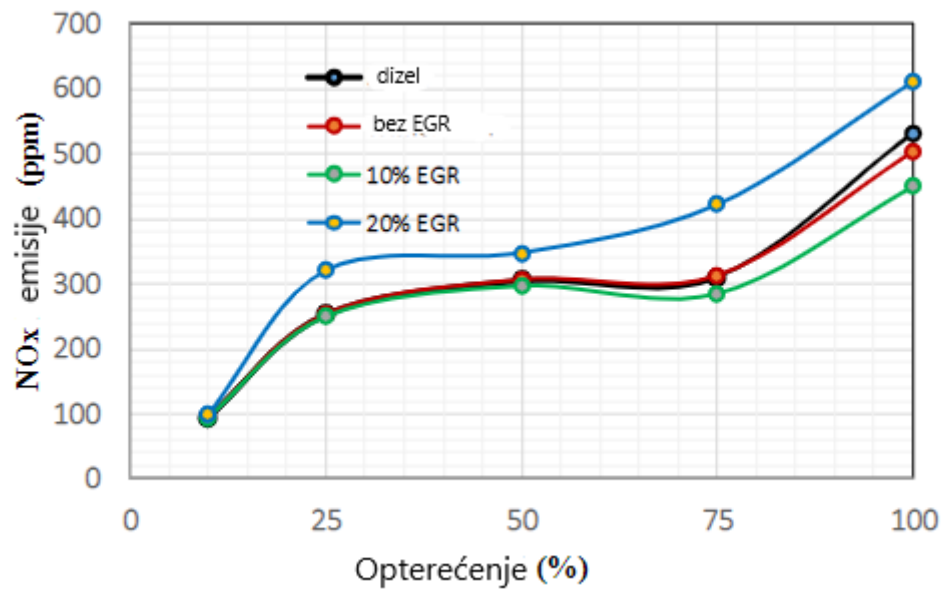
Slijedi istraživanje provedeno na motoru D2156 MTN8, pri režimu rada 40%, opterećenju od 53 ± 2 kW i s $1400 \pm 2\%$ okretaja po minuti.

U prvoj fazi je motor pogonjen samo dizelom, a u idućima dizelom i vodikom u različitim količinama zamjene (1.14%, 2.62%, 3.73%, 4.81%). Prema rezultatima istraživanja, uporaba vodika kao jednog od goriva u dualnom odnosu u motoru, smanjila je specifičnu potrošnju energije (BSEC- *brake specific energetic consumption*) za oko 8% u usporedbi sa standardnim dizelskim motorom, količina emisija NO_x je smanjena za 12% u usporedbi sa standardnim dizelskim motorom pri zamjeni dizela s vodikom od 2.62%, povećanjem postotka zamjene vodika, postepeno se smanjila količina emisija dima i ugljikovodika u odnosu na standardni dizelski motor. Ovime je dokazano da korištenje vodika kao dodatka dizelu ne zahtijeva velike promjene standardnih dizelskih motora, te da je ovakav način rada motora obećavajuća alternativa za motore s kompresijskim paljenjem (Mirica i dr., 2015).



Slika 4-1. Emisija NO_x u ppm u odnosu na različite količine zamjene vodikom u postocima pri opterećenju motora od 40% i 1400 okretaja po minuti (Mirica i dr., 2015)

Provedeno je i slično istraživanje na motoru D234MTZ, pri opterećenju od 60kW s 2200 okretaja po minuti. Vodik je miješan sa zrakom kako bi se dobio zrak obogaćen vodikom koji se dovodio u motor usisnim vodom. Protok zraka obogaćenog vodikom korišten za ovo istraživanje je 25 l/min uz tri različita načina rada: bez rada sustava za recirkulaciju ispušnih plinova (*exhaust gas recirculation system*- EGR), uz rad EGR sustava od 10% i od 20%. Rezultati istraživanja su sljedeći; korištenjem vodika, smanjila se toplinska efikasnost motora, ali se poboljšala potrošnja energije. Pošto vodik ne sadrži ugljik, procesom izgaranja nismo dobili ispušne plinove CO i HC, no porasla je količina NO_x . Potrošnja goriva je smanjena za 8%. Dakle, dodavanjem vodika na usisni vod dizelskih motora s ugrađenim EGR sustavom, dobijemo znatna poboljšanja u radu motora (Hoang i Pham, 2020).



Slika 4-2. Emisija NO_x u ppm u odnosu na opterećenje motora u postocima za dizel, dodavanje vodika bez EGR-a i s 10% i 20% EGR-a (Hoang i Pham, 2020)

5. **BUDUĆNOST PRIMJENE VODIKA KAO GORIVA U RUDARSTVU**

Da bismo mogli sagledati budućnost primjene vodika kao goriva u rudarstvu, potrebno je pozabaviti se problematikom uvođenja istog, pogotovo onom s financijskog stajališta, proizvodnjom gorivih ćelija i samih motora, dostupnosti i uopće postojanja prikladne opreme i strojeva, te o standardima i normama za uporabu vodika. O nekim od tih problema se govorilo i promišljalo na simpoziju Vodik i rudnici. Također, vrlo je važno popratiti svaki napredak, ostvaren do danas, u razvoju rudarskih strojeva pogonjenih vodikom kako bismo mogli zaključiti kakva nas budućnost u rudarskom sektoru zaista očekuje ako će se vodik koristiti kao pogonsko gorivo.

5.1. **Financiranje projekata**

Svi projekti na uvođenju vodika su vrlo ambiciozni, time zahtijevaju i mnogo sredstava prvenstveno zato što se vodik još uvijek ne proizvodi komercijalno. Trenutni troškovi proizvodnje su oko tri puta veći nego što se teži da budu da bi se vodik mogao uopće natjecati s drugim gorivima.

Uzmimo za primjer stanje u Australiji (Australija je jedna od vodećih zemalja kad je u pitanju upotreba vodika u rudarstvu); da bi rudari mogli provesti projekte u djelo, moraju tražiti novčane potpore od vladinih organizacija, a da bi ih dobili, moraju prvo uložiti svoj novac. Stoga, iako je u Australiji mogućnost sufinanciranja od vladinih organizacija relativno velika u usporedbi s drugim državama, za male poduzetnike, koji nemaju početni kapital, je nedostupna.

Banke do sada nisu sudjelovale u financiranju projekata vezanih uz vodik, no kako se navodi, prepoznale su mogućnosti koje takvi projekti donose, pa u budućnosti žele uložiti u njih. Korporativna ulaganja u vozila s gorivim ćelijama su velika i još se povećavaju. Razvoj i interes za ulaganja brzo rastu (Michel, 2020).

5.2. **Vodik i rudnici virtualni simpozij (*Hydrogen and Mines Virtual Summit*)**

Da se o primjeni vodika u rudarstvu promišlja, doznajemo iz izvještaja sa simpozija održanog 08.-09. listopada 2021. Među značajnijim govornicima bili su; predstavnici tvrtke Anglo American, koji su predstavili detalje svog teretnog kamiona s gorivim ćelijama i projekta za sustav brzog punjenja gorivom u Južnoafričkoj Republici i Fortescue Metals

Group, čiji su predstavnici govorili o svojim planovima o voznom parku za vozila s gorivim ćelijama i stanici za punjenje vodikom u Christmas Creeku u Australiji.

Kao glavni problem, istaknuti su troškovi prelaska na vodikovo gorivo. Ostale navedene prepreke su proizvodnja vodika iz obnovljivih izvora, omogućavanje dostupnosti čiste vode, obučavanje radnika i postojanje pogodne opreme, pogotovo vozila.

Slijede ključne točke koje su iznijele vodeće kompanije u razvoju strojeva pogonjenih vodikom, o razvoju opreme s gorivim ćelijama;

5.2.1. Fortescue Metals Group

Tvrtka Fortescue Metals Group, sklopila je ugovor s tvrtkom Hyzon, koja im treba sagraditi deset probnih vozila s električnim gorivim ćelijama, te s britanskim BOC-om, koji će im dostaviti stanicu za punjenje, koja ne samo da će koristiti za punjenje probnih vozila, već i za testiranje drugih vozila koja postaju dostupna.

5.2.2. Anglo American

Za razliku od Fortescue Metals Groupa, tvrtka Anglo American, zbog slabe dostupnosti motora s vodikovim pogonom za teretne kamione, neće čekati da isti postanu dostupni, već je odlučila napraviti svoje. U svojoj prezentaciji, Julian Soles ističe kako tvrtka razvija hibridni motor koji koristi baterije i vodik s ciljem zamjene dizelskih motora na platformama.

5.2.3. Hitachi

Tvrtka Hitachi aktivno radi na dva područja razvoja; elektrifikaciji i upravljanju energijom, za što im je vodik vrlo bitan. Smatraju da je teško naći rješenje koje će odgovarati svim teretnim kamionima, upravo zbog različitih načina punjenja i zbog opreme koju kamioni imaju/ mogu imati u rudarskom sektoru

Također, veliki problem koji nastaje kod zamjene dizela vodikom u hibridnim teretnim kamionima je potreba za češćim punjenjem: uz faktor opterećenja od 35%, moguće je ostvariti rad od oko 6 sati bez punjenja, što je manje nego što je moguće ostvariti dizelskim motorima.

Jedna od najvećih prepreka u razvoju je infrastruktura. Prema trenutnim projektima, rudari moraju osigurati opskrbu vodikom na radilištu, no ne žele svi rudari biti i proizvođači vodika, a sve i da žele, proizvodni kapacitet elektrolizera je, za sad, jako ograničen.

Australska ARENA (*Australian Renewable Energy Agency*) financijski podupire 7 velikih projekata za proizvodnju velikih elektrolizera.

Kao i svi drugi sektori gospodarstva, nužno je da i novi, vodikov sektor u rudarstvu posjeduje standarde, jer bez njih nije moguće uvesti vodik u rudarstvo. *Standards Australia* radi na prihvaćanju i definiranju osnovnih tehničkih i sigurnosnih standarda za domaći sektor vodika, pogotovo za proizvodnju i stanice za punjenje, kao i za skladištenje vodika i u tekućem i u plinovitom agregatnom stanju.

Osim Australije, doprinos u donošenju standarda, ali i veliku važnost istih, daje Čile. Potrebni su posebni standardi za vodik u rudarstvu jer postojeći standardi za vodik nisu dobro primjenjivi za teške rudarske kamione.

Zaključci simpozija su sljedeći; Procjenjuje se da će se veliki troškovi proizvodnje vodika u skorijoj budućnosti znatno smanjiti razvojem elektrolizera velikih kapaciteta, te se kao privremeno sredstvo prilagodbe rudarstva na vodik predlaže prijelaz s čistog dizel goriva na smjesu dizela i vodik (Michel 2021).

5.3. Napredak postignut u rudarstvu na polju uporabe vodika kao pogonskog goriva

Kao što je već rečeno, moramo spoznati što smo do sada napravili da bismo uopće znali što je još sve moguće.

5.3.1. Anglo American

Može se zaključiti iz ranijeg teksta da je tvrtka Anglo American jedna od vodećih u razvoju rudarskih transportnih vozila.

Ideja za razvoj takvih vozila nastala je nakon što se Anglo American pridružio inovativnom programu FutureSmartMining 2019. godine. Prvi napredak se, tada, želio ostvariti u 2020. godini, pa su isti mjesec naručili devet gorivih ćelija od tvrtke Ballard Power Systems. U prosincu 2019., dostavljen im je elektrolizator, te su u veljači 2020. dobili sustav modularne baterije velike snage koja će, zajedno s gorivim ćelijama, pogoniti kamion. Kamion koji su namjeravali koristiti kao pilot je Komatsu930E u površinskom kopu Mogalakwena, u kojem se eksploatira platina, u Južnoafričkoj Republici (Moore, 2020).



Slika 5-1. Rudnik platine Mogalakwena, Limpopo, Južnoafrička Republika (“Anglo American South Africa” 2022)

Proces se odužio.

Prognoziralo se da će kamion biti spreman za rad početkom 2022. godine.

Kamion je hibrid, vodikove gorive ćelije proizvode oko pola energije, baterije drugu polovicu potrebnu za rad kamiona. Tijekom vožnje nizbrdo i kočenja, kamion prikuplja višak energije i pohranjuje je u bateriju što produljuje domet vozila (Hydrogen Central 2022).

06. svibnja 2022., Anglo American je prezentirao svoj prvi kamion pogonjen samo vodikom dobivenim iz zelenih izvora. S vremenom će upravo on, u rudniku Mogalakwena zamijeniti 40 vozila. Ovaj hibrid- teretni kamion je trenutno najveće vozilo, koje radi, pogonjeno vodikom tog tipa. Ima nosivost od 290 tona. Koristi energiju iz solarne elektrane, koja je potrebna za pokretanje procesa za proizvodnju vodika.

To je prvi korak u ostvarenju težnji tvrtke da do 2030., njenih osam rudnika bude neutralno u emisiji ispušnih plinova (Jamasmie 2022).



Slika 5-2. Najveći hibridno pogonjeni kamion vodikom i električnim baterijama (Mining.com, 2022.)

5.3.2. Fortescue Metals Group (FMG)

Fortescue Metals Group si je, također, zadala za zadatak smanjenje emisija ugljikovih spojeva u svojim radnim procesima na nulu do 2030. godine. Tvrtka je započela testiranje baterijskih ćelija za teretne kamione, te je završila dizajn i konstrukciju teretnog kamiona pogonjenog vodikom, čiji se sustavi i rad testiraju. Započeli su i testiranje bušilice za minske bušotine pogonjene vodikom.

Fortescue Future Industries (FFI) je nova tvrtka koja u istražnoj jedinici u Perthu istražuje i testira i električni i vodikov pogon za opremu Fortescue Metals Groupa. Dizajnirali su i konstruirali spomenuti teretni kamion pogonjen vodikom. No, on koristi, uz vodik, i pogon električnom energijom. Dakle, hibrid.

U tijeku su i istraživanja na rudarskoj opremi kao što su bušilice i bageri, kojima su dizelski motori zamijenjeni električnim motorima s vodikovim gorivim ćelijama kao izvorom pogona (Moore, 2021).



Slika 5-3. Bušilica za minske bušotine (International Mining, 2022.)

5.3.3. Copper Mountain Mining

U suradnji s SMS Equipment, Komatsu, ABB, Clean BC i B.C. Hydro, Copper Mountain Mining je započela testiranje pomoćne opreme za teretne kamione i sedam, električni pogonjenih, teretnih kamiona . Imaju prvi površinski kop u sjevernoj Americi koji koristi takvu tehnologiju. Testiraju i istražuju dizel, vodik, baterije i gorive ćelije za pogon teretnih jedinica, s ciljem postizanja neemitiranja ugljikovih spojeva u svojim radnim procesima do 2035. godine (Writer, 2022).



Slika 5-4. Kop Copper Mountain (Mining.com, 2022)

Japanska tvrtka Komatsu planira razviti dampere pogonjene vodikom (Yamanaka 2021).



Slika 5-5. Komatsu 980E- 5 (“Komatsu”, 2022)

6. ZAKLJUČAK

Interes za prijelaz na čišće izvore energije je velik, ne samo u rudarstvu, nego u svim granama gospodarstva. O dekarbonizaciji se puno govori, postoje planovi kako Europske Unije, tako i ostatka svijeta za postizanje potpune dekarbonizacije. Samo su rokovi drugačiji.

Vodik ima veliki potencijal da postane gorivo budućnosti, i to bliske. Jedan od većih problema je to što se on ne proizvodi komercijalno u procesima koji ne emitiraju stakleničke plinove. Mnoge metode dobivanja vodika su još uvijek u razvoju i zahtijevaju velika ulaganja. Rudari se okreću hidrolizi vode, koristeći velike elektrolizere, proizvode vodik na samom radilištu. Uz to je usko vezano to što ne žele svi proizvoditi vodik na radilištu, mogućnosti dovoza i skladištenja vodika na radilištu još uvijek nisu velike.

Uočene su velike prednosti uporabe vodika nad dosadašnjom praksom uporabe dizela, najbitnija je otklanjanje emisija ugljikovih spojeva, no slične prednosti nad dizelom ima i baterijski pogon, pa je važnije usporediti vodikov s baterijskim pogonom. Baterijski pogon je pogodniji za laka vozila, dok je vodikov pogodniji za transport na veće udaljenosti. Rudarski strojevi trebaju raditi cijeli dan, što bi da su pogonjeni baterijama, zahtijevalo veću težinu baterija, a to direktno znači manja masa rude koja se može prevoziti. Zbog toga bi vodikov pogon bio pogodniji za velike rudarske strojeve.

Malim modifikacijama dosadašnjih dizelskih motora, dio dizela se može zamijeniti vodikom. Provedena su istraživanja na takvim motorima; zamjenom u određenom postotku, dobijemo znatno bolje rezultate rada motora, a povećanjem postotka zamjene dizela vodikom u dualnom motoru, smanjuju se količine emisije dima i ugljikovodika u odnosu na standardni dizelski motor.

O uvođenju vodika u rudarstvo se puno promišlja i istražuje, organiziraju se konferencije na kojima tvrtke izlažu svoje planove i projekte. Ove je godine napravljen najveći teretni kamion, hibrid vodika i baterijskog pogona. Puno se ulaže i testira, na teretnim kamionima, damperima, bušaćim garniturama i ostalim velikim rudarskim strojevima i opremi. Zahtjevi za financiranjem takvih projekata su veliki, što stvara prepreke manjim tvrtkama. Svakako se, do danas, već puno toga postiglo.

Smatram da su mogućnosti za uvođenjem vodika zaista velike. Budućnost će pokazati hoće li proizvodnja i korištenje vodika biti zaista financijski isplativo (to je najveća prepreka), ili će se rudarstvo ipak okrenuti baterijskom pogonu strojeva, opreme i vozila. Svakako nas čeka revolucija, možda ne do često spominjane 2030. godine, ali u skorijoj budućnosti da. Sve se mijenja, postajemo sve svjesniji štete koju nanosimo okolišu, čak i ne namjerno, ali

kako god, štetimo. Uz malo prilagodbe i puno sredstava, možemo i moramo unijeti promjene u rudarstvo, pogotovo kad je u pitanju pogon.

7. POPIS LITERATURE

- Hoang, A. T., Van Viet, P. 2020. "A Study on a Solution to Reduce Emissions by Using Hydrogen as an Alternative Fuel for a Diesel Engine Integrated Exhaust Gas Recirculation." In *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc. Vol. 2235.
- Michel, M. 2020. "Funding and Financing Hydrogen Projects for Mines." *Energy and Mines Magazine*, Issue 25
- Michel, M. 2021. "Achieving Scalability in Hydrogen Projects for Mines Hydrogen And Mines Virtual Summit Report, Energy and Mines." *Energy and Mines Magazine*.
- Mirica, I., Cernat A., Pana C., Negurescu N., Nutu C. 2015. "Performance Comparison Between Hydrogen and Diesel Fuel Fuelled Compression Ignition Engine." *U.P.B. Sci. Bull., Series D* 77 (4).
- Shadidi, B., Najafi G., Yusaf T. 2021. "A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines." *Energies*. MDPI.
- Weiss, G., DR Klotz A, DR. 2020. "Is Hydrogen Worth the Hype?" *Energy and Mines Magazine*, Issue 25

IZVORI S INTERNETA:

- Jamasmie, C. 2022. "Anglo American Puts World's Largest Hydrogen Truck to Work." Mining.com. <https://www.mining.com/anglo-american-puts-worlds-largest-hydrogen-truck-to-work/>. 23. srpnja 2022.
- Moore, P. 2020. "Anglo American's Hydrogen Mining Truck Back on Track for H1 2021 First Motion - International Mining." <https://im-mining.com/2020/09/17/anglo-americans-hydrogen-mining-truck-back-track-h1-2021-first-motion/>. 23. srpnja 2022.
- Moore, P. 2021. "Fortescue Future Industries Begins Testing of Hydrogen Powered Mining Truck & Blasthole Drill Rig - International Mining." <https://im-mining.com/2021/08/30/fortescue-future-industries-begins-testing-hydrogen-powered-mining-truck-blasthole-drill-rig/>. 23. srpnja 2022.
- Writer, S. 2022. "Copper Mountain Commissions Trolley Assist Project for Cutting Carbon Emissions - MINING.COM." <https://www.mining.com/copper-mountain-commissions-trolley-assist-project-for-cutting-carbon-emissions/>. 22. srpnja 2022.

Yamanaka, H. 2021. "Komatsu Aims for Lead in Hydrogen-Powered Mining Trucks - Nikkei Asia." <https://asia.nikkei.com/Business/Engineering-Construction/Komatsu-aims-for-lead-in-hydrogen-powered-mining-trucks>. 23. srpnja 2022.

2022. "Miners Experiment with Hydrogen to Power Giant Trucks - Hydrogen Central." <https://hydrogen-central.com/miners-hydrogen-power-giant-trucks-2/>. 23. srpnja 2022.

IZVORI SLIKA:

"Hydrogen Production | Nel Hydrogen." <https://nelhydrogen.com/market/hydrogen-production/>. 22. srpnja 2022.

"Mine Profile: Mogalakwena – Anglo American South Africa." https://southafrica.angloamerican.com/our-stories/mine_profile_mogalakwena. 22. srpnja 2022.

"980E-5 Electric Drive Mining Truck | Komatsu." <https://www.komatsu.com/en/products/trucks/electric-drive-mining-trucks/980e-5/>. 22. srpnja, 2022.