

# KORIŠĆENJE INDUSTRIJSKOG CO<sub>2</sub> U EOR METODAMA ZA ISKORIŠĆENJE NAFTNIH LEŽIŠTA

Branislava Radišić, Slavica Prvulović

Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Đure Đakovića bb, 23 000  
Zrenjanin, Srbija, [branislava.radisic@uns.ac.rs](mailto:branislava.radisic@uns.ac.rs)

**Corresponding author:** Branislava Radišić, University of Novi Sad, Technical Faculty "Mihajlo Pupin", Đure Đakovića bb, 23000 Zrenjanin, [branislava.radisic@uns.ac.rs](mailto:branislava.radisic@uns.ac.rs)

## SAŽETAK

Značajan deo preostale nafte u ležištima ostaje zarobljen nakon primarne i sekundarne eksploatacije, što stvara potrebu za naprednim metodama povećanja iscrpka. Jedna od efikasnijih i ekološki prihvatljivijih tehnika jeste primena industrijskog CO<sub>2</sub> u procesu poboljšano izdvajanja nafte (CO<sub>2</sub>-EOR (Enhanced Oil Recovery)). U ovom radu prikazan je pregled mehanizama delovanja CO<sub>2</sub> na naftna ležišta, uključujući smanjenje viskoznosti, povećanje mobilnosti i postizanje miscibilnosti čime se podstiče istiskivanje zaostale nafte iz poroznog medijuma. Takođe je razmotrena mogućnost sekvestracije CO<sub>2</sub>, čime se ova metoda uklapa u principe održive proizvodnje energije i smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte. Kroz uvid u dostupne eksperimentalne i simulacione podatke iz relevantne literature, prikazani su pozitivni efekti CO<sub>2</sub> ubrizgavanja: povećanje faktora iscrpka nafte do 15%, kao i smanjenje viskoznosti nafte do 80%, u poređenju sa konvencionalnim metodama. Iako postoje tehničke i ekonomske prepreke, CO<sub>2</sub>-EOR predstavlja potencijal za produženje životnog veka naftnih ležišta i redukciju emisija gasova sa efektom staklene bašte.

**Ključne reči:** CO<sub>2</sub>-EOR, industrijski CO<sub>2</sub>, povećanje iscrpka, sekvestracija CO<sub>2</sub>, održiva eksploatacija.

## UVOD

Nakon završetka primarne i sekundarne eksploatacije nafte, značajne količine nafte ostaju trajno zarobljene u poroznim stenskim strukturama ležišta, čime se smanjuje ukupna efikasnost eksploatacije i ekonomska isplativost proizvodnje. U cilju povećanja ukupnog faktora iscrpka, razvijene su tercijarne metode poznate kao Enhanced Oil Recovery (EOR), koje omogućavaju dodatno izdvajanje preostale nafte putem fizičko-hemijskih i mehaničkih intervencija u ležištu.

Među brojnim EOR tehnikama, ubrizgavanje ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) pokazuje značajan potencijal, jer istovremeno omogućava povećanje proizvodnje i dugoročno skladištenje CO<sub>2</sub>, čime se doprinosi ciljevima klimatske neutralnosti. Poseban značaj ima korišćenje industrijskog (antropogenog) CO<sub>2</sub> — nusprodukta energetskih i industrijskih procesa — koji se umesto emitovanja u atmosferu može upotrebiti kao sredstvo za poboljšano izdvajanje nafte i sekvestraciju ugljenika u iscrpljenim rezervoarima.

Cilj ovog rada jeste da prikaže savremene pristupe korišćenju industrijskog CO<sub>2</sub> u EOR metodama, sa fokusom na efikasnost izdvajanja, kontrolu mobilnosti, mogućnosti geološkog skladištenja i izazove u implementaciji ove održive tehnologije.

## MATERIJAL I METODE RADA

### CO<sub>2</sub>-EOR metode i mehanizmi delovanja

Uobičajeno, EOR tehnologije se dele u tri osnovne kategorije:

Termalne metode, koje uključuju primenu toplote (najčešće u obliku pare ili putem sagorevanja nafte in situ) kako bi se smanjila viskoznost sirove nafte i poboljšalo njeno kretanje kroz porozni medijum.

Hemijske metode, koje koriste polimere, surfaktante ili alkalne rastvore za poboljšanje potiskivanja nafte i smanjenje međufazne napetosti.

Radišić, B. i Prvulović, S. (2025). Korišćenje industrijskog CO<sub>2</sub> u EOR metodama za iskorišćenje naftnih ležišta. *STED Conference 14(2)*, 279-288.

Gasne metode, koje obuhvataju ubrizgavanje različitih gasova (CO<sub>2</sub>, azot, prirodni gas) radi povećanja pritiska i/ili smanjenja viskoznosti nafte kroz mešanje i rastvaranje.

Među gasnim metodama, značajnu ulogu ima ubrizgavanje ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>), koje pored tehničkih koristi za proizvodnju, otvara i mogućnosti za dugoročno skladištenje CO<sub>2</sub> u iscrpljenim rezervoarima, čime se istovremeno utiče na smanjenje emisije stakleničkih gasova. (Sečen, 2006; Strika, 2018; Arnaut, 2024).

Ubrizgavanjem CO<sub>2</sub> u naftno ležište postiže se niz korisnih efekata koji omogućavaju dodatno izvlačenje zaostale nafte:

- smanjenje viskoznosti sirove nafte usled rastvaranja CO<sub>2</sub>, čime se poboljšava njena pokretljivost,
- povećanje zapremine nafte zbog širenja fluida usled apsorpcije CO<sub>2</sub>,
- smanjenje međupovršinske napetosti između nafte i stenskog medijuma, što olakšava otpuštanje nafte sa površine stena,
- povećanje pritiska u ležištu, što dodatno doprinosi mobilizaciji nafte.

Ovi mehanizmi omogućavaju CO<sub>2</sub> da efikasno istiskuje preostalu naftu prema proizvodnim bušotinama, povećavajući ukupni stepen iscrpka.

Postoje tri osnovna mehanizma delovanja ubrizganog CO<sub>2</sub> u okviru EOR procesa:

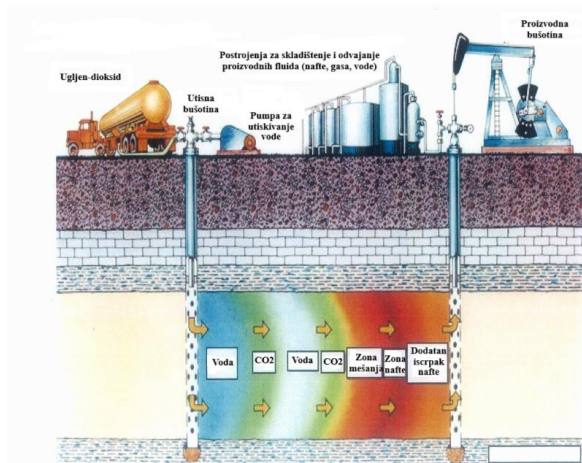
- Miscibilnost (mešljivost): CO<sub>2</sub> se meša sa sirovom naftom u određenim uslovima pritiska i temperature, formirajući jedinstvenu fazu sa smanjenom viskoznošću.
- Ekspanzija i karbonizacija: Rastvaranjem CO<sub>2</sub> u nafti dolazi do njenog bubrenja i dodatnog sniženja viskoznosti, čime se poboljšava njen transport kroz porozni medijum.
- Povećanje pritiska u rezervoaru: Ubrizgani gas povećava energiju sistema, omogućavajući pomeranje nafte ka proizvodnim bušotinama.

U praksi se primenjuju tri osnovna režima ubrizgavanja CO<sub>2</sub>:

- Neprekidno ubrizgavanje (Continuous CO<sub>2</sub> Injection): CO<sub>2</sub> se kontinuirano ubrizgava u ležište bez prekida, čime se stvara stabilan front potiskivanja. Ova strategija je jednostavna za implementaciju, ali postoji rizik od kanalisanja CO<sub>2</sub> kroz visoko propusne zone, što smanjuje efikasnost izdvajanja nafte.
- WAG metoda (Water Alternating Gas): Naizmenično ubrizgavanje vode i CO<sub>2</sub> omogućava bolju kontrolu nad raspodelom fluida u ležištu. Voda služi kao barijera koja smanjuje kanisanje gasa, poboljšava obuhvat i povećava efikasnost istiskivanja. WAG režim se često koristi kao standardna praksa u CO<sub>2</sub>-EOR projektima.
- Recirkulacija CO<sub>2</sub>: Deo CO<sub>2</sub> koji se sa naftom vraća na površinu se hvata, odvaja, prečišćava i ponovo ubrizgava u ležište. Ova strategija doprinosi ekonomskoj održivosti procesa i omogućava veće zadržavanje CO<sub>2</sub> u geološkim strukturama, što dodatno doprinosi smanjenju emisije stakleničkih gasova (Al-Jarba, et al., 2010).

### **CO<sub>2</sub>-WAG injekcija – efikasnost i primena**

Metoda naizmeničnog ubrizgavanja ugljen-dioksida i vode (CO<sub>2</sub>-WAG) razvijena je kako bi se kombinovale prednosti oba fluida u procesu tercijarne eksploatacije nafte. Voda povećava zapreminsku efikasnost potiskivanja, dok CO<sub>2</sub> poboljšava mikroskopski mehanizam istiskivanja nafte smanjenjem viskoznosti i međupovršinske napetosti. Ova sinergija omogućava značajno povećanje ukupne efikasnosti procesa. CO<sub>2</sub>-WAG metoda funkcioniše po principu sekvencijalnog ubrizgavanja sluga CO<sub>2</sub> i vode, čime se postiže bolja raspodela fluida unutar ležišta i smanjuje rizik od kanalisanja CO<sub>2</sub> kroz visoko propusne zone. U kontrolisanim uslovima pritiska i temperature, CO<sub>2</sub> formira tzv. „čep rastvarača“ koji delotvorno istiskuje naftu prema proizvodnim bušotinama. Voda zatim dodatno potiskuje ovaj čep, omogućavajući veće zapreminsko pokrivanje (Al-Shargabi, et al., 2022). Princip WAG metode prikazan je na slici 1.



Slika 1. WAG metoda utiskivanja CO<sub>2</sub> i vode (Strika, 2018).

Prednosti WAG metode uključuju smanjenje ukupne potrošnje CO<sub>2</sub>, ravnomernije pokrivanje fluida, posebno u slojevima sa različitom propusnošću i veću efikasnost u poređenju sa neprekidnim ubrizgavanjem CO<sub>2</sub>. Dok su ograničenja: mogućnost gravitacionog prevazilaženja fluida i rizik od taloženja asfaltena, što zahteva dodatne hemijske tretmane. Uspešnost CO<sub>2</sub>-WAG injekcije zavisi od više faktora:

- Minimalni pritisak za miscibilnost: CO<sub>2</sub> pokazuje povoljnije karakteristike u odnosu na druge gasove jer za postizanje miscibilnosti zahteva relativno niži pritisak.
- Dubina ležišta: Ležišta plića od 760 m često ne mogu obezbediti dovoljan pritisak za stabilno ubrizgavanje CO<sub>2</sub>.
- Svojstva nafte: Optimalni rezultati se postižu kod nafte manje gustine (<921 kg/m<sup>3</sup>, tj. >22°API).
- Heterogenost ležišta: Visoka heterogenost (npr. slojevitost struktura, frakture) može dovesti do neujednačenog toka fluida i smanjene efikasnosti metode.

Metoda CO<sub>2</sub>-WAG ubrizgavanja predstavlja tehnološki i ekonomski održiv pristup povećanju iscrpka nafte, naročito u ležištima sa povoljnim litološkim i fizičko-hemijskim karakteristikama. Pravilna analiza uslova ležišta, kombinovana sa optimalnim odnosom CO<sub>2</sub> i vode, omogućava povećanje efikasnosti, bolju kontrolu toka fluida i dugoročnu mogućnost skladištenja CO<sub>2</sub> u geološkim formacijama (Massarweh, et al., 2022).

### Kontrola mobilnosti CO<sub>2</sub> – izazovi i rešenja

Uprkos značajnim prednostima koje CO<sub>2</sub>-EOR metoda donosi u pogledu povećanja iskorišćenja nafte i mogućnosti trajnog skladištenja ugljen-dioksida u iscrpljenim rezervoarima, jedan od ključnih izazova u njenoj primeni predstavlja narušena kontrola mobilnosti CO<sub>2</sub> u poroznom medijumu. Specifična fizičko-hemijska svojstva CO<sub>2</sub>, naročito njegova niska viskoznost i sklonost ka brzom kretanju kroz visoko propusne zone, često dovode do pojave kanalisanja i prstastog toka, što umanjuje kontakt sa naftom i snižava efikasnost istiskivanja. Osim toga, gravitaciona segregacija dodatno pogoršava raspodelu fluida u vertikalnom profilu ležišta, jer lakši CO<sub>2</sub> teži ka gornjim delovima formacije, izbegavajući dublje delove rezervoara u kojima se nafta zadržava. Zaključno, efikasna kontrola mobilnosti CO<sub>2</sub> predstavlja ključni aspekt uspeha CO<sub>2</sub>-EOR metoda. Kombinacijom hemijskih, digitalnih i inženjerskih rešenja, moguće je prevazići postojeće izazove i postići dvostruki cilj – povećanje proizvodnje i smanjenje emisija CO<sub>2</sub>. Dalji razvoj i sinergija tehnologija u oblasti digitalizacije, nanotehnologije i energetske tranzicije otvaraju nove mogućnosti za održivu eksploataciju nafte u 21. veku.

Autori Massarweh, & Abushaikha, (2022) navode različite metode koje se koriste kako bi se poboljšala kontrola mobilnosti CO<sub>2</sub> i povećala efikasnost njegovog potiskivanja:

- dodavanje polimera – polimeri povećavaju viskoznost CO<sub>2</sub> i poboljšavaju njegovu sposobnost potiskivanja nafte,
- pena stabilizovana surfaktantima – ubrizgavanje pene na bazi CO<sub>2</sub> poboljšava distribuciju gasa u ležištu i smanjuje efekat prstastog toka,
- hibridne metode – kombinacija CO<sub>2</sub> s drugim metodama, poput hemijskih i toplinskih tehnika, povećava ukupnu efikasnost izdvajanja,
- nanočestice u kombinaciji s CO<sub>2</sub> – istraživanja pokazuju da nanočestice mogu poboljšati stabilnost CO<sub>2</sub> pene i poboljšati kontrolu mobilnosti,
- upotreba nečistog CO<sub>2</sub> iz industrijskih izvora – analizira se kako prisustvo drugih gasova u industrijskom CO<sub>2</sub> može uticati na performanse EOR metoda.

Pored toga, naglašavaju da je kontrola mobilnosti CO<sub>2</sub> ključna za poboljšanje efikasnosti EOR metoda i da se najefikasniji pristupi trenutno baziraju na peni stabilizovanoj surfaktantima i upotrebi polimera.

Kombinacija sa drugim metodama i savremenim tehnološkim rešenjima može dodatno poboljšati efikasnost eksploatacije i smanjiti operativne troškove. Napredak u tehnologiji značajno je unapredio primenu ovih metoda:

Real-time simulacije (simulacija ležišta u realnom vremenu): Predviđaju kretanje gasa i optimizuju parametre injekcije. Donošenje odluka na osnovu realnih podataka smanjuje rizik eksperimentalnih pristupa i povećava efikasnost.

4D seizmički monitoring: Prati promene u ležištu tokom vremena, pružajući jasan uvid u kretanje fluida i gasa unutar rezervoara i omogućavajući prilagođavanje strategija.

Pametne bušotine: Kontinuirano prate pritisak, temperaturu i kompoziciju fluida, pomoću senzora koji u realnom vremenu mere parametre. Ovi podaci omogućavaju preciznu kontrolu procesa eksploatacije i optimizaciju gasne injekcije.

AI (veštačka inteligencija) i mašinsko učenje: Optimizuju procese analizom velikih količina podataka i automatskim podešavanjem parametara. Ova automatizacija smanjuje mogućnost ljudskih grešaka, ubrzava proces donošenja odluka i poboljšava ukupnu efikasnost eksploatacije.

Savremeni CO<sub>2</sub>-EOR projekti sve više integrišu digitalne tehnologije kako bi se povećala efikasnost izdvajanja nafte uz istovremeno trajno skladištenje CO<sub>2</sub>. Ključni izazov u ovim projektima je postizanje ravnoteže između dva cilja: maksimizacije proizvodnje nafte i maksimizacije količine trajno uskladištenog ugljen-dioksida. Upravo zbog te međuzavisnosti, u planiranju i upravljanju EOR procesima sve češće se koriste napredne metode optimizacije, modelovanja i analize rizika. Tradicionalni pristupi podrazumevaju ručnu selekciju operativnih parametara, što je sporo, podložno greškama i često zanemaruje promene koje se dešavaju tokom vremena. Tehnološki napredak je značajno poboljšao efikasnost gasnih EOR metoda, smanjujući troškove i ekološki uticaj eksploatacije. Simulacija ležišta u realnom vremenu, 4D seizmičko praćenje, pametne bušotine i veštačka inteligencija omogućavaju precizniju kontrolu nad procesom i povećavaju uspešnost eksploatacije. Dalji razvoj ovih tehnologija donosi još veće mogućnosti za optimizaciju proizvodnje iz zrelih i kompleksnih ležišta, čineći industriju nafte i gasa efikasnijom i održivijom (Ampomah, et al., 2017).

Budućnost gasnog EOR-a zavisi od primene održivih praksi, uključujući razvoj bio-gasova i ekološki prihvatljivih tehnika, kao i usklađivanje sa sve strožim regulatornim zahtevima. Na primer, istražuju se metode poput mikrobnog EOR-a, gde se ubrizgavaju hranljive materije kako bi se stimulisao rast mikroorganizama koji pomažu u mobilizaciji nafte. Takođe, sve veći fokus je na hvatanju i skladištenju ugljen-dioksida (Carbon Capture and Storage - CCS) radi smanjenja ekološkog uticaja CO<sub>2</sub>-EOR projekata. Zaključno, budući napredak u gasnom EOR-u leži u inovacijama, industrijskoj saradnji i održivim praksama, što će omogućiti efikasniju eksploataciju nafte uz smanjenje ekološkog otiska (Ozowe, et al., 2024). U poslednjim godinama, postizanje ugljenične neutralnosti postalo je ključni globalni cilj, posebno nakon potpisivanja Pariskog sporazuma iz 2015. godine, kojim se nastoji ograničiti globalno zagrevanje na ispod 2°C do kraja

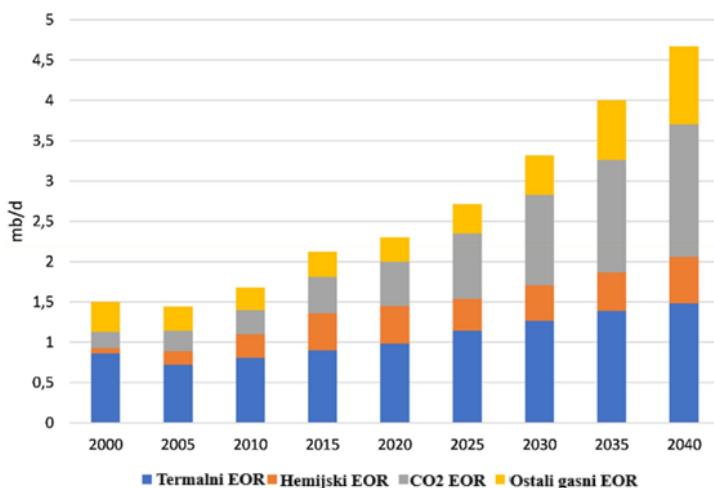
Radišić, B. i Prvulović, S. (2025). Korišćenje industrijskog CO<sub>2</sub> u EOR metodama za iskorišćenje naftnih ležišta. *STED Conference 14(2)*, 279-288.

21. veka. Mnoge zemlje, uključujući Evropsku uniju, Sjedinjene Američke Države i Kinu, postavile su svoje ciljeve i akcione planove za smanjenje emisija ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>). Na primer, EU planira da postigne ugljeničnu neutralnost do 2050. godine, dok Kina planira da dostigne vrhunac emisija do 2030. a zatim da do 2060. ostvari neutralnost. Kako bi se ublažile posledice globalnog zagrevanja, razvijene su tehnologije za hvatanje i skladištenje ugljen-dioksida (CCS). Jedna od najzanimljivijih metoda skladištenja CO<sub>2</sub> jeste ona koja se kombinuje sa poboljšanim izdvajanjem nafte – CO<sub>2</sub>-EOR (enhanced oil recovery). Suština ove metode je da se industrijski CO<sub>2</sub>, koji bi inače bio ispušten u atmosferu, ubrizgava u istrošena naftna ležišta kako bi se istisnula preostala nafta i istovremeno skladištio CO<sub>2</sub>. Time se spaja ekonomska dobit (povećanje eksploatacije) sa ekološkom koristi (smanjenje emisija). Cilj ovog rada jeste da se razmotri održivost ove tehnologije kao sredstva za dugoročno skladištenje CO<sub>2</sub> i doprinos borbi protiv klimatskih promena (Shiyi, et al., 2022; Farajzadeh, et al., 2020).

Posebno se ističe kombinacija EOR metoda sa CCUS konceptom (Carbon Capture, Utilization and Storage), gde se industrijski CO<sub>2</sub> koristi i za poboljšanje proizvodnje nafte i za trajno skladištenje gasova sa efektom staklene bašte. CCUS predstavlja hvatanje, upotrebu i skladištenje ugljen-dioksida, koji je širi koncept od CCS-a, jer podrazumeva i upotrebu CO<sub>2</sub>. Ipak, određeni faktori i dalje ograničavaju širu primenu ove metode. To su:

- nedostatak izvora visokokoncentrovanog CO<sub>2</sub> u blizini ležišta, što povećava logističke troškove,
- visoka cena hvatanja CO<sub>2</sub> iz niskokoncentrovanih izvora, kao što su termoelektrane,
- ograničeni kapaciteti za dugolinijski transport CO<sub>2</sub>, jer su gasovodne mreže još u razvoju,
- nedostatak iskustva sa dugoročnim nadzorom bezbednosti skladišta CO<sub>2</sub>, iako do sada nije zabeležen nijedan slučaj curenja (Shiyi, et al., 2022).

Problem kod CO<sub>2</sub>-EOR metoda jeste nedostatak industrijskih izvora CO<sub>2</sub> blizu naftnih polja i visoki troškovi za hvatanje, transport i skladištenje CO<sub>2</sub>. Iako SAD imaju razvijenu infrastrukturu (preko 13.000 bušotina i 5.600 km cevovoda), šira primena u svetu je ograničena. Kao rešenje se razvija tehnologija za „in situ“ (na licu mesta) generaciju CO<sub>2</sub> u ležištu pomoću hemijskih reakcija, što smanjuje troškove i rizike povezane s transportom. Takva tehnologija omogućava bolju kontrolu nad količinom i pritiskom CO<sub>2</sub> i efikasnije izvlačenje nafte iz „mrtvih zona“ ležišta. Kao što se vidi na slici 2, ukupna količina nafte dobijena EOR metodama raste, a naročito raste udeo CO<sub>2</sub> i gasnih metoda, što potvrđuje značaj inovacija poput „in situ“ CO<sub>2</sub> generacije (Panahov, et al., 2021).



Slika 2. Stvarna i prognozirana raspodela modela za povećanje iscrpka nafte (Panahov, et al., 2021).

### **Korišćenje industrijskog CO<sub>2</sub> – izvori i izazovi**

Jedan od ključnih izazova u primeni tehnologije CO<sub>2</sub>-EOR u savremenim uslovima odnosi se na poreklo i dostupnost samog ugljen-dioksida. Iako se konceptualno podrazumeva da se za poboljšano izdvajanje nafte može koristiti industrijski (antropogeni) CO<sub>2</sub>, realna primena još uvek u značajnoj meri zavisi od prirodnih izvora ovog gasa. Prema Farajzadehu i saradnicima (2020), većina CO<sub>2</sub> koji se danas koristi u EOR projektima potiče iz prirodnih podzemnih nalazišta, a ne iz industrijskih postrojenja, i to uprkos činjenici da veliki broj antropogenih izvora CO<sub>2</sub> postoji širom sveta. Industrijski izvori CO<sub>2</sub> uključuju termoelektrane na fosilna goriva, rafinerije, cementare, čeličane i hemijsku industriju. Među njima, termoelektrane su najznačajniji emitenti zbog velikog obima sagorevanja uglja, nafte i prirodnog gasa. Emisije CO<sub>2</sub> po jedinici energije značajno se razlikuju u zavisnosti od vrste goriva – sagorevanje prirodnog gasa (metan, CH<sub>4</sub>) emituje približno 0,055 kg CO<sub>2</sub>/MJ, nafta (CH<sub>2</sub>) oko 0,073 kg CO<sub>2</sub>/MJ, dok sagorevanje uglja (CH) generiše i do 0,088 kg CO<sub>2</sub>/MJ. Ove brojke ukazuju na ogroman tehnički potencijal za hvatanje CO<sub>2</sub> iz industrijskih procesa, naročito iz sektora energetike. Ipak, tehnički potencijal nije dovoljan za komercijalnu primenu. Glavni razlog za to leži u visokim energetske i finansijskim troškovima izdvajanja CO<sub>2</sub> iz dimnih gasova, što znatno utiče na isplativost EOR projekata koji se oslanjaju na industrijski CO<sub>2</sub>. Trenutno najčešće korišćena tehnologija za separaciju CO<sub>2</sub> je hemijska apsorpcija pomoću monoetanolamina (MEA). Ova metoda, iako efikasna u pogledu čistoće izdvojenog CO<sub>2</sub>, zahteva prosečno oko 4000 kJ egzergije po kilogramu CO<sub>2</sub>, što predstavlja od 30% do 50% energije sadržane u gorivu (zavisno od vrste goriva). U kontekstu komercijalne proizvodnje nafte, ovi gubici čine korišćenje antropogenog CO<sub>2</sub> manje konkurentnim u odnosu na prirodno dostupne izvore (Farajzadeh, et al., 2020).

Još jedan ključan izazov ogleda se u geografskoj neskladnosti između izvora emisije i naftnih ležišta pogodnih za EOR. Naime, termoelektrane, cementare i druga postrojenja najčešće se nalaze u blizini potrošačkih centara i industrijskih zona, dok se naftna i gasna polja često nalaze u udaljenim ili ruralnim oblastima. Zbog toga se javlja potreba za izgradnjom specijalizovane infrastrukture za transport CO<sub>2</sub>, kao što su gasovodi na velike razdaljine i kompresorske stanice za održavanje CO<sub>2</sub> u superkritičnom stanju. Ovi dodatni infrastrukturni zahtevi ne samo da povećavaju kapitalne troškove, već i uvode dodatne energetske gubitke i kompleksnost u operativno upravljanje projektom. Uprkos ovim ograničenjima, korišćenje industrijskog CO<sub>2</sub> ima višestruke prednosti, naročito u kontekstu ublažavanja klimatskih promena. Industrijski CO<sub>2</sub>, koji bi inače bio emitovan u atmosferu, u okviru EOR metoda može biti trajno uskladišten u iscrpljenim naftnim rezervoarima, čime se direktno doprinosi konceptu karbonske neutralnosti. Zbog toga se upotreba antropogenog CO<sub>2</sub> u EOR projektima posmatra kroz prizmu CCUS strategije (Carbon Capture, Utilization and Storage), koja ima dvostruku korist: omogućava povećanje proizvodnje nafte iz zrelih ležišta i istovremeno doprinosi smanjenju emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu (Shiyi, et al., 2022).

Prema Kirchofer, et al. (2013), industrijski alkalni otpad – poput letećeg pepela, cementne prašine i metalurške šljake – ne samo da predstavlja potencijalne izvore za hemijsku sekvencijaciju CO<sub>2</sub> putem mineralne karbonacije, već istovremeno rešava problem odlaganja otpada. Ovi nusprodukti nastaju upravo u industrijama koje su značajni emiteri CO<sub>2</sub> – kao što su termoelektrane, cementare i čeličane – i zato predstavljaju logičan spoj sa CCUS projektima, uključujući EOR metode (Kirchofer, et al., 2013).

### **REZULTATI I DISKUSIJA**

U ovom poglavlju prikazani su sažeti rezultati iz relevantne literature koji ilustruju efekte primene CO<sub>2</sub>-EOR metoda, sa posebnim naglaskom na uticaj industrijskog CO<sub>2</sub> na povećanje faktora iscrpka, smanjenje viskoznosti sirove nafte i potencijal geološkog skladištenja. Prikazani podaci predstavljaju aproksimacije dobijene na osnovu terenskih studija i laboratorijskih istraživanja, sa ciljem da se prikaže efektivnost tehnologije u različitim uslovima eksploatacije. Poređenja metoda ubrizgavanja, analiza reoloških promena i primeri iz konkretnih projekata daju uvid u realni potencijal i izazove upotrebe industrijskog CO<sub>2</sub> u savremenim EOR projektima.

### Efikasnost metoda ubrizgavanja CO<sub>2</sub>

U okviru CO<sub>2</sub>-EOR metoda, primenjuju se dve osnovne šeme ubrizgavanja: kontinuirano ubrizgavanje CO<sub>2</sub> i WAG režim. Kontinuirano ubrizgavanje karakteriše jednostavna implementacija, jer podrazumeva neprekidno unošenje CO<sub>2</sub> u ležište. Međutim, zbog niskog odnosa viskoznosti između CO<sub>2</sub> i nafte, ovaj pristup često dovodi do kanalisanja gasa, proboja kroz propusnije zone i slabije zapreminske pokrivenosti ležišta. Rezultat je smanjena efikasnost izdvajanja nafte i povećani gubici CO<sub>2</sub>. Nasuprot tome, WAG režim omogućava bolju kontrolu mobilnosti fluida, smanjuje gubitke CO<sub>2</sub> i poboljšava distribuciju u poroznom prostoru. Studije pokazuju da WAG režim može poboljšati ukupnu efikasnost izdvajanja nafte za 10–15% u odnosu na kontinuirani režim, pri jednakim količinama ubrizganog CO<sub>2</sub>. U tabeli 1 prikazana je uporedna analiza ovih dveju metoda.

Tabela 1. Uporedna analiza kontinuiranog ubrizgavanja i WAG metode.

| Aspekt                  | Kontinuirano ubrizgavanje CO <sub>2</sub> | WAG metoda |
|-------------------------|-------------------------------------------|------------|
| Efikasnost pomeranja    | Niska                                     | Visoka     |
| Gubitak CO <sub>2</sub> | Veći                                      | Manji      |
| Pokrivenost ležišta     | Smanjena                                  | Poboljšana |
| Tehnička složenost      | Niža                                      | Viša       |

### Uticaj CO<sub>2</sub> na viskoznost nafte

Jedan od ključnih mehanizama koji doprinosi efikasnosti CO<sub>2</sub>-EOR metoda jeste smanjenje viskoznosti nafte usled rastvaranja CO<sub>2</sub> u tečnoj fazi. Kada se CO<sub>2</sub> ubrizga pod visokim pritiskom u rezervoar, on se rastvara u nafti, što dovodi do značajnog smanjenja unutrašnjeg trenja između molekula nafte i povećava njenu mobilnost. Eksperimentalni podaci pokazuju da pri različitim temperaturama dolazi do smanjenja viskoznosti nafte za 40–50%, što direktno utiče na lakše pomeranje nafte ka proizvodnim bušotinama. U tabeli 2 prikazano je smanjenje viskoznosti u odnosu na temperaturu nakon ubrizgavanja CO<sub>2</sub>.

Tabela 2. Smanjenje viskoznosti posle CO<sub>2</sub>.

| Temperatura (°C) | Viskoznost pre CO <sub>2</sub> (Cp) | Viskoznost posle CO <sub>2</sub> (Cp) | Smanjenje (%) |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| 30°C             | 8,0                                 | 4,5                                   | 43,8%         |
| 50°C             | 6,2                                 | 3,2                                   | 48,4%         |
| 70°C             | 4,0                                 | 2,1                                   | 47,5%         |

Ovi rezultati potvrđuju da rastvaranje CO<sub>2</sub> u nafti ima značajan uticaj na njenu reološku strukturu, pri čemu dolazi do smanjenja viskoznosti čak i pri umerenim temperaturnim uslovima. Ovakvo ponašanje CO<sub>2</sub> doprinosi poboljšanju mikroskopske efikasnosti pomeranja, što je posebno značajno u ležištima sa viskoznom naftom. Smanjena viskoznost omogućava bolji kontakt između fluida za potiskivanje i rezidualne nafte, kao i lakše savladavanje kapilarnih sila unutar porozne sredine. Rastvaranje CO<sub>2</sub> u nafti predstavlja jedan od osnovnih mehanizama poboljšanja pomeranja u CO<sub>2</sub>-EOR metodama. Efekat sniženja viskoznosti, koji u nekim slučajevima prelazi 45%, u velikoj meri doprinosi povećanju faktora iscrpka, posebno u fazama kada su rezerve već delimično iscrpljene prethodnim metodama.

### Povećanje faktora iscrpka primenom CO<sub>2</sub>

Primena CO<sub>2</sub> u projektima povećanja iscrpka ne donosi samo ekonomske koristi kroz dodatnu proizvodnju nafte, već omogućava i dugoročno zadržavanje značajnih količina ugljen-dioksida u podzemnim formacijama. Terenske studije pokazuju da se faktori iscrpka mogu povećati za 10 do

Radišić, B. i Prvulović, S. (2025). Korišćenje industrijskog CO<sub>2</sub> u EOR metodama za iskorišćenje naftnih ležišta. *STED Conference 14(2)*, 279-288.

25% u odnosu na prethodni režim vodnog potiskivanja, u zavisnosti od tipa ležišta, dubine, režima ubrizgavanja i svojstava fluida. Istovremeno, značajan deo ubrizganog CO<sub>2</sub> ostaje trajno zarobljen u ležištu, što ovaj proces čini relevantnim i u kontekstu ublažavanja klimatskih promena, posebno kada se uklopi u koncept CCUS tehnologija. U tabeli 3 predstavljeno je, na konkretnim primerima, povećanje faktora iscrpka (Recovery Faktor–RF) nakon CO<sub>2</sub>.

Tabela 3. Povećanje faktora iscrpka.

| Ležište                  | Početni RF (%) | RF posle CO <sub>2</sub> | Povećanje (%) |
|--------------------------|----------------|--------------------------|---------------|
| Weyburn (Kanada)         | 35%            | 56%                      | +21%          |
| Shengli (Kina)           | 30%            | 47%                      | +17%          |
| Garber (SAD)             | 33%            | 44%                      | +11%          |
| Ležišta A (SAD)          | 30%            | 48%                      | +18%          |
| Ležište B (Bliski istok) | 28%            | 44%                      | +16%          |
| Ležište C                | 25%            | 40%                      | +15%          |

U projektu Weyburn (Kanada), koji je jedan od najpoznatijih primera kombinovanog EOR i CO<sub>2</sub> skladištenja, ostvaren je porast faktora iscrpka za 21%, uz trajno zadržavanje preko 90% ubrizganog CO<sub>2</sub> u rezervoaru. Slični rezultati zabeleženi su i u Shengli ležištu u Kini i Uthmaniyah u Saudijskoj Arabiji, gde su tehnički rezultati bili zadovoljavajući, a istovremeno je omogućeno smanjenje emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu. Takvi primeri potvrđuju da je uz adekvatnu kontrolu pritiska, optimizaciju režima ubrizgavanja (npr. WAG) i stabilnost zatvorenog rezervoarskog sistema, moguće istovremeno ostvariti energetske i ekološke ciljeve. CO<sub>2</sub>-EOR metode imaju potencijal da istovremeno unaprede energetski bilans i doprinesu klimatskoj neutralnosti, naročito kada se baziraju na upotrebi industrijskog CO<sub>2</sub>. Tereni podaci jasno ukazuju na dvostruki efekat – povećanje iscrpka i trajnu sekvencijaciju CO<sub>2</sub>, čime ova tehnologija zadobija važnu ulogu u tranziciji ka održivoj proizvodnji energije. Primeri su preuzeti iz preglednih i tehničkih studija: Ajayi, et al. (2019), Massarweh, & Abushaikh (2022), Panahov, et al. (2021).

## ZAKLJUČCI

Primena industrijskog CO<sub>2</sub> u EOR metodama predstavlja efikasan spoj energetske dobitnosti i ekološke održivosti. Ova tehnologija omogućava dodatno izdvajanje nafte iz iscrpljenih ležišta i istovremeno omogućava dugoročno skladištenje CO<sub>2</sub>, čime doprinosi ciljevima smanjenja emisija i klimatske neutralnosti.

Korišćenjem režima ubrizgavanja poput WAG metode, uz savremene pristupe kontroli mobilnosti CO<sub>2</sub> (polimeri, pena, nanočestice), može se značajno povećati faktor iscrpka i stabilnost procesa. Implementacija digitalnih rešenja kao što su real-time simulacije, pametne bušotine i AI alati dodatno povećava operativnu efikasnost i sigurnost eksploatacije.

Ipak, izazovi poput visokih troškova separacije CO<sub>2</sub>, ograničene dostupnosti izvora blizu ležišta i potrebe za infrastrukturom za transport CO<sub>2</sub> i dalje ograničavaju punu primenu ove metode. Razvoj tehnologija za in situ generaciju CO<sub>2</sub>, kao i usklađivanje sa regulativama i klimatskim politikama, ključni su koraci ka široj primeni.

Zaključno, integracija CO<sub>2</sub>-EOR metoda u širi koncept CCUS strategije može doprineti transformaciji naftne industrije u pravcu održivog razvoja i energetske tranzicije.

## DECLARATIONS OF INTEREST STATEMENT

The authors affirm that there are no conflicts of interest to declare in relation to the research presented in this paper.

Radišić, B. i Prvulović, S. (2025). Korišćenje industrijskog CO<sub>2</sub> u EOR metodama za iskorišćenje naftnih ležišta. *STED Conference 14(2)*, 279-288.

## LITERATURA

- Ajayi, T., Gomes, J.S., & Bera, A. (2019). A review od CO<sub>2</sub> storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Petroleum Science* 16, 1028-1063. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-0340-8>
- Arnaut, M. (2024). *Razvoj optimizacijskih kriterija za povećanje iscrpka nafte uz istovremeno trajno skladištenje CO<sub>2</sub>*. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Al-Jarba, M. & Al-Anazi, B.D. (2010). Tehnike povećanja iscrpka nafte i istikivanje korišćenjem CO<sub>2</sub>. *Nafta*, 61(9), 396-398.
- Al-Shargabi, M., Davoodi, S., Wood, D.A., Rukavishnikov, V.S. & Minaev K. (2022). Carbon dioxide applications for enhaced oil recovery assisted by nanoparticles: recent development. *ACS Omega*, 7, 9984-9994.
- Ampomah, W., Balch, R.S., Cathar, M., Will, R., Gunda, D., Dai, Z., & Soltanian, M.R. (2017). Optimum design of CO<sub>2</sub> storage and oil recovery under geological uncertainty. *Applied Energy*, 195, 80-92, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.017>
- Sečen, J. (2006). *Metode povećanja iscrpka nafte*. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.
- Farajzadeh, R., Eftekhari, A.A., Dafnomilis, G., Lake, L.W. & Bruining, J. (2020). On the sustainability of CO<sub>2</sub> storage through CO<sub>2</sub> – Enhanced oil recovery. *Applied Energy*, 261, 114467. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114467>
- Kirchofer, A., Brandt, A., Krevor, S., Prigiobbe, V., Becker, A. & Wilcox, J. (2013). Assessing the potential of mineral carbonation with industrial alkalinity sources in the U.S. *Energy. Procedia* 37, 5858-5869.
- Massarweh, O. & Abushaikha, A. S. (2022). A review of recent developments in CO<sub>2</sub> mobility control in enhanced oil recovery. *Petroleum*, 8(3), 291-317. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.05.002>
- Ozowe, W., Daramola, G.O. & Ekemezie, I.O. (2024). Innovative approaches in enhanced oil recovery: A focus on gas injection synergies with other EOR methods. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, 11(01), 311-324. <https://doi.org/10.30574/msarr.2024.11.1.0095>
- Panahov, G.M., Abbasov, E.M. & Jiang, R. (2021). The novel technology for reservoir stimulation: in situ generation of carbon dioxide for the residual oil recovery. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11, 2009-2026. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01121-5>
- Strika, L. (2018). *EOR metode povećanja iscrpka nafte*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Shiyi, Y., Desheng, M., Junshi, L., Tiyaoyao, Z., Zemin, J. & Haishui, H. (2022). Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4), 955-962.

## UTILIZATION OF INDUSTRIAL CO<sub>2</sub> IN EOR METHODS FOR ENHANCED OIL RECOVERY

Branislava Radišić, Slavica Prvulović

University of Novi Sad, Technical Faculty "Mihajlo Pupin", Đure Đakovića bb, 23000 Zrenjanin, Serbia, [branislava.radicic@uns.ac.rs](mailto:branislava.radicic@uns.ac.rs)

### ABSTRACT

A significant portion of oil remains trapped in reservoirs after primary and secondary recovery, creating the need for advanced enhanced oil recovery (EOR) techniques. One of the more efficient and environmentally friendly methods is the use of industrial CO<sub>2</sub> in the enhanced oil recovery process (CO<sub>2</sub>-EOR). This paper provides an overview of the mechanisms through which CO<sub>2</sub> interacts with oil reservoirs, including viscosity reduction, improved mobility, and the achievement of miscibility, all of which promote the displacement of residual oil from the porous medium. The potential for CO<sub>2</sub> sequestration is also considered, making this method compatible with the principles of sustainable energy production and greenhouse gas emission reduction. Based on available experimental and simulation data from relevant literature, the positive effects of CO<sub>2</sub> injection are highlighted: oil recovery factor increases of up to 15%, and viscosity reductions of up to 80% compared to conventional methods. Despite technical and economic challenges, CO<sub>2</sub>-EOR presents a promising opportunity to extend the productive life of oil reservoirs and reduce greenhouse gas emissions.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>-EOR, industrial CO<sub>2</sub>, enhanced recovery, CO<sub>2</sub> sequestration, sustainable exploitation.