

Pet godina utiskivanja CO₂ za povećanje iscrpka nafte na polju Ivanić i Žutica - Iskustva i rezultati

Five years of CO₂ injection for enhanced oil recovery from the Ivanić and Žutica fields - experience and results

Đorđe Babić, Neven Leonard, Silvan Mikulić i Jerko Jelić-Balta,
INA – Industrija nafte, d.d.

dr. sc. Dubravko Novosel
INA – Industrija nafte, d.d.
dubravko.novosel@ina.hr



Ključne riječi: EOR projekt, utiskivanja CO₂, proizvodnja ugljikovodika

Key words: EOR project, CO₂ injection, hydrocarbon production

Sažetak

Petogodišnje iskustvo utiskivanja CO₂ u ležišta proizvodnih polja Ivanić i Žutica donijelo je iznimno dobre rezultate – primijenjene metodologije i znanja koja su vrijedan kapital i podloga za projektiranje takvih i sličnih projekata u bližoj budućnosti. S obzirom na to da INA u svom portfelju ima mnogo djelomično ili potpuno iscrpljenih plinskih i naftnih ležišta, EOR projekt i njegovi rezultati biti će ugrađeni u svaki novi manji ili veći pothvat u području tercijarnih metoda crpljenja. Važnost EOR projekta ne podrazumijeva samo razmatranje količina dodatnog iscrpka ugljikovodika, već ima i veoma važan okolišni aspekt projekta – izdvajanje, upotrebu i skladištenja CO₂

Od listopada 2014. do listopada 2019. na EPU Ivanić proizvedeno je ukupno 1 579 429 boe nafte i plina, od čega je 677 129 boe isključivo doprinos EOR

projekta. Izraženo u postotcima, to je povećanje iscrpka od 35% u odnosu na predviđenu proizvodnju koja bi se ostvarila da nije primijenjeno utiskivanje ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte u sklopu EOR projekta. Današnja dnevna proizvodnja nafte i plina odgovarala bi proizvodnji nafte iz 2000., dok je udio EOR projekta u dnevnoj proizvodnji 65%.

Tijekom četiri godine utiskivanja ugljičnog dioksida na EPU Žutica dnevna proizvodnja nafte i plina povećana je više od sedam puta, a ukupno je proizvedeno 390 136 boe nafte i plina. Od toga je 300 534 boe isključivo doprinos EOR projekta. U postotcima to je povećanje iscrpka od 77%.

Abstract

Five-year experience with CO₂ injection into the reservoirs of the Ivanić and Žutica producing fields has resulted in valuable methodologies and skills which will be the base for designing similar projects in the near future. Considering a large number of partially or fully depleted oil and gas reservoirs in INA's portfolio, EOR project and its results will be built into each

small-scale or large-scale tertiary recovery venture. The importance of EOR project is not only reflected in incremental production volumes, but it also has an important environmental aspect – CO₂ sequestration, use and storage.

From October 2014 to October 2019 a total of 1, 579, 429 boe of oil and gas was produced from the Ivanić field, of which 677,129 boe can be attributed exclusively to the EOR project. In percentages, it is 35% recovery increase compared to anticipated production which would be obtained without implementation of carbon dioxide injection for enhanced oil recovery. Current daily oil and gas production corresponds to oil production from 2000, while the share of the EOR project in daily production is 65%.

During four years of carbon dioxide injection in the Žutica field daily oil and gas production increased by more than 7.5 times, and total hydrocarbon production amounted to 390,136 boe. Of this amount 300,534 boe or 77% can be attributed exclusively to the EOR project.

1. Uvod

Utiskivanje plinova, odnosno ugljičnog dioksida (u daljnjem tekstu CO₂) jedna je od najstarijih metoda za povećanje iscrpka nafte iz naftnih ležišta (engleski *Enhanced Oil Recovery Methods*, u daljnjem tekstu EOR metode, EOR projekt). U sklopu EOR metoda utiskivanje CO₂ dominira metoda povećanja iscrpka nafte iz naftnih ležišta jer se više od 60% odnosi na primjenu metode utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte. U SAD-u je u tijeku više od 200 projekata utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte. Prva primjena utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte bila je 1958. na polju Dewey-Bartlesville u Oklahomi u Sjedinjenim Američkim Državama. Komercijalni početak primjene utiskivanja CO₂ dogodio se u sedamdesetim godinama prošlog stoljeća također u SAD-u.

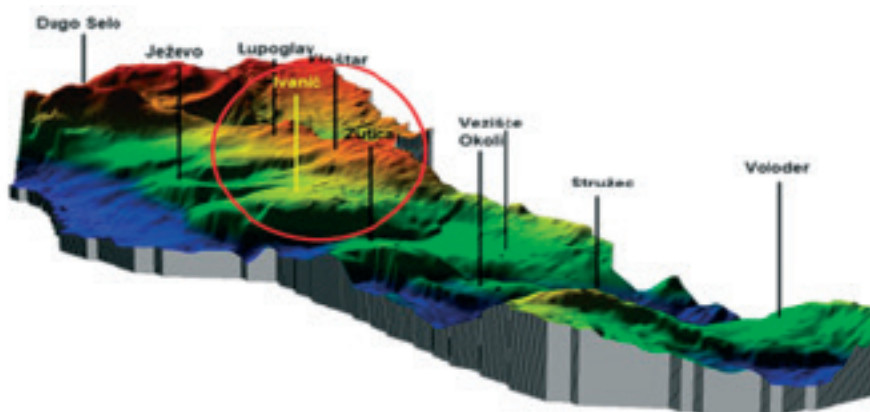
Početak razvoja tercijarnih metoda u Hrvatskoj veže se uz razdoblje od 1978. do 1991., kada su počela brojna teorijska i laboratorijska istraživanja. Laboratorijska ispitivanja, na uzorcima ležišnih stijena s 14 najvećih eksploatacijskih polja u Hrvatskoj, potvrdila su eksploatacijska polja ugljikovodika Ivanić i Žutica kao najbolje kandidate za primjenu naizmjeničnog utiskivanja ugljičnog dioksida i vode za povećanje iscrpka nafte i plina (2, 3, 10). Od 2001. do 2006. na manjem dijelu eksploatacijskog polja ugljikovodika

Ivanić uspješno je provedeno pokusno naizmjenično utiskivanje ugljičnog dioksida i vode (u daljnjem tekstu pilot-projekt) (5, 6, 7, 14). Tijekom pilot-projekta, odnosno nakon dva naizmjenična ciklusa utiskivanja ugljičnog dioksida i vode iz dviju proizvodnih bušotina proizvedeno je 5000 m³ nafte te je tako potvrđena djelotvornost ugljičnog dioksida i vode za istiskivanja nafte iz ležišta na EPU Ivanić i Žutica.

Odabir vrste procesa utiskivanja CO₂ i prognoza budućeg proizvodnog ponašanja ležišta odrađeni su na temelju numeričkog modela izrađenog u programskom paketu Eclipse. Kao optimalna varijanta realizacije EOR projekta odabran je WAG proces (engleski: *Water-Alternating-Gas*) koji se temelji na naizmjeničnom utiskivanju ugljičnog dioksida i vode u trajanju od dvije godine za svaku fazu (1, 2). Numerički model za EPU Ivanić dodatno je usklađen i optimiziran u skladu s podacima i rezultatima dobivenim tijekom pilot-projekta.

Izgradnja potrebne površinske infrastrukture i postrojenja te opremanje bušotina za utiskivanje ugljičnog dioksida odvijali su se u dvije faze (8). Prva faza odnosila se na razdoblje od 2012. do 2014. i uključivala je izgradnju kompresorskih stanica za CO₂ na procesnim postrojenjima Molve i Etan, membranskih separatora na EPU Žutica, sustava cjevovoda za utiskivanje CO₂ i vode te opremanje bušotina na EPU Ivanić i sjevernom dijelu EPU Žutica. Druga faza, koja je trajala od 2014. do 2016., obuhvatila je opremanje bušotina na južnom dijelu EPU Žutica. Na eksploatacijskom polju ugljikovodika Ivanić pokusno utiskivanje ugljičnog dioksida počelo je u listopadu 2014., na sjevernom dijelu EPU Žutica u listopadu 2015., dok je na južnom dijelu EPU Žutica započelo u veljači 2020. godine.

Tijekom pet godina utiskivanja ugljičnog dioksida u sklopu monitoringa obavljena su brojna mjerenja, uzrokovanja fluida i kontrola procesa istiskivanja nafte iz ležišta na polju Ivanić i Žutica sjever. Ukupno je u naftna ležišta na EPU Ivanić i Žutica utisnuto više od milijarda m³ CO₂ s Centralne plinske stanice Molve (u daljnjem tekstu CPS Molve) u Podravini. Rezultati u proizvodnji nafte i plina, kao i rezultati dobiveni laboratorijskim analizama u dovoljnoj mjeri omogućuju dodatno usklađivanje, odnosno kalibriranje numeričkog modela radi optimalnog vođenja procesa utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte na eksploatacijskom polju ugljikovodika Ivanić i Žutica sjever. U tijeku je početak monitoringa rezultata i na južnom dijelu ležišta eksploatacijskog polja ugljikovodika Žutica. Osim dodatnih količina nafte i plina u proizvodnji, EOR



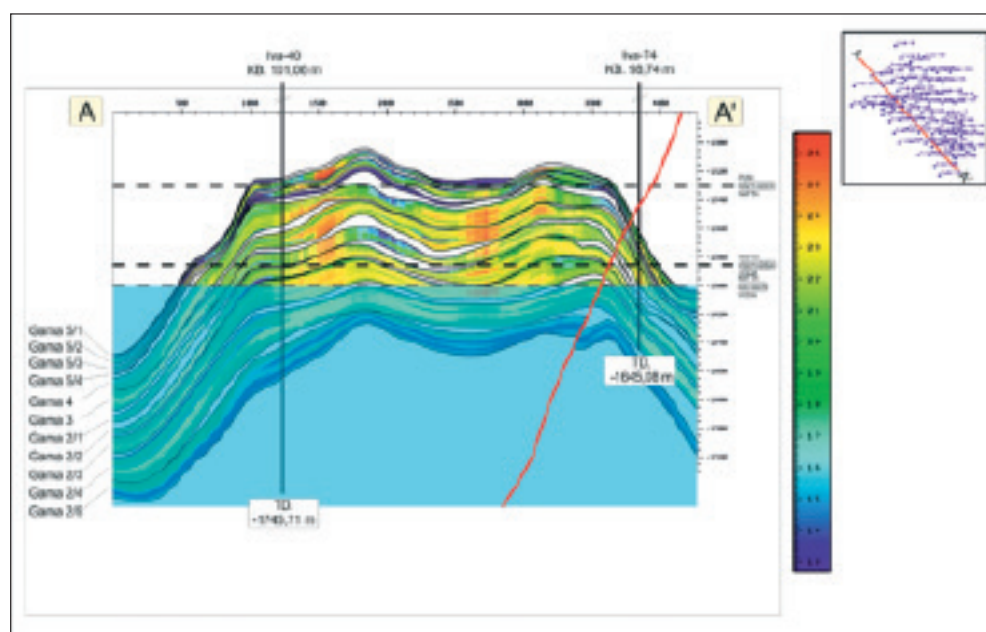
Slika 1. Geološki strukturni model eksploatacijskih polja zapadnog dijela Savske depresije

projekt ima i ekološku dimenziju s obzirom na to da će u ležištima eksploatacijskih polja Ivanić i Žutica ostati trajno zbrinute znatne količine CO₂.

2. Geološki opis i povijest proizvodnje nafte i plina na polju Ivanić i Žutica

Proizvodna polja Ivanić i Žutica nalaze se u sjeverozapadnom dijelu Savske depresije, oko 40 kilometara jugoistočno od Zagreba. Strukture Ivanić i Žutica dio su strukturnog niza koji počinje na sjeverozapadu strukturom Kloštar, a završava strukturom Okola na jugoistoku i prikazan je na slici 1. Sa strukturnog stajališta na EPU Ivanić to je asimetrična brahiantiklinala čija malo duža os ima pružanje sjeverozapad-jugoistok s blago naglašenim tjemnom na južnom dijelu strukture. Slojevi na krilima antiklinala blago tonu, osim na

južnom krilu, gdje relativno strmo tonu u dublji dio Savske depresije. Seizmičkom interpretacijom utvrđena je prisutnost normalnih i reversnih rasjeda. Na EPU Žutica izdvojeno je više serija i pješčanih slojeva. Najdublje zaliježe gama serija, koja je glavni nosilac ugljikovodika na polju, a plića ležišta čine serije A, B i Z'. Pješčani slojevi te serije oblikovani su u gornjem panonu. Strukturni oblik pješčanog tijela gama serije predstavljen je antiklinalom s dva nadsvođenja, južnim i sjevernim, i strukturnim sedlom između njih. Glavni smjer pružanja strukture jest sjeverozapad-jugoistok. Na poljima Ivanić i Žutica nosioci ugljikovodika su pješčenjaci gornjeg panona izdvojeni kao operativna jedinica gama serija. Iako je riječ o istovrsnim pješčenjacima jednake starosti, postanka i s približno jednakim kolektorskim svojstvima, stjecajem okolnosti razlikuje se nomenklatura ležišta, a osim toga broj u nazivu ležišta na polju Ivanić s dubinom se smanjuje, dok na Žutici raste. Gama serija sastoji se od dobro



Slika 2. Prikaz gama serije na EPU Ivanić

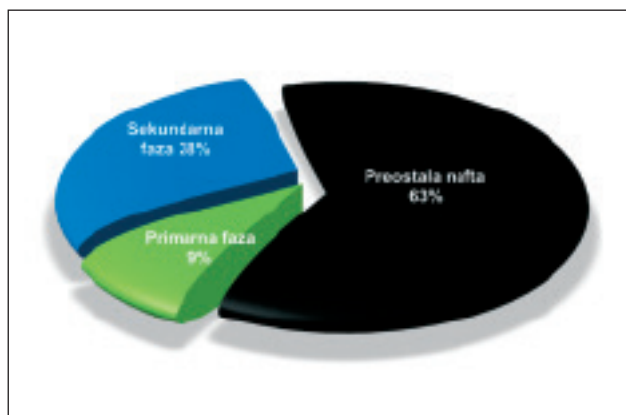
sortiranih, srednje vezanih, sitno do srednje zrnatih kvarcnih pješčenjaka (litoarenita), silita, u izmjeni s laporima. Najzastupljeniji su zrna kvarca, odlomci dolomitnih stijena i tinjci.

Polje Ivanić otkriveno je 1963. bušotinom Iva-4 kojom su utvrđene ekonomski značajne količine nafte gustoće 858 kg/m^3 u pješčenjacima gama serije. Geološki profil EPU Ivanić prikazan je na slici 2. Gama serija na EPU Ivanić podijeljena je na osam pješčenjačkih intervala: gama5 (γ_5), gama4 (γ_4), gama3 (γ_3), gama2/1 ($\gamma_{2/1}$), gama2/2 ($\gamma_{2/2}$), gama2/3 ($\gamma_{2/3}$), gama2/4 ($\gamma_{2/4}$) i gama2/5 ($\gamma_{2/5}$) te na dvije hidrodinamičke cjeline. Prvu hidrodinamičku cjelinu čini interval gama5, s kontaktom plin-nafta (plinska kapa) na -1530 m te kontaktom nafta-voda utvrđenim na -1585 m. Drugu hidrodinamičku cjelinu čine intervali gama4 do gama2/4 (ukupno šest produktivnih intervala) s jedinstvenim kontaktom nafta-voda na -1600 m. Ležište gama2/5 potpuno je zasićeno vodom. Između dvije hidrodinamičke cjeline nalazi se kontinuirani sloj lapora.

Raspon prosječnih vrijednosti petrofizikalnih pokazatelja za gama seriju:

Poroznost, ϕ	21,5 - 23,6%
Zasićenje vodom, S_w	26 - 42%
Propusnost, k	15 - 80 mD

Na polju je izrađeno 87 kanala bušotina, od kojih je trenutačno 43 proizvodnih, 16 bušotina za naizmjenično utiskivanje CO_2 i vode ili *water alternating gas* bušotina (u daljnjem tekstu WAG) i četiri vodoutisne bušotine. Početni tlak i temperatura ležišta određeni su brojnim mjerenjima porasta tlaka na bušotinama. Utvrđen je početni tlak u ležištu od 183,3 bara i početna temperatura od $97,7^\circ\text{C}$. S obzirom na to da je u ležištu gama₅ ustanovljena prisutnost plinske kape, tlak zasićenja ležišne nafte jednak je početnom tlaku ležišta od 183,3 bar. Smatra se da ležišta gama4 do gama2/4 dijele karakteristike slojnih fluida s tlakom zasićenja od 137,2 bar. Primarna faza proizvodnje na polju počela je krajem 1963. i trajala je do kraja 1972., uz iscrpak nafte od 9,1%, koji je prikazan na slici 3. Zbog naglog pada tlaka, karakterističnog za ležišta iskorištavana režimom otopljenog plina, krajem 1972. utiskivanjem vode počela je sekundarna faza proizvodnje. Primijenjen je sustav utiskivanja vode s režućim redovima, s dva periferne utisna reda (na sjeverozapadnom i jugoistočnom dijelu polja) i jednim „režućim“ koji prolazi sredinom



Slika 3. Grafički prikaz iscrpka nafte u primarnoj i sekundarnoj fazi iskorištavanja EPU Ivanić

polja. Ukupan iscrpak nafte nakon sekundarne faze, koja je trajala do listopada 2014., iznosio je 37,5% i prikazan je na slici 3.

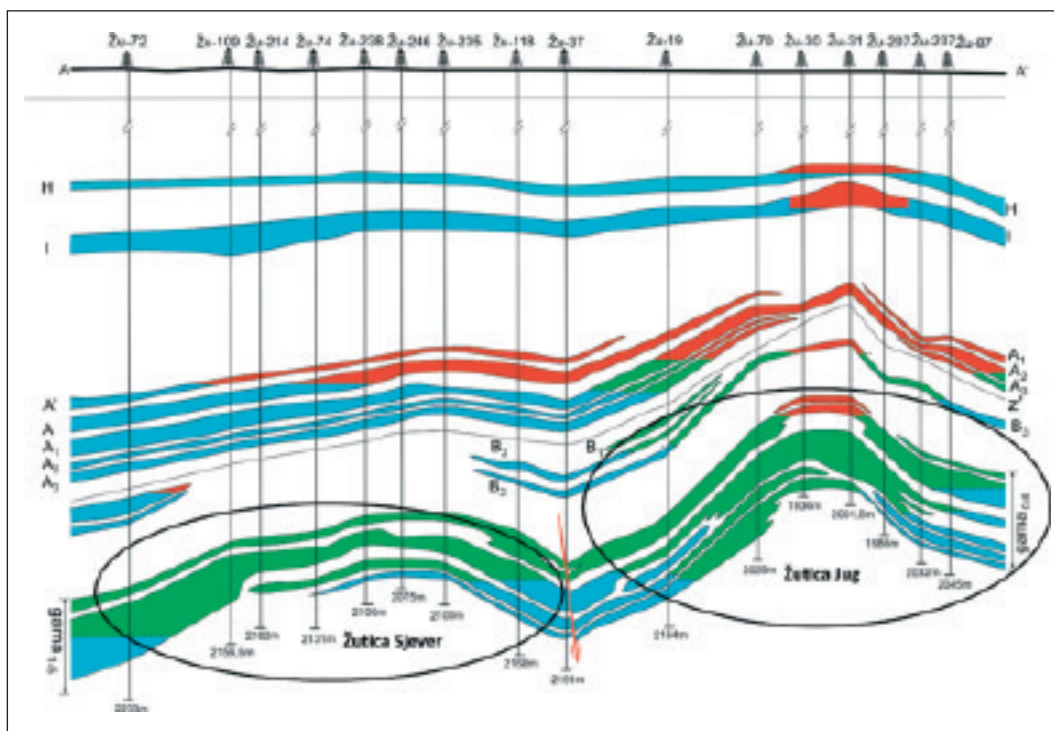
EPU Žutica otkrivena je 1963. istražnom bušotinom Žu-1. U istražnoj fazi rada koja je trajala do 1965. na polju je izrađeno deset istražnih bušotina, nakon čega polje prelazi na daljnju razradu. Prema površini nafto-plinonosti i utvrđenim zalihama pješčana serija gama najveći je i glavni nositelj ugljikovodika na polju Žutica. Budući da strukturno stvara antiklinalnu formu s dva nadsvođenja, sjeverno i južno, koja su odvojena blagim sedlom, polje je podijeljeno na Žuticu sjever i Žuticu jug, što je prikazano na slici 4. U ovom radu naglasak je stavljen na Žuticu sjever.

Gama serija na sjevernom djelu polja Žutica podijeljena je na četiri pješčenjačka intervala: gama1 (γ_1), gama2a (γ_{2a}), gama2 (γ_2) i gama5 (γ_5).

Raspon prosječnih vrijednosti petrofizikalnih parametara za gama seriju:

Poroznost, ϕ	16 - 22%
Zasićenje vodom, S_w	26 - 42%
Propusnost, k	5 - 90 mD

Dosad je na polju Žutica izrađeno 303 kanala bušotina, od čega se 80 kanala nalazi na sjevernom dijelu polja. Trenutačno se na Žutici sjever nalaze 33 proizvodne, osam WAG i pet vodoutisnih bušotina. Utvrđeni početni tlak u ležištima gama serije na sjevernom djelu polja Žutica iznosio je 219 bar, uz temperaturu ležišta od $110,7^\circ\text{C}$. Smatra se da ležišta gama1 do gama5 dijele karakteristike slojnih fluida s tlakom zasićenja od 210 bar.

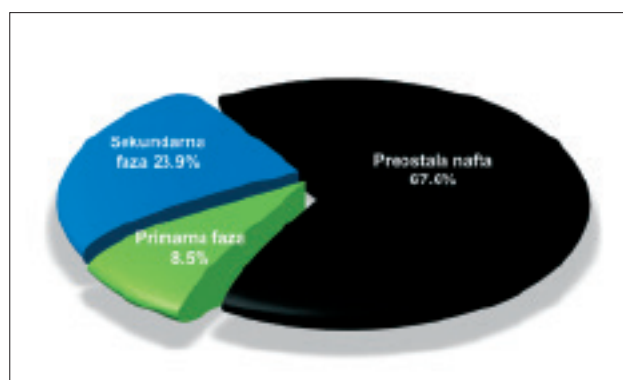


Slika 4. Prikaz gama serije na EPU Žutica

Primarna faza proizvodnje na Žutici sjever počela je u srpnju 1966. i trajala je do kolovoza 1976., uz iscrpak nafte od 8,5%, koji je prikazan na grafikonu 5. Zbog nedostatka utjecaja vodonapornog režima i naglog pada tlaka u kolovozu 1976. započeta je sekundarna faza proizvodnje utiskivanjem vode. Baš kao i na polju Ivanić, primijenjen je sustav utiskivanja vode režućim redovima. Ostvaren ukupan iscrpak nafte nakon sekundarne faze iznosio je 32,4%, a prikazan je na slici 5.

3. Tercijarna faza proizvodnje - povećanje iscrpka nafte utiskivanjem CO₂

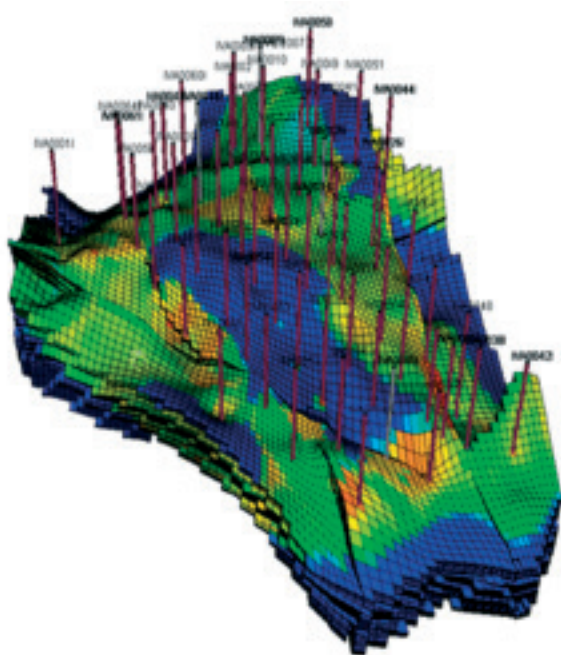
Višegodišnja razmatranja mogućnosti primjene neke metode povećanja iscrpka nafte, temeljena na rezultatima laboratorijskih ispitivanja, potvrdila su da su naftna polja Ivanić i Žutica, međusobno vrlo slična po sastavu nafte i karakteristikama ležišne stijene, izvrsni kandidati za povećanje iscrpka utiskivanjem CO₂. Učinkovitost procesa istiskivanja nafte utiskivanjem ugljičnog dioksida u uvjetima miješanja u osnovi se odnosi na poništavanje međupovršinske napetosti između ugljičnog dioksida i fluida u ležištu. Pritom dolazi do nekoliko pozitivnih učinaka (3, 11, 12, 13) koji su utvrđeni tijekom ispitivanja u laboratoriju te koji utječu na povećanje iscrpka nafte. Vrlo je važno utvrditi minimalni tlak miješanja. Prema Yelling &



Slika 5. Grafički prikaz iscrpka nafte u primarnoj i sekundarnoj fazi iskorištavanja EPU Žutica

Metcalfe u laboratorijskoj proceduri takozvanim slim tube testom određen je minimalni tlak miješanja (u daljnjem tekstu MMP) između 190 i 200 bar. Taj podatak o MMP-u blizu je početnog ležišnog tlaka od 183 bar. (2)

No tijekom utiskivanja ugljičnog dioksida u ležište, u uvjetima miješanja, dolazi do procesa difuzije i disperzije, odnosno do prijenosa mase na kontaktu utisnutog ugljičnog dioksida i ležišnog fluida. Upravo je zato pri projektiranju takvih procesa povećanja iscrpka nafte iz ležišta primarno dobro poznavanje mehanizama miješanja fluida u ležišnim uvjetima. Mehanizam istiskivanja nafte ugljičnim dioksidom sastoji se od znatnog povećanja volumnog faktora nafte (tzv. faktor bubrenja nafte) i smanjivanja viskoznosti zbog velike

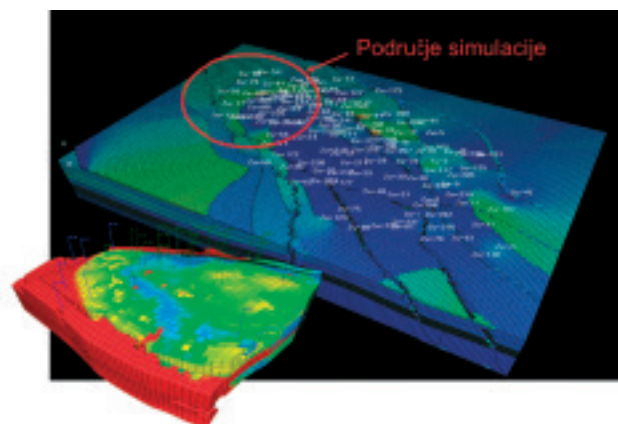


Slika 6. Numerički model polja Ivanić

topivosti CO_2 u nafti te učinaka uzajamnog miješanja istiskivane nafte i injektiranog CO_2 . Za simulaciju tih procesa istiskivanja fluida iz ležišta postoje razni programi, odnosno matematički modeli.

Upotrebom tih programa, odnosno matematičkih modela mogu se približno definirati uvjeti koji vladaju u ležištu, tj. može se opisati višefazno protjecanje fluida. Od 2003. do 2005. provedeno je probno (pilot) utiskivanje CO_2 u ležište gama2/4 (5,6). To je najdublje naftonosno ležište nafte i plina na EPU Ivanić. Rezultati pilot-projekta (5, 6) poslužili su za izradu simulacijskog modela (1) cijelog polja, koji se upotrebljavao za usklađivanje povijesti proizvodnje polja Ivanić i simulaciju različitih scenarija predviđanja buduće proizvodnje primjenom tercijarne metode utiskivanja CO_2 . Odabir vrste procesa i prognoza budućeg proizvodnog ponašanja ležišta odrađeni su na temelju numeričkog modela za polje Ivanić izrađenog u programskom paketu Eclipse i prikazanog na slici 6, dok je za EPU Žutica proizvodnja predviđena analogijom prema numeričkom modelu za EPU Ivanić. Takav simulacijski model za polje Žutica prikazan je na slici 7.

Za utiskivanje CO_2 na polju Ivanić odabrano je pet od ukupno sedam ležišta gama serije ($\gamma_4, \gamma_3, \gamma_{2/1}, \gamma_{2/2}, \gamma_{2/3}$). U ležišta $\gamma_{2/4}$ i γ_5 nije planirano utiskivanje CO_2 s obzirom na to da je ležište $\gamma_{2/4}$ sudjevalo u pilot-fazi projekta, a ležište γ_5 sadržava plinsku kapu. Prije početka utiskivanja ugljičnog dioksida u ležišta gama serije utvrđen je srednji ležišni tlak od 120



Slika 7. Simulacijski model polja Žutica

bar, što je znatno niže od minimalnog tlaka miješanja utvrđenog u laboratorijskim uvjetima.

Numeričkom simulacijom predviđen je WAG proces utiskivanja CO_2 za istiskivanja fluida iz ležišta na EPU Ivanić i Žutica. Inicijalna shema WAG procesa predviđala je dvogodišnje utiskivanje CO_2 , nakon kojeg bi slijedilo dvogodišnje utiskivanje vode u trajanju od 24 godine (1). Početne programirane dnevne količine CO_2 za utiskivanje iznosile su 400 000 m^3/d za polje Ivanić i 200 000 m^3/d za polje Žutica sjever. Nakon dvije godine utiskivanja CO_2 u ležišta EPU Ivanić i Žutica sjever plan je bio početi utiskivanje 600 000 m^3/d CO_2 i u ležišta na Žutici jug. Shema inicijalnog plana utiskivanja CO_2 i vode prikazana je na slici 8.

U projektu su na EPU Ivanić uključene 43 proizvodne bušotine, 16 WAG bušotina koje služe za naizmjenično utiskivanje CO_2 i vode u ciklusima te četiri vodoutisne bušotine, dok su na polju Žutica sjever

	2014	2015	2016	2017
IVANIĆ	400 000	400 000		
ŽUTICA SJEVER	200 000	200 000		
ŽUTICA JUG			600 000	600 000

	2014				2015				2016				2017											
WAG	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
na-5																								
na-6																								
na-18																								
na-28																								
na-21																								
na-6																								
na-22																								
na-24																								
na-29																								
na-23																								
na-70																								
na-80																								
na-82																								
na-84																								

Slika 8. Početni plan WAG utiskivanja CO_2 na EPU Ivanić i Žutica

uključene 33 proizvodne bušotine, osam WAG bušotina koje služe za naizmjenično utiskivanje CO₂ i vode u ciklusima te tri vodoutisne bušotine. Na polju Žutica jug plan je bio da u projekt bude uključena 81 proizvodna bušotina, 16 WAG bušotina koje služe za naizmjenično utiskivanje CO₂ i vode u ciklusima te pet vodoutisnih bušotina.

4. Opis sustava za utiskivanje CO₂ i vode u ležišta EPU Ivanić i Žutica

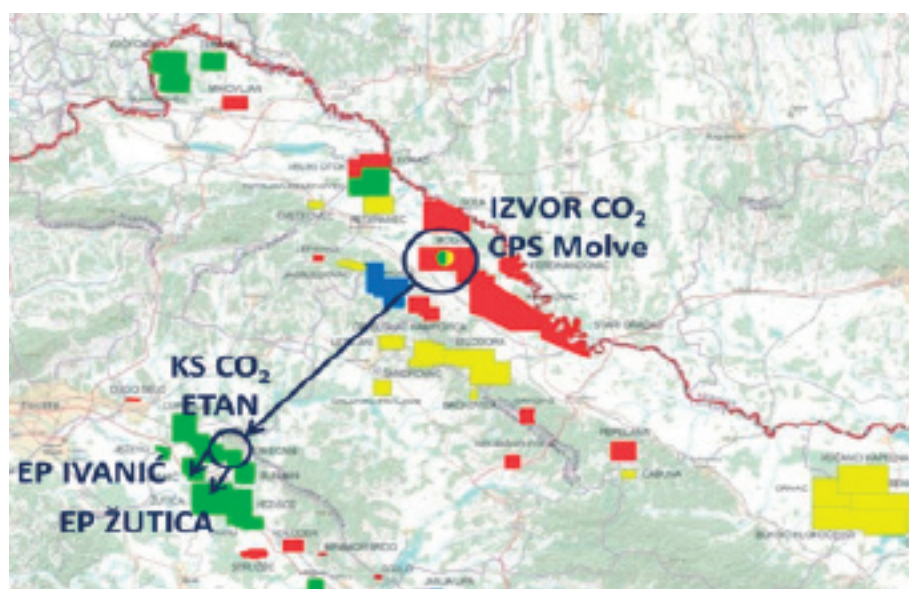
Izvor ugljičnog dioksida za potrebe utiskivanja u naftna ležišta na EPU Ivanić i Žutica su ležišta prirodnog plina iz polja Molve, Kalinovac, Stari Gradac i Gola u Podravini. Uz primjenu najsuvremenije tehnologije i pridržavanje mjera zaštite okoliša već se 39 godina proizvodi prirodni plin i plinski kondenzat iz ležišta duboke Podravine. Osim ugljikovodičnih komponenti prirodni plin iz ležišta duboke Podravine sadržava ugljični dioksid od 9,02% s polja Stari Gradec preko 23,75% s polja Molve do 53,6% na polju Gola. Tehnološkim procesom obrade na CPS Molve CO₂ se iz prirodnog plina izdvaja metodom apsorpcije 40-postotne otopine metildietanolamina. Prije izgradnje kompresorske stanice za CO₂, odnosno implementacije EOR projekta, CO₂ se na CPS Molve ispuštao u atmosferu.

Sustav za utiskivanje ugljičnog dioksida sastoji se od izvora ugljičnog dioksida koji je na CPS Molve te cjevovoda DN 500 za transport CO₂ do Ivanić-Grada, kompresorske i pumpne stanice sa sustavom za ukapljivanje CO₂ na Procesnom postrojenju Etan u Ivanić-Gradu (u daljnjem tekstu PP Etan) te sustava cjevovoda za distribuciju ugljičnog dioksida i vode do

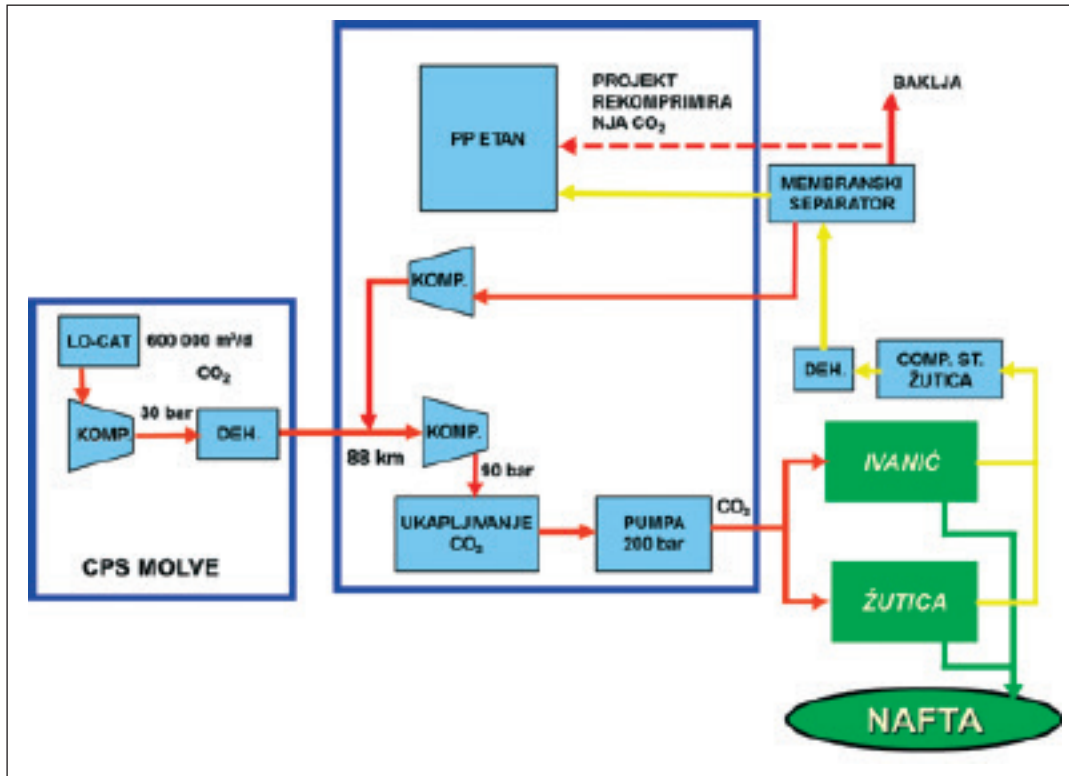
utisnih bušotina na EPU Ivanić i Žutica. Cjelovit sustav prikazan je na slici 8, a pojednostavljen prikaz sustava za utiskivanje ugljičnog dioksida od CPS Molve do PP Etan Ivanić-Grad, odnosno do bušotina na EPU Ivanić i Žutica prikazan je na slici 9.

Izgradnja postrojenja na CPS Molve i PP Etan u Ivanić-Gradu te sustava cjevovoda za utiskivanje ugljičnog dioksida do svih utisnih bušotina na EPU Ivanić i Žutica počela je sredinom 2012. te je završena početkom 2014 (8). Na CPS Molve izgrađena je nova kompresorska stanica za CO₂, koja je prikazana na fotografiji 10. Izdvojeni ugljični dioksid iz tehnološkog procesa na CPS Molve prije komprimiranja dodatno se pročišćava u postrojenju za filtraciju. Zatim se ugljični dioksid komprimira na tlak od 30 bar, pročišćava od tekuće faze (u dehidracijskoj koloni) te transportira DN 500 plinovodom do Ivanić-Grada. Navedeni je plinovod prije probnog rada cijelog sustava za utiskivanje ugljičnog dioksida pregledan uređajem za mjerenje debljine stjenke nošen fluidom (takozvani pametni kracer). Na temelju podataka dobivenih mjerenjem duž 88 kilometara trase plinovoda određene dionice cjevovoda i sekcijских čvorova su zamijenjene. Na PP Etan obnovljena je kompresorska stanica koja je dopunjena sustavom za ukapljivanje CO₂ te novom pumpnom stanicom za transport CO₂ do utisnih WAG bušotina na EPU Ivanić i Žutica. Kompresorska i pumpna stanica sa sustavom za ukapljivanje ugljičnog dioksida na PP Etan u Ivanić-Gradu prikazana je na slici 11.

Osim toga, na EPU Žutica u sklopu postojeće kompresorske stanice postavljeni su membranski separatori za izdvajanje CO₂ iz proizvedenog naftnog plina. Na fotografiji 12 prikazani su membranski separatori na KS Žutica.



Slika 9. Prikaz sustava za utiskivanje CO₂ od CPS Molve do EPU Ivanić i Žutica



Slika 10. Shema pojednostavljenog tehnološkog procesa komprimiranja, transporta i utiskivanja CO₂ u EPU Ivanić i Žutica



Slika 11. Kompresorska stanica za ugljični dioksid na CPS Molve

Sustav cjevovoda za utiskivanje CO₂ od KS CO₂ u Ivanić-Gradu do utisnih bušotina na EPU Ivanić i Žutica u ukupnoj dužini od više od 40 kilometara te sve ostale instalacije (kabeli, svjetlovođi i slično) za kontinuirani monitoring utiskivanja ugljičnog dioksida i vode postavljeni su na površini od 30 četvornih metara na EPU Ivanić i Žutica.

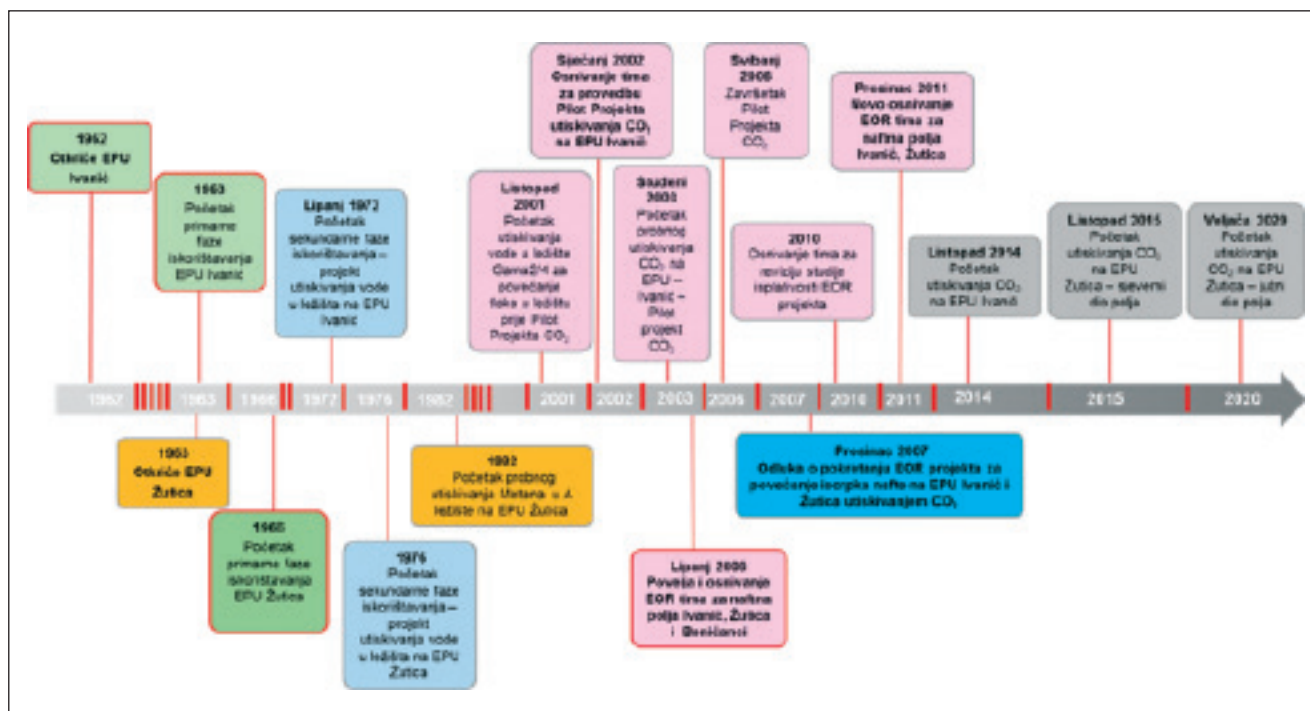
Utiskivanje ugljičnog dioksida i vode na EPU Ivanić i Žutica sjever zahtijevalo je dodatno zacjevljenje postojećih kanala utisnih i drugih bušotina. Pri zacjevljenju bušotina novim zaštitnim cijevima i njihovim cementiranjem cementom otpornim na CO₂ uspješno



Slika 12. Kompresorska i pumpna stanica sa sustavom za ukapljivanje ugljičnog dioksida u Ivanić-Gradu



Slika 13. Membranski separatori za izdvajanje CO₂ iz prirodnog plina na KS Žutica



Slika 14. Tijek aktivnosti na EPU Ivanić i Žutica

su primijenjena nova tehnološka rješenja. U prvoj fazi, od 2013. do 2014., opremljeno je za utiskivanje CO₂ 14 utisnih WAG bušotina na EPU Ivanić i osam WAG bušotina na polju Žutica sjever. Osim toga, zacjevljeno je i opremljeno pet bušotina za utiskivanje vode na EPU Ivanić te osam bušotina na EPU Žutica. Druga faza uključila je opremanje bušotina na južnom dijelu EPU Žutica tijekom 2016., prilikom čega je zacjevljeno 16 kanala utisnih WAG bušotina. Nakon ispitivanja cijelog sustava od CPS Molve preko kompresorske i pumpne stanice za CO₂ na PP Etan u Ivanić-Gradu, u listopadu 2014. počeo je prvi ciklus utiskivanja ugljičnog dioksida. Početne količine ugljičnog dioksida bile su dostatne samo za utiskivanje u 14 WAG bušotina na EPU Ivanić. Naknadnim puštanjem u rad jedinice za filtriranje CO₂ na CPS Molve omogućen je kontinuiran rad kompresorske stanice u punom instaliranom kapacitetu (600 000 m³/d). Time su osigurane i projektirane dnevne vrijednosti ugljičnog dioksida za utiskivanje te je u listopadu 2015. počelo utiskivanje u EPU Žutica sjever. Utiskivanje ugljičnog dioksida u drugoj fazi EOR projekta, odnosno u utisne WAG bušotine na EPU Žutica jug počelo je u veljači 2020.

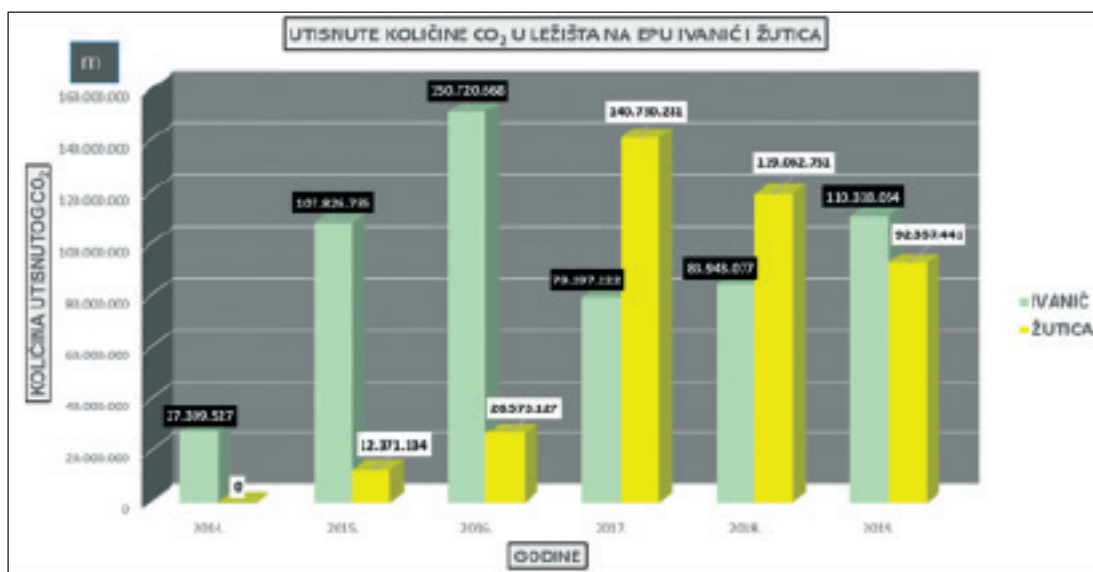
Na slici 13 prikazan je tijek aktivnosti na EPU Ivanić i Žutica u primarnoj i sekundarnoj fazi iskorištavanja. Ujedno su naznačene osnovne aktivnosti vezane uz tercijarnu fazu iskorištavanja ležišta na EPU Ivanić i Žutica.

5. Ostvareni rezultati tijekom petogodišnjeg utiskivanja u ležišta EPU Ivanić i Žutica

Početni rezultati primjene utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte i plina na EPU Ivanić i Žutica objavljeni su već u literaturi (8). Tijekom pet godina primjene EOR projekta na EPU Ivanić i sjevernom dijelu EPU Žutica ukupno je utisnuto malo manje od milijarde m³. Tabelarni i grafički prikaz utisnutih količina prikazan je u tablici 1 i slici 14.

Od 43 proizvodne bušotine na EPU Ivanić trenutno samo tri bušotine proizvode eruptivnim načinom, dok ostale proizvode pomoću dubinskih sisaljki (centrifugalne i klipne). Broj proizvodnih bušotina u radu je varirao tijekom pet godina monitoringa rezultata utiskivanja ugljičnog dioksida s obzirom na to da su se pojedine bušotine s visokim udjelom vode u proizvodnji (< 98%) svjesno zatvarale radi podizanja ležišnog tlaka. Tijekom 2018. u sklopu projekta optimizacije sustava podizanja kapljevine (u daljnjem tekstu ALO projekt) umjesto klipnih dubinskih sisaljki na 19 bušotina instalirane su centrifugalne dubinske sisaljke, uz kontinuirano doziranje inhibitora korozije. Sve to dovelo je do smanjenja broja remontnih radova.

Usporedbom mjerenih proizvodnih podataka s vrijednostima koje su se očekivale na temelju prijašnjih proračuna dobivenih numeričkom simulacijom



Slika 15. Grafički prikaz utisnutih količina CO₂ u ležišta EPU Ivanić i Žutica od 2014. do 2019.

Tablica 1: Utisnute količine CO₂ u ležišta EPU Ivanić i Žutica od 2014. do 2019.

UTIS CO ₂ U LEŽIŠTA NA EPU IVANIĆ I ŽUTICA		
GODINA	IVANIĆ	ŽUTICA
	m ³	
2014.	27.309.527	0
2015.	107.826.735	12.371.134
2016.	160.720.668	26.573.127
2017.	79.297.222	140.730.261
2018.	83.643.077	119.062.751
2019.	110.338.054	92.357.441
UKUPNO	559.436.283	301.004.734

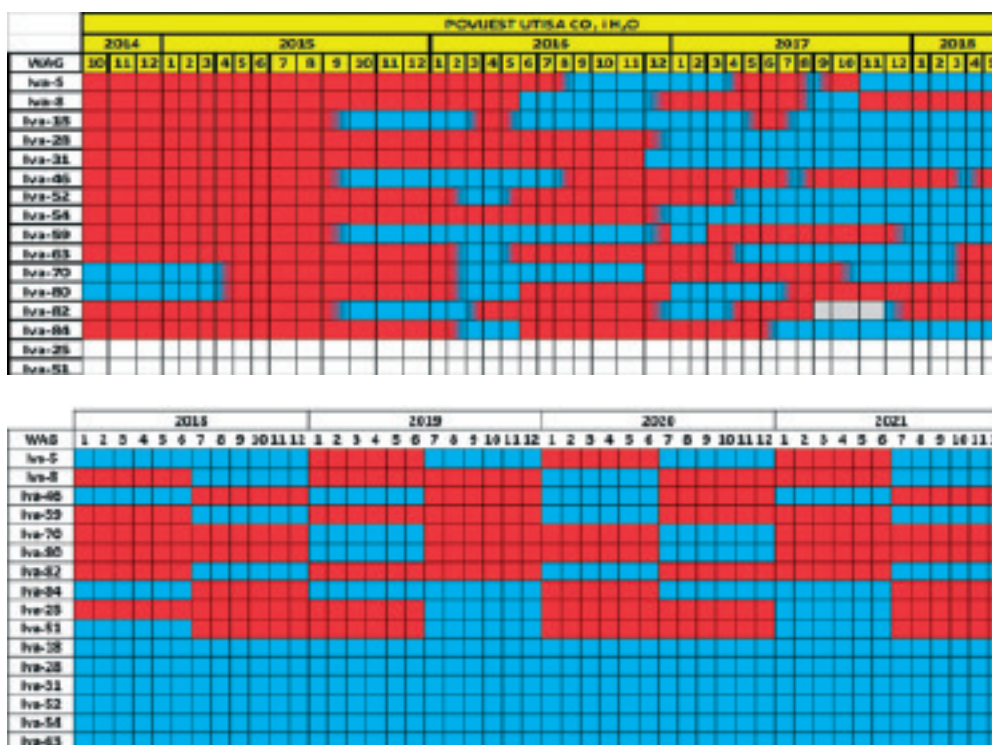
zamijećen je znatno brži prodor CO₂ od utisnih do proizvodnih bušotina. Udio CO₂ u proizvedenom plinu na pojedinim bušotinama počeo se povećavati već nakon prvih mjeseci utiskivanja te je zato donesena odluka o skraćivanju pojedinih ciklusa utiskivanja CO₂ u one bušotine na kojima se praćenjem ustanovilo da je došlo do prodora CO₂. Time je napušten prvotni plan o dvogodišnjem naizmjeničnom utiskivanju ugljičnog dioksida i vode. Prema iskustvima iz najbolje svjetske prakse odlučeno je da se ciklusi utiskivanja voda/ugljični dioksid na cijelom polju izmjenjuju svaki mjesec. Povijest utiskivanja CO₂ i plan utiskivanja za EPU Ivanić prikazan je na slici 15 za razdoblje 2014. do 2019. te na slici 16 za EPU Žutica sjever.

Spoznaja da su predviđanja budućeg ponašanja ležišta numeričkim modelom u diskrepanciji sa stvarnim ponašanjem ležišta rezultirala je potrebom za integriranim pristupom svih struka te promjenom i poboljšanjem početnog numeričkog modela za EPU Ivanić. U sklopu toga osmišljena je kampanja karotažnih mjerenja profila utiskivanja CO₂ u gama serije, a i drugih

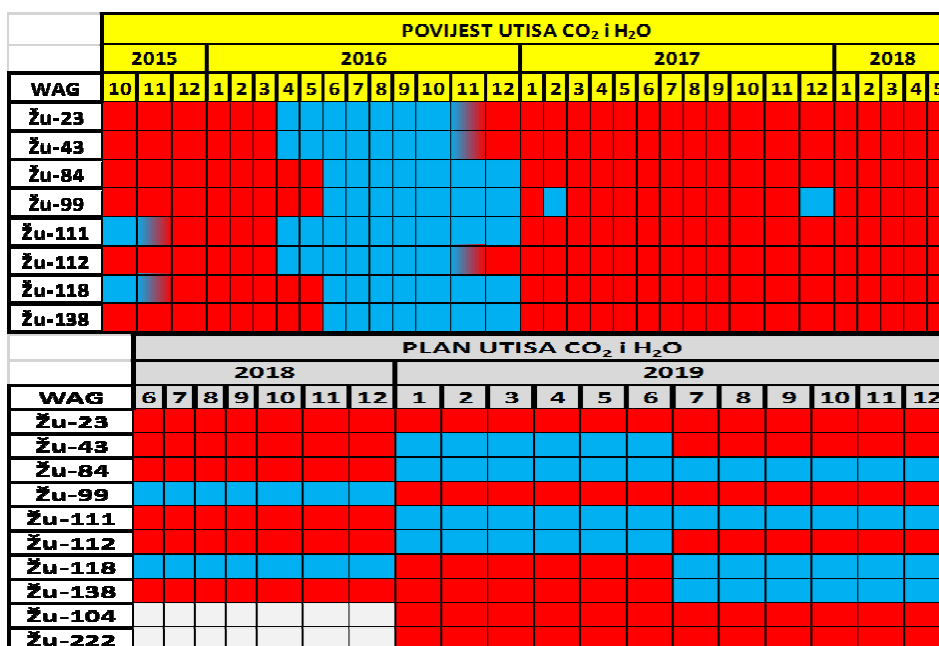
elektrokarotažnih mjerenja (9), koja je prikazana na slici 17. Cilj je bio utvrditi u kojim se omjerima ugljični dioksid utiskuje u pojedina ležišta gama serije. Rezultati analiza tih mjerenja, ali i svih ostalih mjerenja obavljenih u sklopu procesa monitoringa (redovita mjerenja dinamičke i statičke razine kapljavine, hidrodinamička mjerenja u bušotinama, mjerenja proizvodnih količina pokretnim mjernim separatorom, laboratorijske analize fluida i slično) poslužili su za generiranje prediktivnijeg dinamičkog modela.

Tijekom 2018. analizirana je osjetljivost modela na različite scenarije trajanja obroka utiskivanja CO₂ i vode te je kao optimalan scenarij odabran jednomjesečni obrok utiskivanja, što je u skladu s primjerima iz najbolje svjetske prakse. Dnevno utiskivanje plina CO₂ iznosi oko 600 000 m³ ili 1100 t.

Od listopada 2014. do listopada 2019. na EPU Ivanić proizvedeno je ukupno 1 579 429 boe nafte i plina, od čega je 677 129 boe isključivo doprinos EOR projekta. Na slici 18 prikazano je kretanje dnevne proizvodnje na EPU Ivanić. Izraženo u postocima, to je povećanje iscrpka od 35% u odnosu na predviđenu proizvodnju koja bi se ostvarila da nije primijenjeno utiskivanje ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte u sklopu EOR projekta. Današnja dnevna proizvodnja nafte i plina odgovarala bi proizvodnji nafte iz 2000., dok je udio EOR projekta u dnevnoj proizvodnji 65%. Ostvarenje boljih rezultata onemogućeno je zbog učestalijih remontnih radova na proizvodnim bušotinama u najvećem broju uzrokovanih zastarjelom opremom i korozijom, ograničenim količinama CO₂ te niskim ležišnim tlakom. O tim pokazateljima ovisit će daljnji stupanj učinkovitosti EOR procesa.



Slika 16. Plan WAG utiskivanja CO2 na EPU Ivanić od 2014. do 2019.

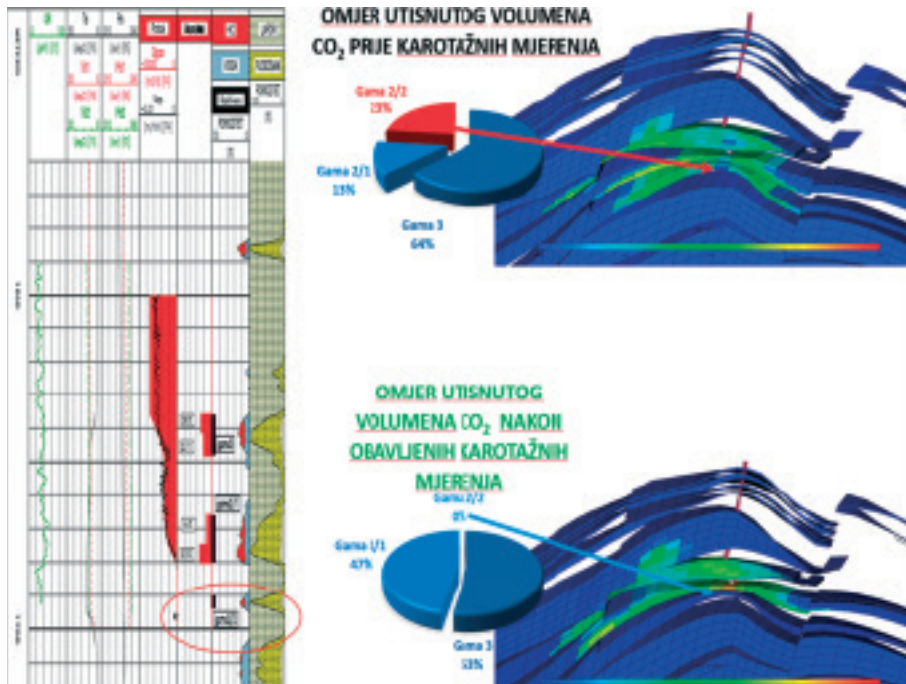


Slika 17. Plan WAG utiskivanja CO2 na EPU Žutica sjever od 2014. do 2019.

Nakon početnih rezultata povećanja iscrpka nafte i plina utiskivanjem ugljičnog dioksida i izazova tijekom tog razdoblja, koji su već objavljeni (4, 8), pripremljen je novi plan aktivnosti za pojedine zone ležišta gama serije na EPU Ivanića i Žutica sjever. To ponajprije uključuje kapitalne remonte bušotina radi otvaranja pojedinih intervala u ležištima, dopucavanja postojećih ležišta ili pak zatvaranja pojedinih intervala. Dobar primjer za to su radovi na eksploatacijskoj bušotini Iva-17 u kojoj je

nakon dopucavanja postojećih ležišta u 2017. godini i zatvaranja/izoliranja pojedinih intervala, bušotina od početka 2019. povećala proizvodnju ugljikovodika s početnih 8,5 m³/dan nafte, 92,7 m³/dan vode i 610 m³/dan plina na 51 m³/dan nafte, 2,5 m³/dan vode i 12 000 m³/dan plina (sadržaj ugljičnog dioksida -50%).

Godinu dana nakon početka utiskivanja ugljičnog dioksida u naftno polje Ivanić, u listopadu 2015. započeto je utiskivanje u naftno polje Žutica sjever



Slika 18. Prikaz mjerenja profila utiskivanja ugljičnog dioksida prije i nakon karotažnih mjerenja

u četiri pješčenjačka intervala gama serije g_1 , g_{2a} , g_2 i g_3 . Trenutačno se na Žutici sjever nalaze 33 proizvodne, osam WAG i pet vodoutisnih bušotina. Za razliku od Ivanića, gdje samo tri bušotine proizvode eruptivnim načinom, na Žutici sjever 85% bušotina proizvodi eruptivnim načinom. Budući da polja Ivanić i Žutica sjever imaju isti izvor CO_2 te dijele infrastrukturu, ciklusi utiskivanja vode i ugljičnog dioksida su usklađeni te se izmjenjuju svaki mjesec. U trenutku utiskivanja CO_2 na polju Ivanić na polju Žutica sjever odvija se utiskivanje vode i obrnuto.

Iako su polja Ivanić i Žutica sjever vrlo slična po sastavu nafte i karakteristikama ležišne stijene, učinak EOR-a na ta dva polja bio je poprilično različit. Rezultati na Žutici sjever mnogo su bolji u odnosu na one postignute na polju Ivanić. Razlog je ležišni tlak, koji je na polju Žutica sjever u trenutku početka EOR projekta iznosio 190 do 200 bar, dok je ležišni tlak na polju Ivanić bio 120 bar. Dobiveni rezultati laboratorijskih ispitivanja pokazali su da je minimalni tlak miješanja slojne nafte i CO_2 na tim poljima 200 bar. Mehanizam istiskivanja nafte s CO_2 odvija se u optimalnim uvjetima pri tlakovima bliskim ili jednakim minimalnom tlaku miješanja. Iako je ukupno ostvarena proizvodnja nafte i plina na polju Ivanić značajnija u odnosu na rezultate ostvarene na polju Žutica sjever, sam učinak EOR metode vidljiviji je na Žutici sjever.

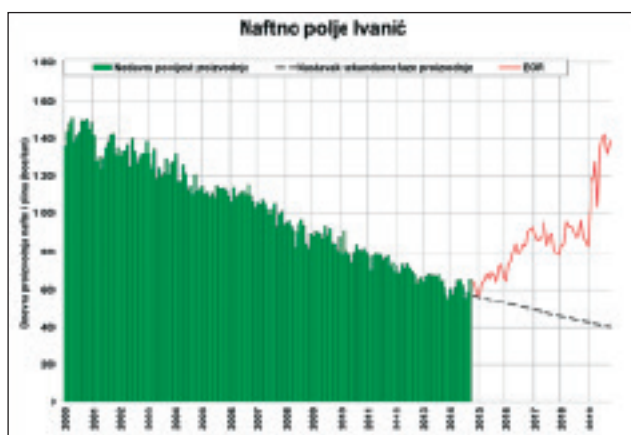
Tijekom četiri godine utiskivanja ugljičnog dioksida u sklopu EOR projekta dnevna proizvodnja nafte i plina povećana je više od sedam puta, a ukupno je proizvedeno 390 136 boe nafte i plina, što je prikazano na slici

19. Od toga je 300 534 boe isključivo doprinos EOR projekta. U postotcima to je povećanje iscrpka od 77% u odnosu na predviđenu proizvodnju koja bi se ostvarila da nije bilo EOR projekta. Današnja dnevna proizvodnja nafte i plina odgovarala bi proizvodnji nafte iz 2005., dok je udio EOR-a u dnevnoj proizvodnji 88%.

6. Izazovi i naučene lekcije tijekom pet godina utiskivanja CO_2 i vode na EPU Ivanić i Žutica

Tijekom puštanja u rad cjelovitog sustava za utiskivanja CO_2 od kompresorske stanice za CO_2 na CPS Molve preko kompresorske stanice za CO_2 na PP Etan do utisnih WAG bušotina na EPU Ivanić i Žutica, nije zabilježen nijedan incident s aspekta zaštite na radu i zaštite okoliša. Isto se odnosi i na sve aktivnosti tijekom izvođenja remontnih radova i mjerenja na utisnim i proizvodnim bušotinama u posljednjih pet godina. No tijekom tog razdoblja u kontekstu proizvodnog i ležišnog inženjeringa bilo je dosta izazova te naučenih lekcija, koji su prikazani na slici 20.

Utvrđene činjenice u području ležišnog inženjeringa iz slike 21. pobliže su opisane u poglavlju 5. Iskustva u primjeni nove generacije elektrokarotažnih SIGMA mjerenja (9) za bolju procjenu i karakterizaciju ležišta gama serije iznimno su korisna u planiranju rudarskih radova na pojedinim ležištima gama serije, odnosno za dodatno usklađivanje numeričkog modela za EPU Ivanić i Žutica sjever.



Slika 19. Grafički prikaz dnevne proizvodnje nafte i plina na EPU Ivanić od 2000. do 2019.



Slika 20. Grafički prikaz dnevne proizvodnje nafte i plina na EPU Žutica sjever od 2005. do 2019.

U proizvodnom inženjeringu, i to onom dijelu koji se odnosi na opremanje proizvodnih bušotina, važno je istaknuti problem korozije u proizvodnim bušotinama, odnosno problem učestalih remontnih radova. Naime, tijekom utiskivanja CO_2 i vode u gama serije na EPU Ivanić i Žutica, odnosno tijekom proizvodnje nafte s velikim udjelom vode i uz veće količine CO_2 otopljenog u proizvedenom plinu, stvaraju se uvjeti visoke korozivnosti. To je već detaljno opisano u literaturi (4). Na utisnim WAG bušotinama tijekom njihova opremanja u prvoj i drugoj fazi projekta upotrijebljen je GRE tubing (engleski: *Glass Reinforced Epoxy Tube*). Tu je ponajprije riječ o ugradnji cijevi od stakloplastike u tubing od ugljičnog čelika. Prostor između dviju cijevi popunjava se cementom pod tlakom. Upotrebom posebnih brtvi koje se ugrađuju u spojnice tubinga tijekom njegove ugradnje ostvarena je zaštita od korozije tijekom utiskivanja CO_2 i vode. Takav slučaj nije bio s proizvodnim bušotinama na EPU Ivanić i Žutica. Više od 50 godina na tim poljima upotrebljavaju se dubinske klipne sisaljke (u daljnjem tekstu DUS) za podizanje kapljevine iz bušotina.

Zbog pojave CO_2 u proizvedenom fluidu te visokog parcijalnog tlaka za CO_2 u proizvodnim bušotinama dolazilo je do oštećenja ugrađene dubinske proizvodne opreme. To je bio povod za izradu opsežne tehnokonomске analize i razmatranje svih tehnoloških sustava (15) za optimalizaciju podizanja kapljevine iz bušotina. Rezultat je bilo pokretanje posebnog projekta ALO (engleski: *Artificial Lift Optimization*) za optimizaciju sustava podizanja fluida u uvjetima visoke korozivnosti u proizvodnim bušotinama na EPU Ivanić i Žutica. Zaključak iz navedene studije bio je da bi se promjenom metode podizanja fluida s postojećih DUS-eva, koje su u primjeni gotovo 50 godina, na pogodniji i prilagodljiviji

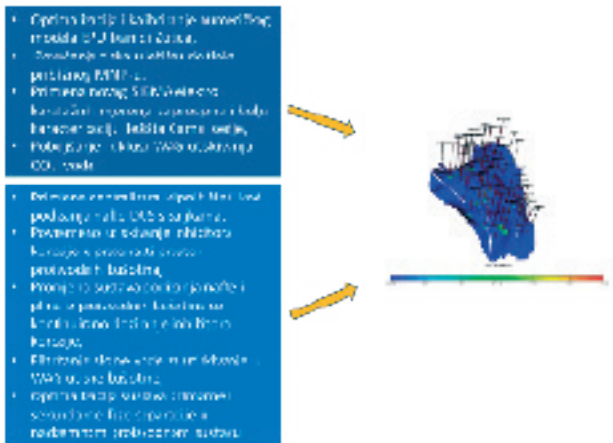
sustav podizanja kapljevine električnim uronjenim centrifugalnim sisaljka (u daljnjem tekstu ESP) ostvarilo smanjenje operativnih troškova za podizanje fluida iz proizvodnih bušotina. Time se i produljuje razdoblje rada bušotina između stajanja, odnosno remontnih radova, što znatno utječe i na sigurnost rada te zaštitu zdravlja i okoliša.

Projektom je obuhvaćeno proizvodno opremanje električnom centrifugalnom sisaljkom uz ugradnju sustava za kontinuirano doziranje inhibitora korozije i kamenca na dubini usisa pumpe. Sve to prikazano je na slici 22. ESP je pouzdanija i učinkovitija metoda podizanja nafte pri trenutačnim proizvodnim uvjetima na polju kojom se omogućuje prilagodba proizvodnje bušotina optimalnim uvjetima upotrebom frekventnog pretvarača, uz kontinuirano inhibiranje kemikalija na dubini usisa pumpe radi smanjenja utjecaja korozije na zaštitne cijevi i proizvodnu opremu.

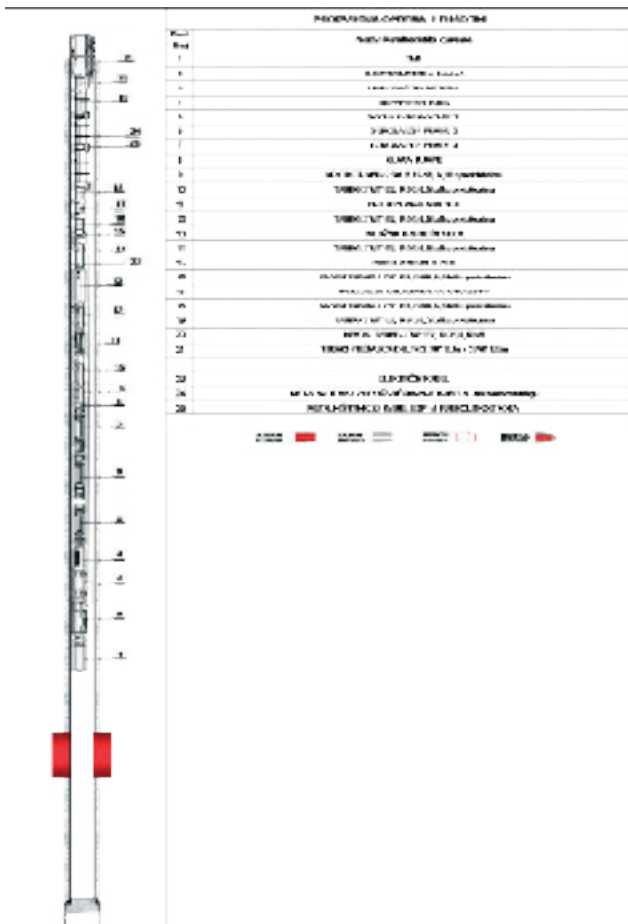
Na temelju provedenih elektrokarotaznih mjerenja i njihove analize bit će potrebno prema kriterijima definirati stanje, odnosno integritet proizvodnih bušotina te provesti dodatne mjere za osiguranje njihova kontinuiranog i sigurnog rada na EPU Ivanić i Žutica.

Remontni radovi na bušotinama u sklopu ALO Ivanić projekta počeli su krajem 2018. i nastavljeni su u 2019. godini. Trenutačno je 16 proizvodnih bušotina opremljeno električnim centrifugalnim sisaljka, a radovi na još osam bušotina su u planu do kraja godine, čime bi se promijenio sustav podizanja nafte na gotovo 80 posto proizvodnih bušotina.

Svaka ESP oprema u sastavu ima i telemetrijsku jedinicu kojom je omogućen nadzor proizvodnih parametara i monitoring rada pumpe u stvarnom vremenu. To omogućuje pravovremenu optimizaciju proizvodnje unatoč čestim promjenama proizvodnih uvjeta na EOR



Slika 21. Naučene lekcije tijekom pet godina EOR projekta na EPU Ivanić i Žutica



Slika 22. Shema dubinske proizvodne opreme uronjene električne sisaljke

polju i kvalitetniju pripremu za uklanjanje potencijalnih kvarova opreme. Mjerenja proizvodnje bušotina prije i poslije ugradnje ESP pokazala su povećanje proizvodnje na promatranim bušotinama, što je posljedica utiskivanja ugljičnog dioksida u sklopu EOR projekta, ali i primjene ALO projekata.

Značajan je i utjecaj projekta s aspekta zaštite na radu, zdravlja i okoliša jer se novim načinom opremanja bušotina i primjenom dubinskog doziranja inhibitora korozije povećava sigurnost pri eventualnom probodu plina iz bušotina. Primjenom ESP-a smanjeno je i zvučno onečišćenje u okolišu proizvodnih bušotina smještenih u blizini naselja. Izvrsni dosadašnji rezultati i stečena iskustva i znanja velik su poticaj da se zadanim tempom odrađuju novi radovi na projektu, ispunive zadani ciljevi smanjenja troškova i omogućiti planirano povećanje proizvodnje primjenom EOR projekta.

U kontekstu proizvodnog inženjeringa, i to dijela koji se odnosi na projekte u poboljšanju i optimizaciji nadzemnog proizvodnog sabirnog sustava na EPU Ivanić i Žutica, već je ugrađeno postrojenje za filtriranje slojne vode na EPU Žutica. Razmatra se takva mogućnost i za EPU Ivanić. Poboljšanjem kvalitete slojne vode, odnosno uklanjanjem suspendiranih čestica i masnoća poboljšava se injektivnost i smanjuju operativni troškovi na ispiranju taloga i u kemijskim obradama utisnih bušotina.

U posljednjih pet godina poprilično su se promijenile proizvodnosti proizvodnih bušotina na EPU Ivanić i Žutica. Promijenio se i sastav plina otopljenog u nafti, odnosno tlakovi pri protjecanju fluida s dna proizvodnih bušotina preko ušća bušotina, priključnih naftovoda do sustava primarne i sekundarne separacije plina iz kapljevine. To sve nameće pripremu novog projekta za daljnju optimizaciju nadzemnog sabirnog sustava i njegovu veću učinkovitost tijekom daljnjeg odvijanja EOR projekta na EPU Ivanić i Žutica.

7. Zaključak

Petogodišnje iskustvo utiskivanja CO₂ u dugo crpljena ležišta Ivanića i Žutice donijelo je iznimno važne primijenjene metodologije i znanja koja su vrijedan kapital i podloga za projektiranje takvih i sličnih projekata u bližoj budućnosti. S obzirom na to da INA u portfoliju ima mnogo djelomično ili potpuno iscrpljenih plinskih i naftnih ležišta, EOR projekt i njegovi rezultati bit će ugrađeni u svaki sljedeći manji ili veći pothvat u području tercijarnih metoda crpljenja. Važnost EOR projekta ne podrazumijeva samo razmatranje količina dodatnog iscrpka ugljikovodika jer postoji i veoma važan okolišni aspekt projekta.

Energetska i gospodarska strategija razvoja u Europskoj uniji, čiji je Hrvatska član, podrazumijeva osobit razvoj u području tehnologije zbrinjavanja emisije CO₂, bilo da je riječ o projektima izdvajanja

i skladištenja CO₂ (*engleski: Carbone Capture and Storage, CCS*) ili projektima izdvajanja, upotrebe i skladištenja CO₂ (*engleski: Carbone Capture Utilization and Storage, CCUS*). Naša iskustva u tim područjima izdvajanja, upotrebe i skladištenja CO₂ mogu postati posebno važna ako i Hrvatska odluči potaknuti upotrebu tih kapaciteta pri provedbi niskougljične strategije razvoja. Dinamika razvoja i primjena zbrinjavanja emisije CO₂ neće ovisiti samo o razvoju tehnologije i upotrebi novih metodologija nego i o razvoju cjelokupnog gospodarstva i okvira energetske tranzicije kako na razini Europske unije, tako i na razini Hrvatske. Nema sumnje da će naša tehnološka iskustva u područjima ležišta, fluida, opreme u

bušotini, nadzemne opreme i korozije biti ključna u pravilnom planiranju projekata. No isto tako može se reći da će bez poticaja i prilagodbi fiskalnog režima kao i zakonskih okvira takvi projekti i dalje biti nedovoljno atraktivni za veća ulaganja i interes investitora.

Zbog svega toga namjera ovog stručnog rada nije samo upoznati javnost s tehničkim problemima i izazovima primjene takvih projekata nego posebno naglasiti potencijale u okolišnoj dimenziji projekta i sinergiji koja se očekuje pri provedbi bilo kakve niskougljične strategije razvoja Hrvatske. Drugim riječima, bilo koji EOR projekt, bez obzira na veličinu dodatnog iscrpka ugljikovodika, može se kombinirati s projektima trajnog zbrinjavanja emisije CO₂.

Literatura

1. DOMITROVIĆ, D., ŠUNJERGA, S., JELIĆ-BALTA, J.: **Numerical Simulation of Tertiary CO₂ Injection at Ivanić Oil Field Croatia**, SPE 89361, SPE/DOE, Fourteenth Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, 2004.
2. GORIČNIK, B., DOMITROVIĆ, D.: **Laboratorijska istraživanja primjenjivosti CO₂ procesa na naftnim poljima u Republici Hrvatskoj**, Naftaplin 1/2003, Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2003.
3. GORIČNIK, B., SARAPA, M.: **Eksperimentalna određivanja P-V-T svojstava sistema CO₂ – nafta**, Zbornik radova, Simpozija svojstava naftnih i plinskih ležišta i njihov utjecaj na konačni iscrpak, Znanstveni savjet za naftu JAZU, Zagreb, 1978.
4. JELIĆ BALTA, J., BORKO, T.: **Korozija – ključni izazovi ispitivanja utjecaja utiskivanja CO₂ na projektu EOR Ivanić i Žutica**, Nafta i plin 153/2018, Stručni časopis Hrvatske udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2018.
5. NOVOSEL, D.: **Rezultati projekta pokusnog istiskivanja nafte utiskivanjem ugljičnog dioksida na Naftnom polju Ivanić**, Naftaplin 1 siječanj – lipanj, Znanstveno-stručno glasilo Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2005.
6. Novosel, D.: **Initial Results of WAG CO₂ IOR Pilot Project Implementation in Croatia**, SPE 97639, SPE, IORC Asia Pacific, Kuala Lumpur, 2005.
7. NOVOSEL, D.: **Termodinamički kriteriji utiskivanja ugljičnog dioksida u naftno polje Ivanić**, Nafta (2), Znanstveni časopis Hrvatskog Nacionalnog naftnog komiteta, Hrvatska Akademija Znanost i Umjetnosti, Zagreb, 2007.
8. NOVOSEL, D., LEONARD, N., MIKULIĆ, S., MUDRIĆ, D.: **Početni rezultati primjene utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte na proizvodnom polju Ivanić i Žutica**, Nafta i plin 153/2018, Stručni časopis Hrvatske udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2018.
9. PAVIČIĆ, H., ČOGELJA, Z., KOSOVEC, Z., MARIĆ-ĐUREKOVIĆ, Ž.: **Primjena SIGMA metode u procjeni i karakterizaciji pješčane serije A na polju Žutica**, Nafta i plin 155/2018, Stručni časopis Hrvatske udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2018.
10. SARAPA, M.: **Utjecaj ugljičnog dioksida na svojstva i iscrpak nafte**, magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1981.
11. SEČEN, J.: **Mogućnost primjene tekućina podatljivih miješanju za istiskivanje nafte iz ležišta**, Ina-Naftaplin, Zagreb, 1981.
12. SEČEN, J.: **Metode povećanja iscrpka nafte**, Ina Industrija nafte d.d.-Segment djelatnosti za istraživanje i proizvodnju nafte i plina – Naftaplin, Zagreb, 2006.
13. SEČEN, J., PERIĆ, M., BAUK, A.: **Mogućnost istiskivanja nafte s pomoću CO₂ u tercijarnoj fazi iskorištavanja ležišta**, Međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom rudarstvu, Zadar, 2001.
14. TUSCHL, M., ŠUNJERGA, S., DOMITROVIĆ, D.: **CO₂ Pilot Injection at Ivanić Oil Field: Numerical Simulation**, presented at 13th European Symposium on Improved Oil Recovery, Budapest, 2005.
15. ZELIĆ, M.: **Tehnologija pridobivanja nafte i plina eruptiranjem i gasliftom**, INA-Naftaplin, Zagreb, 1977.