

Početni rezultati primjene utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte na proizvodnom polju Ivanić i Žutica

Initial Results of CO₂ Injection for Enhanced Oil Recovery from the Ivanić and Žutica Oil Fields

Neven Leonard
INA d.d. Zagreb
neven.leonard@ina.hr

Silvan Mikulić
INA d.d. Zagreb
silvan.mikulic@ina.hr

dr. sc. Dubravko Novosel
INA d.d. Zagreb
dubravko.novosel@ina.hr

Dalibor Mudrić
INA d.d. Zagreb
dalibor.mudric@ina.hr



Ključne riječi: EOR projekt, utiskivanje ugljičnog dioksida, Ivanić, Žutica, povećanje iscrpka nafte i plina, proizvodni rezultati

Key words: EOR Project, carbon dioxide injection, Ivanić oil field, Žutica oil field, enhanced oil and gas recovery, production results

Sažetak

Na osnovi laboratorijskih ispitivanja, proizvodna polja ugljikovodika Ivanić i Žutica odabrana su kao najbolji kandidati za primjenu naizmjeničnog utiskivanja ugljičnog dioksida i vode za povećanje iscrpka nafte i plina. Nakon završetka izgradnje postrojenja i nadzemnih instalacija za utiskivanje ugljičnog dioksida i vode te opremanja utisnih i proizvodnih bušotina, tijekom listopada 2014. započeo je prvi ciklus utiskivanja ugljičnog dioksida u ležište na eksploatacijskom polju ugljikovodika Ivanić. Godinu dana kasnije započelo je i utiskivanje ugljičnog dioksida u ležišta na sjevernom dijelu eksploatacijskog polja ugljikovodika Žutica. Tijekom prve tri godine obavljen je, u sklopu

monitoringa procesa, čitav niz mjerenja, uzorkovanja fluida i kontrola procesa istiskivanja nafte iz ležišta na polju Ivanić. Dobiveni početni proizvodni rezultati u proizvodnji nafte i plina, kao i rezultati dobiveni analiza u laboratoriju u dovoljnoj mjeri pružaju mogućnost „kalibriranja“ numeričkog modela u cilju optimalnog vođenja procesa utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte na eksploatacijskom polju ugljikovodika Ivanić. U tijeku je proces monitoringa rezultata i na sjevernom dijelu ležišta eksploatacijskog polja ugljikovodika Žutica, dok se početak utiskivanja ugljičnog dioksida u južni dio ležišta eksploatacijskog polja ugljikovodika Žutica očekuje početkom 2019.

Abstract

Based on laboratory research of increasing oil recovery, oil fields Ivanić and Žutica were chosen as the best candidates for the carbon dioxide WAG process. Following the finalization of surface facilities for carbon dioxide injection and the completion of injection and production wells, the first cycle of carbon

dioxide injection started in October 2014 on oil field Ivanić and a year later on the northern side of oil field Žutica. During the first three years and according to the monitoring plan, a lot of measurements, laboratory samples analysis and controlling of the oil displacement from the reservoirs of oil field Ivanić were performed. Obtained production results, as well as results of laboratory analysis are sufficient to enable numerical model calibration in order to optimize carbon dioxide injection for increasing oil recovery from the Ivanić oil field. The monitoring process is in progress on the northern side of oil field Žutica. Carbon dioxide injection on the southern side of oil field Žutica should start at the beginning of 2019.

1. Uvod

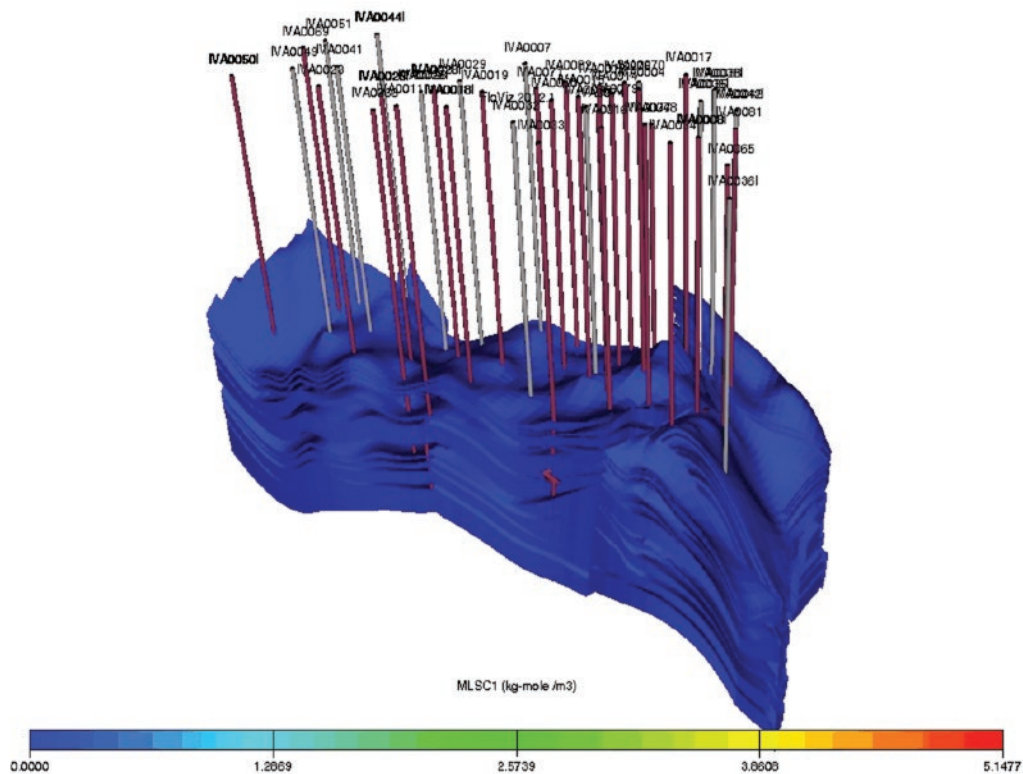
Tercijarna faza iskorištavanja naftnih ležišta (engleski „Enhanced Oil Recovery Methods“, u daljem tekstu: EOR metode, EOR projekt) primjenjuje se u trenutku kada se sekundarne metode iskorištavanja približe granici ekonomičnosti (18), odnosno kada primarnim ili sekundarnim metodama nije moguće proizvoditi preostalu naftu iz ležišta. Pod tim metodama podrazumijeva se oslobađanje nafte iz naftnog ležišta termičkim i kemijskim djelovanjem. Utiskivanje ugljičnog dioksida trenutno dominira u svakodnevnoj primjeni tercijarnih metoda za povećanje iscrpka nafte (65% metoda povećanja iscrpka nafte – EOR projekata u svijetu i 85% u SAD-u). Prva primjena utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte bila je 1958. godine (5,14) na polju Dewey-Bartessville u Oklahomi – Sjedinjene Američke Države. Utiskivanje plinova odnosno ugljičnog dioksida, jedna je od najstarijih metoda za povećanje iscrpka nafte iz ležišta. Sedamdesete godine prošlog stoljeća smatraju se komercijalnim početkom primjene EOR metoda u SAD-u, odnosno u svijetu. Trenutno se utiskivanje ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte primjenjuje na preko 300 EOR projekata u svijetu.

U proteklih 50 godina iz naftnih ležišta u Hrvatskoj proizvedeno je preko 100 milijuna m³ nafte i ostvaren je prosječni iscrpak od preko 32% od utvrđenih (početnih) geoloških rezervi nafte iz eksploatacijskih polja. Visok stupanj istraženosti Panonskog bazena, vlastiti izvori ugljičnog dioksida (eksploatacijska polja ugljikovodika *Molve*, *Kalinovac*, *Stari Gradec*, *Gola*, i *Šandrovac*) te povoljna cijena nafte na svjetskom tržištu omogućili su primjenu EOR metoda za povećanje iscrpka nafte iz naftnih ležišta

u Hrvatskoj. Prema rezultatima laboratorijskih istraživanja krajem 80-tih godina (2,4,15), utvrđeno je da su eksploatacijska polja ugljikovodika (u daljem tekstu: EPU) *Ivanić* i *Žutica* najbolji kandidati za povećanje iscrpka nafte iz ležišta naizmjeničnim utiskivanjem ugljičnog dioksida i vode. Nakon završene numeričke simulacije i dobivenih rezultata, na ograničenom dijelu EPU *Ivanić* u razdoblju od 2001. do 2006. provedeno je pokusno naizmjenično utiskivanje ugljičnog dioksida i vode (8) (u daljem tekstu: pilot projekt). Nakon dva naizmjenična ciklusa utiskivanja ugljičnog dioksida i vode ukupno je iz dvije proizvodne bušotine proizvedeno preko 5000 m³ nafte (9). Time je potvrđena djelotvornost ugljičnog dioksida i vode za istiskivanje nafte iz ležišta EPU *Ivanić* i *Žutica*. Izgradnja postrojenja i opremanje bušotina za utiskivanje ugljičnog dioksida odvijalo se u dvije faze. Prva faza trajala je od 2012. do 2014. dok je druga faza trajala od 2014. do 2016. godine. Pokusno utiskivanje ugljičnog dioksida započelo je u listopadu 2014-te na polju *Ivanić*, odnosno u listopadu 2015-te na sjevernom dijelu polja *Žutica*. Tijekom procesa monitoringa utiskivanja ugljičnog dioksida ostvareni su pozitivni proizvodni rezultati na EPU *Ivanić* i *Žutica* sjever. Ujedno su i utvrđeni pokazatelji za optimalizaciju i dodatna poboljšanja procesa istiskivanja nafte utiskivanjem ugljičnog dioksida.

2. Povijest tercijarnih metoda u Hrvatskoj

Početak razvoja tercijarnih metoda u Hrvatskoj veže se uz razdoblje od 1978. do 1991. godine, kada su započela brojna teoretska i laboratorijska istraživanja, odnosno objavljivanja znanstvenih radova (2,3,4,15,16,17). Konkretno aktivnosti započele su u laboratoriju, gdje su eksperimentalna ispitivanja podijeljena u dvije faze. Početne laboratorijske aktivnosti obuhvatila su ispitivanja uzoraka nafte i ležišnih stijena s 14 najvećih EPU u Hrvatskoj (takozvana „screenig“ faza) (2,4,15). U drugoj eksperimentalnoj fazi ispitivanja su obuhvatila izradu PVT analiza rekombiniranih uzoraka nafte i smjese nafte i ugljičnog dioksida. Cilj je bio utvrditi topivost ugljičnog dioksida u nafti, promjene viskoznosti nafte, utvrditi faktor bubrenja nafte, minimalni tlak miješanja te potvrditi djelotvornost procesa istiskivanja nafte s ugljičnim dioksidom na uzorcima ležišnih stijena („slim-tube test“). Također definirano je da se naizmjeničnim utiskivanjem ugljičnog dioksida i vode može ostvariti



Slika 1. Shema numeričkog modela polja Ivanić

dotadni iscrpак nafte i plina. Ti su rezultati pokazali kako su zbog geoloških karakteristika ležišta i svojstva nafte i plina EPU *Ivanić* i *Žutica* najbolji kandidati za primjenu EOR metoda (2,3,4,15). Također, ova ispitivanja rezultirala su izradom brojnih studija za odabrana EPU o čemu su objavljeni brojni znanstveni radovi (2,3,4,13,15,16,17,18).

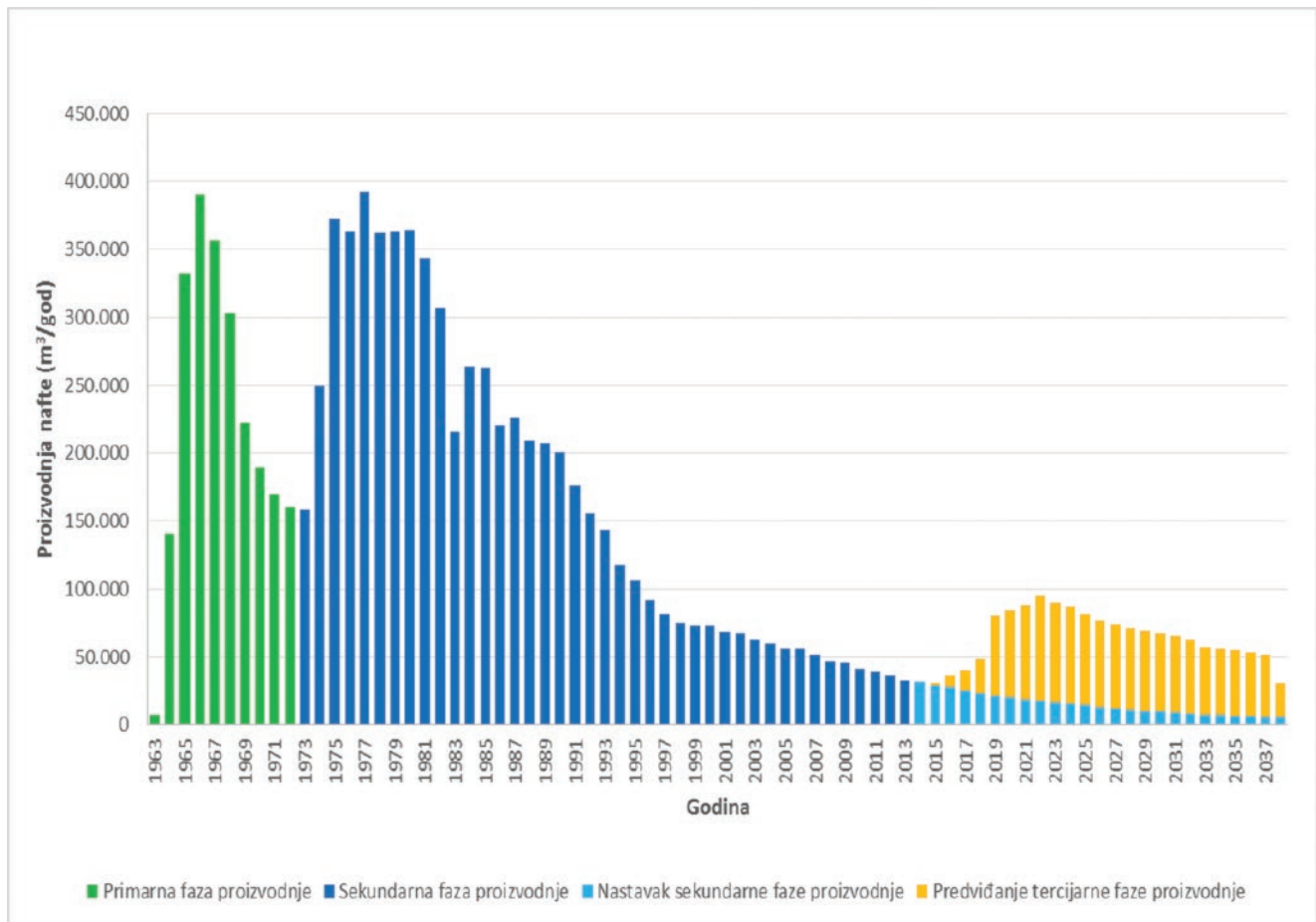
Prije primjene na polju *Ivanić* i *Žutica* odlučeno je da se na ograničenom dijelu polja *Ivanić* započne pilot projekt utiskivanja ugljičnog dioksida u ležište $Gama_{2/4}$. Pilot projekt bio je zasnovan na analitičkom modelu (13). Osnovni cilj pilot-projekta bio je u ležišnim uvjetima potvrditi rezultate dobivene laboratorijskim ispitivanjima. Uz to, bilo je potrebno potvrditi da se naizmjeničnim utiskivanjem ugljičnog dioksida i nafte može ostvariti dodatni iscrpак nafte te utvrditi isplativost primjene EOR metoda na EPU *Ivanić* i *Žutica*.

Nakon dvogodišnjeg utiskivanja vode u ležište $Gama_{2/4}$ u cilju podizanja tlaka u ležištu, pilot-projekt utiskivanja ugljičnog dioksida započeo je krajem 2003. godine na lokaciji utisne bušotine Iva-28 te je završen krajem 2006. nakon dva naizmjenična ciklusa utiskivanja ugljičnog dioksida i vode (8,11). Rezultat ta dva naizmjenična ciklusa utiskivanja bila je dodatna proizvodnja 5000 m^3 nafte i plina iz dotada zatvorenih proizvodnih bušotina Iva-11 i 19 (8,9,10,11). Sve je to

dovelo do nove kategorizacije rezervi nafte i plina te do donošenja odluke o primjeni EOR metoda na EPU *Ivanić* i *Žutica*. Također, pilot-projekt je dao vrijedan doprinos tehničkom i operativnom znanju nužnom za projektiranje površinskog sustava za utiskivanje ugljičnog dioksida i donošenje odluke o načinu opremanja bušotina na polju *Ivanić* i *Žutica*.

Odabir vrste procesa i prognoza budućeg proizvodnog ponašanja ležišta napravljena je na temelju numeričkog modela izrađenog u aplikaciji Eclipse (1,6,7,20). Pri tome su korišteni rezultati i saznanja s pilot projekta te je numerički model za EPU *Ivanić* dodatno podešen odnosno „kalibriran“ (20). Kao optimalna varijanta realizacije EOR projekta odabran je WAG proces (iz engleskog Water-Alternating-Gas) koji se bazira na naizmjeničnom utiskivanju ugljičnog dioksida i vode u trajanju od dvije godine za svaku pojedinu fazu. Projektirane količine ugljičnog dioksida za utiskivanje u ležišta EPU *Ivanić* iznose $400.000 \text{ m}^3/\text{dan}$ dok u sjeverni dio EPU *Žutica* to iznosi $200.000 \text{ m}^3/\text{dan}$.

Rezultati numeričke simulacije pokazali su da će se s polja *Ivanić* i *Žutica* tijekom EOR projekta u 25 godina dodatno proizvesti 3,4 milijuna tona nafte i 600 milijuna prostornih metara plina. Konačni efekti EOR projekta su još i veći kad se ima u vidu ekološka dimenzija projekta, budući da će se u ležištima polja



Slika 2. Proizvodnje nafte na polju Ivanić u primarnoj i sekundarnoj fazi te prognoza za tercijarnu fazu

Ivanić i Žutica trajno zbrinuti znatne količine ugljičnog dioksida. Tijekom 25 godina u ležišta će se utisnuti preko 5000 milijuna m³ ugljičnog dioksida u superkrićnom stanju (12) te se prema rezultatima numeričke simulacije očekuje da će preko 50% ugljičnog dioksida biti trajno zbrinuto u ležištima na EPU Ivanić i Žutica. Na Slici 1. prikazana je shema numeričkog modela za polje Ivanić.

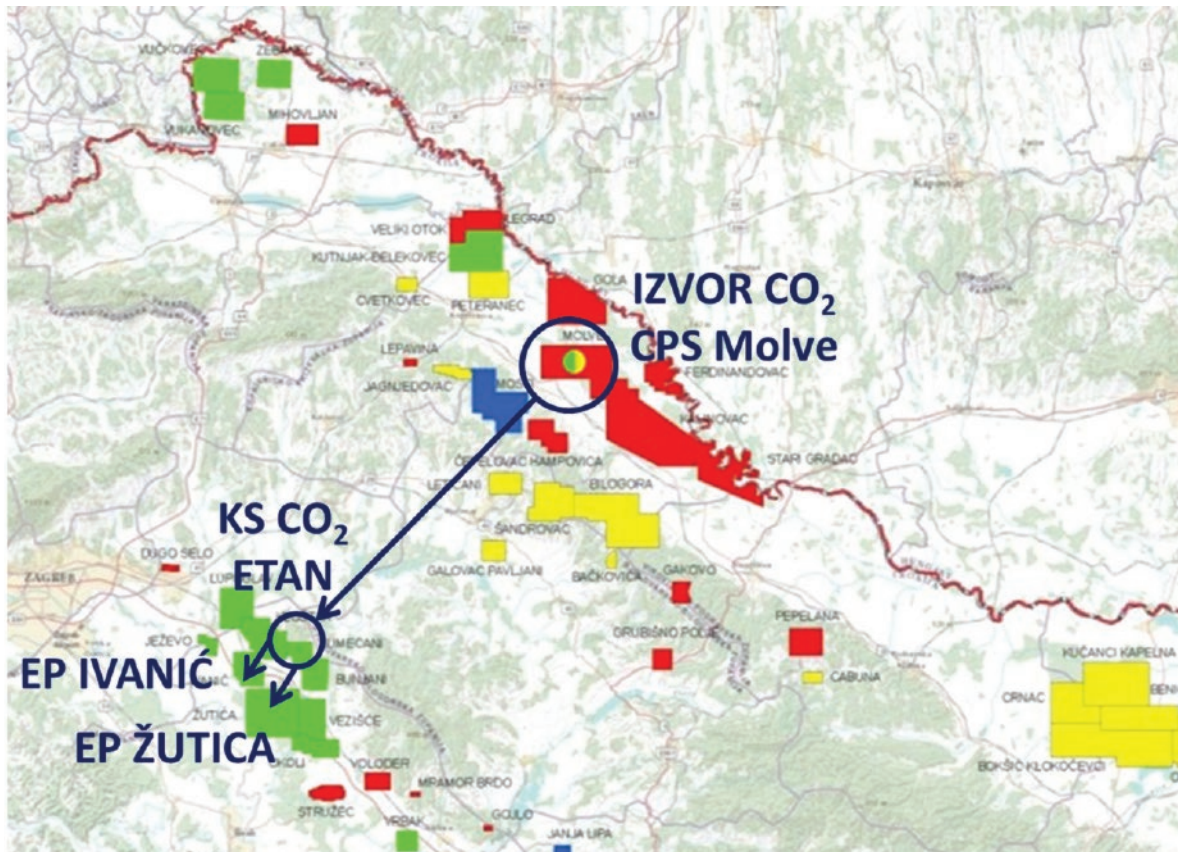
Prognozni proizvodni profil proizvodnje nafte i plina za tercijarnu fazu proizvodnje zasnovan je na numeričkom modelu koje je prikazan na Slici 2.

3. Izgradnja sustava za utiskivanje CO₂ i vode na polju Ivanić i Žutica

Izgradnja postrojenja i sustava za utiskivanje ugljičnog dioksida i vode na polju Ivanić započela je nakon revizije investicijske studije, odnosno dobivanja potrebnih dozvola za građenje. Sam sustav za utiskivanje ugljičnog dioksida i vode sastoji se od izvora ugljičnog dioksida, transportnog sustava do Ivanić-Grada te sustava za distribuciju ugljičnog dioksida do

utisnih bušotina na polju Ivanić i Žutica. Izvor ugljičnog dioksida je Centralna plinska stanica (u daljem tekstu CPS) Molve gdje se iz prirodnog plina u tehnološkom procesu izdvaja ugljični dioksid. Izdvojeni ugljični dioksid nalazi se na atmosferskom tlaku te se prije komprimiranja dodatno pročišćava u postrojenju za filtraciju gdje se izdvaja sumporovodik. Ugljični dioksid komprimira se na tlak od 30 bar, pročišćava od tekuće faze (u dehidracionaloj koloni) te transportira postojećim plinovodom do Ivanić-Grada. Na Slici 3. prikazan je pojednostavljeni prikaz sustava za utiskivanje ugljičnog dioksida od CPS Molve do PP Etan Ivanić-Grad odnosno EPU Ivanić i Žutica. Na Slici 4. prikazana je novoizgrađena kompresorska stanica za ugljični dioksid na CPS Molve, dok je na Slici 5. fotografija kompresorske stanice sa sustavom za ukapljivanje i pumpanje ugljičnog dioksida do utisnih bušotina na EPU Ivanić i Žutica.

Izgradnja postrojenja odvijala se u dvije faze. U prvoj fazi to je značilo izgradnju postrojenja na CPS Molve i u Ivanić-Gradu te sustava cjevovoda za utiskivanje ugljičnog dioksida do svih utisnih bušotina na polju Ivanić i Žutica. Ta faza započela je sredinom 2012.



Slika 3. Pojednostavljeni prikaz sustava za utiskivanje ugljičnog dioksida

godine te je završena početkom 2014. godine. Prije pokusnog komprimiranja ugljičnog dioksida postojeći cjevovod od CPS Molve do Ivanić-Grada dodatno je pregledan uređajem za mjerenje debljine stjenke nošen fluidom (takozvani „pametni kracer“). Na temelju rezultata pregleda izvršene su određene strojarske korekcije na pojedinim dijelovima cjevovoda. Sustav cjevovoda te ostale instalacije (kablovi, svjetlovođi i slično), za kontinuirani monitoring utiskivanja ugljičnog dioksida i vode postavljeni su na površini od 30 km² na polju *Ivanić* i *Žutica*. Opremanje utisnih bušotina za naizmjenično utiskivanje ugljičnog dioksida i vode (u daljem tekstu WAG bušotine – iz engleskog Water-Alternating-Gas) na polju *Ivanić* i *Žutica* sjever zahtijevalo je dodatno zacjevljenje postojećih kanala „starih“ bušotine pri čemu su uspješno primijenjena nova tehnološka rješenja. U prvoj fazi, od 2013. do 2014. opremljene su utisne WAG bušotine na polju *Ivanić* i *Žutica* sjever.

Druga faza uključila je opremanje bušotina na južnom dijelu polja *Žutica* te se odvijala tijekom 2016. Nakon opsežnih analiza i ispitivanja cijelog sustava od CPS Molve preko kompresorske i pumpne stanice u Ivanić-Gradu, u listopadu 2014. započeo je **prvi ciklus utiskivanja ugljičnog dioksida**. Početne količine



Slika 4. Kompresorska stanica za ugljični dioksid na CPS Molve



Slika 5. Kompresorska i pumpna stanica sa sustavom za ukapljivanje ugljičnog dioksida u Ivanić-Gradu

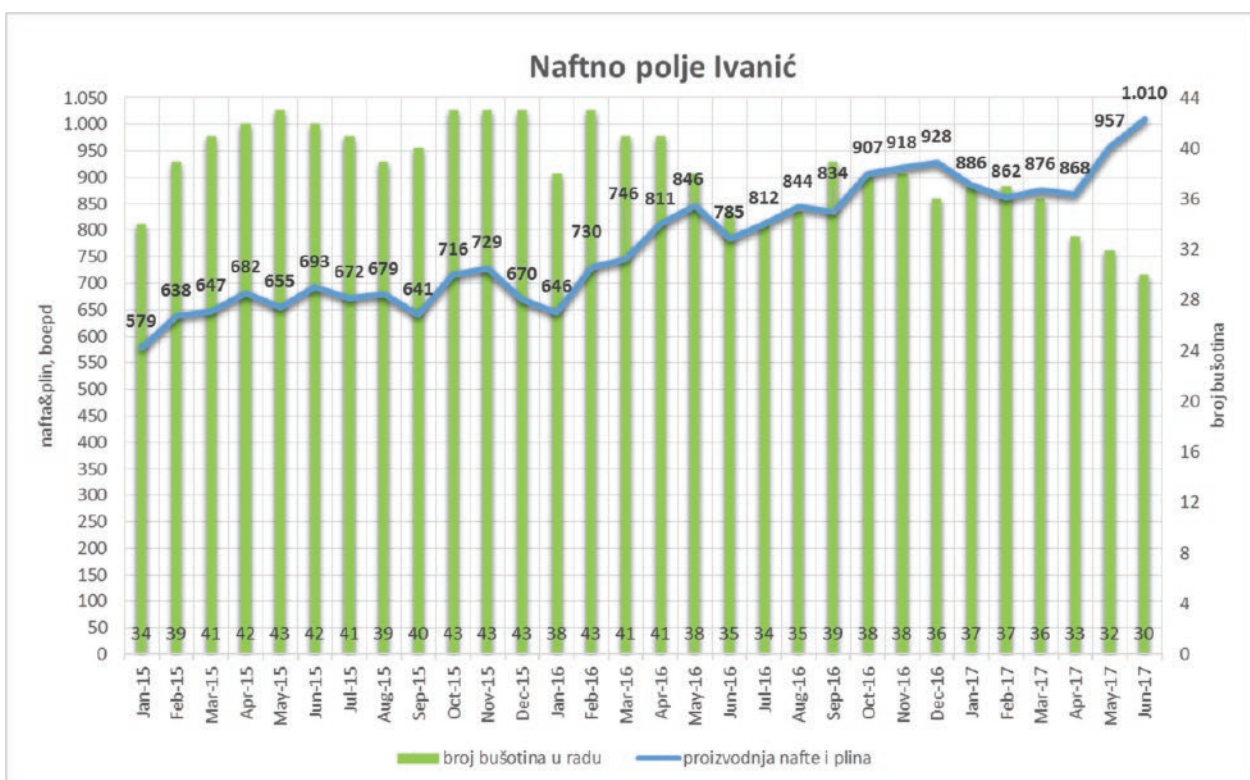
ugljičnog dioksida bile su dostatne tek za utiskivanje u Gama seriju na polju *Ivanić*. Naknadnim puštanjem u rad dodatnih filter jedinica na CPS Molve omogućen je kontinuiran rad kompresorske stanice na CPS Molve, a isto tako i u *Ivanić-Gradu*. Time su osigurane i projektirane dnevne vrijednosti ugljičnog dioksida za utiskivanje te je u listopadu 2015. započelo utiskivanje u EPU *Žutica sjever*.

Ugljični dioksid utiskuje se na polju *Ivanić* u pet od ukupno sedam ležišta Gama serije. U preostala dva ležišta ne utiskuje se ugljični dioksid budući da je jedno ležište sudjelovalo u pilot-projektu (koji je prethodio EOR projektu), dok drugo ležište sadrži plinsku kapu. U projektu je ukupno uključeno 43 proizvodne bušotine, 14 WAG bušotina koje služe za naizmjenično utiskivanje ugljičnog dioksida i vode, 5 bušotina za odlaganje viška slojne vode i jedna mjerna bušotina. Na sjevernom dijelu EPU *Žutica* ugljični dioksid se utiskuje u 3 ležišta Gama serije. Za naizmjenično utiskivanje ugljičnog dioksida i vode opremljeno je 8 WAG bušotina, 3 bušotine služe za odlaganje viška slojne vode dok je 33 proizvodnih bušotina i 15 mjernih. Na južnom dijelu polja *Žutica* za utiskivanje ugljičnog dioksida opremljeno je 16 bušotina, 5 bušotina je za odlaganje viška slojne vode, 81 je proizvodnih i 13 mjernih bušotina.

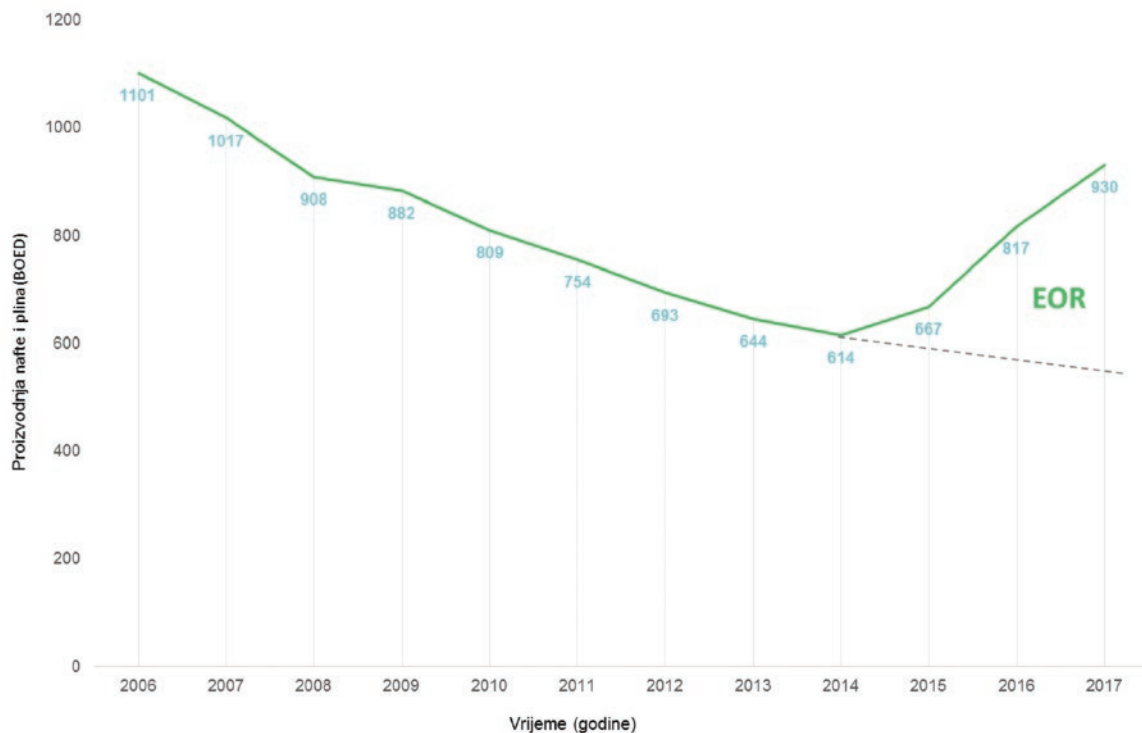
4. Praćenje utiskivanja CO₂ i proizvodnje nafte i plina na polju *Ivanić* i *Žutica*

Na EPU *Ivanić* i sjevernom dijelu EPU *Žutica* prije početka utiskivanja ugljičnog dioksida utvrđeno je početno stanje u proizvodnim bušotinama. Kvalitetna analiza početnog stanja bila je potrebna radi što bržeg uočavanja početka utjecaja ugljičnog dioksida na proizvodnju nafte i plina, kao i zbog što kvalitetnijeg budućeg praćenja cjelokupnog procesa.

Sa stajališta ležišnog inženjeringa na temelju podataka iz numeričkog modela, proces proizvodnje je vođen na EPU *Ivanić* tako da maksimalizira broj bušotina u proizvodnji kako bi se proizvelo što je moguće više kapljevine. Valja napomenuti da je na EPU *Ivanić* prije početka utiskivanja utvrđen ležišni tlak u Gama seriji od 140 do 150 bar što je bitno niže od minimalnog tlaka miješanja utvrđenog u laboratorijskim uvjetima (2). No, odlučeno je da se proces utiskivanja ugljičnog dioksida započne pri takvim uvjetima tlaka u ležištima EPU *Ivanić*. Na temelju toga i uz praćenje nivoa kapljevine u prstenastom prostoru proizvodnih bušotina donesene su odluke o kapitalnim rudarskim radovima u bušotinama s ciljem privođenja proizvodnji i/ili dopucavanja ležišta Gama serije, promjeni dubine ugradnje dubinske sisaljke, mogućem povećanju kapaciteta dubinske sisaljke, mjerenjima radi



Slika 6. Mjesečna proizvodnja nafte i plina na polju *Ivanić* od 2014. – 2017.



Slika 7. Prosječna dnevna proizvodnja nafte i plina na polju Ivanić od 2006. - 2017.

praćenja ležišnog tlaka i analize širenja fronte ugljičnog dioksida i nafte u ležištu.

Od početka utiskivanja ugljičnog dioksida u ležišta na EPU *Ivanić* pa do kraja 2017. kupno je utisnuto preko 366,849.974 m³ ugljičnog dioksida, čime je zapunjeno oko 11% pornog prostora kojeg zauzimaju ugljikovodici. U tom vremenskom razdoblju ne samo da je zaustavljen prirodni pad proizvodnje, nego se proizvodnja ugljikovodika vratila na razinu na kojoj je bila 2009. Ukupno ostvarena proizvodnja nafte za navedeno razdoblje iznosi 113.363 m³, dok je ostvarena proizvodnja naftnog plina 24,349.181 m³. Usporedbom ostvarenih rezultata i predviđanjem buduće proizvodnje bez implementacije EOR metode, (izrađenom po metodi krivulja smanjenja proizvodnje – DCA metoda), dolazi se do zaključka da se na račun EOR projekta proizvelo dodatnih 28.632 m³ nafte i 7,507.687 m³ plina. Na Slici 6. prikazan je grafikon mjesečne dinamike ostvarenja proizvodnja nafte i plina na polju *Ivanić* u funkciji broja proizvodnih bušotina, dok je na Slici 7. grafički prikazano ostvarenje prosječne dnevne proizvodnje na polju *Ivanić* od 2006. do 2017. godine

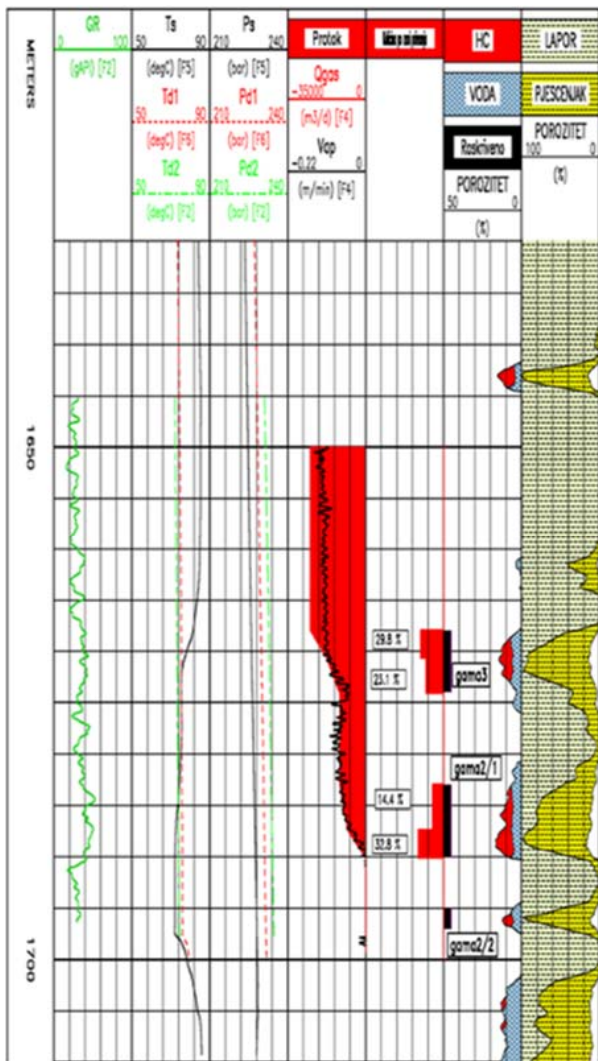
Nakon prvih rezultata EOR projekta, primijećen je znatno brži prodor ugljičnog dioksida od utisnih do proizvodnih bušotina u odnosu na vrijednosti dobivene numeričkom simulacijom. Budući da se u stvarnim uvjetima ležišta udio ugljičnog dioksida u proizvedenom plinu na pojedinim proizvodnim bušotinama

drastično povećavao, donesena je odluka o skraćivanju utiskivanja ugljičnog dioksida u pojedine utisne WAG bušotine u neposrednoj blizini proizvodnih bušotina. Time je napušten prvotni plan o dvogodišnjem naizmjeničnom utiskivanju ugljičnog dioksida i vode.

Spoznaja da su predviđanja budućeg ponašanja ležišta numeričkim modelom u nesukladnosti sa stvarnim „ponašanjem ležišta“, rezultirala je potrebom za izradom točnijeg numeričkog modela. U sklopu toga napravljena je kampanja karotažnih mjerenja (PL), čija je uloga bila utvrditi u kojim se omjerima ugljični dioksid utiskuje u pojedina ležišta. Primjer izmjenjenog profila utiskivanja ugljičnog dioksida na utisnoj WAG bušotini prikazan je na Slici 8.

Na osnovi izmjerenih profila utiskivanja i ažuriranog numeričkog modela, došlo je do promjene režima utiskivanja na utisnim WAG bušotinama iz ugljičnog dioksida na utiskivanje vode i obratno, ili pak do promjene utisnih količina ugljičnog dioksida. Pored toga, na osnovi trogodišnjih podataka praćenja utiskivanja i proizvodnje nafte i plina napravljen je novi plan aktivnosti za pojedine zone ležišta Gama serije na polju *Ivanića* što uključuje kapitalne remonte bušotina s ciljem otvaranja pojedinih intervala u ležištima, dopucavanja postojećih ležišta ili pak zatvaranje pojedinih intervala.

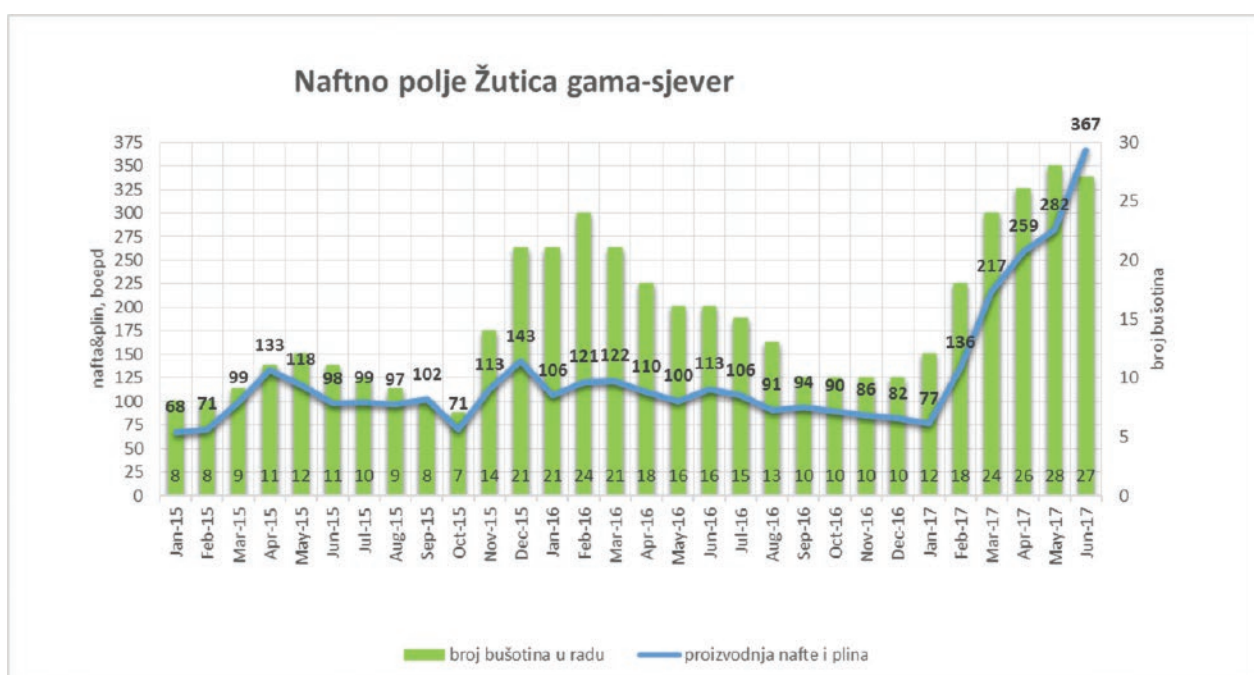
Istodobno s utiskivanjem ugljičnog dioksida u ležišta polja *Ivanić*, u listopadu 2015. započelo je utiskiva-



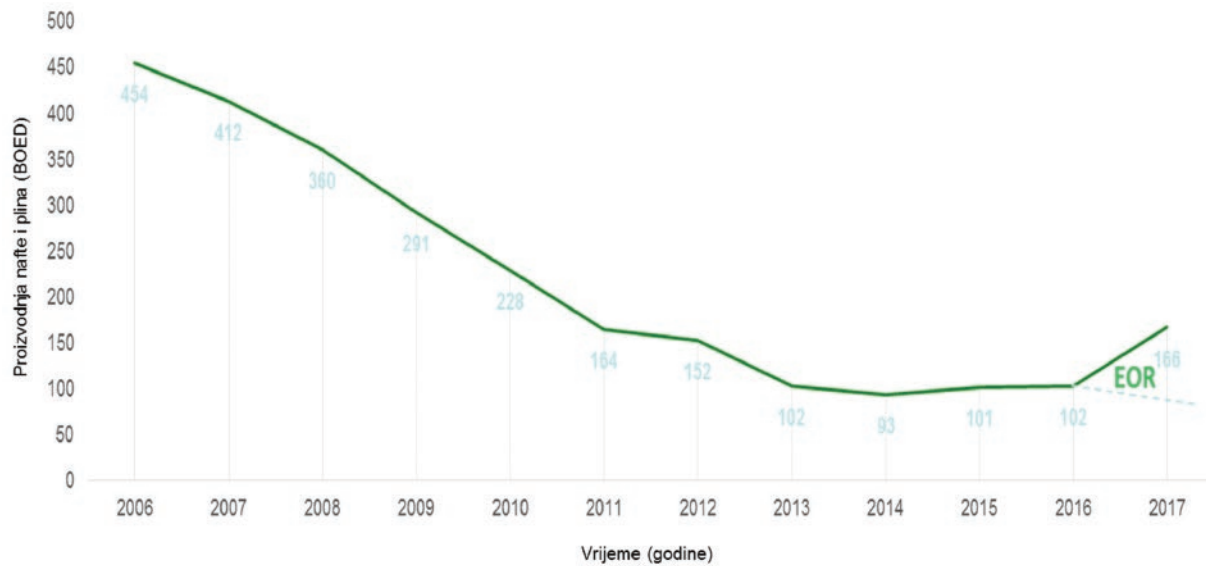
Slika 8. Izmjereni profil utiskivanja WAG bušotine na EPU Ivanić

nje ugljičnog dioksida u ležišta EPU Žutica sjever. Iako su EPU *Ivanić* i Žutica sjever vrlo slična po sastavu nafte i po karakteristikama ležišne stijene utjecaj EOR projekta na ta dva polja bio je poprilično različit. Naime, ležišni tlak na EPU Žutica sjever od 190 bar ustvari je identičan minimalnom tlaku miješanja, za razliku od ležišnog tlaka na polju *Ivanić* koji je prije početka projekta iznosio samo 140 do 150 bar. U ležišta Gama serije na EPU Žutica sjever od početka utiskivanja do kraja 2017. ukupno je utisnuto 179,088.829 m³ ugljičnog dioksida, čime je zapunjeno oko 7% pornog prostora kojeg zauzimaju ugljikovodici. Ukupno ostvarena proizvodnja nafte za navedeno razdoblje iznosi 21.962 m³, dok je ostvarena proizvodnja naftnog plina 2,934.170 m³. Analiza rezultata pokazala je da se zbog primjene utiskivanja ugljičnog dioksida za povećanje iscrpka nafte proizvelo dodatnih 6510 m³ nafte i 574.142 m³ plina. Na Slici 9. prikazana je mjesečna dinamika ostvarenja proizvodnje nafte i plina na EPU Žutica sjever u funkciji broja proizvodnih bušotina, dok je na Slici 10. prikazano ostvarenje prosječne dnevne proizvodnje na EPU Žutica sjever od 2006. do 2017.

Identično kao i za EPU *Ivanić*, i na EPU Žutica sjever napravljena su karotažna mjerenja (PL) profila utiskivanja ugljičnog dioksida u pojedina ležišta. Cilj je bio utvrditi u kojim se omjerima ugljični dioksid utiskuje u pojedina ležišta na EPU Žutica sjever. Analiza mjerenja je završena te se nastavlja praćenje podataka utiskivanja ugljičnog dioksida. Rezultati utiskivanja ugljičnog dioksida na EPU Žutica sjever puno su bolji



Slika 9. Mjesečna proizvodnja nafte i plina na polju Žutica sjever od 2015. do 2017.



Slika 10. Prosječna dnevna proizvodnja nafte i plina na polju Žutica sjever od 2006. do 2017.

u odnosu na one postignute na EPU *Ivanić*. Razlog tome leži u činjenici da se mehanizam istiskivanja nafte s ugljičnim dioksidom (5,14,16,17,18,19) koji se sastoji u značajnom povećanju obujamskog faktora nafte odnosno faktora bubrenja nafte i smanjivanju viskoznosti zbog velike topljivosti ugljičnog dioksida, u nafti te efektima uzajamnog miješanja istiskivane nafte i utisnutog ugljičnog dioksida, odvija u optimalnim uvjetima pri tlakovima bliskim ili jednakim minimalnom tlaku miješanja.

5. Zaključak

Iako je ukupna ostvarena proizvodnja nafte i plina na polju *Ivanić* značajnija u odnosu na rezultate ostvarene na polju *Žutica sjever*, pozitivni učinci utiskivanja ugljičnog dioksida djelotvorniji su za istiskivanje nafte i plina iz ležišta na EPU *Žutica sjever*. Razlog tome je tlak u ležištima Gama serije na sjevernom dijelu polja *Žutica*. Pri tom tlaku istiskivanje nafte iz ležišta odvija se pod uvjetima miješanja što nije slučaj na polju *Ivanić*. Upravo iz tog razloga u tijeku su dodatne

aktivnosti na poboljšanju numeričkog modela za polje *Ivanić*, a isto tako i pripremni radovi na dodatnim utisnim WAG bušotinama.

Starost eksploatacijskih polja ugljikovodika *Ivanić* i *Žutica*, podzemne i nadzemne opreme na njima, te manjak raspoloživih količina ugljičnog dioksida uvelike otežavaju ostvarenje boljih rezultata. Stoga se u narednom razdoblju planiranju aktivnosti na optimalizaciji sustava podizanja fluida iz proizvodnih bušotina (21), poboljšanju kvalitete slane vode za utiskivanje, utiskivanju kemikalija, optimalizaciji tehnološkog procesa sa stajališta primarnog i sekundarnog odvajanja nafte i plina (22) u sabirnom sustavu na EPU *Ivanić* i *Žutica* te tehnološkom procesu i primjena novih dodatnih metoda za bolju djelotvornost istiskivanja nafte i plina iz ležišta. Stečenim iskustvom i planskim promišljanjem u budućem praćenju EOR projekta na EPU *Ivanić* i *Žutica* očekuju se i bolji rezultati od trenutno ostvarenih.

Prikupljena dosadašnja saznanja o EOR projektu na EPU *Ivanić* i *Žutica*, uvelike će olakšati vođenje procesa i donošenje odluka na trenutnim i mogućim budućim EOR projektima u Republici Hrvatskoj.

Literatura

- 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.
- 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.
- GORIČNIK, B., SARAPA, M., DOMITROVIĆ, D.: Possible Improvements of CO₂-Flood Performance in Ivanić Oilfield, *Nafta* (11) Znanstveni časopis Hrvatskog Nacionalnog naftnog komiteta, Hrvatska Akademija Znanosti i Umjetnosti, Zagreb, 1999.
- 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.

5. HOLM, L.W., JOSENDAL, V.A.: Mechanisms of Oil Displacement by Carbon Dioxide, Society of Petroleum Engineer, Journal of Petroleum Technology, JPT (12) December, Richardson, 1974.
6. ILIJAŠ, T., SOKOLIĆ, M., M.: Geološka razrada ležišta polja Ivanić, 2.dio: Geološki model polja, Naftaplin (1)/2002, HUNIG-Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2002.
7. KUKAVICA, V., GAČEŠA, S.: Geološka razrada ležišta polja Ivanić, 1.dio: 3D seizmička interpretacija, Naftaplin (1)/ 2002, HUNIG-Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2002.
8. NOVOSEL, D.: Konceptija površinskog sustava pilot – postrojenja za utiskivanje ugljik (IV) oksida u bušotinu IVA-28, Naftaplin 1 siječanj – lipanj, Znanstveno-stručno glasilo Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2003.
9. 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.
10. NOVOSEL, D.: Hidrodinamička mjerenja u utisnoj bušotini Iva-28 na pilot-projektu CO₂ na Naftnom polju Ivanić, Naftaplin 1 siječanj – lipanj, Znanstveno-stručno glasilo Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2005.
11. Novosel, D.: Initial Results of WAG CO₂ IOR Pilot Project Implementation in Croatia, SPE 97639, SPE, IORC Asia Pacific, Kuala Lumpur, 2005.
12. NOVOSEL, D.: Termodinamički kriteriji utiskivanja ugljičnog dioksida u nafto polje Ivanić, Nafta (2), Znanstveni časopis Hrvatskog Nacionalnog naftnog komiteta, Hrvatska Akademija Znanost i Umjetnosti, Zagreb, 2007.
13. PERIĆ, M., KOVAČ, S.: Simulacijska studija procesa povećanja iscrpka nafte (EOR-procesa) istiskivanjem ugljik-dioksidom primjenom višekomponentnog modela COMP III, Naftaplin (1)/ 2003, HUNIG-Hrvatska udruga naftnih inženjera i geologa, Zagreb, 2003.
14. PIRSON, S., J.: Tertiary Recovery of Oil, Paper presented before Central Appalachian Section, AIME, SAD, June 1941.
15. SARAPA, M.: Utjecaj ugljičnog dioksida na svojstva i iscrpak nafte, magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1981.
16. SEČEN, J.: Mogućnost povećanja iscrpka naftnih ležišta u SR Hrvatskoj, Zbornik radova Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u povodu 40 godina rada, RGN fakultet, Zagreb, 1979.
17. SEČEN, J.: Mogućnost primjene tekućina podatljivih miješanju za istiskivanje nafte iz ležišta, Ina-Naftaplin, Zagreb, 1981.
18. SEČEN, J.: Metode povećanja iscrpka nafte, Ina Industrija nafte d.d.-Segment djelatnosti za istraživanje i proizvodnju nafte i plina – Naftaplin, Zagreb, 2006.
19. 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.
20. 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.
21. ZELIĆ, M.: Tehnologija pridobivanja nafte i plina eruptiranjem i gasliftom, INA-Naftaplin, Zagreb, 1977.
22. ZELIĆ, M.: Tehnologija sabiranja i pripreme nafte i plina za transport, INA-Naftaplin, Zagreb, 1987.