

UDK 622.333.6
UDC 622.333.6

Originalni znanstveni rad
Original scientific paper

Jezik/Language: Hrvatski/Croatian

PROCJENA MOGUĆNOSTI EKSPLOATACIJE METANA IZ ISTARSKIH UGLJENA

ASSESSMENT OF ISTRIAN COAL BED METHANE PRODUCTION POSSIBILITY

MARIO KLANFAR, DOMAGOJ VULIN, ŽELIMIR VEINOVIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: ugljen, metan u ležištu ugljena, tercijarne metode pridobivanja metana, Labinski bazen, Kimova metoda, Langmuirova izoterma

Key words: coal, coal bed methane, enhanced methane recovery, Labin basin, Kim's method, Langmuir isotherm

Sažetak

Potencijal metana u ugljenu do sada nije evaluiran u Hrvatskoj. Za nekoliko odabranih lokacija u Labinskom bazenu prikupljeni su podaci o sastavu ugljena te dubinama i debljinama slojeva i proslojaka. Izrađena je usporedna procjena sadržaja metana u ugljenu pomoću Langmuirove izoterme, općenite krivulje sorpcije te Kimove metode te je nakon ocjene kvalitete svake pojedine procjene određen sadržaj metana u ugljenu između $9.5\text{m}^3/\text{t}$ i $11.73\text{m}^3/\text{t}$ pomoću Kimove jednadžbe. Usporedbom sorpcije metana i CO_2 uočeno je kako je u svrhu održavanja tlaka i većeg iscrpka metana CO_2 jedan od opcija za utiskivajući fluid. Geometrije ležišta ugljena nisu definirane te stoga nije moguća procjena ukupnog sadržaja metana.

Abstract

The potential of coal bed methane has not been evaluated in Croatia so far. For several selected sites in Labin basin data on the composition of coal and the depths and thicknesses of coal layers were collected. Assessment and comparison of the methane content in coal by using the Langmuir isotherm, the general curves of sorption and Kim's method was made and evaluation of the quality of each assessment as well. The analysis resulted with coal bed methane content between $9.5\text{m}^3/\text{t}$ $11.73\text{m}^3/\text{t}$ calculated by Kim's equation. By comparing the sorption of pure methane and sorption of CO_2 , in order to maintain the pressure in a coal bed and higher recovery of methane, the CO_2 could be one of the options for injecting fluid. Geometry of coal layers was not defined and therefore it is not possible to estimate the total content of methane.

Uvod

Iskorištavanje ugljenih ležišta u Hrvatskoj (slika 1) većim dijelom prestaje 1970-ih godina, do kada su napuštena gotovo sva ležišta lignita i smeđeg ugljena. Izuzev pojedinih ležišta (Bukovica, Vrbovo...) koja se povremeno eksploatiraju devedesetih godina. Eksploatacija kamenog ugljena, kojeg u gospodarski značajnim količinama ima jedino u Istri, završava zatvaranjem ugljenokopa u Labinu, Ripendi i na koncu jame Tupljak 1999. Glavni razlozi zatvaranja rudnika bili su nerentabilnost i teški rudarsko-geološki uvjeti. Mnoga ležišta imaju previsoki sadržaj sumpora pa čak i radioaktivna, što ugljen čini nepogodnim za plasman.

Klasičnim metodama separacije anorganski sumpor se može odstraniti iz ugljena, ali organski sumpor ne.

Zaostale su značajne geološke i pretpostavljene rezerve ugljena koje se ne mogu rentabilno pridobivati klasičnim rudarskim metodama. Međutim potencijalna je primjena alternativnih metoda poput podzemnog uplinjavanja ugljena i isplinjavanja metana utiskivanjem ugljičnog dioksida. Metoda kojom se iz ugljena istiskuje prisutni metan, opisana je u ovom radu.

Metan otopljen u slojnoj vodi ili adsorbiran u mikroskopskoj strukturi organske tvari u ugljenim ležištima nastao je tijekom stvaranja ugljena kao izdvojena faza koja se nije mogla zadržati u ugljenu. Sadržaj plina u ugljenu raste s dubinom i kvalitetom, odnosno rangom ugljena. Kako su prirodno nastale

frakture u ugljenom ležištu zasićene vodom, metan je zarobljen u frakturama i najčešće se ne može otkriti konvencionalnim istraživanjima ležišta nafte ili plina. Da se oslobodi plin iz ugljenih ležišta, potrebno je proizvesti velike količine vode iz ugljena, čime se javlja i potreba za iznalaženjem ekološki prihvatljive metode odlaganja vode za svaki pojedini slučaj.

U većini slučajeva, oslobađanje metana iz ležišta ugljena vezano je uz vađenje ugljena rudarskim metodama, gdje pojava metana predstavlja sigurnosni problem. Plin iz ugljena može se proizvoditi: bušenjem, usmjerenim bušenjem (poželjno prije rudarskih radova kako bi se smanjila količina metana, a time i opasnost u

iskorištavanju ugljenih ležišta), bušenjem ugljenog sloja, frakturiranjem i pumpanjem vode na površinu (ukoliko je tlak u sloju premalen za eruptivnu proizvodnju vode).

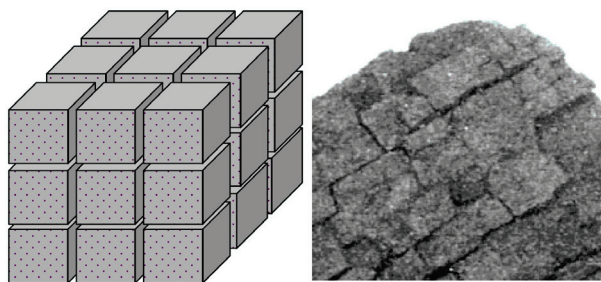
Proizvodnja metana procjenjuje se različitim metodama. Iz mnogih ležišta metana u ugljenu se dulji period proizvodi samo voda prije proizvodnje metana. Izdvajanje plina iz vode, desorpcija plina iz matriksa i difuzija unutar matriksa najbitniji su parametri za procjenu proizvodnje. Metode procjene se razlikuju prema ulaznim podacima i načinu opisivanja fizičkih procesa.



Slika 1. Ležišta ugljena u Republici Hrvatskoj (Vrkljan, 1992).
Figure 1 Coal beds in the Republic of Croatia (Vrkljan, 1992).

Teorijsko razmatranje

Jedan od najbitnijih elemenata procjene čini mehanika protjecanja. Protjecanje vode kroz ugljeni sloj može se predočiti modelom protjecanja kroz stijenu koju karakterizira dvojna poroznost. Model se najčešće pojednostavljuje pravilnom mrežom fraktura u ležištu (Warren i Root, 1963). Takav model najrašireniji je za predviđanje proizvodnje metana iz ugljena i dobra je pretpostavka za protok vode u ugljenom ležištu. Slike 2a i 2b pokazuju kako takav pojednostavljeni model, kao i u stvarnom slučaju ima paralelni raspored pukotina.



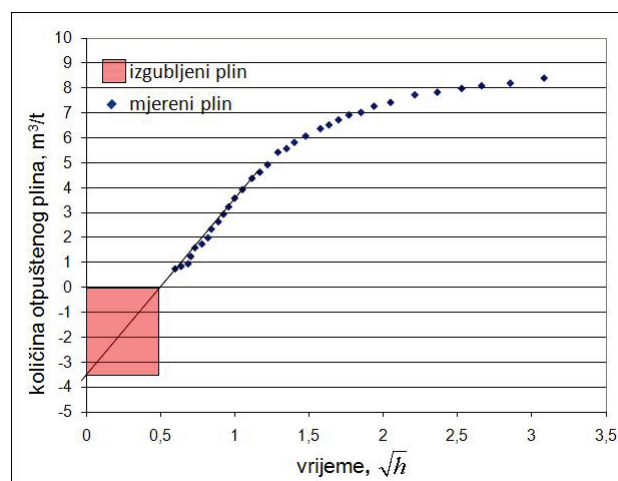
Slika 2a i 2b. Model pukotinskog sustava ugljena
 Figure 2a, 2b Coal cleat system

U ležištu ugljena metan može biti zadržan na 3 načina – adsorbiran na matriks ugljena, slobodan plin u porama i frakturama te kao plin otopljen u vodi. Dok najznačajniji udio u protoku plina imaju makropore i pukotine, većina metana sadržana je u mikroporama, tj. adsorbirano u matriksu ugljena. Time se ležište ne opisuje kao tipično plinsko ležište u naftnoj industriji te se umjesto Darcyevog zakona protjecanja koristi Fickov zakon molekularne difuzije, a umjesto jednadžbe realnog plina često je praktičnije koristiti izoterme adsorpcije/desorpcije za opis volumnih promjena plina pri smanjenju tlaka proizvodnjom.

Krivulje sorpcije su ključni potreban parametar za procjenu volumena plina koji će biti oslobođen iz ugljenog ležišta metana smanjivanjem tlaka. Analize sorpcije su više otežane u slučaju heterogenosti ležišta i složenijeg sastava fluida u ležištu. Prije testova sorpcije na reprezentativnom uzorku jednostavnije je odrediti sorpciju za jednostavne sisteme fluida. Najčešće se laboratorijski iz uzorka ugljena određuje sadržaj plina u in situ uvjetima. Nakon što je poznato početno zasićenje plinom, ugljen se re-adsorbira metanom te se rade izoterme sorpcije, od kojih je prva izoterma adsorpcije metana pri početnom zasićenju.

Dio plina koji desorbira iz uzorka prije samog mjerenja zove se *izgubljeni plin* (slika 3). Nakon što desorbira sav plin koji može desorbirati pri standardnim, površinskim uvjetima tlaka i temperature, u uzorku

preostaje zasićenje rezidualnim plinom koji nije isplativo proizvoditi.



Slika 3. Krivulja desorpcije plina te količina izgubljenog plina (s ekstrapoliranim vremenom izgubljenog plina)

Figure 3 Desorption curve vs. the amount of lost gas (and plotted extrapolated wasted gas time)

Ukupni volumen plina u određenom volumenu stijene čini zbroj volumena izgubljenog, mjenenog i rezidualnog plina. Neovisno određen udio vlage, pepela, te sumpora omogućuje procjenu zasićenja plinom usporedbom izoterme sorpcije i procjena iz količine plina dobivene pomoću testa desorpcije. Podaci o udjelu vlage, pepela i sumpora omogućuju procjenu sadržaj plina u samom ugljenu iz više testova desorpcije učinjenih za uzorak iz jednog sloja ugljena. Također, iz istih podataka moguće je izračunati sadržaj plina za svaku zonu u ležištu ugljena što se kasnije može koristiti za procjenu zaliha plina.

Mjerenja sadržaja vlage i pepela mogu poslužiti za određivanje udjela elemenata koji nisu ugljen. U slučaju prisustva piritu i karbonatnih minerala, potrebne su korekcije za sumpor kako bi se što točnije odredila masa stijene pošto pri određivanju sadržaja pepela sumpor otpinjava.

Za procjenu ukupnih količina plina u ležištu, moguće je izraditi korelaciju zasićenja plinom i ukupne gustoće stijene kojom se određuje sadržaj plina u odnosu na dubinu. U takvom tipu korelacije, problem može predstavljati izvor podataka – podaci o gustoći za dublja ležišta su dostupni iz naftno-istraživačkih bušotina i takva mjerenja nisu kalibrirana za ugljen te daju neprecizne podatke. Iz geofizičkog mjerenja gustoće moguće je odrediti sadržaj pepela izrazom:

$$a_d = \frac{\rho - \rho_c}{\rho_a - \rho_c} \quad (1)$$

gdje su:

a_d - sadržaj suhog pepela (maseni udio)
 ρ - gustoća iz geofizičkog mjerenja gustoće
 (density log), g/cm³
 ρ_c - gustoća čistog ugljena, g/cm³
 ρ_a - gustoća čistog pepela, g/cm³

Sadržaj plina tada je:

$$G_c = G_{pc} (1 - a_d) \quad (2)$$

gdje su:

G_c - sadržaj plina, m³/t ili cm³/g
 G_{pc} - sadržaj plina u čistom ugljenu, m³/t ili cm³/g

Kada je poznat sadržaj plina u ležištu, za određivanje zaliha plina potrebno je poznavati dimenzije ležišta. Jednostavna aproksimacija je pretpostaviti prosječnu debljinu i površinu ležišta ugljena te koristiti izraz 3:

$$G = Ah\rho_b G_c \quad (3)$$

gdje su:

G - procijenjene količine plina u ležištu, m³
 A - prosječna površina promatranog intervala, m²
 h - prosječna debljina odabranog intervala, m
 ρ_b - prosječna gustoća ukupne stijene u promatranom intervalu, t/m³
 G_c - sadržaj plina, m³/t

Vrijeme sorpcije je vrijeme u kojem je desorbiralo 63.2% ukupno desorbiranog plina. Slika 4 pokazuje djelovanje proizvodnje na vrijeme sorpcije.

Kako bi se analitički karakteriziralo izotermnu sorpciju metana i drugih plinova, potrebno je prvo procijeniti dvije osnovne varijable – Langmuirov volumen (V_L , m³) i Langmuirov tlak (p_L , bar). Te varijable određuju izoterme sorpcije iz kojih se primjenom Langmuirove jednadžbe (1918) procjenjuje sadržaj plina u zasićenom ugljenu, ovisno o ležišnom tlaku. Zalihe plina u ugljenu izražavaju se najčešće u m³/t. Ukoliko je pri početnom tlaku iznos koncentracije plina s desne strane Langmuirove izoterme (slika 5), tada je uzorak u podzasićenom području i potrebno je smanjiti tlak do Langmuirove izoterme kako bi se izdvojila prva molekula metana. Ukoliko je koncentracija pri zadanom tlaku na krivulji, za očekivati je da će prvo započeti izdvajanje metana iz fraktura.

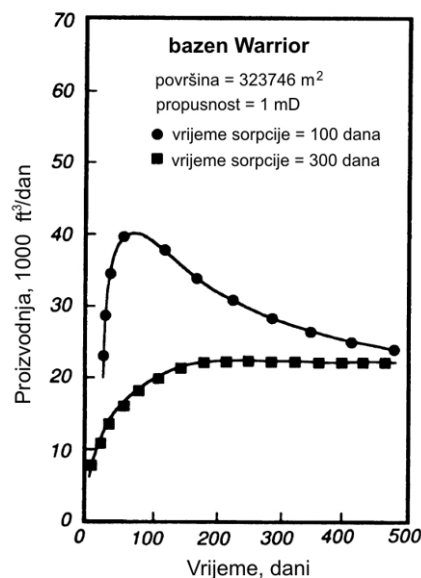
Langmuirova jednadžba proizlazi iz pretpostavke kako je volumen plina adsorbiranog ili desorbiranog pri

konstantnoj temperaturi proporcionalan količini slobodnog plina, tj. tlaku (sorpcije):

$$G_s = G_{sL} \left(\frac{p}{p + p_L} \right) \quad (5)$$

gdje su:

G_s - količina plina pri ravnotežnom tlaku m³/t
 G_{sL} - količina plina pri tlaku koji teži u beskonačnost, m³/t
 p - tlak ravnoteže, bar
 p_L - Langmuirov tlak, tlak pri kojem se pridobije 50%
 G_{sL} , bar



Slika 4. Odnos vremena sorpcije i brzine proizvodnje (Sawyer et al. 1987.)

Figure 4 Sorption time vs. production rate (Sawyer et al. 1987.)

Izraz 5 može poslužiti za procjenu sadržaja plina nakon pada tlaka u ležištu (uslijed istraživanja i eksploatacije)

U slučaju malog broja dostupnih podataka može se upotrijebiti Kimova metoda (1977) koja uračunava temperaturu, tlak, rang ugljena i sadržaj vlage:

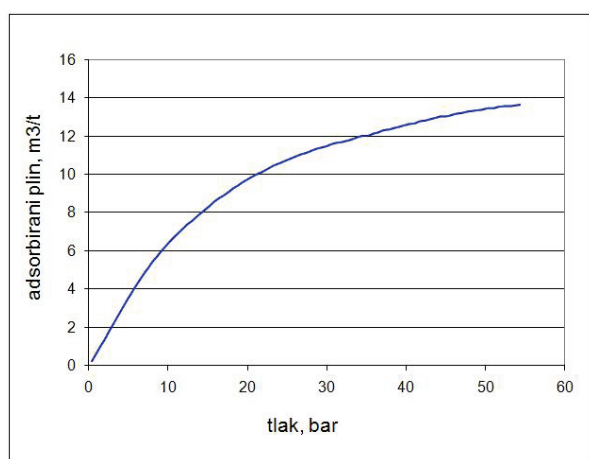
$$G_{pc} = 0.75(1 - a - w_c) \times \left(k_o (0.095d)^{n_o} - 0.14 \left(\frac{1.8d}{100} + 11 \right) \right) \quad (6)$$

$$k_o = 0.8 \frac{x_{fc}}{x_{vm}} + 5.6$$

$$n_o = 0.315 - 0.01 \frac{x_{fc}}{x_{vm}}$$

gdje su:

- G_{pc} - suhi, bez pepela kapacitet plina, cm^3/g
- a - sadržaj pepela, maseni udio, %/100
- w_c - sadržaj vlage, maseni udio, %/100
- d - dubina uzorka, m
- x_{fc} - fiksni ugljik, maseni udio, %/100
- x_{vm} - hlapive tvari, maseni udio, %/100



Slika 5. Mjerena Langmuirova izoterma (prilagodeno iz McLennan et al., 1995).

Figure 5 Measured Langmuir isotherm (modified form McLennan et al., 1995).

Kimova jednadžba (6) dobivena je empirijski, regresijom rezultata mjerenja na nizu uzoraka s različitim dubina. U jednadžbu nisu uzeti u obzir petrografski sastavi ugljena. Ipak, jednadžba govori kako je za očekivati veći sadržaj plina na većoj dubini i kod većeg ranga ugljena (indirektno, preko kemijskog sastava).

U ležištu ugljena većina plina je gustoće sličnoj tekućini (superkritični fluid). Samo mali udio nalazi se slobodan, u plinovitom stanju. Nakon nekog vremena proizvodnje i desorpcije plina dolazi do ukupnog smanjenja tlaka u ležištu. Dopunske metode pridobivanja plina iz ugljenog ležišta (*Enhanced Coalbed Methane*, ECBM) u osnovi održavaju tlak u ležištu. Utiskivanjem plina moguće je održati ležišni tlak, smanjujući jedino parcijalni tlak plinovite faze fluida koji se u početku nalazio u ležištu. Također, odabirom odgovarajućeg plina za utiskivanje, ostvaruje se potiskivanje metana iz ležišta. Najčešći plinovi za potisak, radi dostupnosti i fizikalno-kemijskih svojstava su dušik i ugljični dioksid. Ukoliko se dio CO_2 zadrži u ležištu, umanjuje se učinak stakleničkih plinova pri proizvodnji i iskorištavanju fosilnih goriva. Ugljena

ležišta mogu postati i dugotrajna podzemna skladišta ugljičnog dioksida, međutim najčešće su za tu svrhu pogodna duboka ležišta ugljena (ležišta u kojima će CO_2 biti u superkritičnom području). Prvi isplativi izvediv projekt utiskivanja CO_2 za ECBM proveden je u San Juanu (USA, New Mexico). Konvencionalna proizvodnja metana je započeta 1989. godine, utiskivanje CO_2 je počelo 1995. godine i završeno je 2001. godine pri čemu je u ležištu pohranjeno 277 000 tona CO_2 , a iscrpak metana je povećan sa konvencionalno pridobivih 77% na 95% ukupnih zaliha plina, uz prosječnu proizvodnju 1630 m^3/dan .

Amorino i dr. su (2005) naveli osnovne kriterije za odabir perspektivnih ležišta metana u kojima je moguće utiskivanje plina za dodatni iscrpak:

- visok stupanj homogenosti ležišta;
- jednostavna struktura uz minimalni broj rasjeda i bora;
- dubine između 600m i 1500m;
- geometrija ležišta;
- sastav ugljena (rang, macerali, pepeo, vlaga itd.);
- zasićenje plinom i sadržaj metana u ugljenom ležištu (Law i Rice, 1993; Yee i dr. 1993.);
- zasićenje podzemnom vodom, utjecaj akvifera;
- povoljna propusnost za plin.

Volumni omjer sorpcije CO_2 i CH_4 ugljenog sloja se kreće od 1:1 za ležišta zrelog ugljena do 10:1 za mlada ležišta ugljena. Utiskivani CO_2 prolazi kroz sistem fraktura, difuzno zasićuje stijene ugljena i adsorbira se kroz sustav mikro-pora, oslobađajući plinove poput CH_4 koji imaju manju adsorpciju prema ugljenu. U tom smislu, ugljen se može klasificirati prema tri kriterija vezana uz sastav (Amorino i dr., 2005):

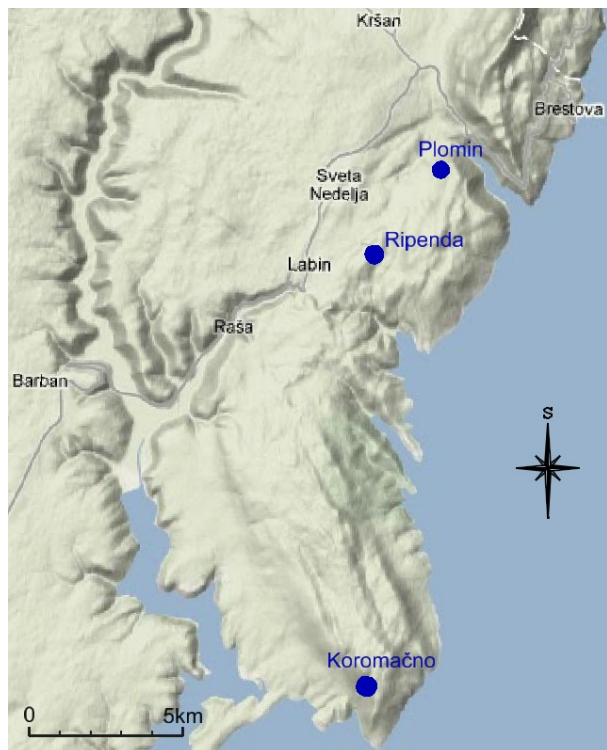
- razred (eng: grade) – relativni odnos organske i anorganske tvari u ugljenu;
- tip, tj. različite kategorije organskih tvari u sastavu;
- rang – razina fizikalno-kemijskih promjena u sastavu i u strukturi ugljena koje se zbivaju prilikom ugljenizacije (dijageneza, dehidracija, katageneza, bitumenizacija, debitumenizacija, metageneza, grafitizacija).

Rang postaje parametar u procjeni ležišta metana u ugljenu kad je potrebno analitički uključiti utjecaj cijeli niz fizikalno-kemijskih svojstava.

Isplativa proizvodnja metana iz ležišta ugljena zahtijeva povoljan sustav pukotina i odgovarajuću propusnost i poroznost. Dok je kod konvencionalnih plinskih ležišta iskorištavanjem u naftnoj industriji poroznost često veća i od 25%, a propusnost često veća od $1\mu\text{m}^2$ ($\approx 1\text{D}$), kod ležišta ugljena poroznost se kreće u rasponu 1-30%, a propusnost u rasponu 0,0001 – 0,25 μm^2 ($\approx 0,1 - 250 \text{mD}$).

Preliminarne procjene količine metana u formacijama s proslojcima ugljena

Kako detaljne laboratorijske analize sorpcije nisu dostupne za ugljen iz eksploatiranih ležišta u Hrvatskoj, a također nisu dostupne niti detaljne strukturne karte ležišta moguća je bila samo preliminarna procjena kapaciteta bazirana na podacima o ugljenu u Labinskom bazenu.

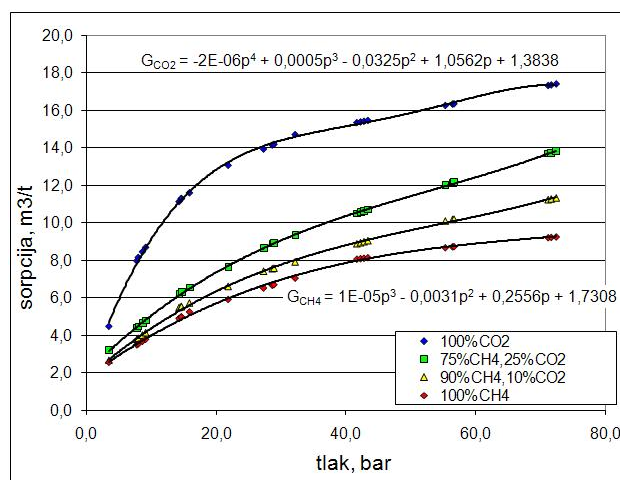


Slika 6. Lokacije istražnih bušotina
Figure 6 Locations of exploration wells

S aspekta dobivanja metana iz ugljenih ležišta, među osnovnim utjecajnim parametrima na sadržaj plina u ugljenu su dubina ležišta i kvaliteta, odnosno rang ugljena. Veća dubina i viši rang ugljena u pravilu znače

veći sadržaj metana. Uzimajući u obzir ovu zakonitost i s ciljem nalaženja geografskih područja ugljenih ležišta uz teoretski što veći sadržaj metana te pregledom dostupne dokumentacije i podataka istražnih radova provedenih na ugljenu u RH, izdvojen je Labinski bazen kamenog ugljena u Istri (Salopek, 1952; Takšić, 1954; Marković, 2002). Dostupni podaci istražnih bušenja u ovom bazenu pokazuju tri područja s većim dubinama ugljenih slojeva (400 – 600 m). Korišteni su podaci o dubini i debljini slojeva ugljena iz bušotina Jurašin i Jurašin 2 na području Plomina, zatim bušotina Ripenda 3 i Ripenda 4 na području Ripende te bušotine B1, B6, B9 i B12 na području Koromačnog (Slika 6).

Procjena količina metana je uspoređena pomoću 3 metode – upotrebom općenite Langmuirove izoterme i izraza 5, zatim upotrebom općenite krivulje sorpcije za čisti metan, tj. korelacijske jednadžbe dobivene obradom grafikona (Slika 7), te implementacijom Kimove metode i izraza 6. Rezultati su prikazani tablicama 1, 2 i 3.



Slika 7. Sorpcija za različite sastave plina (prilagođeno iz McLennan et al.,1995).

Figure 7 Sorption curve for different gas compositions (modified from McLennan et al.,1995).

Tablica 1. Količine metana u suhom ugljenu izračunate iz Langmuirove izoterme.

Table 1 The amounts of methane in the dry coal calculated from the Langmuir isotherm

bušotina	tlak ravnoteže, p bar	Langmuirov tlak, p _L bar	količina plina pri tlaku koji teži u beskonačnost, G _{SL} m ³ /t	količina plina pri ravnotežnom tlaku, G _s m ³ /t
Jurašin	55.7	14	14	11.2
Jurašin 2	51	14	14	11.0
Ripenda 4	47.8	14	14	10.8
Ripenda 3	51.2	14	14	11.0
B1	45.2	14	14	10.7
B6	38.4	14	14	10.3
B9	42.9	14	14	10.6
B12	29.6	14	14	9.5

Tablica 2. Sorpcija metana i CO₂ u suhom ugljenu određena iz općenite krivulje sorpcije
Table 2 Sorption of methane and CO₂ in dry coal, determined from a general sorption curve

bušotina	tlak, p bar	sorpcija metana, G _{CH₄} m ³ /t	sorpcija CO ₂ , G _{CO₂} m ³ /t	omjer sorpcije CO ₂ i metana
Jurašin	55.7	8.1	26.5	3.3
Jurašin 2	51.0	8.0	23.5	2.9
Ripenda 4	47.8	8.0	21.8	2.7
Ripenda 3	51.2	8.0	23.6	2.9
B1	45.2	7.9	20.5	2.6
B6	38.4	7.5	18.0	2.4
B9	42.9	7.8	19.6	2.5
B12	29.6	6.8	15.6	2.3

Tablica 3. Količina metana u suhom (bez pepela i vlage) ugljenu.
Table 3 Amount of methane in dry coal (no ash and moisture)

bušotina	dubina, d m	sadržaj vlage, w _c %/100	sadržaj pepela, a %/100	sadržaj fiksnog ugljika, x _{fc} %/100	hlapive tvari, x _{vm} %/100	kapacitet plina, G _{pc} m ³ /t
Jurašin	557.5	0.034	0.12	0.42	0.43	11.7321
Jurašin 2	510.6	0.034	0.12	0.42	0.43	11.4471
Ripenda 4	478	0.034	0.12	0.42	0.43	11.2353
Ripenda 3	512.26	0.034	0.12	0.42	0.43	11.4576
B1	451.8	0.01	0.14	0.41	0.48	10.9694
B6	383.5	0.01	0.14	0.41	0.48	10.4581
B9	429	0.01	0.14	0.41	0.48	10.8064
B12	296.15	0.01	0.14	0.41	0.48	9.6803

Diskusija i zaključci

U radu su prikazani rezultati procjene količine metana u ugljenima s nekoliko lokacija u labinskom bazenu. Rezultati predstavljaju kapacitet ugljena da sadrži metan, a procjena ukupnih količina nije moguća bez precizirane geometrije ležišta. Bili su dostupni podaci o rezervama ugljena na dotičnim lokacijama, međutim oni ne sadrže geometriju i zalijeganje ležišta i stoga ne predstavljaju kvalitetan podatak za izračun ukupne količine metana.

Ustanovljeni su slijedeći zaključci:

- Od tri metode procjene, najviše se razlikuju rezultati dobiveni iz općenite krivulje sorpcije. Za točniju procjenu pomoću krivulje sorpcije bi bilo korektnije izmjeriti krivulju na ugljenu s konkretnog lokaliteta.
- Procjena iz Langmuirove izoterme (Tablica 1) i Kimovom metodom (Tablica 3) daje slične rezultate. Kako je Kimova metoda korelacija izrađena na velikom broju uzoraka, primjenjena za analize s konkretnih lokaliteta, moguće je zaključiti da se Langmuirovom izotermom može poslužiti za procjenu kada takve analize nisu dostupne.

- Sve procjene su rađene pod pretpostavkom da je gradijent tlaka jednak hidrostatskom gradijentu tlaka. Kimova jednadžba ne uračunava tlak, nego dubinu te je uočljivo kako je pretpostavka hidrostatskog tlaka dobra jer se rezultati poklapaju s rezultatima računatim iz Langmuirove izoterme.

- Usporedbom sorpcije metana u odnosu na CO₂ u Tablici 2, dobiven je omjer sorpcije

$$\frac{G_{CO_2}}{G_{CH_4}} = 2.3 - 3.3 .$$

Utiskivanjem CO₂ radi održavanja tlaka u ležištu i povećanja iscrpka plina moguće je pospješiti proizvodnju plina, naročito ako se CO₂ kaptira na industrijskim izvorima u blizini ležišta. Ovakva proizvodnja ne predstavlja utiskivanje radi trajnog zbrinjavanja CO₂, već cirkulirajući sustav fluida gdje bi za održavanje tlaka bilo potrebno 2.3 do 3.3 puta više CO₂, nego što bi se istisnulo metana. Na taj način bi se umanjila količina CO₂ za trajno zbrinjavanje (radi premašenih kvota emisija stakleničkih plinova, prema potpisanom Kyoto protokolu).

- Rezultati daju kapacitet metana za suhi ugljen i zanemaren je metan u vodi u ugljenu. U posljednjem stupcu tablice 3 dati su sadržaji metana u ugljenu bez oduzetih masenih udjela vode i pepela. Sadržaj metana u ukupnom sloju ugljena (s vodom) mogao bi se odrediti kada bi se odredio sastav slojne vode.
- Opisanim metodama nije moguće uzeti u obzir sadržaj sumpora u ugljenu koji mijenja krivulju sorpcije za CO₂.

Za bolju procjenu potencijala metana u ugljenim ležištima potrebna je precizna definicija geometrije ugljenih slojeva i laboratorijske analize ugljena, mjerenje krivulja sorpcije te mjerenje Langmuirovih izoterma.

Accepted: 15.10.2010.
Received: 20.09.2010.

Literatura

- Amorino, C., Bencini, R., Cara, R., Cinti, D., Deriu, G., Fandinò, V., Giannelli, A., Mazzotti, M., Ottiger, S., Pizzino, L., Pini, R., Quattrocchi, F., Sardu, R. G., Storti, G., Voltattorni, N. (2005): CO₂ geological storage by ECBM techniques in the Sulcis area (SW Sardinia Region, Italy). *Second International Conference on Clean Coal Technologies for Our Future, Castiadas*.
- Crnolatac, I. (1951): Geološki istražni radovi dubokim bušenjem u Raši. Fond struč.dok. HGI, Zagreb.
- Kim, A.G. (1977): Estimating Methane Content of Bituminous Coalbeds From Adsorption Data. *U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 8245*.
- Law, B.E. and Rice D.D. (Eds.), 1993, Hydrocarbons from Coal, *AAPG Studies in Geology #38, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa*, 400 pp.
- Langmuir, I. (1918): The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. *Journal of the American Chemistry Society*, Vol. 38.
- Marković, S. (2002): Hrvatske mineralne sirovine. pp. 544. HGI, Zagreb.
- McLennan, J.D., Schafer, P.S., Pratt, T.J. (1995): A guide to determining coalbed gas content, Gas Research Institute, Chicago, 204 pp.
- Salopek, M. (1952): Geološko kartiranje ugljenosnih terena oko Raše u Istri. Fond struč.dok. HGI, Zagreb.
- Sawyer, W.K., M.D. Zuber, V.A. Kuuskraa, and D.M. Horner (1987): Using Reservoir Simulation and Field Data to Define Mechanisms Controlling Coalbed Methane Production. *Proceedings of the 1987 Coalbed Methane Symposium*, pp. 295-307, University of Alabama/Tuscaloosa.
- Takšić, A. (1952): Geološka dokumentacije bušotine Ripenda 4 – Raša. Fond struč.dok. HGI, Zagreb.
- Takšić, A. (1954): Pregled ležišta ugljena u Hrvatskoj. Fond struč.dok. HGI, Zagreb.
- Tomić, A. (1961): Istražno bušenje na kamenu ugljen u 1960. godini na području Istre. Fond struč.dok. HGI, Zagreb.
- Vrkljan, D. (1992): Podzemno uplinjavanje ugljena i mogućnosti primjene na ležištima Hrvatske. Magistarski rad, RGN fakultet, Zagreb.
- Warren, J.E., and Root, P.J. (1963): The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. *SPEJ*, **22**, 245-255. Dallas.
- Yee, D., Seidele, J.P. and Handson (1993): Gas sorption on coal and measurements of gas content, In: Law, B.E. and Rice D.D. (Eds.), Hydrocarbons from Coal, AAPG Studies in Geology #38, American Association of Petroleum Geologists, 203-218, Tulsa.
- (1963): Istražni radovi u području Koromačno i Plomin za 1962. i 1963. godinu. Istarski ugljenokopi Raša.
- (1983): Rješenje o količini i kakvoći rezervi kamenog ugljena u istražnom prostoru Istra – područje Koromačno. Komisija za utvrđivanje rezervi mineralnih sirovina, Zagreb.
- (1987): Rješenje o količini i kakvoći rezervi kamenog ugljena u eksploatacijskom polju Labin – područje Ripenda-Plomin. Komisija za utvrđivanje rezervi mineralnih sirovina, Zagreb.