
Beata Rudnicka*

SKŁADOWANIE DWUTLENKU WĘGLA – IDEA I KIERUNEK ROZWOJU

Praca ma na celu pokazanie możliwych metod redukcji ilości dwutlenku węgla dostającego się do atmosfery, czyli tzw. sekwestracji CO₂. Sekwestrację dwutlenku węgla, czyli wychwytywanie i składowanie CO₂, można podzielić na tzw. sekwestrację naturalną, sekwestrację mineralną oraz sekwestrację geologiczną. Analizy petrofizyczne przeprowadzone w otworze Ośno IG-2, z którego dane wykorzystano w projekcie EnerGizerS dotyczącym wspomaganego systemu geotermalnego wykorzystującego dwutlenek węgla zamiast wody, przedstawiono jako wzorcowe. Systemy CO₂-EGS (*enhanced geothermal system*) cieszą się zainteresowaniem ze względu na możliwość geologicznego składowania dwutlenku węgla przy jednoczesnym pozyskiwaniu energii geotermalnej. Na podstawie danych geofizyki otworowej i wyników badań laboratoryjnych na próbkach geologicznych zostały obliczone parametry zbiornikowe: porowatość i przepuszczalność.

CARBON STORAGE – THE IDEA AND DIRECTION OF DEVELOPMENT

This paper aims to present possible methods for reducing carbon dioxide entering the atmosphere, i.e., so-called CO₂ sequestration. Carbon dioxide sequestration, i.e., the CO₂ capture and storage, can be divided into so-called natural sequestration, mineral sequestration and geological sequestration. Data from the Ośno IG-2 well, which is being used in the EnerGizerS project for an enhanced geothermal system using carbon dioxide instead of water, was selected as an example of ongoing petrophysical analyses. CO₂-EGS (enhanced geothermal systems) are of interest because of the possibility of geological storage of carbon dioxide in the process of obtaining geothermal energy. Based on well logging data and laboratory results on geological samples, reservoir parameters were calculated: porosity and permeability.

1. WPROWADZENIE

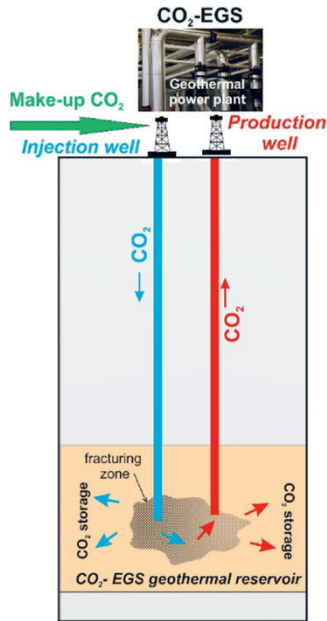
W dobie kryzysu klimatycznego i różnorodnych działań mających na celu ograniczenie emisji dwutlenku węgla coraz częściej słyszy się o sekwestracji dwutlenku węgla, czyli składowaniu zapobiegającym jego przedostawaniu się do atmosfery. Mimo że pojęcie sekwestracji

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Koło Naukowe Geofizyków AGH „Geofon”.

wydaje się dość abstrakcyjne, metody te stosuje się od kilkudziesięciu lat, m.in. w celach intensyfikacji wydobywania ropy naftowej czy też gazu z pokładów węgla. Na samo pojęcie sekwestracji składa się wychwytywanie, oddzielanie, transport oraz ostatecznie składowanie dwutlenku węgla. Wokół nas cały czas zachodzi tzw. naturalne składowanie dwutlenku węgla, które jest etapem cyklu obiegu węgla w przyrodzie. Część CO_2 jest pochłaniana przez biosferę, pogrzebaną materię organiczną (ropę naftową, gaz ziemny i węgiel) czy też pogrzebany węgiel nieorganiczny. Największym pochłaniaczem tego bezwonnego gazu są hydrosfera i atmosfera, jednak emisja dwutlenku węgla jest na tyle duża, że same ekosystemy nie są wystarczające do zachowania równowagi w przyrodzie i pochłonięcia jego ogromnych ilości. Dlatego opracowano inne rozwiązania składowania dwutlenku węgla, do których należą m.in. sekwestracja w oceanach (przez wpuszczanie do oceanu skroplonego CO_2 rurociągami bezpośrednio z lądu bądź za pomocą tankowców), sekwestracja mineralogiczna (inaczej karbonatyzacja – wykorzystanie oddziaływania dwutlenku węgla z minerałami) oraz szeroko pojęta sekwestracja geologiczna. Nadmierne ilości CO_2 są składowane w wyeksploatowanych pokładach gazu ziemnego, głębokich poziomach wodonośnych czy też służą do zwiększenia wydobywania ropy naftowej lub gazu z nieeksploatowanych pokładów węgla [1].

Wraz ze wzrostem emisji dwutlenku węgla pojawiają się nowe propozycje łagodzenia skutków jego obecności w atmosferze. Jednym z nich jest projekt EnerGizerS, którego celem są badania prowadzące do identyfikacji i szczegółowej charakterystyki struktur geologicznych dla niekonwencjonalnych systemów geotermalnych CO_2 -EGS (*CO₂ enhanced geothermal systems*) w Polsce i Norwegii wykorzystujących nadkrytyczny dwutlenek węgla jako medium robocze. Rozwiązanie to przynosi podwójną korzyść – pozwala na neutralizowanie antropogenicznych zmian klimatu przy jednoczesnym zaspokajaniu potrzeb energetycznych. Wspomagane systemy geotermalne wykorzystują potencjał geotermalny skał. Do zbiornika petrotermalnego (zbiornik podziemny tzw. gorących skał) wiercone są co najmniej dwa otwory – jeden iniekcyjny, drugi produkcyjny (rys. 1). Za pomocą pierwszego z nich włączany jest pod wysokim ciśnieniem płyn roboczy – najczęściej woda, ale w tym przypadku dwutlenek węgla. Medium, przechodząc przez ciepłe struktury, nagrzewa się i jest wydobywane drugim otworem na powierzchnię w celu zamiany niesionego ciepła na energię cieplną lub elektryczną. Cały obieg medium roboczego odbywa się w układzie zamkniętym, przez co wykorzystywana jest określona ilość dwutlenku węgla [2]. Przy wyborze lokalizacji dla wyżej wspomnianych systemów CO_2 -EGS brane są pod uwagę przede wszystkim odpowiednie właściwości termiczne i petrofizyczne skał zbiornikowych, dostępność źródła CO_2 (np. działających elektrowni spalających paliwa kopalne), istnienie otworów wiertniczych i innej infrastruktury. Ważną kwestią jest również wysoki poziom rozpoznania geologicznego oraz prawne i środowiskowe aspekty. Utwory skalne, które w przyszłości miałyby pełnić funkcję zbiorników petrogeotermalnych dla wspomaganych systemów geotermalnych, powinny charakteryzować się wysoką temperaturą, dość niską porowatością i przepuszczalnością, a także powinny być naturalnie uszczelnione od góry, w stropie, w celu zapobiegania ucieczce medium roboczego.

W ramach projektu EnerGizerS (<http://www.energizers.agh.edu.pl>), realizowanego dzięki współpracy naukowców z Polski i Norwegii, badane są trzy lokalizacje: formacja Åre na Morzu Północnym, blok Gorzowa w zachodniej Polsce oraz niecka mogileńsko-lódzka w środkowej Polsce (rys. 2).



Rys. 1. Schemat działania wspomaganých systemów geotermalnych

Źródło: [2]



Rys. 2. Lokalizacja dla potencjalnych systemów CO₂-EGS w Polsce i Norwegii

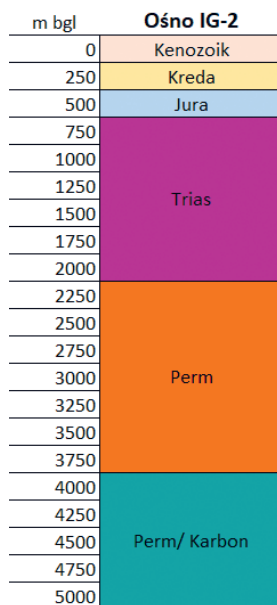
Źródło: [2]

Celem badań jest analiza parametrów petrofizycznych dla lokalizacji wspomaganych systemów geotermalnych na przykładzie utworów permskich czerwonego spągowca z wykorzystaniem danych z otworu Ośno IG-2. Region bloku Gorzowa, w którym znajduje się interpretowany otwór wiertniczy, został wybrany ze względu na analogię do lokalizacji niemieckiego systemu EGS – Groß Schönebeck.

2. MATERIAŁ I METODY

2.1. BUDOWA GEOLOGICZNA

Otwór Ośno IG-2 został odwiercony w zachodniej części Polski, około 10 km od miejscowości Radówek, na obszarze bloku Gorzowa. Blok Gorzowa jest regionalną jednostką geologiczną. Prawie cały jego obszar pokryty jest lawami i pokrywami piroklastycznymi określanymi jako formacja Wyrzeka. Ponadto obszar ten cechuje się wysokimi wartościami strumienia ciepłego – temperatura na głębokości około 3000 m osiąga 105°C, a na głębokości 4000 m – nawet 135°C. Obszar ten jest częścią basenu polskiego, który pod względem budowy geologicznej zbliżony jest do północnoniemieckiego basenu czerwonego spągowca, na terenie którego istnieje petrogeotermalna instalacja Groß Schönebeck EGS. Instalacja ta wykorzystuje dolnopermskie piaskowce i skały wulkaniczne zalegające na znacznych głębokościach, stąd też utwory czerwonego spągowca są formacjami najbardziej odpowiednimi dla lokalizacji CO₂-EGS w Polsce. Otwór Ośno IG-2 odwiercono w celu zbadania permskich osadów, ich pozycji stratygraficznej, litologii oraz oceny perspektywiczności pod kątem występowania węglowodorów. Profil chronostratygraficzny otworu został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Profil chronostratygraficzny otworu Ośno IG-2

Na głębokości 3209,5 m wyróżniono analizowane utwory permskie czerwonego spągowca. W jego skład wchodzi piaskowce, zlepieńce, czyli skały osadowe grubookruchowe zbudowane z ziaren żwiru spojonych lepiszczem, oraz skały wulkaniczne. Górna część czerwonego spągowca składa się głównie z czerwonych łupków ilastych, natomiast dolna jest reprezentowana przez utwory wulkaniczne z nielicznymi cienkimi przewarstwieniami skał osadowych. Utwory czerwonego spągowca charakteryzują się dość małą porowatością efektywną i przepuszczalnością absolutną. Od góry czerwony spągowiec jest uszczelniony osadami cechsztyńskimi, które blokują swobodną ucieczkę medium wypełniającego pory. Z głębokości 3212–3659 m pobrano rdzenie wiertnicze, które poddano badaniom laboratoryjnym, wykorzystując metodę porozymetrii rtęciowej.

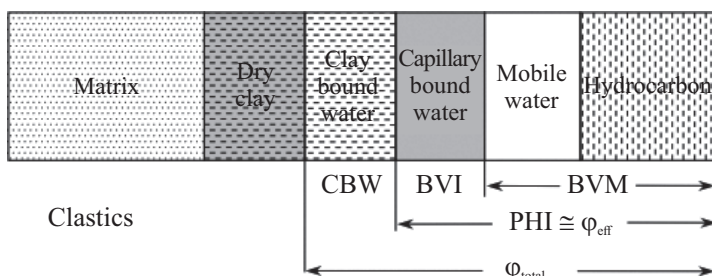
2.2. GEOFIZYKA OTWOROWA

Aby określić właściwości zbiornikowych skał, tj. porowatość i przepuszczalność absolutną, oprócz badań laboratoryjnych można wykorzystać profilowania geofizyki otworowej. Geofizyka otworowa jest jedną z podstawowych metod określania właściwości utworów zalegających pod powierzchnią ziemi. Jej początki sięgają pierwszej połowy XX wieku, dokładnie 1927 roku, kiedy to w Pelchelbronn w Alzacji (wschodnia Francja) zarejestrowano pierwsze profilowanie oporności elektrycznej. Od tego momentu geofizyka otworowa zaczęła się gwałtownie rozwijać i już w 1929 roku elektryczne profilowanie oporności wykorzystano w Wenezueli, Stanach Zjednoczonych, Rosji i Indiach [3]. Pomiar oporności elektrycznej był stosowany w przemyśle poszukiwawczym do celów korelacji otworów oraz do identyfikacji potencjalnych warstw występowania węglowodorów. W kolejnych latach powstawały nowe sondy pomiarowe wykorzystujące m.in. potencjały spontaniczne (SP) i promieniowanie gamma (GR), a w latach 50. właściwości sprężyste skał, czyli profilowania akustyczne [3].

Istotą geofizyki otworowej jest pomiar parametrów fizycznych ośrodka skalnego za pomocą sond pomiarowych wzdłuż osi otworu wiertniczego. Dana sonda pomiarowa – lub najczęściej zestaw sond (ze względu na szybszy pomiar oraz niższy koszt) – jest opuszczana do otworu wiertniczego na kablu karotażowym, zamontowanym na wyciągu umieszczonym w specjalnym mobilnym laboratorium geofizycznym. Kabel karotażowy, poza tym, że utrzymuje sondy, przesyła zarejestrowane dane do jednostki centralnej systemu pomiarowego znajdującej się w mobilnym laboratorium [4]. Podczas profilowań geofizyki otworowej rejestrowane są fizyczne właściwości skał zmieniające się z głębokością. Większa część profilowań jest prowadzona bezpośrednio przed zarurowaniem otworu, ale są również profilowania rejestrowane w otworach zarurowanych (wymagają jednak wprowadzenia poprawek na wpływ rur i cementu) [5]. Dzięki wnikliwej analizie i interpretacji otrzymanych danych możliwe jest rozpoznanie litologii zalegających warstw oraz przypisanie im odpowiedniego wieku stratygraficznego. Za pomocą różnorodnych profilowań można określić własności fizyczne skał. Dane te są wykorzystywane m.in. w przemyśle naftowym do poszukiwania węglowodorów, do lokalizacji geologicznych zbiorników gazu ziemnego, do poszukiwania miejsc i formacji geologicznych dla geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla czy też podczas badań niezbędnych do budowy instalacji geotermalnych. Informacje uzyskane dzięki geofizyce otworowej są wykorzystywane m.in. przez geofizyków innych specjalności, przede wszystkim sejsmików, geologów, inżynierów złożowych czy też inżynierów wiertnictwa i produkcji.

Porowatość efektywna

Porowatość jest jedną z niezbędnych wielkości określających potencjał wspomaganych systemów geotermalnych. Aby jak najlepiej zrozumieć pojęcie porowatości, na rysunku 4 przedstawiono typowy model klastycznej skały zbiornikowej. Na jej budowę składają się matryca skalna, suche ropy oraz przestrzeń porowa, czyli woda związana w minerałach ilastych (CBW – *clay bound water*), woda kapilarna (BVI – *bulk volume irreducible*), woda ruchoma oraz węglowodory (BVM – *bulk volume movable*). Jako porowatość całkowitą (ϕ_{total}) określa się sumę wszystkich czterech elementów składających się na przestrzeń porową skały. Przy projektowaniu systemów CO₂-EGS bardziej interesująca jest natomiast porowatość efektywna (ϕ_{eff}), czyli porowatość całkowita pomniejszona o wodę związaną w minerałach ilastych.



Rys. 4. Model budowy klastycznej skały zbiornikowej (objaśnienia symboli w tekście)

Źródło: [6], zmienione

Do obliczenia porowatości efektywnej wykorzystano dane otrzymane z profilowania akustycznego – czas interwałowy DT . Profilowanie akustyczne (*acoustic log*, *sonic log*) to pomiar czasu interwałowego DT wyrażonego w mikrosekundach na metr [$\mu\text{s}/\text{m}$] lub mikrosekundach na stopę [$\mu\text{s}/\text{ft}$], czyli odwrotność prędkości rozchodzenia się fali P w ośrodku skalnym. Sonda do profilowania akustycznego jest wyposażona w nadajnik lub nadajniki emitujące fale akustyczne oraz odbiorniki, które rejestrują odbite fale. Do obliczenia porowatości całkowitej użyto wzoru Wylliego [7]:

$$\phi = \frac{DT - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}} \quad (1)$$

gdzie:

ϕ – porowatość całkowita [–],

DT – czas interwałowy z profilowania akustycznego [$\mu\text{s}/\text{m}$],

DT_{ma} – czas interwałowy w szkielecie skalnym [$\mu\text{s}/\text{m}$],

DT_{fl} – czas interwałowy płynu nasycającego przestrzeń porową [$\mu\text{s}/\text{m}$].

Dodatkowo do obliczonej porowatości całkowitej konieczne jest wprowadzenie poprawki na zailenie, czyli poprawki na zawartość minerałów ilastych w skale:

$$\varphi_{sh} = \frac{DT_{sh} - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}} \quad (2)$$

gdzie:

- φ_{sh} – porowatość obliczona dla poziomów ilastych [-],
- DT_{sh} – czas interwałowy w poziomach ilastych [$\mu\text{s}/\text{m}$].

Po wprowadzeniu poprawki otrzymano porowatość efektywną:

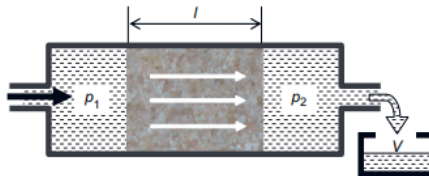
$$\varphi_e = \varphi_{sh} \cdot V_{sh} \quad (3)$$

gdzie:

- φ_e – porowatość efektywna [-],
- V_{sh} – zailenie [-].

Przepuszczalność absolutna

Kolejnym istotnym parametrem mającym znaczenie dla funkcjonowania systemów CO_2 -EGS jest przepuszczalność absolutna. Parametr ten charakteryzuje zdolność skały do przepuszczania przez nią płynów złożowych przy danym gradiencie ciśnienia [8]. Aby dokładniej zrozumieć to pojęcie, na rysunku 5 przedstawiono zasadę działania laboratoryjnego pomiaru.



Rys. 5. Schemat laboratoryjnego pomiaru przepuszczalności. Objasnienia w tekście

Źródło: [6], zmienione

Przepływ cieczy w ośrodku skalnym obrazuje prawo Darcy'ego (4) – objętość płynu przepływającego przez ośrodek porowaty w jednostce czasu jest proporcjonalna do spadku hydraulicznego oraz współczynnika filtracji:

$$u = \frac{V}{t \cdot A} = -\frac{k}{\eta} \cdot \text{grad } p \quad (4)$$

gdzie:

- u – przepływ płynu (objętość V przepływająca przez przekrój poprzeczny A w jednostce czasu t),
- k – przepuszczalność,
- η – lepkość płynu,
- $\text{grad } p$ – gradient ciśnienia, $\text{grad } p = (p_1 - p_2)/l$.

Przekształcając wzór (4), otrzymujemy uogólniony wzór na przepuszczalność absolutną:

$$k = \eta \cdot \frac{u}{\text{grad } p} \quad (5)$$

W geofizyce otworowej wyróżnia się trzy rodzaje przepuszczalności:

- 1) przepuszczalność absolutną (najbardziej interesującą podczas projektowania wspomaganych systemów geotermalnych) – przepływ laminarny niereaktywnego płynu (brak reakcji między płynem i szkieletem skalnym);
- 2) przepuszczalność efektywną – przepływ jednego medium w obecności innego, gdy są one niemieszalne;
- 3) przepuszczalność względną – stosunek przepuszczalności efektywnej do przepuszczalności względnej [6].

Do obliczenia przepuszczalności absolutnej w interpretowanym czerwonym spągowcu wykorzystano wzór Wylliego–Rosa (wzór (6)):

$$PERM = kw \cdot \frac{PHI^d}{SWirr^e} \quad (6)$$

gdzie:

$PERM$ – przepuszczalność absolutna [mD],

PHI – porowatość efektywna [-],

$SWirr$ – nasycenie wodą nieredukowalną [-],

kw – stała według Morrisa–Biggsa: 62 500 [-],

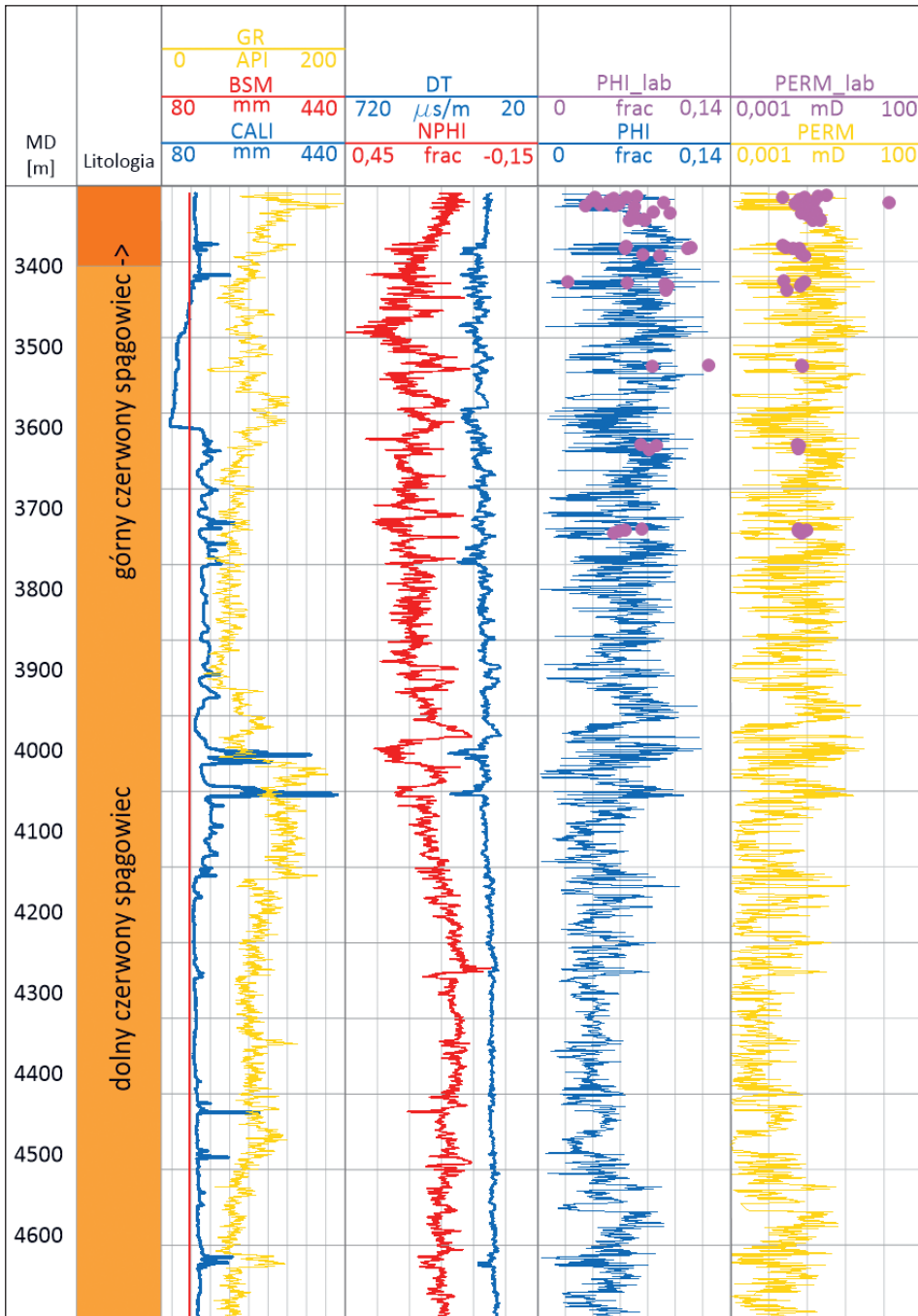
d – stała według Morrisa–Biggsa: 6,0 [-],

e – stała według Morrisa–Biggsa: 2,0 [-].

Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną $SWirr$ został dopasowany do wyników badań laboratoryjnych metodą spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego na próbkach z rdzeni wiertniczych.

3. WYNIKI ANALIZY PETROFIZYCZNEJ I DYSKUSJA – POROWATOŚĆ EFEKTYWNA I PRZEPUSZCZALNOŚĆ ABSOLUTNA

Na podstawie danych z otworu Ośno IG-2 dla czerwonego spągowca występującego na głębokości 3209,5–4700,0 m obliczono porowatość efektywną i przepuszczalność absolutną (rys. 6). Na pierwszej ścieżce przedstawiono intensywność naturalnej promieniotwórczości gamma GR, następnie średnicę rzeczywistą CALI i nominalną BSM otworu, kolejna ścieżka to czas interwałowy DT oraz porowatość neutronowa NPHI. Przedostatnia ścieżka ilustruje obliczoną porowatość efektywną oraz wyniki badań laboratoryjnych na próbkach z rdzeni wiertniczych z porozymetrii rtęciowej. Ostatnia ścieżka obrazuje przepuszczalność absolutną wraz z wynikami badań laboratoryjnych na próbkach z rdzeni wiertniczych.



Rys. 6. Zestawienie profilowań z otworu Ośno IG-2 z obliczonymi porowatością efektywną i przepuszczalnością absolutną (objaśnienie symboli w tekście)

W celu uzyskania jak najbardziej dokładnej wartości porowatości efektywnej czerwony spągowiec został podzielony na mniejsze przedziały, dla których przyjmowano zróżnicowane parametry. Do wzoru (3) podstawiono następujące wartości: czas interwałowy szkieletu skalnego rzędu 140–250 $\mu\text{s}/\text{m}$ (w zależności od przeważającej litologii; najmniejsze wartości dla piaskowców, największe dla łupków) i czas interwałowy medium wypełniającego pory około 650 $\mu\text{s}/\text{m}$ dla całej miąższości czerwonego spągowca. Średnia wartość czasu interwałowego w warstwach o 100-procentowym zaileniu wynosiła 300 $\mu\text{s}/\text{m}$. Przy obliczaniu przepuszczalności absolutnej takie same parametry zostały przyjęte dla całej miąższości czerwonego spągowca. Przyjęto nasycenie wodą nieredukowalną równe 0,25.

Obliczone wartości porowatości efektywnej PHI_{lab} i przepuszczalności absolutnej PERM_{lab} dość dokładnie pokrywają się z wynikami badań laboratoryjnych, co świadczy o dobrze dobranych parametrach. W interwale czerwonego spągowca zanotowano przedziały, w przypadku których dane literaturowe nie były poprawne. Na głębokości około 3950 m oraz 4000 m na profilowaniu średnicy rzeczywistej otworu CALI widoczne są znaczne wymycia (kawerny), które powodują podwyższenie wartości czasu interwałowego, a zatem w tych miejscach wartości porowatości efektywnej i przepuszczalności absolutnej są mniej wiarygodne w porównaniu z pozostałymi interwałami.

Parametry zbiornikowe z rozróżnieniem na typ skały, głębokość zalegania oraz temperaturę zestawiono w tabeli 1. Wartości porowatości efektywnej obliczone na podstawie profilowań są zbliżone do wartości otrzymanych za pośrednictwem badań laboratoryjnych. W przypadku przepuszczalności absolutnej wartości są bardziej rozbieżne – wynika to prawdopodobnie ze zróżnicowanej litologii. Otrzymane wartości fizyczne dla skał są w dużej części zbliżone z właściwościami skał wykorzystywanych w już istniejących wspomaganych systemach geotermalnych, tj. Groß Schönebeck w Niemczech oraz Soultz-sous-Forêts we Francji. Skały w rejonie systemu Groß Schönebeck zalegają na głębokościach poniżej 4000 m i mają temperaturę rzędu 150°C. Wartości porowatości efektywnej mieszczą się w zakresie od 2% do 3%, za to przepuszczalność absolutna wynosi maksymalnie 3 mD dla piaskowców. We Francji skałami wykorzystywanymi w systemach CO_2 -EGS są granity leżące już poniżej 1500 m. Temperatura na głębokości 5000 m osiąga nawet 200°C. Wartości porowatości efektywnej i przepuszczalności absolutnej również są zbliżone do tych z bloku Gorzowa i z Niemiec.

Tabela 1. Zestawienie własności zbiornikowych dla skał czerwonego spągowca z otworu Ośno IG-2

Lokalizacja	Typ skały	Głębokość zalegania [m]	Temperatura [°C]	Porowatość efektywna [%]		Przepuszczalność absolutna [mD]	
				badania laboratoryjne	geofizyka otworowa	badania laboratoryjne	geofizyka otworowa
Blok Gorzowa	piaskowce	3209,5–3227,0	145–150 na głębokości 4200–4300 m	3,40–9,14	1,20–9,90	0,02–13,40	0,001–1,070
	złepieńce	3227,0–3275,0		6,60–9,60	3,04–11,20	0,07–0,20	0,001–2,100
	skały wylewne	>3275,0		2,20–12,40	0,20–13,20	0,05–0,09	0,001–5,700

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Duży udział paliw kopalnych w sektorze energetycznym oraz wysoka emisja dwutlenku węgla do atmosfery powoduje nieodwracalne skutki przejawiające się zmianą klimatu na naszej planecie. Do zapewnienia przyszłym pokoleniom miejsca do życia niezbędne jest podejmowanie kroków niwelujących lub w znacznej mierze zmniejszających emisję dwutlenku węgla. Sekwestracja niezaprzeczalnie jest jednym z głównych sposobów ograniczenia emisji tego bezwonnego, ale szkodliwego gazu do atmosfery. Perspektywnym kierunkiem wykorzystania CO₂ są wspomagane systemy geotermalne, takie jak planowany w rejonie bloku Gorzowa. Z przeprowadzonych analiz jednoznacznie wynika, że własności petrofizyczne dolnopermskich skał czerwonego spągowca są podobne do własności utworów w rejonach wspomaganych systemów geotermalnych w Niemczech i we Francji, zlokalizowanych także na obszarze basenu czerwonego spągowca. Utwory czerwonego spągowca we wszystkich wymienionych krajach znajdują się na podobnej głębokości i osiągają odpowiednio wysokie temperatury skał, dzięki czemu mogą stanowić zbiorniki petrogeotermalne. Można powiedzieć, że systemy CO₂-EGS w pewien sposób składują dwutlenek węgla. Dodatkowo zapewniają również energię elektryczną, co wiąże się z zamianą części energii produkowanej przez elektrownie ciepłone na energię produkowaną przez neutralne dla klimatu wspomagane systemy geotermalne. Blok Gorzowa i utwory czerwonego spągowca są perspektywną lokalizacją pod wspomagane systemy CO₂-EGS.

Podziękowania

Przede wszystkim pragnę podziękować dr hab. inż. Annie Sowizdzał, prof. AGH – inicjatorce i kierownicze programu EnerGizerS, który otrzymał dofinansowanie w ramach polsko-norweskich projektów badawczych POLNOR 2019 finansowanych przez Fundusze Norweskie za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – za możliwość zapoznania się z tematyką projektu i jego wykorzystania do stworzenia artykułu. Podziękowania składam również na ręce mojej opiekunki pracy – dr hab. inż. Paulinie Krakowskiej-Madejskiej, prof. AGH, za obecność, pomoc i wsparcie swoją wiedzą i umiejętnościami. Chciałabym podziękować również dyrekcji Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego za udostępnienie danych oraz próbek rdzeni wiertniczych z otworu Ośno IG-2. Panu dr. inż. Grzegorzowi Machowskiemu dziękuję za przeprowadzone badania w laboratorium porozymetrii wiertniczej w Katedrze Surowców Energetycznych WGGiOŚ AGH. Podziękowania kieruję również do recenzentów niniejszego artykułu za poświęcony czas, dokładne zapoznanie się z tekstem oraz cenne rady i wskazówki.

LITERATURA

- [1] Tarkowski R., *Geologiczna sekwestracja CO₂*, Wydawnictwo Instytutu IGSMiE Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2005.
- [2] Sowizdzał A., Machowski G., Krzyżak A., Puskarczyk E., Krakowska-Madejska P., Chmielowska A., *Petrophysical evaluation of the Lower Permian formation as a potential reservoir for CO₂-EGS – Case study from NW Poland*, Journal of Cleaner Production, vol. 379, part 2, 2022, 134768, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134768>.

- [3] Schlumberger Limited, *Log Interpretation Principles/Applications*, Schlumberger Educational Services, Houston 1989.
- [4] Ellis D.V., Singer J.M., *Well Logging for Earth Scientists*, Springer Dordrecht 2007, <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4602-5>.
- [5] Jarzyna J., Bała M., Zorski T., *Metody geofizyki otworowej: Pomiary i interpretacja*, wyd. 2, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 1999.
- [6] Schön J.H., *Physical Properties of Rocks: A Workbook*, Handbook of Petroleum Exploration and Production, vol. 8, Elsevier, Amsterdam 2011.
- [7] Drabina A., *Metody wyznaczenia porowatości ogólnej na podstawie profilowań geofizyki otworowej w utworach klastycznych i węglanowych*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 19, nr 2, 2017, s. 13–24.
- [8] Plewa M., Plewa S., *Petrofizyka*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1992.