

**Jacek Blicharski\*, Rafał Smulski\***

**STANOWISKO LABORATORYJNE  
WYPIERANIA SIĘ PŁYNÓW W OŚRODKACH POROWATYCH  
W ASPEKCIE SEKWESTRACJI CO<sub>2</sub>\*\***

**1. WSTĘP**

Proces składowania dwutlenku węgla w strukturach geologicznych wiąże się z jego filtracją w ośrodku porowatym w wyniku czego następuje wypieranie się płynów rodzimego i zatłaczanego. W przypadku deponowania dwutlenku węgla w szcerpanych złożach węglowodorów będzie miało miejsce wypieranie węglowodorów, względnie wody przez zatłaczany CO<sub>2</sub>.

Budowane w ramach Projektu Badawczego finansowanego przez MNiSW nr 4674/B/T02/2010/39 stanowisko laboratoryjne umożliwia badanie zjawisk fizycznych zachodzących w procesach wypierania płynów w ośrodkach porowatych w układzie gaz-gaz, jak również gaz-ciecz. Stanowisko to pozwoli na wykonywanie pomiarów przy różnych wydajnościach przepływu w szerokim zakresie ciśnień i temperatur, odwzorowujących rzeczywiste warunki panujące w złożu. Istotnym elementem prowadzonych badań jest możliwość śledzenia zmian składu, jak również rozwoju strefy mieszania wypierających się płynów. Badania te pozwolą na lepsze zrozumienie i analizowanie zjawisk fizycznych zachodzących w trakcie procesu zatłaczania dwutlenku węgla do złóż.

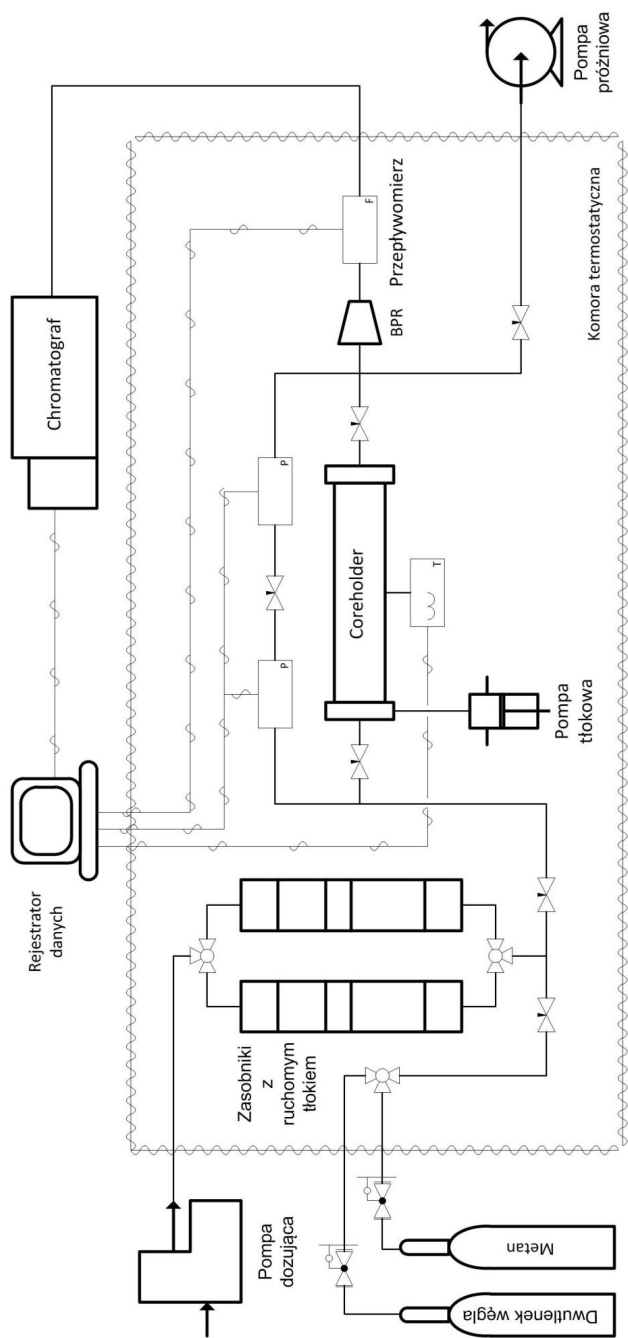
**2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO**

Głównymi elementami aparatury badawczej są: system zatłaczania płynów, komora ciśnieniowa do badania próbek rdzeni skalnych (*coreholder*), układ pomiaru przepływu i koncentracji gazów oraz układ rejestracji danych. Schemat stanowiska pokazano na rysunku 1.

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Inżynierii Gazowniczej, Kraków

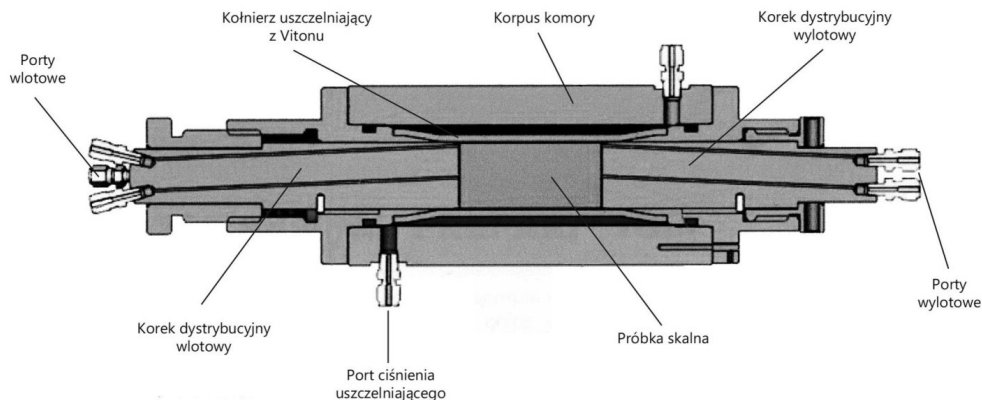
\*\* Artykuł przygotowany w ramach projektu badawczego finansowanego przez MNiSW nr 4674/B/T02/2010/39



**Rys. 1.** Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania wypierania płynów w ośrodkach porowatych

System zatłaczania składa się z dwóch zasobników z ruchomym tłokiem, butli z gazami i bezpulsacyjnej pompy dozującej typu LF 10 firmy Vinci Technologies, której zakres wydajności wynosi od 0,005 do 15 ml/min [4]. Zasadniczym elementem stanowiska pomiarowego jest komora ciśnieniowa z badanym ośrodkiem porowatym.

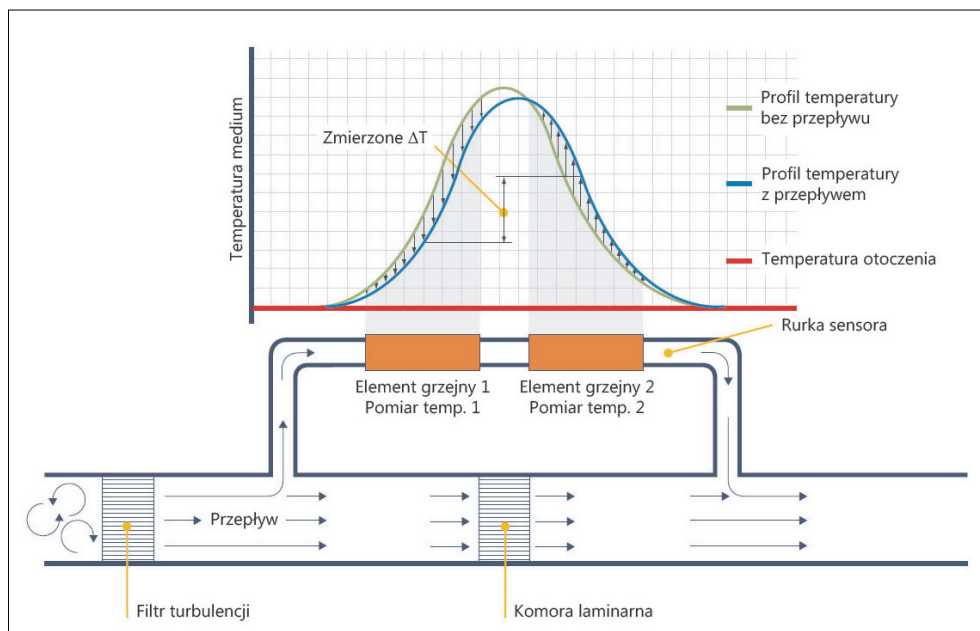
Stanowisko badawcze wyposażone w komorę ciśnieniową typu Hasler firmy Vinci Technologies umożliwiającą przeprowadzanie eksperymentów na próbkach rdzeni o średnicy 1", długości od 1 do 3", w temperaturze do 175 °C i przy ciśnieniu do 685 bar. Przekrój komory pokazano na rysunku 2 [3].



Rys. 2. Komora ciśnieniowa do badania przepływów w próbkach skalnych

Badana próbka ośrodka porowatego w kształcie rdzenia umieszczana jest w komorze w elastycznym kołnierzu. Celem zapewnienia szczelności próbka poddawana jest naprężeniom ściskającym wywołanym przez tzw. ciśnienie uszczelniające (*confining pressure*). Ciśnienie to jest wytwarzane poprzez zatłaczanie cieczy hydraulicznej pomiędzy uszczelniający kołnierz w którym znajduje się rdzeń a stalowy korpus obudowy komory ciśnieniowej. Na wlocie i wyjściu rdzeń uszczelniany jest mechanicznie korkami dystrybucyjnymi. Przetłaczane przez badaną próbkę skalną płyny doprowadzane są do komory ciśnieniowej poprzez króćce wlotowe i wylotowe. Czoła króćców stykające się z badaną próbką posiadają specjalne wyżłobienia pozwalające na równomierny rozpływ i odbiór płynu z próbki.

Układ pomiaru i koncentracji przepływającego płynu składa się z dwóch głównych elementów tj. przepływomierza masowego oraz chromatografu gazowego. Chromatograf gazowy jest urządzeniem typu 6890 Series firmy Hewlett-Packard z detektorem cieplno-przewodnościowym (*thermal conductivity detektor – TCD*), komorą nastrzykową typu split/splitless i kapilarną kolumną chromatograficzną Carboxen 1006 firmy Supelco. Przepływomierz masowy realizowany jest przez termiczny przepływomierz masowy typu EL-FLOW firmy Bronkhorst [5]. Zasadniczym podzespołem termicznego przepływomierza masowego EL-FLOW jest sensor, który składa się ze stalowej rurki kapilarnej oraz dwóch elementów termorezystancyjnych. Uproszczony schemat przepływomierza i zasadę jego działania ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Schemat przepływomierza EL-FLOW i zasada jego działania [5]

Część gazu przepływa przez sensor, który jest podłączony jako „bypass” głównego kanału przepływomierza, tam podgrzewany jest przez elementy grzejne. Pomiar termiczny polega na monitorowaniu efektu schładzania podgrzewanych elementów termorezystancyjnych przez opływające je medium. Różnica temperatur jest wprost proporcjonalna do masowego przepływu przez sensor. W kanale głównym przepływomierza umieszczono komorę laminarną, składającą się z pakietu stalowych dysków z precyzyjnie wytrawionymi kanałkami. Dzięki dokładnemu rozdzielaniu strumienia medium natężenie przepływu przez sensor jest proporcjonalne do całkowitego natężenia przepływu przez przepływomierz.

W celu określenia wartości masowego natężenia przepływu wykorzystuje się następującą zależność:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad \text{oraz} \quad \Delta T = k \cdot c_p \cdot q_m$$

gdzie:

$c_p$  – masowe natężenie przepływu,

$q_m$  – ciepło właściwe medium.

Celem utrzymania stałej temperatury w trakcie pomiaru badana próbka skalna zamontowana w komorze badawczej, zasobniki z gazem, jak również przepływomierz umieszczone są w komorze termostatycznej. Jest to komora typu FED-240 firmy BINDER o wymiarach wewnętrznych 800 × 600 × 500 mm, której zakres temperatury wynosi 300 °C.

Pomiary temperatury i ciśnień na wejściu i wyjściu z komory ciśnieniowej mierzone są za pomocą przetworników ciśnienia i temperatury typu ATM firmy STS Sensor Technik Sirnach.

Mierzone w trakcie eksperymentu parametry są wyświetlane i zapisywane w rejestratorze danych pomiarowych. Stanowisko wyposażono w rejestrator typu MultiCon CMC-99 firmy Simex. Jest to zaawansowane wielokanałowe urządzenie pozwalające mierzyć, prezentować i rejestrować parametry w wielu kanałach jednocześnie, wyposażone w 8 wejść prądowych (4...20 mA), 8 wejść napięciowych (0...10 V), 4 wejścia RTD (Pt100, Pt500, Pt1000), 3 szeregowo porty RS-485/RS-232 i Ethernet 10M RJ-45.

### **3. METODYKA BADAŃ PRZY WYPIERANIU SIĘ GAZÓW**

Przed rozpoczęciem eksperymentu z pomocą pompy próżniowej w badanej próbce rdzenia wytwarzane jest podciśnienie. Następnie próbka nasycona jest gazem wypieranym ( $\text{CH}_4$ ) podawanym z butli aż do uzyskania ustalonej wartości ciśnienia. Jednocześnie celem zapewnienia szczelności badanego rdzenia zwiększane jest ciśnienie uszczelnienia w korpusie komory. Po ustaleniu się temperatury w komorze ciśnieniowej rdzenia następuje zasadnicza faza eksperymentu tj. wypieranie metanu dwutlenkiem węgla. Po wtłoczeniu  $\text{CO}_2$  z butli do zasobnika ciśnienie gazu w zasobniku jest stopniowo podwyższane do zadanej wartości poprzez wtłaczanie wody poniżej ruchomego tłoka z użyciem pompy dozującej. W trakcie eksperymentu pompa zatłacza dwutlenek węgla z ustaloną wydajnością oraz utrzymuje stałe ciśnienie na wlocie do komory. Ciśnienie na wylocie z komory utrzymywane jest za pomocą regulatora ciśnienia (*back pressure regulator*). W początkowej fazie eksperymentu z rdzenia wypływa jedynie metan (płyn wypierany), koncentracja metanu jest równa 1, zaś dwutlenku węgla 0. Wypieranie się płynów powoduje stopniową zmianę nasyceń badanej próbki wypierającymi się gazami. Po pewnym czasie tzw. „czasie przebiccia” z rdzenia zaczyna wypływać dwutlenek węgla (płyn wypierający), którego koncentracja stopniowo wzrasta, aż osiągnie wartość maksymalną równą 1, po czym eksperyment jest przerywany [8]. Zmiany koncentracji  $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$  jak również wydajność przepływu gazów mierzone są na wyjściu z komory ciśnieniowej za pomocą chromatografu gazowego i przepływomierza masowego.

### **4. KALIBRACJA STANOWISKA – POMIARY PRZEPUSZCZALNOŚCI OŚRODKA POROWATEGO**

Omawiane stanowisko badawcze pozwala na przeprowadzenie szerokiego spektrum badań przepływów płynów w ośrodkach porowatych, w tym wykonanie badań podstawowych takich jak pomiary współczynnika przepuszczalności.

Przepuszczalność jest własnością ośrodka porowatego, będąca miarą jego zdolności do transportu przez siebie płynu przy istniejącym gradiencie ciśnienia. Pomiaru współczynnika przepuszczalności dokonuje się przy w trakcie ustalonego, laminarnego przepływu

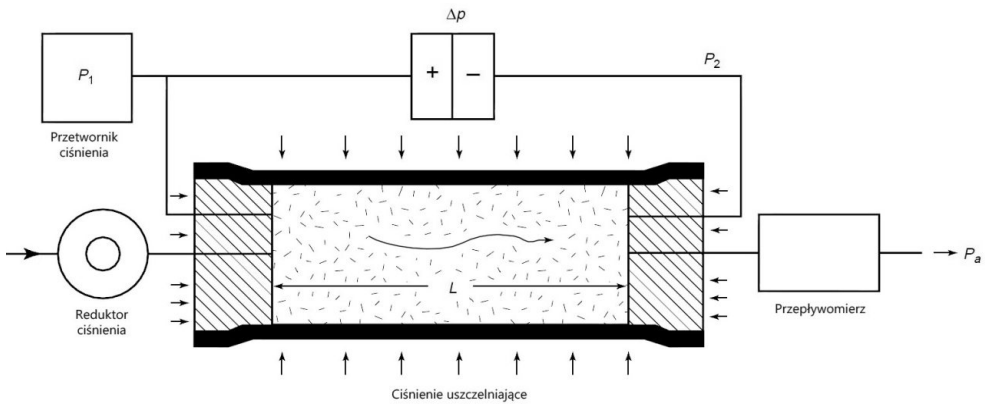
gazu przez badaną próbkę. Warunki przepływu ustalonego uzyskiwane są, gdy ciśnienie na wejściu i wyjściu z rdzenia oraz wydajność przepływu nie zmieniają się w czasie. Przy odpowiednio niskim gradiencie ciśnienia przepływ gazu ma charakter laminarny (liczba Reynoldsa  $Re < 1$ ) i jest opisywany prawem Darcy [6], wówczas przepuszczalność wyznaczana jest wg zależności:

$$k_g = \frac{2 \cdot \mu_{sr} \cdot q_n \cdot P_n \cdot z_{sr} \cdot T \cdot L}{A \cdot T_n \cdot (P_1^2 - P_2^2)}$$

gdzie:

- $q_n$  – wydajność przepływu gazu w warunkach normalnych,
- $P_1, P_2$  – ciśnienia na wejściu i wyjściu układu przepływowego,
- $T$  – temperatura w komorze rdzenia,
- $A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego rdzenia,
- $L$  – długość rdzenia,
- $z_{sr}, m_{sr}$  – współczynniki pseudościśliwości i lepkość gazu wyznaczone przy średnim ciśnieniu w układzie przepływowym definiowanym jako:  $P_{sr} = (P_1 + P_2)/2$ .

W czasie pomiaru gaz z butli przepływa przez wyciętą w kształcie walca próbkę skalną, której pobocznica jest uszczelniona. Mierzonymi parametrami są wydajność przepływu gazu przez rdzeń, temperatura oraz ciśnienia na wejściu i wyjściu komory ciśnieniowej. Uproszczony schemat pomiaru przepuszczalności pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat pomiaru przepuszczalności gazowej ośrodka porowatego

Przy niskich ciśnieniach przepływu gazu obserwowane jest zjawisko prześlizgiwania się molekuł gazu o wielkościach porównywalnych z wielkością porów, co powoduje, że przepuszczalność dla gazu zależy od ciśnienia – jest to tzw. efekt Klinkenberga. Wówczas przepuszczalność dla gazu opisywana jest zależnością:

$$k_g = k_\infty \cdot \left( 1 + \frac{b}{P} \right)$$

gdzie:

$k_g$  – przepuszczalność dla gazu,

$k_\infty$  – przepuszczalność przy nieskończonej wysokości ciśnienia (przepuszczalność Klinkenberga),

$b$  – stała zależna od rodzaju gazu i ośrodka, w którym następuje przepływ.

Celem uwzględnienia efektu Klinkenberga dla każdej próbki wykonuje się minimum trzy pomiary przy różnych ciśnieniach. Proporcjonalność uzyskanych wyników świadczy o laminarności przepływu. Wyznaczone wartości współczynnika przepuszczalności gazu  $k_g$  nanoszone są na wykres  $k_g$  vs  $1/P_{sr}$ . Zgodnie z równaniem Klinkenberga przecięcie z osią rzędną wyznacza parametr  $k_\infty$ , zaś nachylenie prostej określa iloczyn  $b \cdot k_\infty$  [1].

## 5. WYNIKI POMIARÓW WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPUSZCZALNOŚCI

Pomiary przepuszczalności ośrodka porowatego wg przedstawionej wcześniej procedury przeprowadzono na wzorcowym rdzeniu o następujących parametrach: średnica 25,4 mm, długość 25,4 mm, porowatość 4,9%. Przepuszczalność gazowa próbki wyznaczona z użyciem Helu wynosi 1.66 mD, natomiast przepuszczalność Klinkenberga 1,45 mD, oraz parametr  $b$  równania Klinkenberga 37,2 kPa.

Celem uchwycenia efektu Klinkenberga pomiary wykonano przy kilku różnych ciśnieniach na tym samym rdzeniu wzorcowym z użyciem argonu i dwutlenku węgla. Uzyskane wyniki pomiarów w postaci wydajności przepływu, ciśnień przed i za badaną próbką i temperatury pomiaru zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1**

Wyniki pomiarów przepuszczalności

Lp.	Gaz	Temperatura pomiaru [°C]	Ciśnienie przed próbką [bar]	Ciśnienie za próbką [bar]	Wydajność przepływu [cm <sup>3</sup> /min]	Współczynnik przepuszczalności [mD]
1	CO <sub>2</sub>	40	4,11	1,00	146,7	<b>2,89</b>
2	CO <sub>2</sub>	40	10,06	7,43	359,8	<b>2,40</b>
3	CO <sub>2</sub>	40	12,50	12,05	77,8	<b>2,14</b>
4	Ar	22	22,22	20,22	498,3	<b>2,44</b>
5	Ar	22	31,50	30,33	417,1	<b>2,41</b>
6	Ar	22	39,01	38,30	311,3	<b>2,35</b>
7	Ar	22	47,16	46,66	245,8	<b>2,24</b>

Wyznaczone metodami regresji liniowej parametry równania Klinkenberga w postaci przepuszczalności Klinkenberga i parametru  $b$  wynoszą odpowiednio dla pomiarów

z użyciem dwutlenku węgla  $k_{\infty} = 2,14$  mD,  $b = 322$  kPa oraz dla pomiarów z użyciem argonu  $k_{\infty} = 2,05$  mD,  $b = 105.5$  kPa.

Jak widać uzyskane wyniki są zbieżne, jednakże nieznacznie różnią się od wartości pomiarów wzorcowych. Różnice te wynikają z innych własności gazów oraz warunków odniesienia, które w przypadku pomiarów wzorcowych wynosiły odpowiednio 22 °C i 15 psi, natomiast wyniki przeprowadzonych badań odniesiono do warunków normalnych.

## 6. WNIOSKI

Budowane stanowisko laboratoryjne pozwala na prowadzenie badań przy przepływach płynów w ośrodkach porowatych w warunkach odpowiadających rzeczywistym warunkom występującym w złożu.

W ramach prac przygotowawczych do właściwych badań wypierania płynów w ośrodkach porowatych przeprowadzono wstępne badania mające na celu określenie przepuszczalności próbek skalnych. Przeprowadzone eksperymenty ponadto miały za zadanie sprawdzenie szczelności aparatury, jak również kalibrację stanowiska celem uzyskania powtarzalności pomiarów. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić na pełną przydatność stanowiska do prowadzenia badań wypierania się płynów w ośrodkach porowatych.

## LITERATURA

- [1] American Petroleum Institute: *Recommended Practices for Core Analysis*. 2 ed., 1998.
- [2] Rybicki C., Blicharski J., Wójcikowski M.: *Stanowisko laboratoryjne do badania przepływów wielofazowych w ośrodkach porowatych*. Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 22/2, 2005.
- [3] Vinci Technologies: *Hassler Core Holder – Operating Manual*. Nanterre, France, 2011.
- [4] Vinci Technologies: *Low Flow Pumps Series – Precision Pumps – Operating Manual*. Nanterre, France, 2010.
- [5] Bronkhorst High-Tech BV: *General instructions digital Mass Flow/Pressure instruments laboratory style/EL-FLOW – Instruction Manual*. Nijverheidsstraat, Netherlands, 2010.
- [6] Hagoort J.: *Fundamentals of gas reservoir engineering*. Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo 1988.
- [7] Greenkorn R.A.: *Flow Phenomena in Porous Media*. Marcel Dekker Inc., New York 1983.
- [8] Newberg M.A., Foh S.E.: *Measurement of Longitudinal Dispersion Coefficient for Gas Flowing Through Porous Media*. SPE 17731, 1988.