

Grzegorz WAŁOWSKI, Gabriel FILIPCZAK

e-mail: g.walowski@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Ocena przepuszczalności materiału porowatego w warunkach barbotażu

### Wstęp

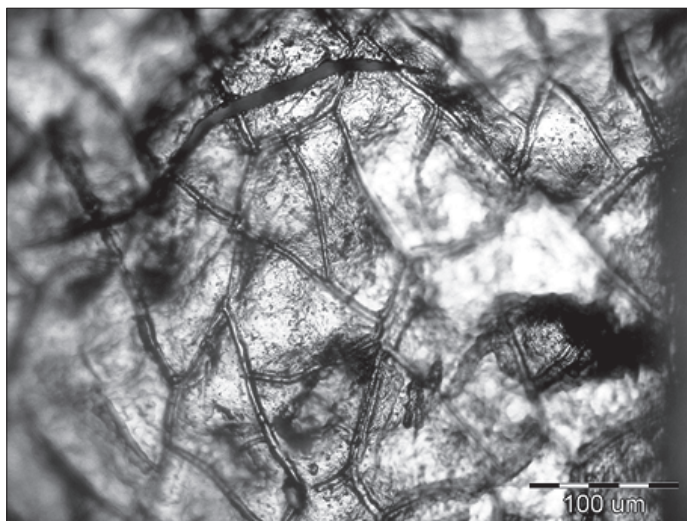
Przesłanką do badań własnych jest zagadnienie związane z procesowaniem węgla *in situ* w technologii zgazowania, w szczególności jego podziemnego procesowania UCG (*Underground Coal Gasification*). W takich warunkach ma się do czynienia z procesami redukcji (*spalanie, zgazowanie, wytworzenie popiołu*), w obszarze których formuje się złożo porowate. Jest to następstwem tworzenia się tzw. karbonizatu po częściowym lub całkowitym zgazowaniu złoża węgla [Stańczyk i Kapusta, 2007].

Jednym z istotniejszych problemów związanych z takim procesowaniem jest ocena porowatości złoża oraz jego przepuszczalności. Rozpoznanie warunków przepływu przez tego typu materiały porowate niesie za sobą istotne problemy hydrodynamiczne wraz z oceną mechanizmu przepływu gazu w strukturach karbonizatu. Związane jest to w zasadniczy sposób z anizotropową strukturą materiału, nieczęsto spotykaną w innych przypadkach procesowych [Wałowski i Filipczak, 2012].

W niniejszej pracy podjęto próbę oceny niektórych zagadnień wynikających z hydrodynamiki przepływu gazu przez takie złożo, a oceny tej dokonywano w warunkach barbotażu gazu przez różne typy karbonizatu.

### Badania doświadczalne

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, którego zasadniczym elementem było naczynie służące do oceny zjawiska aeracji poprzez porowaty materiał karbonizatu. Stanowisko wyposażono w rotametr do pomiaru strumienia gazu oraz manometr do pomiaru ciśnienia. Ciśnienie odniesienia związane z procesem aeracji ustalano reduktorem w zakresie (0,1=0,4) MPa. W szczególnym ujęciu na obecnym etapie badań rozpoznawano przepuszczalność karbonizatu pozyskanego z georeaktora doświadczalnego z Kopalni Doświadczalnej Barbara w Mikołowie [Stańczyk i in., 2010]. Mikrostrukturę ogólną takiego karbonizatu przedstawiono na rys. 1. Widoczna jest anizotropowa struktura karbonizatu, objawiająca się nieregularnym układem kanalików i szczelin, stanowiących przestrzeń dla przepływu gazu.

Rys. 1. Mikrostruktura karbonizatu *in situ*

Zakres badań obejmował wyznaczenie gęstości pozornej, ocenę porowatości ogólnej karbonizatu, oszacowanie przepuszczalności, a na tej podstawie wyznaczenie współczynnika oporu przepływu.

### Wyniki badań i analiz

Badano trzy różne próbki karbonizatu (Tab. 1). W każdym przypadku dokonywano obserwacji barbotażu. Technika barbotażu stosowano celem oceny obszaru aeracji dla danego materiału porowatego. W ujęciu ilościowym oceniano takie parametry jak: gęstość pozorną karbonizatu  $\rho_{poz}$ , porowatość  $\varepsilon$ , przepuszczalność jako miarę spadku ciśnienia  $\Delta P$ , zastępczy współczynnik oporów przepływu  $\xi_e$ . Niezależnie od pomiaru strumienia aeracji, przepuszczalność oraz zastępczy współczynnik oporów przepływu wyznaczano w oparciu o spadek ciśnienia odpowiadający danemu przepuszczalności złoża materiału porowatego.

Gęstość pozorną karbonizatu wyznaczano na podstawie pomiaru objętości całkowitej próbki  $\vartheta$  oraz jej masy  $m$ , a mianowicie

$$\rho_{poz} = \frac{m}{\vartheta} \quad (1)$$

Porowatość bezwzględna karbonizatu  $\varepsilon_b$  oznacza z kolei iloraz objętości swobodnej  $\vartheta_p$  do całkowitej objętości  $\vartheta$  próbki [Aksielrud i Altszuler, 1987]. Przy odpowiednich przekształceniach definicji, porowatość ta może być przedstawiona w postaci

$$\varepsilon_b = \frac{\vartheta_p}{\vartheta} = 1 - \frac{\vartheta_{st}}{\vartheta} = 1 - \frac{\left(\frac{m_{st}}{\rho_{st}}\right)}{\left(\frac{m}{\rho_{poz}}\right)} = 1 - \frac{\rho_{poz}}{\rho_{st}} \quad (2)$$

gdzie:

$m_{st}$  – masa ciała stałego [kg]

$\rho_{st}$  – gęstość ciała stałego (węgiel) [kg]

$\rho_{poz}$  – gęstość pozorną (karbonizat) [kg].

Oprócz porowatości bezwzględnej, dla wszystkich próbek karbonizatu oceniano też tzw. porowatość efektywną  $\varepsilon_e$ , która w swym definiowanym zakresie

$$\varepsilon_{e(\min)} = 0,2\varepsilon_b \quad \varepsilon_{e(\max)} = 0,5\varepsilon_b \quad (3)$$

jest miarą objętości porów łączących się ze sobą względem objętości całkowitej [Łuszcz, 2007]. Dodatkowo uzupełnieniem tej cechy jest wskaźnik porowatości  $n$ , który charakteryzuje stopień zagęszczenia porowatego ośrodka. Z definicji [Cala, 2012]:

$$n = \frac{\varepsilon_b}{1 - \varepsilon_b} \quad (4)$$

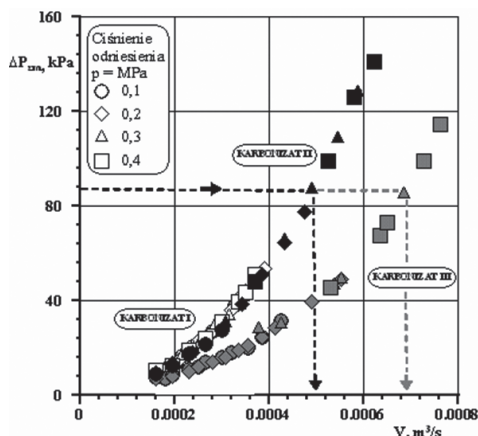
Parametry badanych próbek karbonizatów charakteryzujące ich rodzaj i klasę przedstawiono w tab. 1. Karbonizaty cechowały się średnią porowatością rzędu od 34 do 45%.

Tab. 1. Charakterystyka karbonizatu *in situ*

Próbka	Gęstość pozorna	Porowatość bezwzględna	Porowatość efektywna		Wskaźnik porowatości
	$\rho_{poz}$	$\varepsilon_b$	$\varepsilon_{e(\min)}$	$\varepsilon_{e(\max)}$	$n$
	kg/m <sup>3</sup>	%	%	%	-
I	1300	42,2	8,4	21,1	0,73
II	1239	44,9	9,0	22,5	0,82
III	1487	33,9	6,8	17,0	0,51
Średnia	1342	40,3	8,1	20,2	0,69

Wyniki pomiarów charakteryzujące przepuszczalność badanych próbek karbonizatu przedstawiono na rys. 2. Odniesiony do całkowitego spadku ciśnienia  $\Delta P_{zm}$  zmierzony strumień  $V$  przepływającego przez karbonizatu gazu jest tym większy im wyższe jest ciśnienie aeracji, tj. ciśnienie odniesienia.

Z drugiej strony przepuszczalność karbonizatu przy danej wartości ciśnienia odniesienia wykazuje niekiedy odmienne wartości. Widać to



Rys. 2. Przepuszczalność karbonizatu: (pole białe – karbonizat I, czarne – karbonizat II, szare – karbonizat III)

np. przy porównaniu próbek I/II i próbki III (zaznaczono to na rys. 2 linią odniesienia przy wartości ciśnienia ok. 90 kPa). Można to tłumaczyć faktem, że struktura wewnętrzna próbki III różni się znacznie od pozostałych (Tab. 1), a świadczy o tym także niższy wskaźnik porowatości dla karbonizatu III.

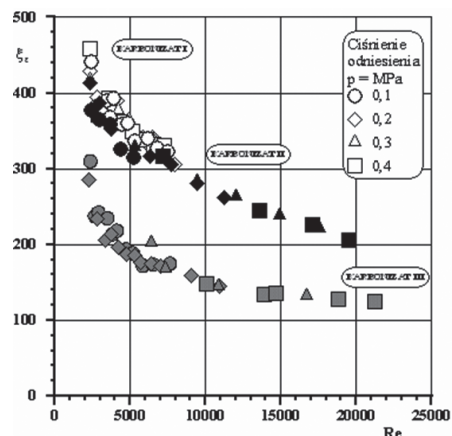
Podjęto próbę wyznaczenia zastępczego współczynnika oporów przepływu  $\xi_e$  na podstawie uzyskanych wyników pomiarów. Z definicji zastępczy współczynnik oporów przepływu odniesiono do średniej przepuszczalności, odniesionej do spadku ciśnienia  $\Delta P_{zm}$  oraz prędkości przepływu  $w$  w kanale zasilającym ( $d = 6$  mm):

$$\xi_e = \frac{2\Delta P_{zm}}{w^2 \rho_{sr}} \quad (5)$$

gdzie:

$\rho_{sr}$  – gęstość gazu dla ciśnienia odniesienia [ $\text{kg/m}^3$ ].

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4. Wskazują one, że trend zmian wartości tego współczynnika jest zgodny z przewidywaniami, tzn. jego wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby *Reynoldsa*  $Re$ . Z kolei wysokie obliczeniowe wartości współczynnika  $\xi_e$  wynikają z faktu, że obliczenia odniesiono do przekroju wlotowego kanału zasilającego materiał porowaty (Rys. 3a).



Rys. 4. Zastępczy współczynnik oporów przepływu (pole białe – karbonizat I, czarne – karbonizat II, szare – karbonizat III)

jednak tak oszacowany współczynnik oporu może stanowić podstawę oceny obliczeń oporów przepływu gazu przez materiały porowate.

### Wnioski

Sprawdzając dane literaturowe stwierdzono brak informacji w zakresie oceny cech jakościowo-ilościowych materiałów porowatych o niejednorodnej strukturze wewnętrznej.

W przedstawionej pracy dokonano oceny tych cech w odniesieniu do karbonizatu pochodzącego z georeaktora podziemnego zgazowania węgla.

Przeprowadzono badania hydrodynamiki, które dotyczyły warunków barbotażu gazu przez złożę karbonizatu. Pozwoliło to na dokonanie oceny takich parametrów hydrodynamicznych jak przepuszczalność materiału porowatego oraz wynikający stąd współczynnik oporów przepływu.

Wyniki badań wskazują, że w warunkach barbotażu możliwa jest dość dokładna ocena tych parametrów, co daje możliwość kompleksowej oceny cech i właściwości różnego rodzaju materiałów porowatych w aspekcie procesowym.

Kierując się dotychczasowymi wynikami badań i analiz, dalsze zamierzenia badawcze koncentrować się będą na modelowaniu hydrodynamiki przepływu gazu przez złożę porowate przy różnej konfiguracji rozprywu czynnika.

### LITERATURA

Aksielrud G.A., Altszuler M.A., 1987. *Ruch masy w ciałach porowatych*. WNT, Warszawa

Bębenek B., Bębenek H., 1987. *Straty energii w przepływach płynów*. Wyd. Pol. Krakowskiej, Kraków

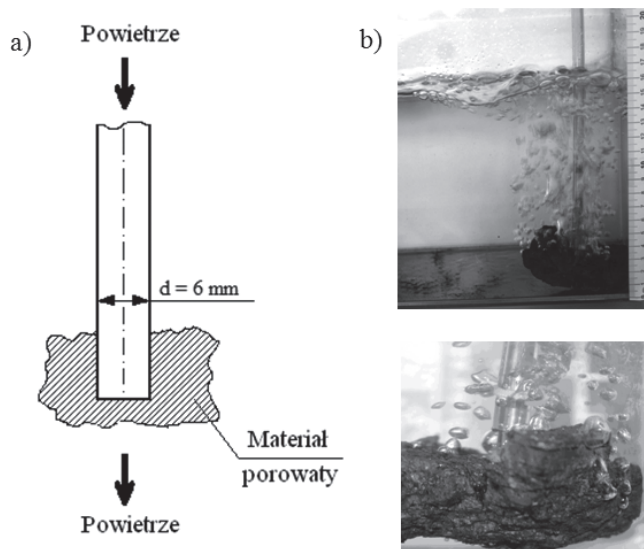
Cała M., 2012. *Mechanika gruntów*. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, AGH, Kraków (05.2012): [http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/1wyklad\\_ZG.pdf](http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/1wyklad_ZG.pdf)

Luszcz M., 2007. *Rozpoznawanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego*. 311[14].Z1.01. Inst. Technologii Eksploatacji – PIB, Radom (08.2011): [http://naftowka.pl/zsp4/media/pomoc/miner/zloza\\_ropy\\_i\\_gazu.pdf](http://naftowka.pl/zsp4/media/pomoc/miner/zloza_ropy_i_gazu.pdf)

Stańczyk K., Dubiński J., Cybulski K., Wiatowski M., Świądowski J., Kapusta K., Rogut J., Smoliński A., Krause E., Grabowski J., 2010. Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara. *Polityka Energetyczna*, 13, nr 2, 423-433

Stańczyk K., Kapusta K., 2007. Podziemne zgazowanie węgla. *Karbo*, nr 2, 98-102

Wałowski G., Filipczak G. 2012. *Techniczno-technologiczne aspekty procesowania węgla „in situ”*. XXI Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków, 20-24 Luty 2012, 389-396



Rys. 3. Schemat zasilania (a) oraz widok aeracji (b)

W celu właściwej oceny tego współczynnika, jak wynika z danych literaturowych [Bębenek i Bębenek, 1987], należałoby posłużyć się w badanym przypadku prędkością odniesioną do przekroju wlotowego mikrokanalów materiału porowatego (Rys. 1), czyli do większej prędkości przepływu po stronie oporu miejscowego. Niestety, aktualne wyniki badań nie pozwalają na ocenę tego typu współzależności. Niemniej



Praca powstała dzięki współfinansowaniu ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.