

Grzegorz WAŁOWSKI¹, Gabriel FILIPCZAK²

e-mail: g.filipczak@po.opole.pl

¹ Zakład Odnawialnych Źródeł Energii, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Oddział w Poznaniu, Poznań² Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Gazoprzepuszczalność materiałów porowatych o anizotropowej strukturze

Wstęp

Przepływ gazu przez ośrodki o porowatej strukturze ma miejsce w wielu obszarach procesowych. Najczęściej związany jest ze zjawiskiem filtracji albo przepływem gazu przez warstwy wypełnienia, jako ośrodka porowatego o luźnym ułożeniu. Z przepływem tym spotykamy się również w procesach technologicznych związanych z termicznym procesowaniem węgla, a także podczas ruchu naturalnych gazów (np. metanu) przez górotwory, czy też przepływu reakcyjnych gazów przez różnej postaci karbonizaty [Younger, 2011; Stańczyk, 2012; Woźnicka i in., 2013; Błaszczak, 2014]. W niektórych procesach działanie aparatów oraz zachodzący w nich przepływ gazu uzależnione są od dystrybutorów fazy gazowej, które także bardzo często wykonane są z materiałów porowatych [Zawora, 2001].

W każdym przypadku rozpoznanie warunków przepływu gazu przez porowate złoża niesie za sobą istotne problemy związane z opisem hydrodynamiki i oceną mechanizmów ruchu gazu przez ośrodki porowate, zwłaszcza przy ich zróżnicowanej strukturze wewnętrznej. Z drugiej strony znajomość tych mechanizmów pozwala na dokonanie oceny zjawisk hydrodynamicznych, jakie towarzyszą przepływowi gazu przez materiały i złoża porowate.

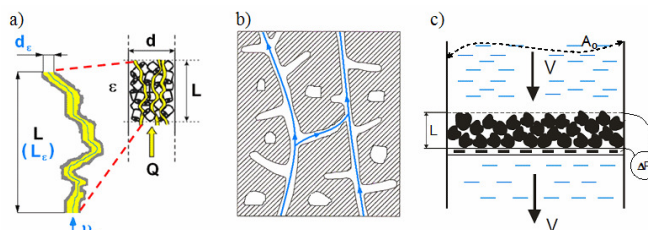
Pomimo powszechnej obecności procesowej przepływu gazu przez materiały porowate, w literaturze przedmiotu nadal brakuje jednoznacznej interpretacji oraz wyraźnego wskazania na charakter zjawisk hydrodynamicznych towarzyszących temu przepływowi. Główną tego przyczyną upatrywać należy w bardzo złożonej i różnorodnej strukturze materiałów porowatych, co ze względu na zmienne warunki przepływu pociąga za sobą trudności w opisie tych zjawisk, ale często także ze względu na zmieniającą się skalę procesu – od porowatego ziarna do porowatego złoża. I choć w literaturze przedmiotu nie brakuje modeli uwzględniających w swym opisie cechy strukturalne porowatych materiałów, zwłaszcza w aspekcie teorii homogenizacji [Auriault i in., 1990; 1993; Łydzba, 1991; 2002; Coussy, 2007], to zagadnienie wpływu anizotropowej struktury na przepuszczalność porowatych materiałów wciąż nie jest wystarczająco rozpoznane. Sytuacja jeszcze bardziej się komplikuje w odniesieniu do oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate o stałej (szkieletowej) budowie. W obszarze tym trudno napotkać informacje odnoszące się do hydrodynamiki przepływu gazu, a jeżeli już to są one bardzo nieliczne.

Niniejsza praca wychodzi naprzeciw niektórym z tych problemów. Przedstawiono wyniki badań w zakresie oceny gazoprzepuszczalności różnego rodzaju stałych materiałów porowatych oraz dokonano oceny warunków procesowych związanych z hydrodynamiką przepływu gazu przez materiały o anizotropowej strukturze wewnętrznej. Wskazano także na możliwości numerycznego modelowania struktury przepływowej materiałów porowatych o szkieletowej budowie.

Charakterystyka warunków procesowych

Każdy ośrodek porowaty cechuje się określoną porowatością, a jego struktura przepływowa uzależniona jest nie tylko od tej porowatości, ale także od rozmiaru (średnicy) kanalików oraz ich kształtu. Drugą specyficzną cechą ciał porowatych jest ich zdolność do magazynowania i transportowania płynów wskutek działania sił zewnętrznych i wewnętrznych. Aksielrud i in. [1987] wskazują, że

przepływ gazu przez ośrodki porowate o wymiarach kanalików (porów) rzędu milimetrów i mniej, jest zdominowany przez zjawiska procesowe wynikające z hydrodynamiki przepływu płynu lepkiego, podczas gdy w przepływach przez struktury o bardzo małych wymiarach porów, rzędu dziesiątych części milimetra, zjawiska te są ograniczane przez fizykochemiczne i dyfuzyjne oddziaływania mechaniczne zachodzące na granicy faz. Fakt ten znajduje potwierdzenie także w pracach innych autorów [Dulnev i Novikov, 1991; Mozhaev, 2002], przy czym rozbieżność między tymi zjawiskami zanika, gdy utrzymywana jest duża intensywność ruchu gazu. Niemniej, w każdym przypadku mechanizm przepływu gazu jest ściśle powiązany ze strukturą geometryczną ośrodka porowatego i zależy od konfiguracji i rozmiaru kanalików, a także ich kształtu oraz krętości. Wyróżnić przy tym możemy dwa zasadnicze przypadki przepływu płynu w złożach porowatych – rys. 1. Pierwszy, gdy przepływ ten odnosi się do złoża porowatego o strukturze ziarnistej, oraz drugi – gdy materiał porowaty stanowi sztywną szkieletową strukturę z porami i kanalikami.



Rys. 1. Schemat przepływu płynu przez złożo porowate: a) ziarniste (kręty kanalik), za [Lambe i Witman., 1978]; b) o sztywnej budowie szkieletowej z otwartymi kanałami przepływowymi oraz porami ślepyimi i zamkniętymi dla przepływu – wg [Strzelecki i in., 2008]; c) model Darcy'ego wg [Piecuch, 2009]

W pierwszym przypadku (Rys.1a) ma się do czynienia z przepływem w przestrzeni pomiędzy ziarnami i można przyjąć, że wynikająca z porowatości złoża (ϵ) przestrzeń jest w całości aktywna dla przepływu. Natomiast w przypadku drugim (Rys. 1b), przepływ zachodzi jedynie w obszarze porów i kanalików otwartych i wzajemnie ze sobą połączonych, o powierzchni swobodnej znacznie mniejszej niż to wynika z bezwzględnej porowatości materiału.

Dodatkowa złożoność hydrodynamiki wynika z faktu, że struktury szkieletowe stanowią złoża zwarte (sztywne), w żaden sposób niemogące być rozluźnione podczas wzrostu ciśnienia w układzie. W konsekwencji, warunki przepływu przez takie struktury będą różniły się względem siebie, a odstępstwo to będzie tym większe, im większa będzie krętość kanalików, oraz im większy będzie udział zamkniętych dla przepływu kanałów i ślepych porów. Za miarę tego odstępstwa przyjmuje się niekiedy współczynnik oporów przepływu o pewnej zastępczej wartości, odniesionej do porowatości złoża (ϵ), średnicy zastępczej kanalików (d_c) oraz rzeczywistej drogi przepływu (L_c), jaka wynika z krętości kanalików [Lambe i Whitman, 1978].

Podstawą szczegółowej analizy ruchu płynów w ośrodkach porowatych pozostaje prawo Darcy'ego. W swej pierwotnej postaci prawo to opisuje warunki przepuszczalności różnego rodzaju gruntów w analogii do mechanizmu filtracji podczas laminarnego ruchu

wody przez warstwę piasku, stanowiącą złożę ziarniste (Rys. 1c). Jeżeli uwzględnić zróżnicowanie właściwości cieczy, to jej prędkość przepływu przez porowaty ośrodek uzależniona będzie proporcjonalnie do zmiany gęstości (ρ), a odwrotnie proporcjonalnie do zmiany lepkości (η) [Strzelecki i in., 2008]. Wówczas równanie Darcy'ego opisujące przepuszczalność (Q) porowatego złoża przyjmuje postać

$$Q = K A_o \frac{\rho g \Delta h}{\eta L}, \quad (1)$$

gdzie:

Δh – spadek ciśnienia, [m sł. cieczy]

L – wysokość złoża, [m]

A_o – przekrój poprzeczny złoża, [m²].

Postać tego równania jest charakterystyczna dla współczesnego opisu tego zagadnienia, jednakowoż z założenia modelu Darcy'ego odniesionego jedynie do przepływu laminarnego.

Występujący w równ. (1) współczynnik K opisuje tzw. przepuszczalność porowatego ośrodka, a jego wartość – jak to wynika z modelu Darcy'ego – jest charakterystyczna dla danego złoża porowatego. Ponieważ współczynnik ten (z definicji) ma wymiar powierzchni, z hydrodynamicznego punktu widzenia traktowany jest często jako pewna cecha geometryczna, charakteryzująca przepuszczalność porowatego materiału. Z kolei wartość tak rozumianej przepuszczalności zależy nie tylko od filtracyjnych cech ośrodka porowatego (struktury, wymiarów cząstek, stopnia ich zagęszczenia, porowatości itp.), ale także od fizycznych właściwości płynu [Waluś, 1973]. Z założenia, współczynnik ten nie zależy natomiast od kształtu i wielkości samego złoża.

Model Darcy'ego ma oczywiście zastosowanie także do opisu przepływów ciśnieniowych. Wówczas równ. (1) ma postać

$$Q = K A_o \frac{\Delta P}{\eta L} \quad (2)$$

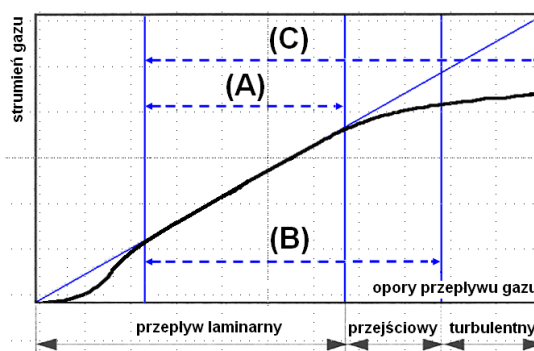
Stąd

$$K = \eta \frac{Q}{A_o \Delta P} \quad (3)$$

Ostatnie równanie pokazuje, że przy znanym strumieniu przepływu (Q) przepuszczalność złoża porowatego może być wyznaczona na drodze eksperymentalnej, o ile znane są właściwości płynu (η) oraz geometryczne parametry układu przepływowego (A_o). Parametrem mierzonym jest wówczas spadek ciśnienia na złożu.

W ujęciu fenomenologicznym ocena przepuszczalności ośrodka porowatego może być podporządkowana różnym kryteriom hydrodynamicznym, co zależy od struktury ośrodka, rodzaju płynu (jedno- i wielofazowy) oraz sposobu wymuszania przepływu (gravitacyjny, ciśnieniowy). Liczne w tym względzie publikacje [Strzelecki, 2008; Piecuch, 2009; Orzechowski, 2009; Błaszczuk, 2014], opisujące ten proces zarówno od strony badawczej jak i analitycznej, odnoszą się *de facto* do zjawiska filtracji i są na ogół utożsamiane z zagadnieniem laminarnego przepływu cieczy przez złożę ziarniste, zgodnie z prawem Darcy'ego [Bębenek i in., 1997]. Nie wyczerpuje to oczywiście wielu innych przypadków ruchu płynów przez ośrodki porowate. Dla warunków przejściowego i burzliwego ruchu cieczy wyróżnić można chociażby badania Forchheimera [Amao, 2007; Peszyńska 2010], Erguna [1952] i Brinkmana [Franchi, 1996; Tobiś, 1981]. Bardziej zaawansowany opis przepływu dla przestrzennego układu kapilar w postaci wiązki krętych kanalików znaleźć można u Kozeny'ego-Carmana [Kembłowski, 1985].

Charakterystyczne porównanie zakresu ważności modeli Darcy'ego, Forchheimera i Brinkmana przedstawiono na rys. 2, zaczerpniętym z pracy Hansena [2007]. Z przebiegu funkcji opisującej przepuszczalność gazu względem spadku ciśnienia na porowatym złożu wynika, że poza obszarem Darcy'ego (A), w którym obowiązuje liniowa zależność tej funkcji (przepływ laminarny), w pozostałych obszarach, odnoszących się do przepływu przejściowego i burzliwego (zakresy B i C), funkcja ta ma charakter nieliniowy.



Rys. 2. Charakterystyka warunków przepływowych przez złoża porowate: (A) - obszar Darcy'ego, (B) - obszar Forchheimera, (C) - obszar Brinkmana [Hansen, 2007]

Jeżeli na ruch płynu wywierają wpływ jedynie zjawiska dyfuzji, to w obszarze laminarnym opis przepuszczalności także jest nieliniowy. Wynika stąd, że im większa turbulencja przepływu, tym siły bezwładności mają bardziej znaczący wpływ na opory przepływu.

Przykładowe zestawienie kilku charakterystycznych modeli wykorzystywanych do obliczania współczynnika przepuszczalności materiałów ziarnistych przedstawiono w tab. 1. Ja widać, modele te są bardzo zróżnicowane, w wielu przypadkach obiegające od założeń modelu Darcy'ego, a często – jak np. modele Slichtera i Dulliena – nie uwzględniają właściwości płynu. Nie wszystkie też, chociażby jak ASTM i Szczelkaczewa, uwzględniają parametr porowatości, jako charakterystyczną cechę złoża ziarnistego. Brak jest przy tym odniesienia do ośrodków porowatych o strukturze szkieletowej, co ogranicza możliwości wykorzystania tych modeli do opisu hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate materiały o strukturze szkieletowej. Wykonane w tej mierze badania własne opisano poniżej.

Tab. 1. Modele opisujące współczynnik przepuszczalności [Waluś, 2015]

Autor	Model	Uwagi
ASTM (American Society for Testing and Materials)	$K_A = \frac{2\eta L Q_g P_{wyl}}{A_o (P_{wl}^2 - P_{wyl}^2)} = \frac{\eta L Q_g P_{wyl}}{A_o \Delta P_{zm}} \frac{2}{(P_{wl} + P_{wyl})}$	piaski, łupki ropo- i gazonośne
Brinkman	$K_B = \frac{w_o \eta}{\frac{\Delta P}{L} - (\rho \beta w_o^2) - \eta w_o}$	złożę owoców
Darcy	$K_{Da} = \frac{w_o \eta L}{\Delta P_{zm}}$	piasek (woda)
Dullien	$K_{Du} = \frac{d_e^2}{180} \left(\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \right)$	materiały ziarniste
Forchheimer	$K_F = \frac{w_o \eta}{\frac{\Delta P}{L} - (\rho \beta w_o^2) + C}$	materiały ziarniste i porowate
Slichter	$K_S = 7,8 \epsilon^{3,26} d_e^2$	złożę kuliste (gaz)
Szczelkaczew	$K_{Sz} = \frac{w_o \eta}{\hat{\rho}}$	złożę ziarniste - (ciecz)

Badania doświadczalne

Materiały. Badaniom na przepuszczalność podano wiele zróżnicowanych rodzajów materiałów, których średnia porowatość bezwzględna zawierała się w granicach 22-56%. Większość z nich stanowiły karbonizaty (koks) z termicznego procesowania węgla kamiennego, a ponadto takie materiały jak częściowo przetopione skały płonne (w tym wulkaniczne), pumeks naturalny i syntetyczny,

a także porowaty spiek poliamidowy o symetrycznej strukturze przestrzennej.

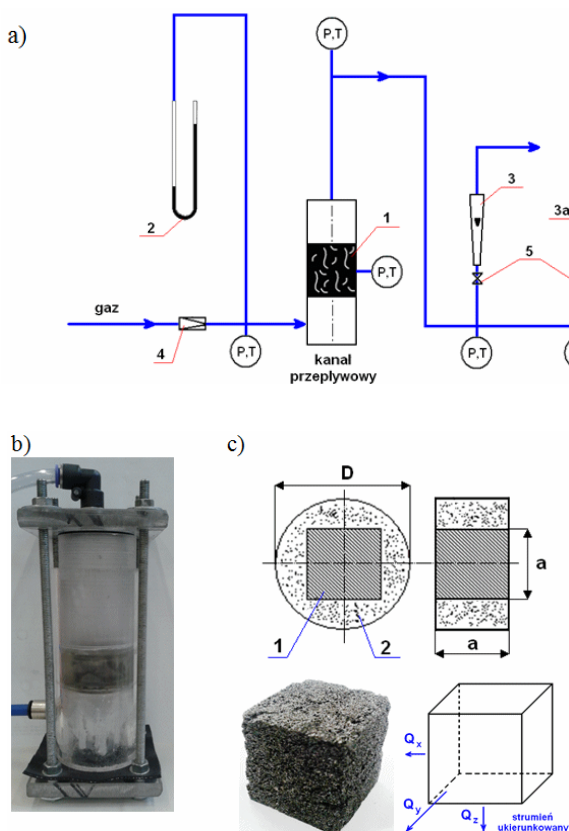
Stanowisko. Badania prowadzono na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku [Filipczak i in., 2015], którego ogólny schemat przedstawiono na rys. 3a. Zasadniczym elementem tego stanowiska był kanał przepływowy (Rys. 3b), w którym umieszczona była próbka porowatego materiału (1). Badane próbki miały kształt sześcienu (Rys. 3c), a konstrukcja kanału umożliwiała dokonywanie pomiaru gazoprzepuszczalności dla każdego z trzech głównych kierunków przepływu (X, Y, Z), poprzez obrót sześciennęj próbki w wybranej płaszczyźnie celki pomiarowej.

Wyniki i ich analiza

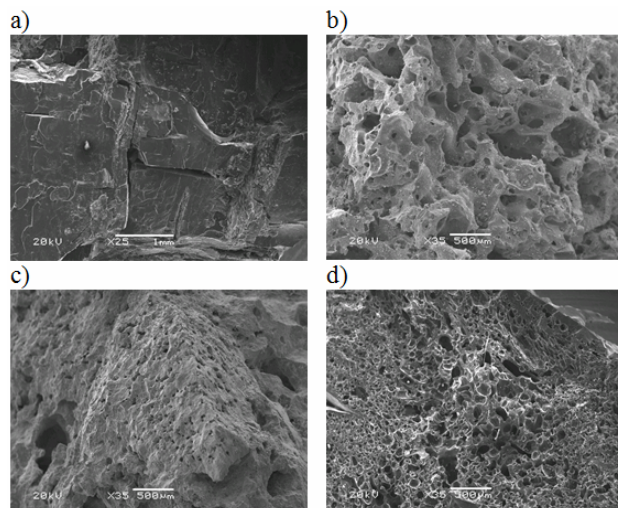
Badane materiały wykazywały się zróżnicowaną budową, a ich struktura wewnętrzna była oceniana na podstawie obrazu skaningowego – rys. 4. Na tej podstawie określono też porowatość materiału oraz jej średnią wartość efektywną (otwartą dla przepływu), wynikającą z przelotowych porów [Wałowski, 2015]. Za miarę przepuszczalności przyjęto strumień objętościowy gazu, wynikający z rozróżalnej różnicy ciśnienia na porowatej próbce materiału.

Przykładowe wyniki pomiarów charakteryzujące przepuszczalność typowego karbonizatu *in situ* przedstawiono na rys. 5. Z rozkładu punktów doświadczalnych widać, że przepuszczalność tego rodzaju materiału istotnie zależy od kierunkowości przepływu gazu. Wskazuje to na wyraźną asymetryczność przepuszczalności względem danego kierunku przepływu, a w konsekwencji na wyraźnie anizotropową strukturę tego materiału, w odniesieniu do którego tensor przepuszczalności jest tensorem anizotropowym.

Podobne wyniki otrzymano także dla innych tego rodzaju materiałów [Wałowski, 2015].



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego, wraz z elementami wyposażenia: a) układ pomiarowy: 1- materiał porowaty (próbka), 2- manometr różnicowy, 3- rotametr (3a- przepływomierz bąbelkowy dla najmniejszych strumieni), 4- reduktor ciśnienia gazu, 5- zawór regulacyjny, b) kanał przepływowy, c) celka pomiarowa: 1- próbka, 2- korpus uszczelniający ($D = 49 \text{ mm}$, $a = 20 \text{ mm}$)



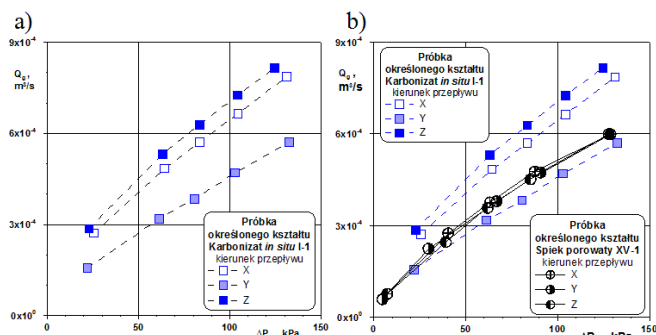
Rys. 4. Obrazy SEM struktury karbonizatów: a) karbonizat *in situ*, b) koks, c) skała płonna *in situ*, d) karbonizat *ex situ* (powiększenie x35)

Punktem odniesienia do takiej asymetrii może być tworzywo z poliamidu porowatego, stanowiące spiek cząstek kulistych o średnicy cząstki ok. 0,1 mm.

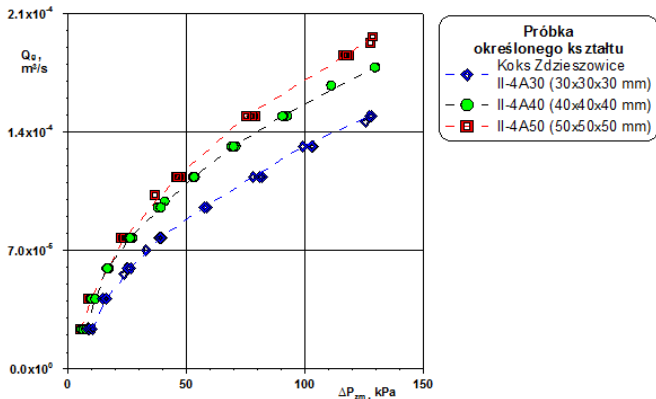
Z danych doświadczalnych wynika, że charakterystyka przepuszczalności tego tworzywa praktycznie nie zależy od kierunku przepływu gazu, co wskazuje na symetryczną strukturę jego budowy. Jednocześnie, pomimo znacznie mniejszej od karbonizatu *in situ* porowatości, poliamid ten cechuje się podobną charakterystyką przepływu gazu.

Potwierdza to spostrzeżenie, że większy efekt przepuszczalności karbonizatów wynika bardziej z ich porowato-szczelinowej struktury, aniżeli ze skali porowatości. Interesujące jest przy tym, że dla porowatego poliamidu charakterystyka przepuszczalności ma także nieliniowy charakter, co w zakresie prowadzonych pomiarów świadczy o przewadze burzliwego przepływu gazu.

Potwierdzają to wyniki badań pokazane na Rys. 6, charakteryzujące gazoprzepuszczalność koks o zwielokrotnionej objętości próbek sześciennych – 30×30×30, 40×40×40, 50×50×50 mm. Wyniki tych pomiarów pokazują, że wzajemne odstępstwo dla przepuszczalności gazu pomiędzy próbkami o wielokrotnie większej objętości nie przenosi się na proporcjonalne przesunięcie charakterystyki przepuszczalności. Ma to duże znaczenie w aspekcie przeniesienia skali, a jednocześnie potwierdza tezę, że w przypadku porowatych materiałów szkieletowych skala ich porowatości nie jest czynnikiem dominującym dla opisu hydrodynamiki gazoprzepuszczalności. Spostrzeżenie to potwierdzają wyniki pomiarów pokazane na rys. 7, odniesione do średniej przepuszczalności różnego rodzaju materiałów, dla przepływu powietrza w dwóch prostopadłych kierunkach (Y, Z).



Rys. 5. Rozkład punktów doświadczalnych charakteryzujących asymetryczność przepływu powietrza przez złożo karbonizatu *in situ* (a) oraz porównanie tej asymetrii do porowatego spieku z poliamidu (b)



Rys. 6. Charakterystyka przepuszczalności koksów o zwiokrotnionej objętości próbki

W każdym przypadku (potwierdzają to wyniki badań *Wałowskiego* [2015] dla innych układów) materiały o relatywnie dużej porowatości – takie jak pumeks, czy koks – cechują się bardzo małą przepuszczalnością, co świadczy o ich strukturze wewnętrznej w dużej mierze zamkniętej dla przepływu gazu.

Porównawcze zestawienie wartości obliczeniowej współczynnika przepuszczalności, wyznaczanego względem modeli przedstawionych w tab. 1, przedstawiono na rys. 8. Jak można zauważyć, we wszystkich analizowanych przypadkach otrzymuje się bardzo zróżnicowane wyniki, a są one charakterystyczne zarówno w aspekcie zastosowanej metody obliczeniowej, jak i ze względu na rodzaj materiału. Wyróżnić przy tym można trzy tendencje zmian wartości współczynnika przepuszczalności wraz ze wzrostem ciśnienia: malejącą, niezmienną oraz wzrastającą.

Zgodnie z modelem *Darcy'ego* tendencja malejąca wskazuje na większy efekt dławienia strumienia gazu, aniżeli wynikać by to mogło ze wzrostu wartości ciśnienia.

Z kolei widoczna dla modelu *Szczetkaczewa* tendencja wzrostowa wynika (przy danych właściwościach gazu) ze wzrostu obliczeniowej prędkości przepływu gazu, która jest proporcjonalnie powiązana z wartością tego współczynnika. W powyższym kontekście niezmiennie tendencje wartości współczynnika przepuszczalności wpisują się wprost do postaci modeli obliczeniowych.

Własny model do oceny współczynnika przepuszczalności

Wobec rozbieżności, a zarazem licznych ograniczeń w stosowaniu znanych z literatury modeli, zarówno w aspekcie struktury materiałów porowatych, jak i sposobu podejścia do oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez takie materiały, podjęto próbę opracowania własnego modelu do oceny współczynnika przepuszczalności.

Z założenia, własny model odniesiono do alternatywnego podejścia, jakie wynika z miejscowych oporów przepływu. Przy odniesieniu współczynnika oporów (ξ_ε) oraz prędkości gazu (w_ε) do warunków związanych z wartością porowatości (ε) można to zapisać jako

$$\Delta P = \xi_\varepsilon \frac{\rho_g w_\varepsilon^2}{2} \quad (4)$$

Przekształcenie tego równania prowadzi do wyrażenia

$$Q_g = \sqrt{A_o^2 \frac{2 \Delta P}{\xi_\varepsilon \rho_g}} = \sqrt{\frac{2 A_o^2}{\xi_\varepsilon}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}} \quad (5)$$

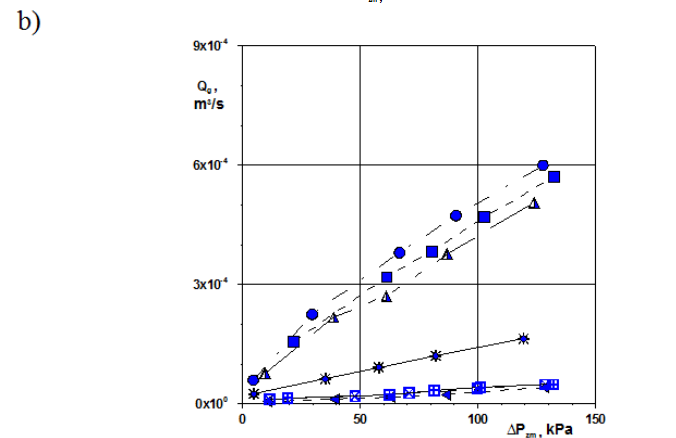
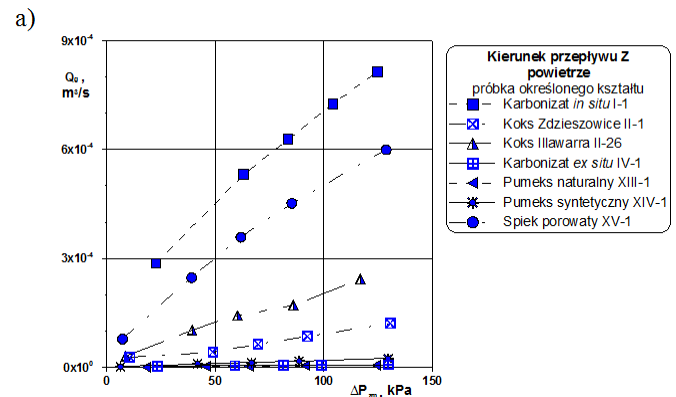
w którym efektywna powierzchnia przepływu gazu (A_o) wynika z porowatości złoża. W przeliczeniu na całkowity przekrój (A) kanału przepływowego daje to $A_o = \varepsilon A$.

Łatwo zauważyć, że składowa $\sqrt{\frac{2 A_o^2}{\xi_\varepsilon}}$ tego wyrażenia ma wymiar powierzchni, co w hydrodynamicznym ujęciu pozwala ją traktować jako odpowiednik współczynnika przepuszczalności. Stąd (z definicji)

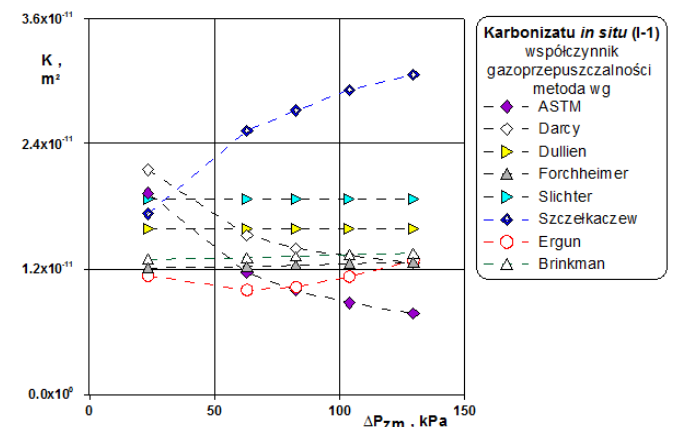
$$K_V = \sqrt{\frac{2 A_o^2}{\xi_\varepsilon}} \quad (6)$$

Strumień gazu jest wówczas opisany zależnością

$$Q_g = K_V \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}} \quad (7)$$



Rys. 7. Charakterystyka przepuszczalności materiałów porowatych względem kierunku przepływu gazu: a) kierunek Z, b) kierunek Y



Rys. 8. Współczynnik przepuszczalności względem różnych metod obliczeniowych

O ile znane są parametry hydrodynamiczne (strumień, spadek ciśnienia na złożu oraz porowatość złoża i rodzaj gazu), to wartość tak rozumianego współczynnika przepuszczalności może być wyznaczona na drodze eksperymentalnej. Wówczas bowiem

$$K_V = \frac{Q_g}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}} \quad (8)$$

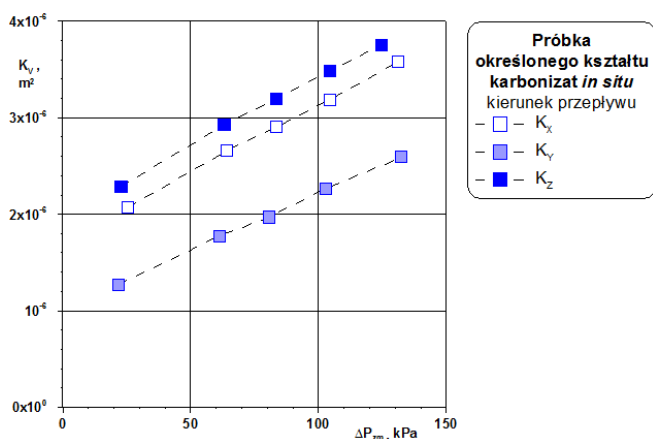
Jeżeli odnieść tak zdefiniowany współczynnik do danego kierunku przepływu (X, Y, Z), to dla każdego z nich otrzymuje się

$$K_X = \frac{Q_X}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}}, \quad K_Y = \frac{Q_Y}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}}, \quad K_Z = \frac{Q_Z}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}} \quad (9)$$

Wynikająca stąd średnia (objętościowa) wartość współczynnika przepuszczalności może być obliczona np. jako średnia geometryczna

$$K_V = \sqrt[3]{K_X K_Y K_Z} \quad (10)$$

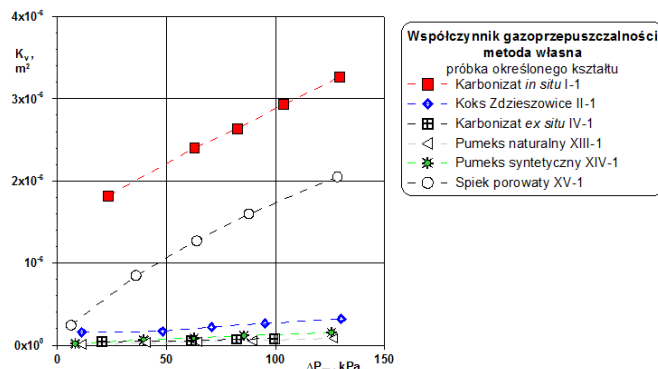
Przykładowe wyniki wyznaczonego na tej podstawie współczynnika przepuszczalności dla karbonizatu *in situ* przedstawiono na rys. 9. Zwraca uwagę zróżnicowana intensywność przepływu gazu względem danego kierunku przepływu, co wskazuje na silną anizotropowość tego rodzaju materiału. Podobne rezultaty otrzymano dla innych karbonizatów [Wałowski, 2015].



Rys. 9. Współczynniki gazoprzepuszczalności dla karbonizatu *in situ* wg równ. (9)

Charakterystyczną cechą wyników badań dotyczących współczynnika przepuszczalności jest monotoniczny na ogół charakter zmian jego wartości wraz ze wzrostem ciśnienia. Wskazuje to na odpowiednio proporcjonalny wzrost przepuszczalności wraz ze zwiększającym się ciśnieniem. Z definicji współczynnika przepuszczalności (8) wynika jednocześnie, że skutkiem zwiększonego spadku ciśnienia przyrost wartości tego współczynnika jest powodowany relatywnie większym od spadku ciśnienia przyrostem strumienia gazu, czemu sprzyjać może szczelinowo-porowata struktura karbonizatu *in situ* oraz ewentualne wewnętrzne odkształcenie objętościowe takiego szkieletu. W kontekście porównania współczynnika przepuszczalności do innych metod obliczeniowych – rys. 8 – charakter zmian tak zdefiniowanego współczynnika lepiej oddaje mechanizm tego zjawiska.

Z drugiej strony, jak to wynika z pomiaru strumienia gazu, dla wielu materiałów obserwuje się też bardzo niski poziom przepuszczalności, co ma swe źródło w odmiennej strukturze tych materiałów, przy względnie dużym udziale porów ślepych i kanałów zamkniętych (Rys. 10).

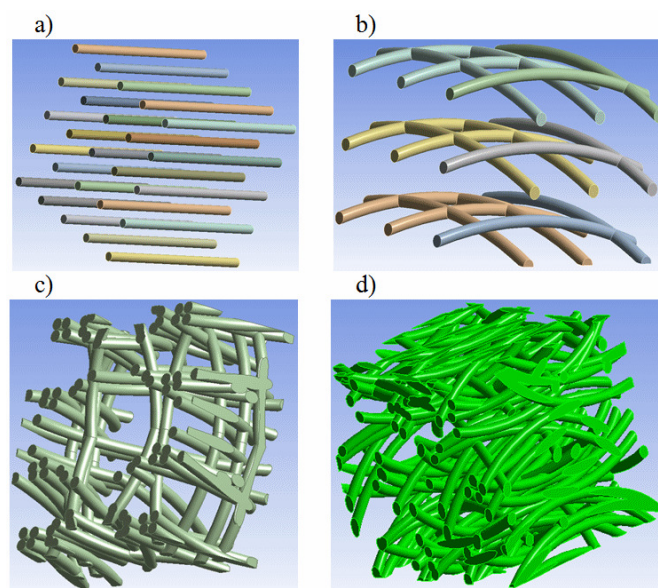


Rys. 10. Uśrednione wartości współczynnika gazoprzepuszczalności porowatych materiałów wyznaczone wg równania (10)

Zespolony obszar krętej sieci wielowarstwowej

Uwzględniając procesowe właściwości materiału porowatego, w tym przepuszczalność i jego anizotropię, podjęto także próbę stworzenia zespolonego obszaru krętej sieci wielowarstwowej na drodze numerycznej. Przyjęty do tworzenia mnogiej sieci mikrokanalów algorytm obejmuje zasadniczo trzy wariantowe etapy, jak to przedstawiono na rys. 11. Założono przy tym, że geometria sieci odpowiada porowatej strukturze analogicznej do symetrycznego rozprywu gazu przez mikrokanale o konfiguracji porów prostych, zakrzywionych i krętych. Pozwoliło to na zamodelowanie geometrii pola przepływu gazu w sześciennym, przy założeniu wymiarowym odpowiadającym badanym próbkom. W tym celu wykorzystano przeliczenie liczby mikrokanalów wynikających z objętości przepływu gazu względem rzeczywistej porowatości analizowanej próbki. Przyjęto przy tym konfigurację odpowiadającą sieci mikrokanalów rozmieszczonych regularnie (Rys. 11a,b) oraz losowo, kiedy w skrajnych przypadkach kanały sieci częściowo nachodziły na siebie, tworząc quasi-fraktalną sieć mikrokanalów krętych (Rys. 11c,d).

Opracowana metodyka tworzenia geometrii sieci mikrokanalów krętych pozwala na uściślenie kryteriów powierzchniowych bryły.



Rys. 11. Algorytm modelowania geometrii wielowarstwowej sieci mikrokanalów: a) równoległa sieć mikrokanalów prostych, b) równoległa sieć mikrokanalów krzywo liniowych, c-d) quasi-fraktalna sieć mikrokanalów krzywo liniowych i krętych

Natomiast modelowana w ten sposób struktura szkieletowa, reprezentująca przestrzeń kanalików krętych, umożliwiła procedowanie bardziej szczegółowych obliczeń, zgodnie do adekwatnych metod numerycznych w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate materiały o szkieletowej strukturze [Wałowski i in., 2014; Wałowski, 2015].

Przeprowadzono też rozważania w zakresie możliwości oceny procesowej wyników badań. Uzyskane rezultaty pozwalają stwierdzić, że wykorzystanie takich cech karbonizatów jak współczynnik przepuszczalności oraz skali anizotropowości, może być wykorzystane w identyfikacji niektórych wskaźników procesowych, odnoszących się do oceny technologicznej jakości koksu [Wałowski, 2015].

Podsumowanie

Przeprowadzone rozpoznanie zagadnienia gazoprzepuszczalności ośrodków porowatych wykazało, że w literaturze przedmiotu jest bardzo mało informacji odnoszących się do hydrodynamiki przepływu gazu przez stałe (szkieletowe) materiały porowate. W tym względzie wykonano odpowiednie badania doświadczalne gazoprzepuszczalności tej grupy materiałów, a także dokonano oceny zjawisk hydrodynamicznych wynikających z oporów przepływu gazu. Badania te uzupełniono o numeryczne obliczenia, symulujące wewnętrzną strukturę badanych materiałów, z uwzględnieniem krętości i przestrzenne rozkładu kanałów przepływowych.

Stwierdzono, że o skali przepuszczalności szkieletowych materiałów porowatych decydują tak charakterystyczne parametry jak stopień efektywnej dla przepływu gazu porowatości oraz anizotropowa struktura tych materiałów. Obie te cechy w istotny sposób wpływają na współczynnik przepuszczalności, co zostało uwzględnione w ocenie teoretycznej zagadnienia. Jednocześnie, odniesiona do gazoprzepuszczalności ocena parametrów hydrodynamicznych wykazała, że żaden z dostępnych w literaturze modeli nie czyni zadość poprawnej korelacji z uzyskanymi wynikami badań. Taki stan rzeczy tłumaczyć należy ograniczonym zakresem stosowania tych modeli do ośrodków szkieletowych, cechujących się znaczną anizotropowością wewnętrzną struktury.

Ukonstytuowany na podstawie uzyskanych wyników własny model identyfikacji współczynnika przepuszczalności materiałów porowatych oparto na wartości miejscowych oporów przepływu, co poprawnie oddaje tendencje zmian parametrów hydrodynamicznych.

Ponieważ w ocenie miejscowych oporów przepływu nie uwzględnia się zmiany lepkości płynu, proponowany model będzie miał ważność porównawczą tylko dla konkretnego zakresu współczynnika lepkości gazu, jaki wykorzystano podczas badań.

LITERATURA

- Aksielrud G. i in. (1987). *Ruch masy w ciałach porowatych*. WNT, Warszawa
- Amao A.M., (2007). *Mathematical model for Darcy Forchheimer flow with applications to well performance analysis*. Master's Thesis, Department of Petroleum Engineering, Texas Tech. University, Misato
- Auriault J.L., Caillierie D., (1989). Quelques remarques sur les méthodes d'homogénéisation. *Rev. Franç. Geotech.*, 49, 43–50
- Auriault J.L., Strzelecki T., Bauer J., He S., (1990). Porous deformable media saturated by a very compressible fluid: quasi-statics, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 9(4), 373-392
- Auriault J.L., P. Royer P., 1993. Ecoulement d'un gaz dans milieu poreux a double porosite: *Mechanique des Sols et milieu poreux/Soil Mechanics and Porous Media*, C.R. Acad. Sci. Paris, 3117, II, 431-36
- Bębenek B., Bębenek H., (1987). *Straty energii w przepływach płynów*. Wyd. Pol. Krakowskiej, Kraków 1987
- Błaszczak M., (2014). *Badanie procesów migracji substancji ropopochodnych i ich emulsji w strukturach porowatych*. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka
- Coussy O., (2007). *Mechanics and physics of porous solids*, John Wiley
- Dulnev G.N., Novikov V.V., (1991). *Transfer processes in inhomogeneous media* (in Russian). Energoatomizdat, Leningrad
- Ergun S., (1952). Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.*, 48(2), 89-94
- Filipczak G., Krause E., Wałowski G., (2015). *Układ do wyznaczania współczynnika przepuszczalności gazów przez porowate materiały o anizotropowej strukturze, zwłaszcza przez karbonizaty* (P.409191). Zgłoszenie w toku postępowania przed Urz. Patent. - *Biul. Urz. Patent. nr 12 (1081)*, 45
- Franchi F., Straughan B., (1996). Structural stability for the Brinkman equations of porous media. *Math. Met. Appl. Sci.*, 19, 1335-1347. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1476(19961110)19:16<1335::AID-MMA842>3.0.CO;2-Y
- Hansen T.E., (2007). *Flow in micro porous silicon carbide*. Master Thesis, Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, Kopenhaga
- Kembłowski Z., Michałowski S., Strumiłło C., Zarzycki R., (1985). *Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej*. WNT, Warszawa
- Kotnarowska D., (2010). *Powłoki ochronne*. Wyd. Pol. Radomskiej, Radom
- Lambe T., Whitman R. V. Warszawa (1978). *Mechanika gruntów*, Arkady, Warszawa
- Lydźba D., (1991). Constitutive equation of gaz-coal medium. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 13(3-4), 51-62
- Lydźba D., (2002). Zastosowania metody asymptotycznej homogenizacji w mechanice gruntów i skał. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. i Hydrotech. Pol. Wrocławskiej*, 74, Monogr. 23
- Mozhaev A. P., (2002). Chaotic homogeneous porous media. Theory of dispersion turbulence. *J. Eng. Phys. Therm.*, 75(2), 371-383
- Orzechowski Z., Prywyer J., Zarzycki R., (2009). *Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska*. WNT, Warszawa
- Peszynska M., Trykozko A., Sobieski W., (2010). Forchheimer law in computational and experimental of flow through porous media at porescale and mesoscale. *Math. Sci. Appl.*, 32, 463-482
- Piecuch T., (2009). Równanie Darcy jako podstawa analizy teoretycznej szczególnych przypadków procesu filtracji. *Rocznik Ochr. Środ.*, 11(21), 299-319
- Przybyłowicz K., (2003). *Metaloznawstwo*. WNT, Warszawa
- Stańczyk K. i in., (2012). *Hydrogen-oriented underground coal gasification for Europe (HUGE). Final report*. Research Found for Coal and Steel. EUR 25044 EN Project
- Strzelecki T., Kostecki S., Żak S., (2008). *Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate*. Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne, Wrocław
- Tobiś J., (1981). *Badania kinetyki ogrzewania strumienia cieczy w kolumnie wypełnionej nieruchomym złożem*. Inst. Chemii Fiz. PAN, Warszawa
- Waluk J., (1973). *Laboratorium z mechaniki gruntów*. Wyd. Politechniki Wrocławskiej
- Wałowski G., (2015). *Hydrodynamika przepływu gazu przez złożę porowate*. Praca doktorska, Wydz. Mechaniczny, Politechnika Opolska
- Wałowski G., Filipczak G., Krause E., (2014). Numeryczna ocena hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate struktury karbonizatów. *Modelowanie Inżynierskie*, 20(51), 123-232
- Woźnicka M., Koniecznyńska M., (2013). *Eksploatacja gazu z łupków a środowisko naturalne. Państwowa służba geologiczna o gazie w łupkach*. Wyd. Państw. Inst. Geol., Warszawa, 7, 94-101
- Younger P.L., (2011). Hydrogeological and geomechanical aspects of underground coal gasification and its direct coupling to carbon capture and storage. *Mine Water Environmental*, 30, 127–140. DOI: 10.1007/s10230-011-0145-5
- Zawora J., (2001). *Podstawy technologii maszyn*. WSiP, Warszawa