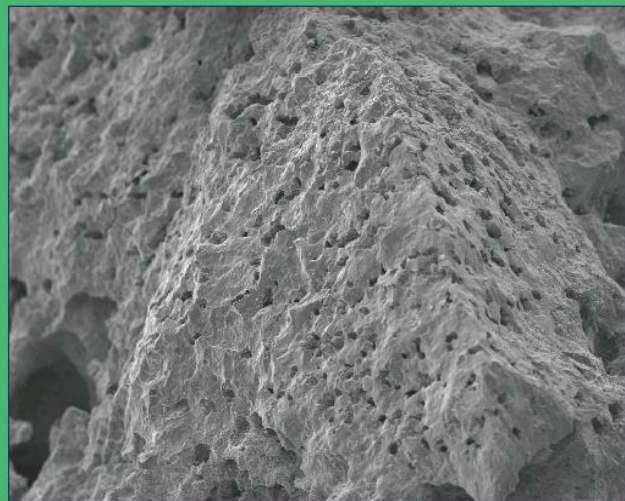
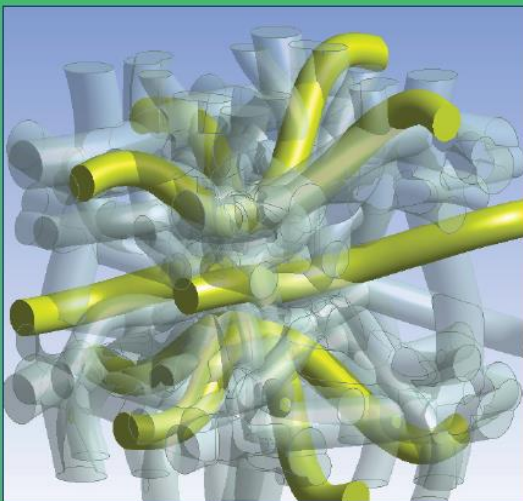


Grzegorz WAŁOWSKI
Gabriel FILIPCZAK

Hydrodynamika przepływu gazu przez złożo porowate



**Grzegorz WAŁOWSKI
Gabriel FILIPCZAK**

**Hydrodynamika przepływu gazu
przez złożę porowate**



**POLITECHNIKA OPOLSKA
ISBN 978-83-66033-74-0**

Opole 2020

POLITECHNIKA OPOLSKA

KOMITET REDAKCYJNY

Małgorzata ADAMSKA, Włodzimierz BĘDKOWSKI, Aleksander KAROLCZUK,
Mariusz MIGAŁA, Barbara MIŁASZEWICZ, Piotr NIESŁONY – przewodniczący,
Zbigniew PERKOWSKI, Jan SADECKI, Beata ŚWIERCZEWSKA

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Tadeusz BOHDAL
prof. dr hab. inż. Włodzimierz CIESIELCZYK

Redaktor:

Aleksander KAROLCZUK

Komitet Redakcyjny Wydawnictw Politechniki Opolskiej
ul. Prószkowska 76

© Copyright by Politechnika Opolska 2020

Skład: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.
Nakład 40 egz. Ark. wyd. 11,0. Ark. druk. 11,0.
Druk i oprawa: Sekcja Poligrafii Politechniki Opolskiej.

Spis treści

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA	5
1. WPROWADZENIE	7
2. WYBRANE ZAGADNIENIA TECHNICZNO-PROCESOWE	9
2.1. Wiadomości ogólne	9
2.2. Filtracja – przepływ płynu przez złożę ziarniste	12
2.3. Przepływ gazu przez porowate materiały strukturalne	15
2.4. Przepływ gazu przez szczelinowo-porowate materiały naturalne	16
2.5. Przepływ gazu w porowatych i szkieletowych strukturach materiałów z termicznego procesowania węgla	19
3. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW PROCESOWYCH	23
3.1. Mechanizm przepływu gazu w strukturach porowatych	23
3.2. Hydrodynamika przepływu gazu przez struktury porowate	30
3.3. Sposoby pomiaru oraz metody oceny gazoprzepuszczalności ośrodków porowatych	44
4. BADANIA DOŚWIADCZALNE	63
4.1. Charakterystyka materiału badawczego	63
4.2. Stanowisko doświadczalne	72
4.3. Zakres i metodyka badań	76
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	79
5.1. Ocena przepuszczalności	79
5.2. Współczynnik gazoprzepuszczalności i autorski model jego opisu	92
5.3. Ocena anizotropii i jej wpływ na gazoprzepuszczalność	103
5.4. Model ekwiwalentnego współczynnika oporów przepływu	109
6. NUMERYCZNE BADANIA MODELOWE	123
6.1. Problem skali	123
6.2. Wybór modelu numerycznego	126
6.3. Geometria kanału krętego	129
6.4. Model dyskretny mikrokanalu	130
6.5. Warunki początkowe i brzegowe modelu	131
6.6. Koncepcja geometrii sieci mikrokanalów krętych	132
6.7. Wyniki analizy numerycznej	136
7. OCENA PROCESOWA WYNIKÓW BADAŃ	143
7.1. Ocena jakości koksu	143
7.2. Ocena jakości syngazu	146
8. PODSUMOWANIE	149
LITERATURA	151
STRESZCZENIA	161
Załącznik – Charakterystyka strukturalna badanych materiałów	163

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

- A – pole przekroju, m^2
 B – stała obliczeniowa, -
 C – stała obliczeniowa, -
 Da – liczba Darcy'ego, -
 H – wysokość złoża, m
 K – współczynnik przepuszczalności, m^2
 L – długość, m
 P – ciśnienie, Pa
 Re – liczba Reynoldsa, -
 S – stała indywidualna, m^{-1}
 T – temperatura, K
 Q – strumień objętościowy, m^3/s
 V – objętość, m^3
 a – powierzchnia jednostkowa, m^2/m^3
 b – stała (zależna od rodzaju gazu i ośrodka), -
 d – średnica, m
 e – wskaźnik porowatości, -
 f – zmodyfikowany współczynnik oporów przepływu, -
 g – gęstość strumienia masy (prędkość masowa), $kg/(m^2 \cdot s)$
 \hat{g} – przyśpieszenie ziemskie, m/s^2
 h – wysokość, m
 k – współczynnik filtracji, m/s
 m – masa, kg
 n_k – liczba kapilar, -
 q – gęstość objętościowa strumienia, $m^3/(m^2 \cdot s)$
 r – promień, m
 s – szerokość, m
 w – prędkość, m/s
 z – współczynnik ściśliwości gazu, -

Symbole greckie

- Δ – różnica (spadek), -
 α – obliczeniowy współczynnik Leva, m^{-1}
 β – obliczeniowy współczynnik Forchheimera (parametr inercji), -
 δ – współczynnik szorstkości (chropowatości), -
 ε – porowatość złoża, m^3/m^3
 η – dynamiczny współczynnik lepkości, $Pa \cdot s$
 φ – współczynnik kształtu wypełnienia, -
 κ – współczynnik krętości porów, -
 λ – współczynnik tarciovych oporów przepływu, -
 ν – prędkość rzeczywista, m/s

- ρ – gęstość, kg/m^3
 ξ – współczynnik miejscowych oporów przepływu, -
 ψ – współczynnik kształtu porów, -

Indeksy odnoszą się do:

- B* – Brauera
B-K – Blake-Kozeny
B-K-C – Blake-Kozeny-Carmana
B-P – Burke-Plummera
Ch-Y – Chen-Yuana
Du – Dulliena
E – Erguna
F – Forchheimera
K-C – Kozeny-Carmana
S – Slichtera
Sz – Szczelkaczewa
T – Tallmage'a
W – Windspergera
Z – Żaworonkowa
b – wartości bezwzględnej
c – wartości całkowitej
e – wymiaru ekwiwalentnego (zastępczego)
ef – wartości efektywnej
f – płynu
g – gazu
k – kapilary
max – wartości maksymalnej
n – warunków normalnych
o – wartości liczonej na pełny przekrój złoża (wartość pozorna)
obl – wartości obliczeniowej
p – cząstki kulistej
pr – próbki
st – materiału stałego (szkieletu)
sw – objętości swobodnej
śr – wartości średniej
v – parametru objętościowego
wl – przekroju (parametru) wlotowego
wyl – przekroju (parametru) wylotowego
wyz – wartości wyznaczonej doświadczalnie
zm – wartości zmierzonej
ε – wartości obliczonej względem porowatości złoża

1. WPROWADZENIE

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 złoża porowatego o luźnym ułożeniu. Często też, przepływ ten powiązany jest z dystrybucją (migracją) gazów procesowych w adsorbentach i innych aktywatorach wykorzystywanych do pochłaniania zanieczyszczeń gazowych, jak również oceny jakości tych aktywatorów w aspekcie ich cech procesowych. Materiały porowate wykorzystuje się też w budowie dystrybutorów gazu, stosowanych w aparatach barbotażowych, jak np. kolumnach air-lift, celem równomiernego rozprowadzenia strugi gazu [17, 51, 205]. Z przepływem tym spotykamy się także w procesach technologicznych związanych z termicznym procesowaniem węgla, a także podczas ruchu naturalnych gazów kopalnych (np. metanu) przez górotwory, czy też przepływu reakcyjnych gazów hutniczych przez różnej postaci karbonizaty [96, 167, 202, 204].

Innym, dość charakterystycznym przykładem przepływu gazu w materiałach porowatych, jest jego ruch w złożach tzw. georeaktora w trakcie procesu podziemnego zgazowania węgla. Jest to jedna z nowocześniejszych obecnie technologii pozyskiwania energii z kopaliny węglowych w miejscu ich zalegania [14, 88, 167, 189]. Naturalnym materiałem porowatym są także górotwory łupkowe, stanowiące ogromny skądinąd rezerwar gazu ziemnego, zawartego w drobnych szczelinach skał łupkowych. Wymuszenie ruchu (wydobycie na powierzchnię) tak uwięzionego gazu wymaga zastosowania procesu zwanego szczelinowaniem [89, 202], co nawiązuje do porowato-szczelinowej struktury tego typu górotworów.

W każdym z tych przypadków rozpoznanie warunków przepływu gazu przez złoża porowate niesie za sobą istotne problemy związane zarówno z opisem hydrodynamiki, jak i z oceną mechanizmów ruchu gazu przez takie złoża, zwłaszcza przy zróżnicowanej ich strukturze. Z drugiej strony znajomość tych mechanizmów pozwala na dokonanie oceny zjawisk, jakie towarzyszą hydrodynamicie przepływu gazu przez tego typu materiały, a w konsekwencji na szczegółowy opis warunków procesowych, związanych z ruchem gazu przez złoża porowate.

Niezależnie od szerokiego zastosowania przepływu gazu w materiałach porowatych oraz związanych z tym licznymi problemami poznawczymi, w literaturze przedmiotu wciąż odczuwa się niedosyt badań w zakresie interpretacji oraz opisu zjawisk towarzyszących temu przepływowi. Sprzyjająca większej efektywności procesowej właściwa ocena hydrodynamiki, w tym analiza ruchu (migracji) gazu w złożach o skomplikowanej strukturze, wymagają coraz bardziej precyzyjnego opisu ze względu na zróżnicowane warunki przepływu, wynikające zarówno z samej struktury materiałów porowatych, jak i ze względu na zmianę skali procesu – od porowatego ziarna do porowatego złoża. Brakuje przy tym uogólnionych modeli, uwzględniających w swym opisie zarówno cechy struktury

ry porowatej jak i właściwości gazu, co umożliwiłoby jakościowo i ilościowo opisać jego przepływ w strukturach porowatych o zróżnicowanej budowie.

Niniejsza praca wychodzi naprzeciw niektórym z tych problemów. Stanowi podsumowanie wieloletnich badań prowadzonych w Katedrze Inżynierii Procesowej Politechniki Opolskiej w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate o stałej strukturze szkieletowej, a w znacznym zakresie realizowanych w ramach pracy doktorskiej jednego ze współautorów [186]. Realizacja tych badań możliwa była także dzięki współpracy z Głównym Instytutem Górnictwa oraz Zakładami Koksowniczymi "Zdzieszowice" – Arcelor-Mittal Oddział w Zdzieszowicach, za co autorzy w tym miejscu wyrażają serdeczne podziękowanie.

Zasadniczą przesłanką dla prowadzenia takich badań jest ciągła aktualność tej tematyki, wynikająca zarówno z weryfikacji istniejących, jak i z poszukiwania nowych rozwiązań procesowych, które mają szczególne znaczenie w kontekście obserwowanego powrotu do tzw. czystych technologii węglowych (*Clean Coal Technologies*), powiązanych z rozwojem przyjaznych środowisku procesów zgazowania węgla. Pomimo ograniczeń oraz trudności w praktycznej realizacji, procesy te we współczesnej gospodarce światowej należą do preferowanych wciąż innowacyjnych zadań, prowadzących do pozyskiwania alternatywnych zasobów energetycznych. W tym kontekście, badania własne obejmujące w swym zakresie ocenę hydrodynamiki przepływu gazów przez szkieletowe złoża porowate w postaci różnego rodzaju karbonizatów, stanowiących z natury produkty termicznego zgazowania węgla, znajdują istotne znaczenie dla rozwoju tych technologii.

Zainteresowania autorów wybiegają też w kierunku nowych aplikacji, ukierunkowanych na odmienne od węglowych koncepcje i tendencje w zakresie niekonwencjonalnych technologii energetycznych, zwłaszcza opartych o produkcję biogazu. W tym względzie realizowane są badania własne odnoszące się do przepływu biogazu przez sprzyjające hodowli mikroorganizmów tzw. porowate złoża adhezyjne, co w kontekście przepuszczalności gazowej porowatych materiałów o strukturalnej strukturze ma duże znaczenie dla rozwoju czystych technologii energetycznych.

Autorzy wyrażają przekonanie, że zaprezentowane w pracy wyniki własnych badań oraz szerokie spektrum rozpoznanych problemów, obejmujące swym zakresem modelowanie numeryczne, będą pomocne zarówno przy dalszych pracach badawczych, jak i w praktyce inżynierskiej.

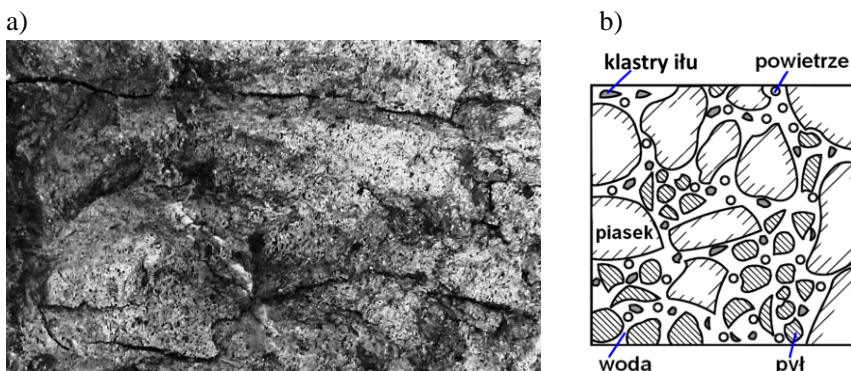
2. WYBRANE ZAGADNIENIA TECHNICZNO-PROCESOWE

2.1. Wiadomości ogólne

Ośrodkiem porowatym określa się naturalne lub sztuczne materiały, charakteryzujące się znaczną liczbą kanalików i pustych przestrzeni, o względnie małych w porównaniu z wielkością samego ciała wymiarach. Przestrzenie puste, niezależnie od ich kształtu, nazywa się porami, których forma i wielkość zależą od rodzaju złoża ziarnistego. Strukturę porowatą wykazują zarówno materiały pochodzenia naturalnego jak i sztucznego, w tym takie układy jak: gleba, pumeks (skała wulkaniczna), ceramiczne materiały budowlane, spieki metalowe, a także tzw. piany metalowe. Można wyodrębnić przy tym dwie podstawowe grupy ośrodków porowatych, a mianowicie:

- a) ośrodki porowate stanowiące złoża luźne, składające się z materiałów ziarnistych, zajmujących przestrzeń wynikającą z ukształtowanej geometrycznie objętości, np. zbiornika,
- b) ośrodki o strukturze szkieletowej, stanowiące zwarty i konstrukcyjnie sztywny układ porowaty o postaci jednolitego złoża materiału, jak np. koks, beton, piankowe tworzywa sztuczne, ceramika itp.

W obu przypadkach w danym ośrodku porowatym występują zwykle pory o zróżnicowanym i nieregularnym kształcie, tworząc najczęściej przestrzeń porowato-szczelinową, jak to przykładowo pokazano na rys. 2.1. Dla porów (kanalików) o kształcie kołowym lub do niego zbliżonym, charakterystycznym wymiarem porów będzie średnica, natomiast w przypadku kanałów szczelinowatych ich szerokość. Wielkość porów i szczelin przepływowych determinuje jednocześnie ogólną strukturę materiałów porowatych. Zwykle przyjmuje się klasyfikację przestrzeni porowato-szczelinowych według systematyki podanej w tabeli 2.1.



Rys. 2.1. Struktura porowato-szczelinowa karbonizatu (a) oraz rozkład faz (wg [9]) dla gruntu naturalnego (b)

Tabela 2.1

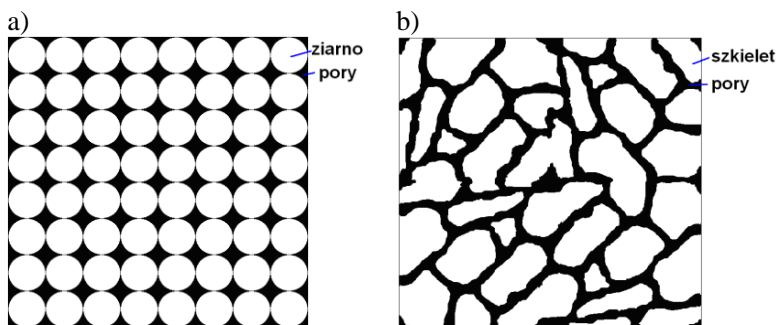
Systematyka porów i szczelin, wg [72]

Pory		Szczeliny	
średnica efektywna ^{*)} d_{ef} , mm		szerokość s , mm	
mikropory	$d_{ef} \leq 0,0002$	subkapilarne	$s < 0,0001$
mezopory	$0,0002 < d_{ef} \leq 0,5$	kapilarne	$0,25 < s < 0,0001$
makropory	$d_{ef} > 0,5$	nadkapilarne	$s > 0,25$
*) średnica pora w efektywnym przekroju przepływu			

Z punktu widzenia przepuszczalności płynów ośrodki porowate mogą być traktowane dwojako, a mianowicie jako:

- izotropowe, gdy cechy filtracyjne złoża wykazują jednakowe właściwości we wszystkich kierunkach przepływu,
- anizotropowe, gdy występują zróżnicowane właściwości filtracyjne złoża względem wybranego kierunku przepływu płynu.

Pierwszy przypadek wskazuje na jednorodną strukturę porowatego złoża, podczas gdy w drugim przypadku w danej objętości ma się do czynienia ze zróżnicowaną kierunkowo strukturą porów i kanałów przepływowych. Poglądowy obraz struktur izotropowej i anizotropowej przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Struktura porowata: a) izotropowa, b) anizotropowa (kolor czarny: przestrzeń wolna, biały: konstrukcja szkieletowa)

Podstawową cechą charakteryzującą każdy układ porowaty jest jego porowatość, która stanowi miarę zajętej przez pory objętości złoża. W zależności od struktury złoża wyróżnia się przy tym porowatość całkowitą odniesioną do objętości wszystkich porów zawartych w złożu (V_o) oraz porowatość rzeczywistą (efektywną), odniesioną do objętości porów przelotowych, tj. otwartych dla przepływu (V_{ef}).

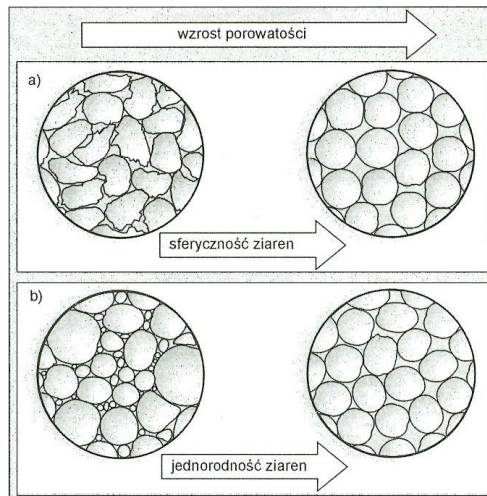
Z definicji więc

$$\varepsilon = \frac{V_o}{V}, \quad (2.1a)$$

oraz

$$\varepsilon_{ef} = \frac{V_{ef}}{V}. \quad (2.1b)$$

Porowatość zwykle w mniejszym stopniu zależy od wymiarów cząsteczek z jakich składa się układ porowaty, natomiast znaczący wpływ na jej wartość ma kształt ziaren (porów) tworzących taki układ. Przykładowo – jak to pokazano na rysunku 2.3, zaczerpniętym z pracy [9] – ziarna o nieregularnych kształcie mogą być bardziej upakowane od ziaren kulistych (rys. 2.3a), dlatego porowatość ośrodka zbudowanego z nieregularnych ziaren jest mniejsza. Z kolei rozkład wielkości ziaren (rys. 2.3b) wskazuje, że im bardziej równomierne ziarna, tym większa jest porowatość.



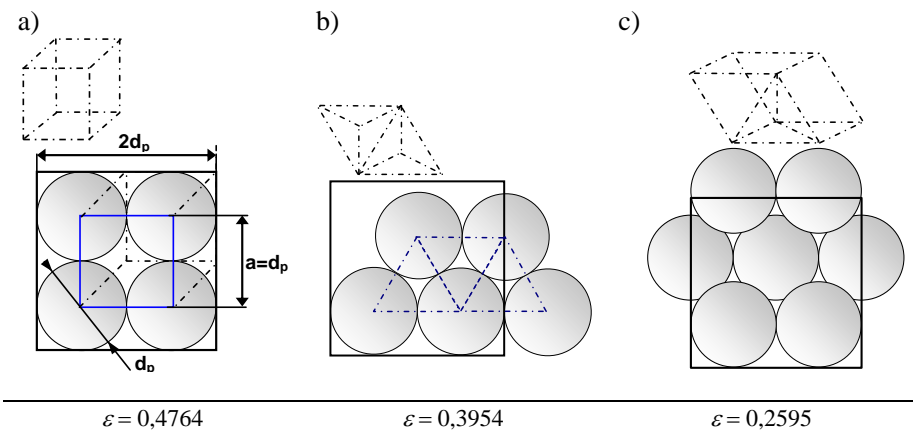
Rys. 2.3. Wpływ kształtu ziaren (a) oraz rozmiaru cząstek (b) na porowatość złoża, za [9]

Dla izotropowego złoża zawierającego jednakowej wielkości elementy kuliste – rys. 2.4 – porowatość zmieniać się będzie od maksymalnej wartości

$$\varepsilon_{\max} = \frac{V_o}{V} = \frac{\left(d_p^3 - \frac{\pi d_p^3}{6} \right)}{d_p^3} = 0,4764$$

dla regularnego układu sześciennego (rys. 2.4a), do wartości $\varepsilon = 0,2595$ – dla romboedrycznego układu „kula na trzech kulach” (rys. 2.4c). Oczywiście, dla układów rzeczywistych (materiałów naturalnych) porowatość może zarówno przekraczać wartość maksymalną, jak i przyjmować wartości mniejsze od mi-

nimalnej, a odstępstwo to jest tym większe im bardziej struktura złoża odbiega od izotropowej (rys. 2.3).



Rys. 2.4. Przykładowe układy izotropowej struktury materiału porowatego, wg [70]:
a) sześcienny, b) romboidalny, c) romboedryczny

Można przy tym przyjąć, że objętość przestrzeni wolnych wskazuje bezpośrednio na ilość (pojemność) płynu, jaka może być zmagazynowana w danym złożu. Z kolei wymiar, struktura ułożenia porów, a także kształt kanalików i przestrzeni wolnych, wpływają na przepuszczalność złoża. W każdym przypadku przepuszczalność ta, jako miara zdolności transportu gazu wewnętrznymi kanalikami utworzonymi przez wzajemne połączenie porów, uwarunkowana jest oddziaływaniem sił ciśnienia. Duże znaczenie ma tutaj czy przepływ płynu odbywa się jedynie pod wpływem sił grawitacji, czy też jest dodatkowo wymuszony działaniem sił zewnętrznych, na skutek wytworzonej różnicy ciśnienia [103, 120, 168]

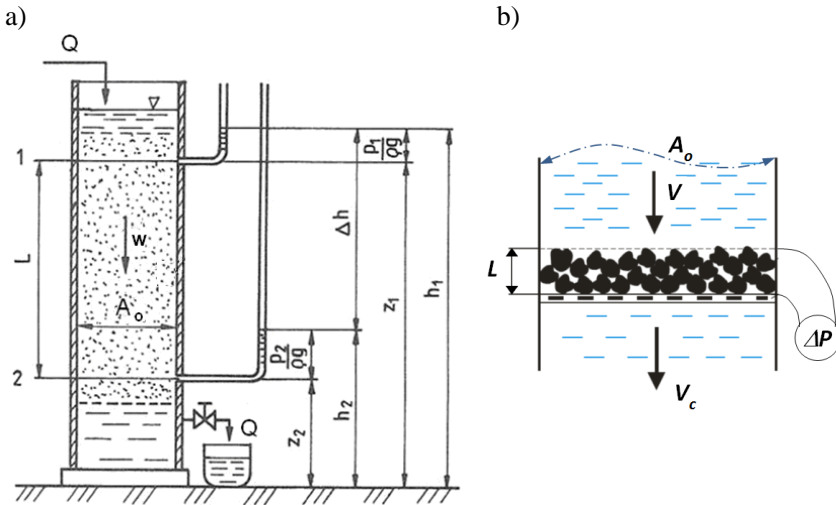
2.2. Filtracja – przepływ płynu przez złożo ziarniste

W odniesieniu do większości przypadków podstawą szczegółowej analizy ruchu płynów w ośrodkach porowatych pozostaje prawo Darcy'ego [168]. W swej pierwotnej postaci prawo to opisuje warunki przepuszczalności różnego rodzaju gruntów w analogii do mechanizmu filtracji podczas laminarnego ruchu wody przez warstwę ziarnistego złoża piasku. Typowy układ hydrauliczny do pomiaru przepuszczalności takiego złoża przedstawiono na rys. 2.5, na którym podano także schemat napływu cieczy na warstwę materiału ziarnistego, zgodnie do mechanizmu filtracji (rys. 2.5b).

W wyniku przeprowadzonych badań Darcy stwierdził, że strumień cieczy (Q), definiowany jako objętość wypływającego płynu (V_c) w czasie (τ), jest odwrotnie proporcjonalny do długości drogi filtracji (L), a wprost proporcjonalny do przekroju kolumny (A_o) oraz różnicy ciśnienia hydrostatycznego (Δh). W ujęciu ilościowym można to zapisać w postaci

$$\frac{V_c}{\tau} = Q = k A_o \frac{\Delta h}{L} , \quad (2.2)$$

gdzie k jest współczynnikiem proporcjonalności, zwanym współczynnikiem filtracji albo współczynnikiem przepuszczalności Darcy'ego. Współczynnik ten dla danego rodzaju złoża ma ściśle określoną wartość i jest cechą przewodności hydraulicznej porowatego układu.



Rys. 2.5. Doświadczenie Darcy'ego (a) oraz przepływ cieczy przez ziarniste złożo filtracyjne (b), wg [132, 137]

W przeliczeniu na prędkość pozorną płynu (w_o), tj. liczoną na pełny przekrój kolumny pomiarowej,

$$w_o = \frac{Q}{A_o} , \quad (2.3)$$

na podstawie (2.2) otrzymuje się wzór

$$w_o = k \frac{\Delta h}{L} , \quad (2.4)$$

znany jako prawo Darcy'ego.

Równość dwóch ostatnich wzorów (2.3) i (2.4) pokazuje, że prawo Darcy'ego można także zapisać względem gęstości strumienia objętościowego (q_o), identyfikowanej z szybkością filtracji. Z definicji

$$q_o = \frac{Q}{A_o} = k \frac{\Delta h}{L} . \quad (2.5)$$

Pokazuje to, że w przypadku, gdy przepływ cieczy następuje tylko przez warstwę osadu (rys 2.5b), odniesiona do przekroju złoża intensywność przepływu cieczy w środowisku porowatym jest odpowiednikiem szybkości filtracji.

Jeżeli uwzględnić zróżnicowanie właściwości cieczy, to jej prędkość przepływu przez porowate złożo uzależniona będzie proporcjonalnie do zmiany gęstości, a odwrotnie proporcjonalnie do zmiany lepkości [12]. Wówczas zależność (2.2) przybierze postać

$$Q = K A_o \frac{\rho \hat{g}}{\eta} \frac{\Delta h}{L}, \quad (2.6)$$

kóra jest charakterystyczna dla współczesnego zapisu zagadnienia Darcy'ego, jakkolwiek odniesiona jedynie do przepływu laminarnego.

Występujący w ostatnim równaniu współczynnik K jest tożsamy do zależności

$$K = \frac{k\eta}{\rho \hat{g}} \quad (2.7)$$

i jest miarą przepuszczalności porowatego ośrodka.

Z porównania wymiarów widać, że współczynnik ten ma wymiar powierzchni, co wskazuje na to, że w ujęciu hydrodynamicznym przepuszczalność porowatego materiału może być traktowana jako jego pewna geometryczna cecha, zależna od struktury tego materiału. Z kolei wartość tak rozumianej przepuszczalności zależy nie tylko od filtracyjnych właściwości ośrodka porowatego (struktury, wymiarów cząstek, stopnia ich zagęszczenia, porowatości itp.), ale także od fizycznych właściwości filtrującej cieczy, zwłaszcza lepkości. Nie zależy natomiast od kształtu i rozmiaru samego złoża.

Model Darcy'ego ma oczywiście zastosowanie także do opisu przepływów ciśnieniowych. Wówczas dla równania (2.6) mamy

$$Q = K A_o \frac{\Delta P}{\eta L}, \quad (2.8)$$

a stąd

$$K = \eta \frac{Q}{A_o} \frac{L}{\Delta P}. \quad (2.9)$$

Równanie (2.9) pokazuje, że przy znanym strumieniu przepływu przepuszczalność złoża porowatego może być wyznaczona na drodze eksperymentalnej, o ile znane są właściwości płynu oraz geometryczne parametry układu przepływowego.

Warto nadmienić, że wynikająca z definicji (2.9) tzw. jednostkowa przepuszczalność ośrodka porowatego odnieszona będzie do próbki o przekroju 10^{-4} m^2 , dla cieczy o lepkości $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, pod wpływem gradientu ciśnienia 10^3 Pa/m , ze strumieniem przepływu w ilości $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, co odpowiada przepuszczalności równej 1 darcy (1 Da). Przepuszczalność taka jest w przybliżeniu 10^{12} mniejsza od wymiaru przepuszczalności 1 m^2 . Na przykład: przepuszczalnością 1 Da

cechuje się kapilara o średnicy ok. 5,6 μm , podczas gdy przepuszczalność skał ropo- i gazonośnych leży zazwyczaj w granicach (10^{-15} – 10^{-12}), a więc od wartości kilku mili- do kilku darcy. Z kolei dana wzorem (2.7) relacja pomiędzy przepuszczalnością (K) a współczynnikiem filtracji (k), dla tych samych danych wyniesie

$$K = 10^{-7} k \quad . \quad (2.10)$$

Stąd zachodzi równoważność wartości 1 Da = 10^{-7} m/s.

Ze względu na różne cechy i właściwości porowatych materiałów, często stosuje się indywidualne, bardzo szczegółowe równania opisujące opory przepływu ΔP . Chętnie operuje się też jednostkowymi oporami przepływu, odniesionymi do wysokości złoża $\Delta P/L$, albo – co jest rzadziej spotykane – odniesionymi dodatkowo do gęstości płynu $\Delta P/\rho L$. Chmiel i in. [32, 33] wskazują, że korzystanie z uogólnionych zależności kryterialnych pozwala przy tym porównać względem siebie parametry hydrodynamiczne (zwłaszcza jednostkowe opory przepływu), bezpośrednio dla różnych rodzajów porowatych złóż i materiałów.

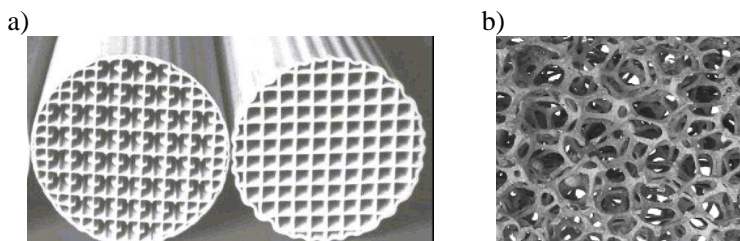
2.3. Przepływ gazu przez porowate materiały strukturalne

W wielu procesach przemysłowych bardzo często wykorzystywany jest przepływ gazu przez różnego rodzaju dystrybutory powierzchni kontaktu faz ciekłej i gazowej. Dystrybutory te stanowią najczęściej moduły o porowatej strukturze w postaci trwałych elementów konstrukcyjnych. Dobór rodzaju takiego dystrybutora, a także jego struktury wewnętrznej, ma istotny wpływ na hydrodynamikę działania aparatów, w których takie dystrybutory się stosuje, co ma bezpośredni związek z rozwinięciem powierzchni międzyfazowej. Najczęściej spotykane rozwiązania konstrukcyjne takich dystrybutorów stanowią symetryczne układy wielokanałowe określonego przeznaczenia [104, 156]. Innym rozwiązaniem są dystrybutory szczelinowe, których odmianą są wkłady dodatkowo wypełnione materiałem porowatym [146, 148]. W tym ostatnim przypadku wypełnienie stanowią materiały o porach rzędu mikrometrów lub plecionki demisterowe o podobnych wymiarach.

Znaczący zakres aplikacji porowatych materiałów strukturalnych obejmują również procesy reakcyjne prowadzone w aparatach o budowie strukturalnej [37, 199]. Aparaty te utożsamia się najczęściej z grupą reaktorów monolitycznych (tzw. katalizatorów), wyposażonych w ceramiczne wkłady o wielokanałowej strukturze, jak to na przykładzie katalizatorów spalin pokazano na rys. 2.6a, zaczerpniętym z pracy [92]. Oczywiście struktura wewnętrzna takich wkładów może być bardzo zróżnicowana, a ich wspólną cechą jest bardzo duży stopień efektywnej porowatości, przy jednoczesnym zachowaniu znaczącej powierzchni swobodnej dla przepływu gazów. Stanowi to niewątpliwie dużą zaletę procesową tego rodzaju materiałów.

Podobnymi cechami charakteryzują się tzw. piany metalowe o strukturze porowato-szkieletowej [49, 59]. Stanowią one elementy porowate o symetrycznej

strukturze w całej w swej objętości (rys. 2.6b), przy efektywnej porowatości rzędu 90%, co zależy od struktury komórek. Duża powierzchnia swobodna, a także duża dla przepływu płynów przestrzeń wzdłużna sprawiają, że piany te coraz częściej znajdują zastosowanie, jako wypełnienia strukturalne przepływowych wymienników ciepła i masy.

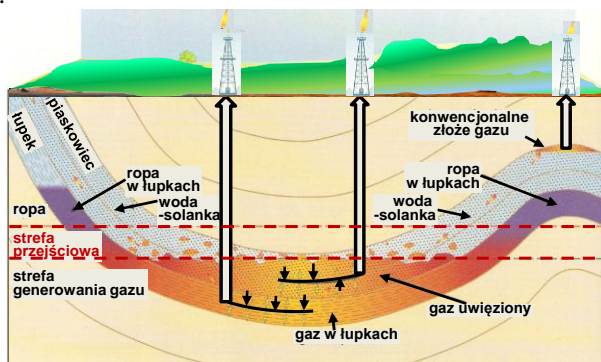


Rys. 2.6. Przykładowe monolity ceramiczne, za [49, 92]

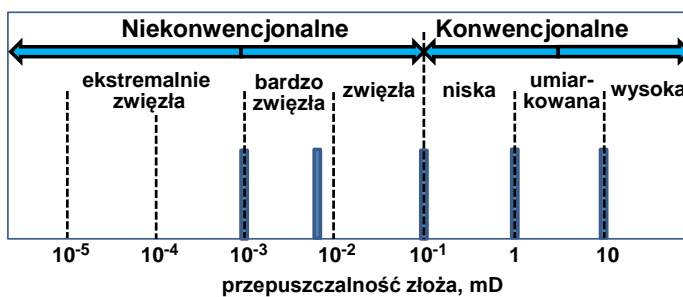
2.4. Przepływ przez szczelinowo-porowate materiały naturalne

W naturalnych warunkach przepływ płynów w porowatych strukturach powiązany jest z ruchem gazów i cieczy w złożach geologicznych [50]. Złoża te, jako pierwotne zasobniki (rys. 2.7) stanowią obszary migracji takich substancji jak ropa naftowa czy gaz ziemny, ale także ruchu innych cieczy i gazów, jak chociażby wodnych solanek, czy też metanu w górotworach węgla kamiennego.

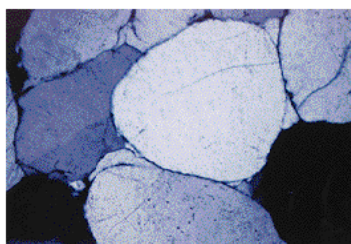
W odniesieniu do złóż gazu, warunki migracji są uzależnione od struktury podłoża skalnego [50, 110, 169], które względem przepuszczalności traktuje się jako konwencjonalne, bądź jako niekonwencjonalne – rys. 2.8. Złoża konwencjonalne cechują się naturalnie dużą przepuszczalnością, umożliwiającą migrację gazu w złożu rzędu kilku (i więcej) miliardarcy, natomiast złoża niekonwencjonalne związane są z występowaniem gazu w postaci silnie rozproszonej, w zamkniętych niewielkich (zwięzłych) porach skalnych – rys. 2.9. Ponieważ złoża te charakteryzują się jednocześnie znikomą porowatością (rzędu kilku procent), a zawarty w nich gaz jest uwięziony w zamkniętych mikroskopijnych porach, zakres przepuszczalności tego rodzaju złóż jest dużo mniejszy niż 0,1 mDa [66].



Rys. 2.7. Obszary migracji substancji w złożu geologicznym – na podstawie [139]



Rys. 2.8. Diagram przepuszczalności dla konwencjonalnych i niekonwencjonalnych naturalnych złóż gazu, na podstawie [50]

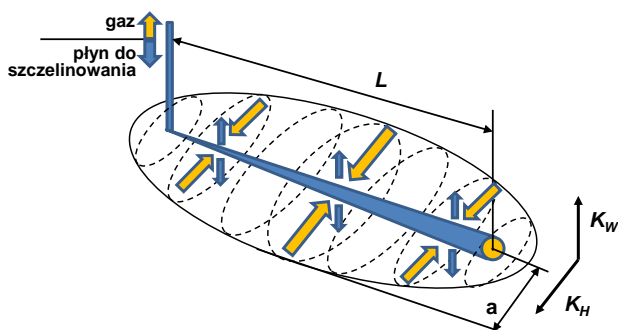


Rys. 2.9. Przekrój przez niekonwencjonalne złożo gazu ziemnego – ciemniejsze zabarwienia na granicy ziaren wskazują na przestrzenie (pory) zamknięte zawierające gaz, wg [75]

Bardzo ważnym czynnikiem determinującym zakres przepuszczalności złoża jest jego skład mineralny oraz rozprzestrzenienie w nim materii organicznej. W przypadku pokładów piaskowców i skał łupkowych, które charakteryzują się relatywnie bardzo małą przepuszczalnością (złoża niekonwencjonalne), uniemożliwia to w zasadzie swobodny przepływ gazu w ich wnętrzu [50]. Pozyskanie gazu uwięzionego w porowatych strukturach takich pokładów wymaga wówczas zastosowania specyficznego procesu technologicznego, jakim jest szczelinowanie hydrauliczne [62, 68, 172, 202].

Technologia ta polega na drążeniu otworów pionowych, nawet do głębokości ponad 3000 m (na takiej głębokości zalegają m.in. złoża gazu łupkowego w Polsce), a następnie drążeniu otworów poziomych – rys. 2.10.

Otwór o odcinku poziomym (długości L) pozwala penetrować złożo o przepuszczalności horyzontalnej (K_H) i przepuszczalności pionowej (K_W), tworząc strefę drenażu w postaci spłaszczonej elipsoidy. Celem wspomaganie tego procesu do otworów takich doprowadza się pod wysokim ciśnieniem płyn do szczelinowania (zawiesina wody z piaskiem), za pomocą którego rozluźnia się skały, uwalniając jednocześnie gaz. Zawarty w takim płynie piasek wnika w szczeliny złoża, dystansując jego strukturę, co zapewnia swobodny rozptyw gazu w całej strefie. Sposobem tym można „odprężyć” złożo w odległości nawet do $a = 150$ m od poziomej rury drenażowej, a zaletą też jest, że strefa ta jest znacznie większa niż analogiczny obszar oddziaływania dla otworu pionowego [62, 67, 142].



Rys. 2.10. Schemat selektywnego szczelinowania otworu poziomego – na podstawie [68, 74]

Warto dodać, że w zakresie technologii wydobywania gazu z łupków znaczący jest także „polski akcent”. Mianowicie, zespół badaczy z Wojskowej Akademii Technicznej opracował metodę [125], w której zamiast typowego płynu szczelinującego wykorzystuje się ditlenek węgla, za pomocą którego wypiera się gaz nie tylko ze skalistych szczelin, ale także z wnętrza struktury skały łupkowej. W szczegółowym rozwiązaniu, metoda ta polega na wtłaczaniu do złoża skroplonego ditlenku węgla, który rozprężając się wywołuje znacznie większe ciśnienie niż ma to miejsce przy tradycyjnym szczelinowaniu hydraulicznym. Dodatkowo do wtłaczanego gazu jest również piasek, który podtrzymuje powstałe pęknięcia przed ich ponownym zasklepieniem.

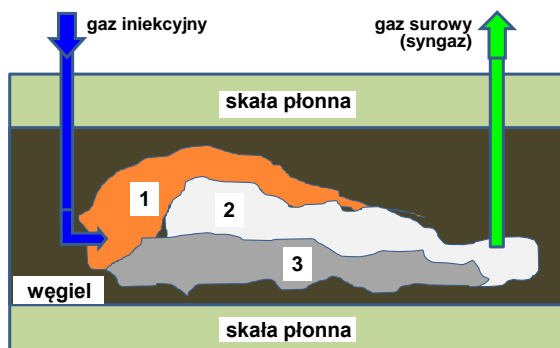
Innym, charakterystycznym dla naturalnych materiałów szczelinowo-porowatych zagadnieniem związanym z przepuszczalnością gazu jest proces odmetanowania złóż węgla [85, 95]. Proces ten (w ogólnym ujęciu), polega na wierceniu w porowatym górotworze otworów drenażowych, a przez mechaniczne wytworzenie różnicy ciśnień przekierowanie wydobywanego gazu do rurociągów systemu odmetanowania, a stąd bądź na powierzchnię do stacji odmetanowania, bądź (w systemach bezpieczeństwa) do szybu wydmuchowego powietrza wentylacyjnego. Skład oraz ilości metanu pozyskiwanego przez taki system uzależniony jest od sposobu prowadzenia procesu, wielkości sieci rurociągów tego systemu oraz licznych czynników fizycznych, jak m.in. głębokość złoża i jego przepuszczalność, ciśnienie, temperatura. Znaczna zachęta do realizacji procesu odmetanowania wynika też z faktu, że specyfika strukturalnej budowy węgla jako ośrodka szkieletowo-porowatego jest taka, że ilość zwartego metanu w węglu jest większa niż ilość gazu, jaka mogłaby być zawarta w tradycyjnym złożu o tej samej porowatości jak węgiel [68, 94].

W każdym z powyższych przypadków rozpoznanie warunków przepuszczalności porowatego złoża może w znacznym stopniu przyczynić się do lepszego zrozumienia mechanizmów przepływu i migracji gazów w danym złożu skalnym, co może też mieć związek z bardziej efektywnym wydobywaniem zasobów gazowych z naturalnych złóż geologicznych. Ma to tym większe znaczenie, że postępująca industrializacja powoduje coraz większe zainteresowanie gospodarki dodatkowymi zasobami surowców energetycznych.

2.5. Przepływ gazu w porowatych i szkieletowych strukturach materiałów z termicznego procesowania węgla

Współczesne technologie alternatywnego wykorzystania węgla jako surowca energetycznego coraz częściej odniesione są do możliwości stosowania niekonwencjonalnych technik jego przetwarzania, związanych z procesowaniem węgla *in situ*. Technologia podziemnego zgazowania węgla (*Underground Coal Gasification* – *UCG*) jest znana na świecie od ponad wieku i od lat testowana w różnych warunkach eksperymentalnych [14, 41, 52, 88, 151]. Istotną zaletą tej technologii jest to, że pozwala ona na bezpośrednie pozyskiwanie energii w miejscu zalegania węgla, natomiast sam proces przebiega analogicznie do tradycyjnych technik zgazowania węgla, choć jest od nich dużo bardziej skomplikowany i znacznie trudniejszy w realizacji [52, 81].

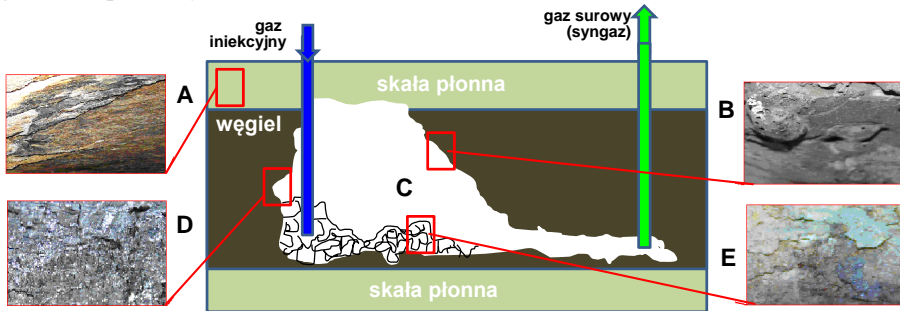
Technologia termicznego zgazowania węgla *in situ* realizowana jest w tzw. georeaktorze, którego przykładowy schemat – wraz z zaznaczeniem stref termicznych procesu zgazowania – przedstawiono na rys. 2.11. W przykładzie tym proces zgazowania węgla prowadzony jest przy udziale czynnika iniekcyjnego, którym może być np. powietrze. Generowany w takim procesie gaz surowy (tzw. syngaz), zawiera głównie takie składniki jak wodór, tlenek węgla, ditlenek węgla oraz metan i jest odprowadzany bezpośrednio ze strefy zgazowania węgla. Stosując termiczno-chemiczne procesowanie w warunkach podziemnego zgazowania węgla można wyprodukować gaz o wartości opałowej nawet do $14,5 \text{ MJ/m}^3$ [133].



Rys. 2.11. Strefy termicznego procesowania w georeaktorze (na podstawie [87]):
1 – spalanie i redukcja, 2 – zgazowanie, 3 – popiół

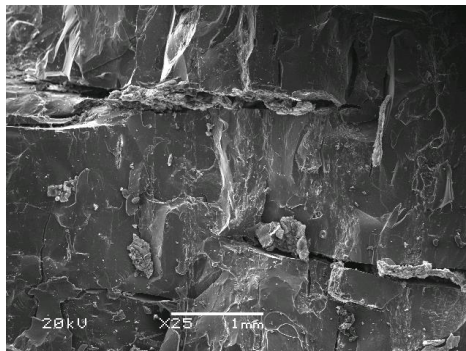
Kształt i obszar zajmowany przez zbiornik georeaktora zależy od struktury geologicznej usytuowania złoża węgla oraz otaczających go skał płonnych [130]. Najczęściej zawiera się on w obszarze skały płonnej, która otacza pokład węgla *in situ*, jak to pokazano na rysunku 2.12. Skała płonna – rys. 2.12(A) – stanowi w tym przypadku naturalny georeaktor, charakterystyczny dla skał osadowych zwięzłych i spoiстых. Podczas utleniania i zgazowania pokładu węgla po stronie skały płonnej tworzy się ściana georeaktora. Stanowi ją przetopiona skała płonna o zwartej strukturze, często w postaci szkliwa – rys. 2.12(B). Geo-

komora (kawerna) – rys. 2.12(C) – jest z kolei przestrzenią wypełnianą gazem surowym, migrującym w kierunku otworu produkcyjnego. Natomiast karbonizat – rys. 2.12(D) – jest „tymczasową” ścianą georeaktora, tworzącą się po przereagowaniu węgla kamiennego. Popiół skalny i żużel – rys. 2.12(E), jako substancje mineralne, występują w formie związków nieorganicznych. Z geologicznego punktu widzenia georeaktor posiada strukturę porowatą i jest przepuszczalny dla gazów kopalnianych.



Rys. 2.12. Obraz strukturalny georeaktora, na podstawie [130]:
 A – naturalna skała płonna, B – przetopiona skała płonna, C – kawerna, D – karbonizat (przereagowany węgiel), E – popiół i żużel (zdjęcia własne)

Następstwem częściowego lub całkowitego zgazowania węgla jest tworzenie się karbonizatu. Przykładową strukturę takiego karbonizatu pokazano na rys. 2.13. Widoczna jest anizotropowa struktura tego produktu, na całej powierzchni objawiająca się nieregularnym układem kanalików i szczelin, stanowiących dodatkowe przestrzenie dla przepływu gazu.



Rys. 2.13. Obraz SEM typowego karbonizatu *in situ*

Typowe techniki procesowe wynikające z technologii podziemnego zgazowania węgla można znaleźć w wielu opracowaniach tematycznych, których syntetyczny opis podano też w pracy własnej [186]. W literaturze dość często wyraża się przy tym pogląd, że w każdych warunkach dla uzyskania zadanej jakości i składu syngazu z georeaktora niezbędne jest opracowanie szczegóło-

wych technologii dla każdego złoża węgla, co także wiąże się z poszukiwaniem skutecznych sposobów oceny jakości wytwarzanych produktów gazowych. Na kilka takich projektów wskazano w tabeli 2.2. W tym kontekście dużego znaczenia nabierają działania związane z rozpoznaniem kryteriów ruchu gazu w złożu porowatego georeaktora.

Tabela 2.2

Komercyjne przedsięwzięcia w zakresie technologii UCG, wg [38]

Instytucja	Charakter projektu	Miejsce	Moc cyklu i paliwa
Laurus Energy Inc.	pilotowy	Ameryka Północna	300 MW, wodór na potrzeby rynku przemysłowego
Linc Energy Ltd. & Ergo Exergy Technologies Inc.	badawczy	Leigh Creek (Australia)	gaz do turbin gazowych, produkcja ultra czystego oleju napędowego
	demonstracyjny	Chinchila (Australia)	ocena składu surowego gazu do zastosowania w turbinach gazowych
Cougar Energy	badawczy	Kingaroy (Australia)	400 MW
Carbon Energy	badawczy	Bloodwood Creek (Australia)	5 MW, testy silników gazowych
Eskom	demonstracyjny	Majuba (RPA)	(100–140) MW
UK Samwell	pilotowy	Mongolia	1000 MW

3. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW PROCESOWYCH

Duża różnorodność złożeń porowatych, zarówno w aspekcie ich wykorzystania w technologii przemysłowej, jak i występowania w środowisku naturalnym sprawia, że problematyka przepływu płynów, przez tego rodzaju materiały jest niezwykle złożona i wciąż nie do końca poznana. Literatura przedmiotu jest jednocześnie dość urozmaicona w swej tematyce, w której większy nacisk jest położony na aplikacyjne rozpoznanie hydrodynamiki przepływu płynów przez porowate złoża (czy to ziarniste, czy też szkieletowe), aniżeli na badania podstawowe.

W odniesieniu do problematyki przepływu gazu przez złoża porowate, stanowiącej podstawowy zakres niniejszego opracowania, zagadnienia procesowe rozpatrzono w trzech kategoriach, poprzez:

- a) opis mechanizmów ruchu gazu w strukturach porowatych,
- b) przegląd badań w zakresie wybranych sposobów opisu hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża porowate,
- c) opis sposobów pomiaru gazoprzepuszczalności złożeń porowatych wraz ze wskazaniem na metody oceny tej gazoprzepuszczalności.

Każde z tych zagadnień w niezależny sposób niesie z sobą istotne znaczenie dla poszerzenia wiedzy w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu w ośrodkach o porowatej strukturze.

3.1. Mechanizm przepływu gazu w strukturach porowatych

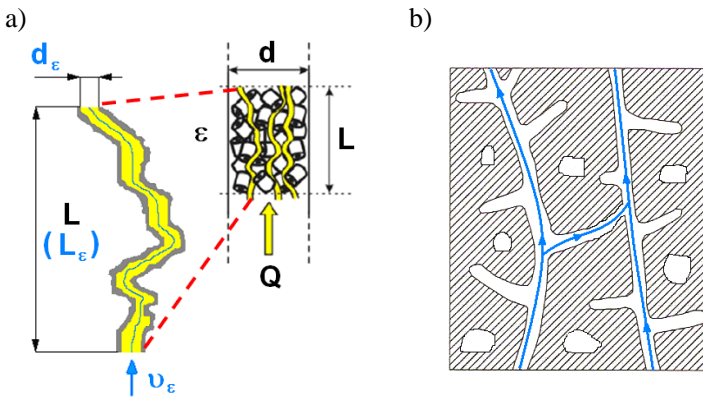
Każdy ośrodek porowaty cechuje się określoną porowatością, a jego struktura przepływowa uzależniona jest zarówno od tej porowatości, jak i od rozmiaru (średnicy) kanalików i ich kształtu – przy danej długości kanalika. Drugą specyficzną cechą ciał porowatych jest ich zdolność do magazynowania i transportowania płynów wskutek działania sił zewnętrznych i wewnętrznych. Aksieliud i Altszuler [1] 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 kilku dziesiątych mikrometrów, zjawiska te są ograniczane przez fizykochemiczne i dyfuzyjne oddziaływania mechaniczne zachodzące na granicy faz. Fakt ten znajduje potwierdzenie także w pracach innych autorów [46, 120], przy czym rozbieżność między tymi zjawiskami zanika, gdy utrzymana jest duża intensywność (burzliwość) ruchu gazu.

W hydrodynamicznym ujęciu mechanizm przepływu gazu w złożach porowatych jest ściśle powiązany ze strukturą geometryczną samego ośrodka porowatego. Poza wymienionymi czynnikami odnośnie rozmiaru i kształtu kanalików, mechanizm ten zależy także od tzw. krętości kanalików, opisaney ilorazem rzeczywistej drogi przepływu (L_e) do jej wartości wynikającej jedynie z grubości warstwy porowatego złoża (L), tj.:

$$\kappa = \frac{L_\varepsilon}{L} \quad (3.1)$$

Wyróżnić przy tym można dwa zasadnicze przypadki przepływu płynu w złożach porowatych – rys. 3.1. Pierwszy, gdy przepływ ten odnosi się do złoża porowatego o strukturze ziarnistej (rys. 3.1a), oraz drugi – gdy materiał porowaty stanowi sztywną szkieletową strukturę z porami i kanalikami (rys. 3b).

W pierwszym przypadku ma się do czynienia z przepływem w przestrzeni wolnej pomiędzy ziarnami i można przyjąć, że cała przestrzeń wynikająca z danej porowatości jest przestrzenią aktywną dla przepływu płynu. W drugim natomiast przypadku (rys. 3.1b), przepływ zachodzi jedynie wewnątrz porów i kanalików stanowiących o porowatości szkieletowej struktury. Ponieważ w strukturze takiej część porów może być zamknięta (a często wprost ślepa), przepływ przez taki materiał jest ograniczony jedynie do przestrzeni kanałów otwartych (efektywnych), czyli wzajemnie ze sobą połączonych. Dodatkowa złożoność hydrodynamiki wynika także z faktu, że struktury szkieletowe stanowią złoża zwarte (sztywne), w żaden sposób niemogące być rozluźnione podczas wzrostu ciśnienia w układzie.



Rys. 3.1. Schemat przepływu płynu przez złożo porowate:

a) ziarniste (kręty kanalik), za [99]; b) o sztywnej budowie szkieletowej z otwartymi kanałami przepływowymi oraz porami ślepyimi i zamkniętymi, wg [168]

W konsekwencji, opory przepływu podczas opływu krętych przestrzeni będą różniły się od oporów przepływu przez strukturalnie zamknięte kanaliki, a odstępstwo to będzie tym większe im większa będzie krętość kanalików. Według Lambego i Whitmana [99], miarą tego odstępstwa może być m.in. współczynnik oporów o pewnej zastępczej (ekwiwalentnej) wartości, wynikający z hydrodynamiki przepływu gazu przez tego rodzaju struktury, gdy znana jest porowatość złoża (ε), średnica zastępcza kanalików (d_ε) i ich kształt, a także rzeczywista długość drogi przepływu (L_ε), wynikająca z krętości kanalików przepływowych.

Stosowane do określania struktury ośrodków porowatych modele porów krętych są wykorzystywane w różnych obszarach wiedzy, najczęściej w ocenie

przepuszczalności ziarnistych struktur gleby [21, 36 168, 198]. Z kolei w odniesieniu do złóż szczelinowo-porowatych, chociażby jak w formacjach łupkowych, istotny wpływ na warunki przepływu gazu ma w opinii autorów prac [22, 62, 122, 171] struktura porowatości złoża, wynikająca dodatkowo z kształtu kanalików i kapilar. Proponowane przez tych autorów rozwiązania modelowe bazują w zasadzie na formie wzajemnych powiązań między kapilarami i opierają się na następujących założeniach ich kształtu (tabela 3.1):

- a) modele kapilar kołowo-symetrycznych o jednorodnym kształcie, w tym:
 - Burdinego – kapilara cylindryczna o stałym promieniu,
 - Mualema – dwie związane wzajemnie kapilary o zróżnicowanych promieniowo wymiarach,
 - Michaelisa – kołowo-stożkowy kształt kapilary,
 - Petersena – model kapilary o hiperbolicznym przekroju wzdłużnym,
- b) modele strukturalne (podwójne) zakładające, że dominujący przepływ gazu zachodzi przez symetryczną matrycę porowatą, a szczeliny między nimi są znikomej przepuszczalności,
- c) modele tzw. struktur wielokrotnych, charakterystyczne dla nieustalonego przepływu gazu z porowatej matrycy do słabo przepuszczalnych szczelin, determinujące warunki hydrodynamiczne w stosunkowo długim okresie (na przestrzeni lat).

Pierwsza grupa tych modeli, zgodnie z modelem zaproponowanym przez Burdinego [21], wykorzystuje najprostszą geometrię porów jaką jest cylindryczny kształt kanalików przepływowych (tab. 3.1a). Jakkolwiek element bazowy tego modelu składa się jedynie z cylindrycznej kapilary o stałym promieniu, to w wielu przypadkach jest z powodzeniem wykorzystywany w obliczeniach procesowych wymiany ciepła i masy [64, 116].

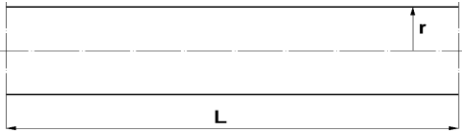
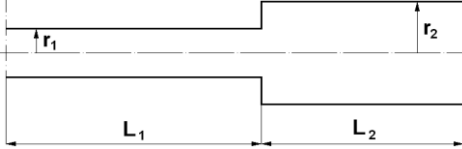
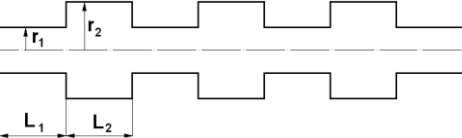
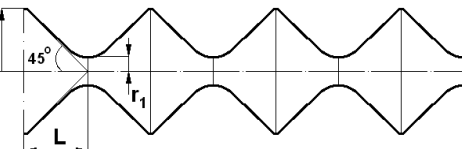
Z kolei model kapilarny zaproponowany przez Mualema (tab. 3.1b), wykorzystuje do opisu konfiguracji porowatego złoża dwie powiązane ze sobą kapilary o odmiennych promieniach. W modelu tym (z założenia) stosunek przekrojów kapilar jest wartością stałą dla całego analizowanego złoża.

Michaelis [111] rozbudował model Mualema, przyjmując, że kapilara jest zbudowana z szeregowo połączonego zespołu kołowo-symetrycznych porów o dwóch różnych średnicach, przy czym pory te połączone są ze sobą przemienicznie (tab. 3.1c).

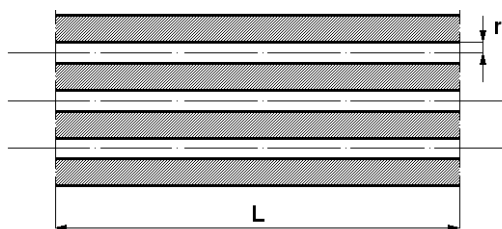
Dużo bardziej skomplikowany model kapilary o okresowo zmiennym przekroju zaproponował Petersen – [196]. Stanowi ją kołowo symetryczna powierzchnia utworzona z obrotu wycinków hiperboli wokół jej osi (tab. 3.1d). Poszczególne odcinki takiej kapilary (segmenty o większej i mniejszej średnicy) połączone są ze sobą naprzemiennie. Grunewald [63] wykazuje, że model tej postaci znacznie lepiej aniżeli model Michaelisa odzwierciedla strukturę kapilary rzeczywistej, czego wyrazem jest fakt, że zmiana średnicy poszczególnych segmentów jest w tym przypadku płynna, a nie skokowa.

Tabela 3.1

Charakterystyka modeli kapilarnych

	Rodzaj modelu	Charakterystyka
a)	Model kapilary cylindrycznej Burdinego [21]	
b)	Model kapilary przewężeniowej Mualema [122]	
c)	Model kapilary wielokrotnej Michaelisa, wg [111]	
d)	Model kapilary kołowo-symetrycznej Petersena, wg [196]	

Rozszerzeniem modeli kapilar kołowo-symetrycznych o jednorodnym liniowym kształcie są modele strukturalne (podwójne), wg założenia których przepływ płynu zachodzi przez symetrycznie porowatą matrycę utworzoną z zespołu kapilar o kształcie kołowo-symetrycznym – rys. 3.2. Sam kształt kapilar może w tym przypadku przybierać inną formę o jednorodnym kształcie. Aksielrud, Altszuler [1] wymieniają na przykład modele ze strukturą kapilarno-porowatą o postaci ziaren kulistych, charakterystycznych dla złoża ziarnistego.



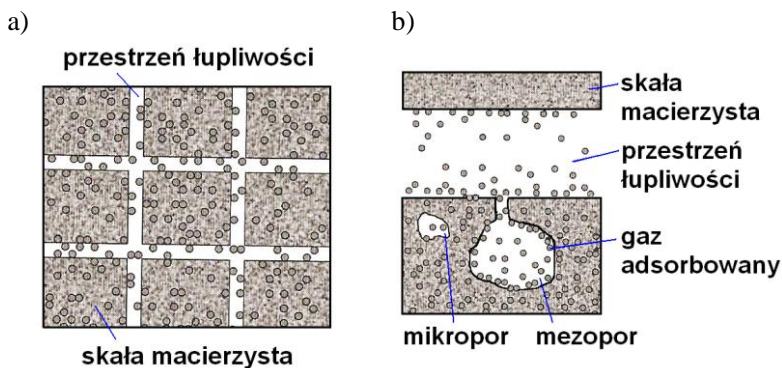
Rys. 3.2. Model strukturalny kapilarnego ciała porowatego, za [1]

W odniesieniu do szkieletowych materiałów porowatych, chociażby jak np. węgla i jego karbonizatów, zjawiska hydrodynamiczne podczas przepływu gazu istotnie zależą zarówno od struktury porów, jak i sił (mechanizmów) wpływających na ten przepływ. Tytułem przykładu na rys. 3.3 – za autorami pracy [158] – przedstawiono modelowy schemat porowatej struktury węgla, z oznaczeniem spodziewanych mechanizmów procesowych.



Rys. 3.3. Model porowatej struktury węgla, wg [158]

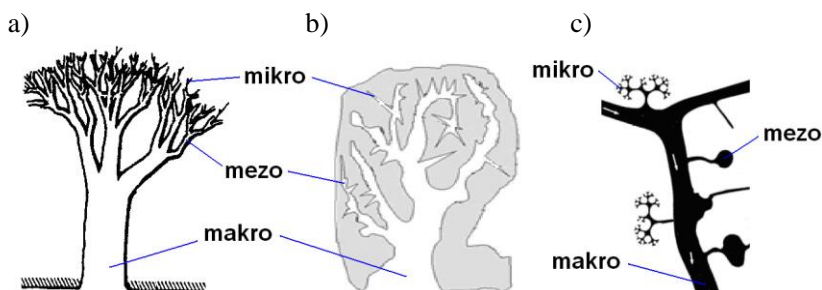
W przypadku tym ruch gazu odbywa się w licznych mikrokanalach o krętym i bardzo skomplikowanym kształcie, także w systemie połączonych ze sobą kanałów o bardzo zróżnicowanej geometrii. Ze względu na stopień powiązania, znajdujący się w takim ośrodku gaz można podzielić na gaz wolny, wypełniający pory i szczeliny oraz gaz związany z materiałem fizykochemicznie poprzez procesy sorpcyjne – rys. 3.4. Ilość wolnego gazu zależy przy tym od porowatości złoża, stopnia nasycenia porów gazem oraz ciśnienia złożowego. Natomiast ilość gazu związanego zależy głównie od sorpcyjnych właściwości ośrodka porowatego, ale także temperatury i ciśnienia złoża.



Rys. 3.4. Model porowatej struktury węgla, za [102]:
a) modelowa matryca złoża, b) element matrycy

Filtracyjny transport gazu w systemie makroporów o takiej strukturze wiąże się ze znaczną modyfikacją ciśnienia porowego, które decyduje jednocześnie o przebiegu dyfuzji gazu [176]. W warunkach *in situ* wpływ ciśnienia zewnętrznego (górotwór) oraz ciśnienia gazu mogą powodować zmianę struktury porowej złoża. Wynika to z faktu, że węgiel można traktować jako układ biporowaty, w którym strefy mikroporów są sprężane przez duże ciśnienie płynów, jak np. ditlenku węgla, metanu, wody, zalegających w porach takiego układu. W konsekwencji następuje zmiana geometrii makroporów albo makropory zwężają się w związku z występowaniem zjawisk sorpcyjnych, co znacząco wpływa na przepuszczalność złoża.

W ogólnym ujęciu taki system złoża porowatego może mieć budowę zwartą, jednolitą oraz zawierającą spękania i szczeliny, tworząc tzw. fraktalny system przepływu. Reich i wsp. podają [152], że dla systemu takiego gazoprzepuszczalność wzrasta, natomiast Kovacek i Radke [93], a także Dyląg i Rosiński [48] wskazują, że zagadnienie przepływów gazu w ujęciu fraktalnym, może być reprezentowane przez strukturę drzewiastą, zgodnie do modelu Simonsa [161]. W modelu tym, pełniące funkcję transportująco-magazynującą mezopory są odgałęzieniami makroporów, a mikropory odgałęzieniami mezoporów, jak to zobrazowano na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Fraktalny system przepływu i funkcje jego struktury drzewiastej:
a) transportująca [161], b) magazynująca [125], c) transportująco-magazynująca [57]

Wypływ gazu z tego typu ośrodków szczelinowo-porowatych powoduje zarazem obniżenie ciśnienia w złożu, co wiąże się ze zmianą przepuszczalności. Z drugiej strony przepływ gazu w naturalnych złożach kopalnych jest znacznie bardziej złożony, gdyż łączy w sobie praktycznie wszystkie możliwe formy i mechanizmy. Wynika to z faktu, że w procesie uwalniania i przepływu gazu w ośrodku szczelinowo-porowatym mogą występować jednocześnie takie zjawiska jak redukcja ciśnienia, dyfuzja i desorpcja, czy migracja międzyszczelinowa gazu. Oczywiście, w znaczeniu mechanicznym oraz energetycznym zjawiska desorpcji i filtracji są ze sobą ściśle związane, co jeszcze bardziej komplikuje mechanizmy ruchu gazu w takim złożu. Na niektóre wynikające stąd formy ruchu gazu wskazano na rys. 3.6, zaczerpniętym z pracy Hagoorta [68].



Rys. 3.6. Formy strukturalne i modele ruchu gazu w ośrodku szczelinowo-porowatym, za [68]

W ujęciu szczegółowym mechanizmy transportu gazu, jakie w określonych warunkach termodynamicznych dominują w ośrodku porowato-szczelinowym są najczęściej weryfikowane względem strumienia. Na przykład Rose (wg [203]) wyróżnia ruch płynu w porowatym złożu jako:

- subkapilarny, gdy ruch wymuszony jest ciśnieniem ale jednocześnie odbywa się przy podwyższonej temperaturze,
- kapilarny, występujący pod wpływem sił kapilarnych, jak również napięcia powierzchniowego,
- nadkapilarny, zachodzący pod wpływem sił ciężkości, a opisywanego ogólnymi prawami hydrauliki.

Z kolei Werner i Gertis [195] wyróżniają następujące formy transportu gazu w porowatych strukturach:

- przepływ laminarny, który ma miejsce gdy wzajemne zderzenia molekuł zachodzą w zakresie promienia kapilar,
- dyfuzja, która zachodzi jako proces samoczynnego mieszania się cząstek gazu, aż do pełnego wyrównania składu,
- transport Knudsena, definiowany jako liczba zderzeń cząsteczki ze ściankami porów, odniesiona do pełnej liczby wzajemnych zderzeń między cząsteczkami.

W literaturze można również natrafić na statystyczno-fizyczne modele opisujące przebieg procesu przepływu płynów w strukturach porowatych, czego przykłady można znaleźć m.in. w pracach [46, 83, 116, 120, 121, 182]. Jednakże i tu zachodzących zjawisk hydrodynamicznych nie sposób znaleźć w postaci jednoznacznego opisu matematycznego. Główną tego przyczyną jest znaczne zróżnicowanie geometrii ośrodków szczelinowo-porowatych, w tym zmienność kształtu porów przepływowych, a także skomplikowana i trudna do jednoznacznego opisu sieć połączeń między kanalikami biorącymi aktywny udział w przepływie gazu.

3.2. Hydrodynamika przepływu gazu przez struktury porowate

W ujęciu fenomenologicznym przepływ płynu przez ośrodek porowaty może być podporządkowany różnym kryteriom hydrodynamicznym, co zależy od struktury ośrodka, rodzaju płynu (jedno- i wielofazowy) oraz sposobu wymuszania przepływu (grawitacyjny, ciśnieniowy). Liczne w tym względzie publikacje, obszernie analizowane m.in. w pracach Strzeleckiego [168], Piecucha [137], Orzechowskiego [132], czy Błaszczyk [17], 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 złoża ziarniste, zgodnie z prawem Darcy'ego [13]. Nie wyczerpuje to oczywiście wielu innych przypadków ruchu płynów przez ośrodki porowate. Dla warunków burzliwego ruchu cieczy wyróżnić chociażby należy modele Forchheimer [3] i Erguna [54]. Bardziej zaawansowany opis przepływu dla przestrzennego układu kapilar w postaci wiązki krętych kanalików odnajdujemy również w modelu Kozeny-Carmana [86]. W literaturze przedmiotu znajdują się także podejścia opisu hydrodynamiki ruchu płynów jedno- i wielofazowych przez ośrodki porowate, uwzględniające wpływ zarówno właściwości płynów jak i rodzaju ośrodka porowatego na przepływ przez złoża ziarniste [17, 83, 137].

Celem oceny przydatności tych modeli do opisu hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża porowate, poniżej bardziej szczegółowo scharakteryzowano wybrane postaci modeli i metod obliczeniowych, jakie w dużej mierze stanowią podstawę interpretacji zagadnień procesowych wynikających z tego opisu. Podkreślić jednak należy, że w literaturze przedmiotu opublikowano nieliczne jak dotąd prace odnoszące się do przepływu gazu przez złoża porowate, a jeżeli już, to w pracach tych koncentrowano się głównie na badaniach i identyfikacji zjawisk zachodzących przy przepływie gazu przez złoża ziarniste (luźno usypane), najczęściej w kolumnie wypełnionej materiałem porowatym. Nieliczne prace odnoszą się natomiast do badań przepuszczalności gazu przez materiały porowate o budowie sztywnej (szkieletowej).

Charakterystyczny dla obu tych obszarów przegląd dostępnego materiału literaturowego odnoszącego się do badań hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża porowate scharakteryzowano w tabeli 3.2. Z kolei na rys. 3.7 – zgodnie do zestawienia podanego w tej tabeli – przedstawiono wyniki niektórych z tych badań w zakresie oceny oporów przepływu przez takie złoża. Należy nadmienić, że w zestawieniu tym uwzględniono jedynie prace, w których podano wyniki badań, bądź zawarte w nich dane umożliwiały przeliczenie oporów przepływu przy danej prędkości pozornej gazu, tj. liczonej na pełny przekrój kolumny.

Przedstawione na rys. 3.7 wyniki wskazują na bardzo zróżnicowane charakterystyki obliczeniowe oporów przepływu, co zależy nie tylko od rodzaju złoża, ale także od zakresu przepuszczalności oraz struktury danego złoża i jego porowatości. Wpływ na to ma też niewątpliwie fakt, że wynikające z hydrodynamiki przepływu gazu przez ośrodki porowate parametry procesowe są przez różnych autorów niejednakowo interpretowane, co znacznie utrudnia ich wzajemne porównanie.

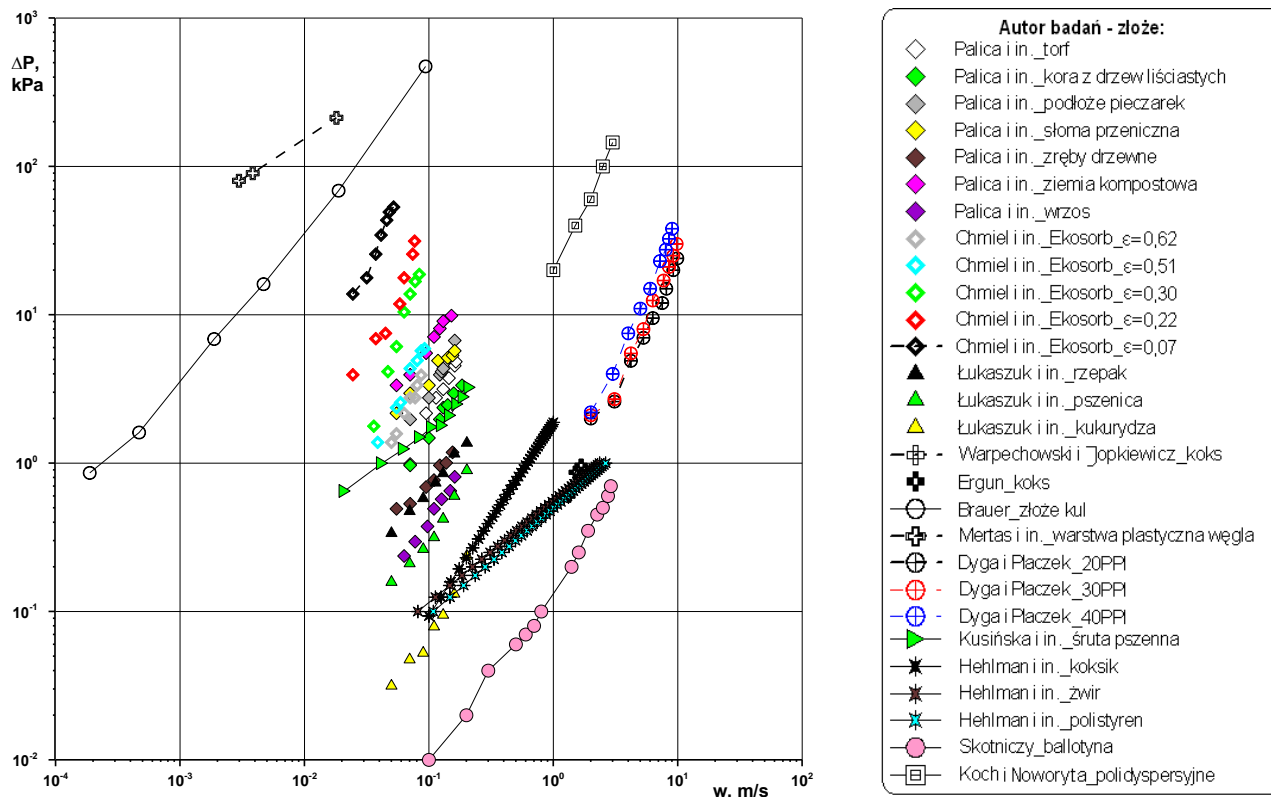
Tabela 3.2

Opracowania odnoszące się do badań hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża ziarniste i porowate

Lp.	Autor	Rodzaj gazu	Charakterystyka złoża						Prędkość gazu w_o , m/s
			Rodzaj materiału	Wysokość złoża H , m	Średnica kolumny (złoża) D , m	Średnica ekwiwalentna ziarna (porów) d_e , m	Pole przekroju próbki A , m^2	Porowatość (złoża) ε	
1.	Ergun [54]	CO ₂ , N ₂ , CH ₄ , H ₂	koks	0,95	0,724		0,4117	0,42	1,33–1,67
2.	Brauer [20]	powietrze	usypane kule	0,50	-	0,0024	0,5000	0,32	0,01–1,48
3.	Koch, Noworyta [91]	powietrze	polidispersyjny (ogólnie)	0,60	-	0,0024	0,0010	0,32	1,00–3,00
4.	Palica i in. [134]	powietrze	torf kwaśny	0,45	0,175	-	0,0240	0,47	0,07–0,16
			kora z drzew liściastych					0,65	0,07–0,18
			torf (podłoże)					0,75	0,07–0,16
			słoma pszeniczna					0,93	0,05–0,16
			zrębki drewniane					0,68	0,05–0,15
			ziemia kompostowa					0,62	0,05–0,15
			suche pędy wrzосу					0,93	0,06–0,16
5.	Chmiel i in. [32]	powietrze	Ekosorb-100	0,45	0,175	0,0240	0,0005	0,62	0,05–0,08
							0,0008	0,51	0,03–0,09
							0,0021	0,30	0,03–0,08
							0,0029	0,22	0,02–0,07
							0,0167	0,07	0,02–0,05
6.	Warpechowski, Jopkiewicz [194]	powietrze	koks	0,95	0,380	0,0330	0,0476	0,42	1,33–1,67

cd. tabeli 3.2

Lp.	Autor	Rodzaj gazu	Charakterystyka złoza						Prędkość gazu w_o , m/s
			Rodzaj materiału	Wysokość złoza H , m	Średnica kolumny (złoza) D , m	Średnica ekwiwalentna ziarna (porów) d_e , m	Pole przekroju próbki A , m^2	Porowatość próbki (złoza) ε	
7.	Skotniczy [163]	powietrze	kulki szklane (ballotyna)	0,04	0,110	0,0050	-	-	0,10–2,90
8.	Hehlmann i in. [71]	powietrze	koksik	0,20		0,0049		0,61	0,10–1,00
		powietrze	żwir	0,20		0,0043		0,37	0,10–1,00
		powietrze	polistyren	0,20		0,0023		0,38	0,10–1,00
9.	Mertas i in. [113]	N ₂	ziarna węgla (uplastycznionego)	0,08	0,020	-	0,0003	-	0,003 – 0,018
10.	Dyga, Płaczek [49]	powietrze	piana aluminium:	1,00	0,020		0,0003		
			20PPI			0,00345		0,93	2,00–9,90
			30PPI			0,00225		0,95	2,00–9,80
			40PPI			0,00230		0,93	2,00–9,00
11.	Lech [101]	CO ₂	CaO	(47,5–49,5) · 10 ⁻³	(45,8–48,7) · 10 ⁻³	(0,67–1,08) · 10 ⁻⁶	-	0,51–0,61	-
12.	Blicharski, Smulski [16]	CO ₂ , Ar	skały	25,4 · 10 ⁻³	25,4 · 10 ⁻³	-	500 · 10 ⁻⁶	0,049	-
13.	Łukaszuk i in. [106]	powietrze	rzepak	0,95	0,196	0,00186	0,0121	0,40	0,05–0,20
			pszenica			0,00410	0,0142	0,47	0,05–0,25
			kukurydza			0,00785	0,0130	0,43	0,05–0,25
14.	Kuśińska i in. [98]	powietrze	śruta pszenna	10	0,196	0,004	0,0302	-	0,021–0,21



Rys. 3.7. Zestawienie wyników badań oporów przepływu gazu przez złoże ziarniste i porowate – zgodnie z tabelą 3.2

Przy ocenie oporów przepływu najczęściej korzysta się z analogii do przepływu przez kanały zamknięte, zgodnie z równaniem Darcy-Weisbacha

$$\Delta P = \lambda_e \frac{\rho_f v_e^2}{2} \frac{L}{d_e} \quad , \quad (3.2)$$

w którym współczynnik oporu

$$\lambda_e = f(Re) = a Re^{n-2} \quad , \quad (3.3)$$

przy wartości liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{v_e d_e \rho_f}{\eta_f} \quad . \quad (3.4)$$

Współczynniki obliczeniowe tego równania są definiowane w rozmaity sposób, zależnie od rozpatrywanych warunków procesowych. Serwiński [159] podaje na przykład, że dla laminarnego ruchu płynu wykładnik $n = 1$, natomiast gdy przepływ jest burzliwy $n = 1,75$, co odpowiada równaniu Blasiusa na współczynnik oporu przepływu

$$\lambda_e = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad . \quad (3.5)$$

Taki sposób podejścia ma tę niedogodność, że wymagane do oceny hydrodynamiki przepływu płynu przez porowate złoża parametry, takie jak średnica zastępcza (d_e), współczynnik oporu przepływu (λ_e) – jako funkcji liczby Reynoldsa, a także prędkość rzeczywista płynu (v_e), są wyznaczone w odniesieniu do pojedynczej kapilary (rys. 3.1a). Z uwagi na zróżnicowaną konfigurację porowatego złoża, prowadzi to do znacznych rozbieżności wyników obliczeń względem eksperymentu, a często wręcz uniemożliwia przeprowadzenie obliczeń z powodu braku odpowiednich danych. Liczne w tym względzie modyfikacje, jak i przyjęta metodologia obliczeń, uzależnione są od rodzaju oraz struktury porowatego złoża.

Jedną z popularniejszych w tym względzie modyfikacji jest równanie Levy'ego i wsp. [97, 159]

$$\Delta P = \lambda_f \frac{\rho_f w_o^2}{2} \frac{L}{d_e} f(\varepsilon, \phi) \quad , \quad (3.6)$$

w którym funkcja

$$f(\varepsilon, \phi) = \frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \phi^{3-n} \quad , \quad (3.7)$$

opisuje wpływ porowatości złoża i kształtu wypełnienia na spadek ciśnienia.

W metodzie tej zastępcza średnica ziarna (elementu wypełnienia) odniesiona jest do średnicy kuli o tej samej objętości, co objętość ziarna, natomiast hydrodynamika strugi odniesiona jest do prędkości pozornej płynu (w_o), liczonej na pełny przekrój złoża (np. kolumny). Współczynnik oporów przepływu (λ_f) jest zdefiniowany analogicznie do równania (3.3), przy wartości liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{w_o d_e \rho_f}{\eta_f} \quad . \quad (3.8)$$

Przy tych warunkach wykładnik potęgi w równaniach (3.3) i (3.7) przyjmuje wartość $n = 1$ dla ruchu uwarstwionego, oraz $n = 2$ dla przepływu burzliwego. Z badań doświadczalnych wynika także, że ruch uwarstwiony ma miejsce gdy $Re < 10$, w przedziale $10 < Re < 100$ występuje ruch przejściowy, natomiast gdy $Re > 100$ przepływ płynu ma charakter burzliwy.

Wynikające z tych zakresów zależności dla szczegółowego obliczania współczynnika oporów są następujące [159]:

a) dla ruchu laminarnego

$$\lambda_f = \frac{\delta_1}{Re} = \frac{400}{Re} \quad , \quad (3.9)$$

b) dla ruchu turbulentnego

$$\lambda_f = \frac{\delta_2}{Re^{0,1}} \quad , \quad (3.10)$$

przy wartości współczynnika chropowatości od $\delta_2 = 7$ dla powierzchni gładkich, do $\delta_2 = 16$ – w przypadku powierzchni bardzo szorstkich.

Jakkolwiek z założenia metoda Levy'ego jest odniesiona do oceny oporów przepływu gazu przez suche warstwy wypełnienia w aparatach kolumnowych, to nierzadkie są też przypadki jej wykorzystania do oceny hydrodynamiki złoż z ziarnistych. Każdorazowo metoda ta wymaga wówczas uprzedniej oceny charakterystycznych dla porowatego złoża parametrów, takich chociażby jak porowatość złoża, kształt i średnica wypełnienia, współczynnik oporów przepływu. Traktując te parametry jako stałe dla danego złoża, równanie (3.6) można wówczas zapisać w uproszczonej formie

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha_e \frac{g_o^2}{\rho_f} = \alpha_e \rho_f w_o^2 \quad , \quad (3.11)$$

którą często stosuje się w rachunku korelacyjnym. Występujący w tym równaniu współczynnik obliczeniowy α_e (m^{-1}) obejmuje w swej ogólnej postaci wszystkie parametry, jakie wynikają z konfiguracji geometrycznej porowatego złoża – zgodnie z równaniem (3.6).

Odmianą od powyższych metodologię postępowania zaproponował Ergun [54]. Autor ten opiera mianowicie swój model o doświadczalnie wyznaczony współczynnik oporu przepływu, zgodnie z formułą

$$\lambda_f = 1,75 + \frac{150}{Re} \quad . \quad (3.12)$$

Według Dziubińskiego [51], formuła ta przy wartości liczby Reynoldsa zdefiniowanej jako

$$Re = \frac{w_o d_e \rho_f}{(1 - \varepsilon) \eta_f} \quad , \quad (3.13)$$

całościowo charakteryzuje hydrodynamikę przepływu płynu przez złożę porowate, zarówno w zakresie przepływu laminarnego jak i burzliwego,

Z wyrażenia (3.12) wynika, że w zakresie ruchu laminarnego, kiedy liczba Reynoldsa przybiera małe wartości ($Re < 10$), składowa współczynnika odpowiedzialna za tarciove opory przepływu przybiera wielokrotnie większą wartość, aniżeli ma to miejsce w przypadku rozwiniętego ruchu burzliwego ($Re > 10^3$), gdy wartość ta niewiele odbiega od stałej równania (3.12). Przy tych założeniach modyfikacja równania Darcy-Weisbacha ma postać

$$\frac{\Delta P}{L} \frac{d_e}{\rho_f w_o^2} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = 1,75 + \frac{150}{Re} \quad (3.14)$$

Po uwzględnieniu (3.13) i uporządkowaniu danych otrzymuje się wyrażenie na jednostkowe opory przepływu przez warstwę porowatego złoża

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{w_o \eta}{d_e^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f w_o^2}{d_e} \quad (3.15)$$

często wykorzystywane w obliczeniach oporów przepływu gazu przez luźno usypane nieruchome wypełnienie, albo też złożę ziarniste.

Z wyrażenia tego wynika, że przy dominacji ruchu laminarnego opory przepływu wskutek tarcia są proporcjonalne do członu $(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3$, zaś przy narastającej burzliwości proporcja ta zmienia się do $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$.

Warto odnotować, że także w tym ujęciu niezbędna jest znajomość zastępczej średnicy elementów złoża (d_e). Chcąc ominąć tę niedogodność Ergun, opierając się na teorii modeli kapilarnych i empirycznych analizach statystycznych, wyznaczył odpowiednie stałe, jakie wynikają ze zjawiska przepuszczalności złoża ziarnistego. Rozwinięte w ten sposób równanie opisujące jednostkowe opory przepływu ma wówczas postać

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(k S_o^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \eta_f w_o \right) + \left(\frac{1,75}{\sqrt{150}} \sqrt{k S_o^2} \frac{1}{(1-\varepsilon)} \left(\sqrt{\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}} \right)^2 \rho_f w_o^2 \right) \quad (3.16)$$

gdzie k i S_o oznaczają stałe wyznaczone na drodze doświadczalnej, charakterystyczne dla przepuszczalności złoża w postaci nieruchomego wypełnienia. Koch i Noworyta [91], powołując się na Wakemana [184], zauważają przy tym, że w strefach przyściennych porowatość w warstwie takiego złoża może być większa, aniżeli bliżej rdzenia. Fakt ten może rzutować na niedokładność równań opisujących jednostkowe opory przepływu, w obliczeniu których zakłada się na ogół pełną symetryczność przepływu.

Pojęcie przepuszczalności w obliczeniu oporów przepływu przez nieruchome wypełnienia wprowadza również Carman [25]. Wynikające z laminarnego przepływu jednostkowe opory opisuje on równaniem

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{k(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_o^2 \eta_f w_o = \frac{\eta_f w_o}{K_o} \quad , \quad (3.17)$$

w którym pojęcie przepuszczalności zdefiniowane jest parametrem

$$K_o = \frac{1}{k S_o^2} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad . \quad (3.18)$$

Parametr ten zawiera w swej postaci indywidualne stałe k i S_o , charakterystyczne dla każdego wypełnienia. Przy znanej porowatości złoża wartości tych stałych znajdują się na drodze doświadczalnej.

Na podobne w ujęciu parametrów rozwiązanie wskazuje Brauer [20], który dla laminarnego przepływu przez warstwę wypełnienia proponuje równanie

$$\frac{\Delta P}{L} = 18\phi_\varepsilon \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta_f w_o}{d_e^2} = \lambda_f \text{Re} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta_f w_o}{d_e^2} \quad . \quad (3.19)$$

Współczynnik oporów przepływu opisany jest w tym przypadku doświadczalną zależnością

$$\lambda_f = \frac{18\phi_\varepsilon}{\text{Re}} \quad , \quad (3.20)$$

przy $\phi_\varepsilon = k/2$.

Badania Palicy i wsp. [134] wskazują, że wynikający z modelu Brauera zakres obliczeniowy może być rozszerzony także na obszar przepływu burzliwego, przy współczynniku oporów przepływu

$$\lambda_f = \frac{160}{\text{Re}} + \frac{3,1}{\text{Re}^{0,1}} \quad . \quad (3.21)$$

Kembłowski i wsp. [86] podają, że jeżeli odnieść warunki wynikające z laminarnego przepływu gazu przez złoża porowate do charakterystycznego dla procesu filtracji zjawiska przepuszczalności przez upakowane złożo ziarniste (rys. 2.5), to na podstawie równania Kozeny-Carmana zachodzi

$$\frac{\Delta P}{L} = C_{K-C} \eta_f w_o \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} a^2 \quad . \quad (3.22)$$

Występująca w tym równaniu stała Kozeny-Carmana (C_{K-C}) ma charakter doświadczalny i jest uzależniona od kształtu i krętości porów. W pracach [135, 180] wykazuje się, że najczęściej $C_{K-C} \approx 5$.

W takim ujęciu problemu można zauważyć podobieństwo równania Kozeny'ego-Carmana do modelu Levy'ego – równanie (3.6). Dla rozpatrywanego wciąż laminarnego przepływu, kiedy to $n = 1$, model ten przyjmuje postać

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{400}{\text{Re}} \frac{\rho_f w_o^2}{2} \frac{1}{d_e} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \varphi^2 \quad . \quad (3.23)$$

Uporządkowanie równań (3.22) i (3.23) oraz ich przekształcenie względem prędkości pozornej (w_o) prowadzi do zależności

$$w_o = \left[\frac{1}{a^2 C_{K-C}} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \right] \frac{\Delta P}{\eta_f L} = \left[\frac{d_e^2}{200 \varphi^2} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \right] \frac{\Delta P}{\eta_f L} \quad . \quad (3.24)$$

W swej ogólnej postaci obie strony tej zależności zbieżne są z modelem Darcy'ego (2.8), w odniesieniu do którego przepuszczalność złoża K opisana jest tutaj uogólnionymi wyrażeniami ujętymi w nawiasy kwadratowe.

Wówczas też

$$w_o = \frac{Q}{A_o} = \frac{K}{\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad . \quad (3.25)$$

Prowadzi to do wniosku, że w zależności od przyjętego kryterium obliczeniowego przepuszczalność porowatego złoża może mieć różną cechę, a przez to może być także różnie definiowana.

Dla przepływu burzliwego problemem pojawiającym się w formalnym porównaniu modeli korzystających z pojęcia przepuszczalności jest trudność w ocenie samego współczynnika przepuszczalności. W odróżnieniu bowiem od ruchu laminarnego, dla którego współczynnik ten – zgodnie z prawem Darcy'ego – wykazuje zależność liniową względem oporów przepływu i zależy jedynie od struktury (porowatości) złoża, to w przypadku wzrostu burzliwości strugi zależność ta ma nieliniowy charakter. Dla przepływu burzliwego należałoby więc korelować wartość tego współczynnika w układzie współrzędnych

$$\frac{\Delta P}{\rho_f L} = f(w_o^2) \quad . \quad (3.26)$$

Przykładowo, dla modelu Levy'ego (3.11) prowadzi to do korelacji

$$\frac{\Delta P}{\rho_f L} = \alpha_e w_o^2 + \beta \quad , \quad (3.27)$$

w której współczynnik obliczeniowy β , wskazuje jedynie na odstępstwo (przesunięcie funkcji) względem liniowego modelu Darcy'ego.

Przeprowadzone przez Palicę i wsp. [134] badania oporów przepływu gazu dla siedmiu różnego rodzaju złóż biologicznych wskazują (rys. 3.7), że opisana równaniem (3.27) metoda korelacji danych doświadczalnych dość dobrze odzwierciedla wyniki eksperymentów, jakkolwiek w ocenie tych eksperymentów niezbędne było stosowanie dodatkowych współczynników poprawkowych. W podobnych zakresowo badaniach Kawika [84], porównanie tego typu korelacji do badań innych autorów wskazuje, że zadowalające wyniki otrzymuje się

także w zakresie laminarnego jak i przejściowego przepływu gazu przez tego rodzaju złoża.

Podobną w ujęciu funkcję proponuje Mokrosz [119]. W pracy dotyczącej zagadnień procesowych wynikających z absorpcji gazu w przepływie przez porowate złoża biologicznie czynne (utworzone z typowego dla tego procesu wypełnienia komórkowego), autor ten do obliczania spadku ciśnienia na takim złożu proponuje równanie

$$\frac{\Delta P}{\rho_f w_o^2} = C \text{Re}^A \quad . \quad (3.28)$$

W równaniu tym liczba Reynoldsa opisana jest zgodnie z definicją (3.8), przy średnicy ekwiwalentnej złoża wg Kozeny-Carmana

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{a} \quad . \quad (3.29)$$

W szczególnym przypadku, dla ziaren kulistych o średnicy cząstek d_p , dla których powierzchnia właściwa

$$a = \frac{6}{d_p} \quad , \quad (3.30)$$

średnica ekwiwalentna jest równa

$$d_e = \frac{2}{3} d_p \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad . \quad (3.31)$$

O ile więc prawo Darcy'ego i jemu podobne modele sprawdzają się dla relatywnie małych wartości prędkości filtracji odpowiadających na ogół przepływowi laminarnemu, to przy prędkościach charakterystycznych dla ruchu burzliwego obserwuje się znaczne odchylenie od liniowej zależności Darcy'ego. Forchheimer jako pierwszy zasugerował, że jest to najprawdopodobniej spowodowane przez efekty kinetyczne i zaproponował korektę równania Darcy'ego o człon sił bezwładności, które w tym przypadku znacznie przewyższają siły lepkościowe. Modelem bezpośrednio dedykowanym do takich warunków jest empiryczne równanie Forchheimera - wg [19, 56, 136]

$$\rho_f \frac{\Delta P}{L} = \frac{\eta_f}{K} g_o + \beta g_o^2 \quad , \quad (3.32a)$$

albo, przy $g_o = \rho w_o$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\eta_f}{K} w_o + \beta \rho_f w_o^2 \quad . \quad (3.32b)$$

W swym ogólnym ujęciu równanie to – poprzez wzajemne powiązanie zwane też równaniem Darcy'ego–Forchheimera – jest funkcją spadku ciśnienia na porowatym złożu zarówno względem charakterystycznych dla przepływu laminarnego sił lepkościowych (prawa Darcy'ego), jak i sił bezwładności uwzględ-

niających znaczenie burzliwości przepływu. Współczynnik β tej funkcji ma tutaj wymiar $1/m$ i tak jak parametr przepuszczalności K , jest wyznaczany na drodze doświadczalnej. Niemniej, dla uporządkowanych złożeń ziarnistych znane są również formuły obliczeniowe [3, 6, 56], które uzależniają wartość tego współczynnika zarówno od samego parametru K , jak i porowatości złoża oraz krętości przepływowych kanalików.

Nieco szerszą definicję równania Forchheimera podaje Brinkman [wg 175], który uwzględnił fakt, że poruszające się z różną prędkością elementarne strugi płynu mogą na siebie oddziaływać dodatkowymi siłami lepkościowymi, uzależnionymi od zróżnicowanych w przekroju przepływu efektów przyściennych. Uwzględnienie tego zjawiska prowadzi do nieliniowego modelu

$$\frac{\Delta P}{L} = \eta_f w_o \left(\frac{1}{K} + 1 \right) + \beta \rho_f w_o^2, \quad (3.33)$$

którego przydatność dla rozwiniętego przepływu turbulentnego potwierdzają m.in. Anderson i Franchi [6, 58], także w zakresie nieizotermicznych zjawisk procesowych (np. chłodzenie).

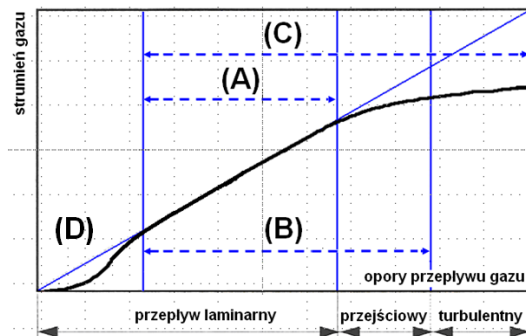
Dla całkowitego zakresu nieliniowej zależności prędkości pozornej od spadku ciśnienia, dla homogenicznych oraz niejednorodnych ośrodków porowatych, Cieśllicki [34] proponuje równanie

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\eta_f}{K} (1 + \beta w_o^2) w_o. \quad (3.34)$$

Równanie to autor ten utożsamia z zaproponowaną przez Meia i Ariaulta [112] teorią homogenizacji dla przepływu gazów przez struktury porowate zbudowane z systemów powtarzających się struktur elementarnych. Umożliwia to analizę nieliniowego przepływu gazu w ośrodkach porowatych z pominięciem ograniczeń pojawiających się przy stosowaniu równania Forchheimera. W uzupełnieniu, Cieśllicki i Lasowska [35] wykazali doświadczalnie, że w wielu sytuacjach równanie (3.34) dokładniej opisuje nieliniową zależność między pozorną prędkością a gradientem ciśnienia.

Zestawienie warunków przepływowych charakterystycznych dla modeli typu Darcy'ego, Forchheimera i Brinkmana pozwala na porównanie zakresu ich stosowania, jak to poglądowo przedstawiono na rys. 3.8, zaczerpniętym z pracy Hansena [80]. Z kształtu charakterystyki funkcji strumienia gazu (przepuszczalności) względem spadku ciśnienia na złożu wynika, że poza obszarem Darcy'ego (A), w którym obowiązuje liniowa zależność tej funkcji, w pozostałych zakresach obrazujących przepływ przejściowy i burzliwy (B i C), funkcja ta ma charakter nieliniowy. Jednakże, gdy w obszarze laminarnym na ruch płynu oddziałują jedynie zjawiska dyfuzji (D), to w obszarze tym opis zagadnienia przepuszczalności jest także nieliniowy. Ogólnie więc, im większa turbulencja przepływu, tym siły bezwładności mają większy wpływ na generowanie oporów przepływu.

Wynikający z tych przesłanek zakres praktycznej stosowalności poszczególnych modeli warstwy ziarnistej względem liczby Reynoldsa scharakteryzowano w tabeli 3.3.



Rys. 3.8. Charakterystyka warunków przepływowych przez złoża porowate: A – obszar Darcy’ego, B – obszar Forchheimera, C – obszar Brinkmana, D – zakres dyfuzji

Tabela 3.3

Zakresy stosowalności modeli przepływowych warstw ziarnistych, wg [3, 136]

Charakterystyka hydrodynamiki			
przepływ laminarny		przepływ przejściowy	przepływ burzliwy
$Re < (1-3)$	$(1-3) < Re < (10-15)$	$(10-15) < Re < (80-120)$	$Re > (80-120)$
zakres pre-Darcy (dyfuzja)	prawo Darcy’ego		
	prawo Forchheimera		
	prawo Brinkmana		

Jeżeli odnieść warunki przepływu do szczególnego przypadku ciała porowatego, w którym przepływ następuje przez układ wzajemnie połączonych kanałków o zróżnicowanym kształcie, to bardziej przydatne w praktyce okazały się modele tzw. kapilarno-porowate.

Zgodnie z ogólnie przyjętą interpretacją, w tego typu modelach warstwa ziarnista ma postać wiązki poskręconych kanałków (porów) kapilarnych o zmiennym kształcie (rys. 3.1a), których poprzeczny przekrój (jak np. w kolumnie wypełnionej) może być uznany w przybliżeniu za niezmienny.

Najbardziej typowym przedstawicielem tej grupy modeli jest model Kozeny’ego–Carmana – wg [86]. Model ten z definicji odniesiony jest do przepływu laminarnego i jako taki częściej jest aplikowany dla przepływu cieczy. W odróżnieniu od modelu ziarnistego tychże autorów – równanie (3.22), kiedy to warstwa porowata jest traktowana jako zbiór omywanych przez płyn ziaren – w modelu kapilarnym kanałki (pory) przepływowe zastępuje się układem równoległych kapilar prostoliniowych (rys. 3.2). Jeżeli założyć przy tym jednorodną

strukturę złoża, o ekwiwalentnej średnicy kanalików kapilarnych wynikającej z (3.31), to wartość spadku ciśnienia w złożu ziarnistym można opisać za pomocą wzoru Blake'a–Kozeny'ego–Carmana [17, 86]

$$\frac{\Delta P}{L} = f_{B-K-C} \frac{\rho_f w_o^2}{d_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}, \quad (3.35)$$

gdzie wyrażenie

$$f_{B-K-C} = \frac{B_o}{\text{Re}_{B-K-C}} \quad (3.36)$$

jest zmodyfikowanym współczynnikiem oporów przepływu, wyznaczanym względem liczby Reynoldsa zdefiniowanej zależnością (3.13), przy średnicy zastępczej odpowiadającej ekwiwalentnej średnicy porów (d_e). Z kolei wartość stałej B_o Carman określił na poziomie 180, jako średnią wartość wynikającą z dostępnych danych literaturowych dla wody, oleju i powietrza. Jednocześnie, na podstawie własnych badań stwierdził on, że w złożu ziarnistym usypanym z kulek, średnie nachylenie strumienia płynu w stosunku do pionowej osi przepływu odpowiada kątowi ok. 45° . Stąd wynikająca z wysokości złoża (L) średnia długość drogi krętej (L_e) wynosi $L_e = 1,42L$ – rys. 3.1.

Stanowiące o rozwiązaniu modelu Kozeny–Carmana (3.35)–(3.36) założenia wynikają z laminarnego ruchu płynu, co sprawia że model ten jest spełniony jedynie dla wartości $\text{Re}_{B-K-C} < 10$. Z tego też powodu najczęściej nie sprawdza się on dla warunków przepływu gazu przez warstwy porowate, dla którego z przepływem laminarnym ma się do czynienia bardzo rzadko. Przyczyn tego stanu rzeczy należy także upatrywać w tym, że w rzeczywistych układach z powodu zmiennej średnicy kanalików występują znaczne wahania krętości porów. Ponadto, średnica ekwiwalentna (z tego samego powodu) nie stanowi skutecznej oceny rzeczywistej średnicy kapilar, stosowanej w obliczeniach modelowych przepuszczalności złoża. Potwierdzenie tego można znaleźć m.in. w pracy [101], której autor wprost wskazuje na brak przydatności modelu porowato-kapilarnego do oceny gazoprzepuszczalności stałych materiałów porowatych w postaci tlenku wapniowego. Autor ten dodatkowo podaje, że o ile w porowatym ciele stałym (szkieletowym) występuje gradient ciśnienia, to wynikający z przepuszczalności sumaryczny strumień gazu, na który składa się strumień powierzchniowy (dyfuzyjny) i strumień związany z różnicą ciśnienia, stanowi w efekcie całkowity strumień, jaki przemieszcza się pod wpływem tego gradientu.

Nieco inną metodykę obliczania oporów przepływu przez złoża kanalików krętych proponuje Windsperger [200]. Uwzględnia on mianowicie łączny wpływ współczynnika oporów przepływu (λ) i współczynnika krętości porów (κ), zgodnie do zależności

$$\Delta P = \frac{3}{4} (\lambda \cdot \kappa) \frac{\rho_f w_o^2 L (1-\varepsilon)}{d_e \varepsilon^3}, \quad (3.37)$$

w której iloczyn ($\lambda \cdot \kappa$) opisany jest wyrażeniem

$$(\lambda \cdot \kappa) = 2,2 \left(\frac{0,4}{\varepsilon} \right)^{0,78} \left(\frac{64}{\text{Re}} + \frac{1,8}{\text{Re}^{0,1}} \right). \quad (3.38)$$

Liczba Reynoldsa jest przy tym zdefiniowana równaniem

$$\text{Re} = \frac{2 \rho_f w_o d_e}{3 (1 - \varepsilon) \eta}. \quad (3.39)$$

Chmiel, Palica i wsp. [32, 33], dokonując oceny wyników badań oporów biofiltracji na złożach biologicznie aktywnych wskazują, że względem metody Windspergera lepszą zgodność z eksperymentem oddaje model Levy'ego. Stwierdzają oni też, że odstępstwa względem zmierzonych i obliczonych wartości oporów przepływu mogą także wynikać z faktu uśredniania wartości przepuszczalności złoża.

W zakresie innych eksperymentów warto podkreślić badania, które bezpośrednio odnoszą się do ruchu gazu w porowatych złożach o różnej konfiguracji, jak w poniższych kilku przykładach.

Skotniczy [163] analizując przepływ powietrza przez gruntowe wymienniki ciepła dokonał serii pomiarów, które obejmowały również wyznaczenie oporów przepływu gazu w ośrodku porowatym gruntu z nałożoną wymianą ciepła. Istotnym rezultatem tych badań jest wskazanie, że dane pomiarowe mieściły się w zakresie stosowalności prawa Darcy'ego, co odpowiadało warunkom przepływu laminarnego. Zestawiając te wyniki z danymi eksperymentalnymi Niolda i Bejana [124], Skotniczy doszedł do wniosku, że przy znajomości oporów przepływu i prędkości porowej (wartości mierzone), można dość dokładnie oszacować wartość współczynnika przepuszczalności.

Hehlmann, Pietrasik i in. [71, 72], badając procesy spalania, a także suszenia w złożu ziarnistym zauważyli, że równania obliczeniowe bazujące na kapilarnym modelu warstwy, dają wyniki znacznie odbiegające od danych eksperymentalnych [72, 144, 145]. Autorzy ci wskazują, że lepsze rezultaty uzyskuje się w oparciu o model energetyczny, bazujący na charakterystycznych parametrach złoża o zmiennych parametrach przepływowych, aczkolwiek zbieżnych z procesem filtracji. W rezultacie podają oni równania korelacyjne opisujące opory przepływu gazu przez złożo ziarniste, co jednakże ma zastosowanie jedynie do wybranego zagadnienia procesowego.

Z kolei badacze z Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla [113] podkreślają, że w przypadku przemysłowej komory koksowniczej, w której znajduje się luźno usypany rozdrobniony węgiel, w trakcie jego temperaturowego uplastycznienia, gaz wydziela się przede wszystkim wewnątrz warstwy plastycznej i to jego obecność w znacznym stopniu wpływa na wielkość generowanego ciśnienia w złożu. Uzyskane wyniki badań zmiany ciśnienia gazu wskazują przy tym, że tworząca się w procesie zgazowania warstwa plastyczna węgla stanowi istotny opór dla przepływu uwalniającego się w tym procesie gazu. Po przemianie war-

stwy plastycznej w półkoks, w złożu zaczynają z kolei dominować struktury kanalikowe (spękania), przez które gaz może bez znaczącego oporu przemieszczać się w całym złożu. Autorzy tych badań twierdzą jednocześnie, że w warunkach tego procesu współczynnik gazoprzepuszczalności może być wyznaczony na podstawie prawa Darcy'ego.

Warpechowski i Jopkiewicz [194], badając hydrodynamikę przepływu gazu w złożu koksu wykazali, że szacowane wartości liczby Reynoldsa przekraczały 3000, a na wartość współczynnika oporu znacznie większy wpływ mają parametry geometryczne złoża, aniżeli zmiana lepkości gazu.

Interesujący jest fakt, podkreślony przez autorów pracy [49], mówiący o tym, że model Darcy-Forchheimera można adoptować do opisu zjawisk hydrodynamicznych występujących w przepływie gazu przez tzw. stałe piany metalowe, stanowiące najczęściej symetryczne struktury komórkowe (rys. 2.6b). Badania tych autorów wskazały, że wykorzystanie korelacji Forchheimera postaci (3.32) dość dobrze oddaje warunki przepływu przez tego typu struktury, a potwierdzono to zarówno w przepływie jedno- jak i dwufazowym z udziałem gazu i cieczy.

Podane przykłady wskazują, że charakteryzujące hydrodynamikę ruchu płynów w porowatych ośrodkach modele są pod względem merytorycznym bardzo zróżnicowane, a dla rzeczywistych warunków przepływowych bardzo trudno jest jednoznacznie wskazać na przydatność poszczególnych modeli do danych warunków procesowych i technologicznych. Prowadzi to do wniosku, że w każdym przypadku należy doświadczalnie weryfikować zakres stosowności tych modeli do danych warunków procesowo-technologicznych.

Odrębnym, bardzo spektakularnym zresztą zagadnieniem jest fakt, że w literaturze przedmiotu brak jest praktycznie alternatywnego podejścia do oceny spadku ciśnienia na porowatym złożu, jaki wynika z opisu miejscowych oporów przepływu

$$\Delta P = \xi \frac{\rho w^2}{2}, \quad (3.40)$$

jako powszechnie przyjętego sposobu opisu straty ciśnienia na skutek zmiany energii kinetycznej podczas przepływu płynu przez zamknięte kanały. W tym względzie problem ten został zauważony w badaniach własnych i jako taki stanowi przedmiot szerszej analizy przedstawionej w dalszej części niniejszego opracowania (pkt 5).

3.3. Sposoby pomiaru oraz metody oceny gazoprzepuszczalności ośrodków porowatych

Ocena przepuszczalności gazu przez złoża porowate jest istotna zarówno ze względów procesowych jak i technologicznych. W obu sytuacjach podejmowane są liczne próby odnoszące się do poszukiwania efektywnych metod przewidywania gazoprzepuszczalności materiałów porowatych, a także skutecznych sposobów pomiaru i weryfikacji metod tej oceny. Studia wskazują, że opisywa-

ne w literaturze sposoby pomiaru przepuszczalności gazu przez złoża porowate są bardzo zróżnicowane i można przyjąć, że jedyną cechą wspólną tych sposobów jest odpowiednia konstrukcja próbników służących weryfikacji modeli i metod obliczeniowych, jakkolwiek nie ma w tym względzie jednoznacznie zunifikowanych sposobów tej oceny. Dodatkową trudnością w tym względzie jest też to, że wykorzystywane do badań próbki mają różną na ogół formę i zróżnicowany kształt, a najczęściej stanowią złoża modelowe, co nie zawsze odpowiada wprost rzeczywistym warunkom procesowym.

Odrębnym niejako aspektem metodyczno-pomiarowym jest to, że doświadczalną ocenę gazoprzepuszczalności prowadzi się na ogół w jednym wybranym kierunku przepływu preparowanej próbki (np. wzdłuż pionowej osi złoża), co w odniesieniu do porowatych materiałów naturalnych prowadzi często do dużych przekłamań jakościowo-ilościowych. Taki stan rzeczy nie ułatwia przeniesienia wyników pomiarów na warunki rzeczywiste, a także nie sprzyja określeniu jednoznacznych kryteriów dla przeniesienia skali. Prowadzi to w efekcie do znacznej indywidualizacji metod oceny gazoprzepuszczalności ośrodków porowatych, które z powyższych względów oparte są najczęściej o formuły eksperymentalne [186].

Na podstawie kilku przykładów opisanych m.in. w pracach [16, 77, 113, 118, 126, 141, 153-155, 164, 173, 181], scharakteryzowano niektóre sposoby pomiaru i obliczeń przepuszczalności gazu przez różnorakie materiały porowate, w szczególności o strukturze:

- ziarnistej – gleba, złoża filtracyjne,
- szkieletowej – pumeks, węgiel, koks i inne karbonizaty,
- kapilarno-porowatej – materiały ceramiczne, beton.

Wskazane w tych przykładach sposoby i metody pomiarowe, których uzupełnieniem są też niektóre badania zestawione w tabeli 3.2, znajdują coraz częstszy punkt odniesienia do wielu analiz, a jednocześnie wskazują na niezmiernie dużą złożoność problematyki doświadczalnej w zakresie oceny gazoprzepuszczalności złożów porowatych o zróżnicowanej strukturze.

Spośród licznych metod badawczych na czoło wysuwają się sposoby proponowane przez *American Society for Testing and Materials* (ASTM) [164]. I jakkolwiek stanowią one z założenia układy do pomiaru przepuszczalności gazu przez porowate struktury skalne i glebowe, zwłaszcza piaski i łupki ropo- i gazonośne, to mogą być adoptowane także na inne układy.

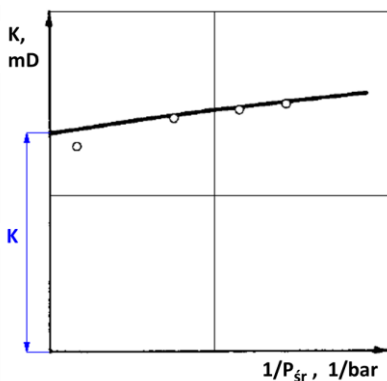
Geneza metody ASTM wynika z termodynamicznego ujęcia warunków przepływu gazu [61], co przy ciśnieniowym przepływie izotermicznym (zgodnie do prawa Boyle'a) prowadzi do współczynnika przepuszczalności opisanego wyrażeniem

$$K = 2\eta \frac{Q_g}{A_o} L \frac{P_{wyl}}{(P_{wl}^2 - P_{wyl}^2)} = \eta \frac{Q_g}{A_o} L \frac{P_{wyl}}{\Delta P_{zm}} \frac{2}{(P_{wl} + P_{wyl})} , \quad (3.41)$$

które jedynie z pozoru przypomina równanie Darcy'ego (2.9). Zastosowano tu bowiem dodatkowy simpleks wartości średniego ciśnienia (między wlotem i wylotem), umożliwiając zapis tego wyrażenia w postaci funkcji liniowej, przy argumentie tej funkcji równoważnym średniemu spadkowi ciśnienia w złożu, tj.

$$\frac{1}{P_{\text{śr}}} = \frac{2}{(P_{\text{wl}} + P_{\text{wyl}})} \quad (3.42)$$

Przy pozyskaniu danych doświadczalnych umożliwiających wykreślenie takiej funkcji – jak to przykładowo pokazano na rys. 3.9 – punkt przecięcia linii z osią rzędną stanowi w tym przypadku ekwiwalentną wartość współczynnika przepuszczalności.



Rys. 3.9. Charakterystyka współczynnika przepuszczalności wg metody ASTM [164]

I jakkolwiek wartość tak opisanego współczynnika nie ma merytorycznego uzasadnienia, to współczynnik ten sam w sobie stanowić może podstawę do porównania złóż porowatych różnego pochodzenia. Autorzy tej metody dodatkowo sugerują, że jeżeli rozkład punktów doświadczalnych nie czyni zadość powyższemu rozwiązaniu, to pomocne może być przeprowadzenie kolejnego testu przy innej relacji ciśnienia.

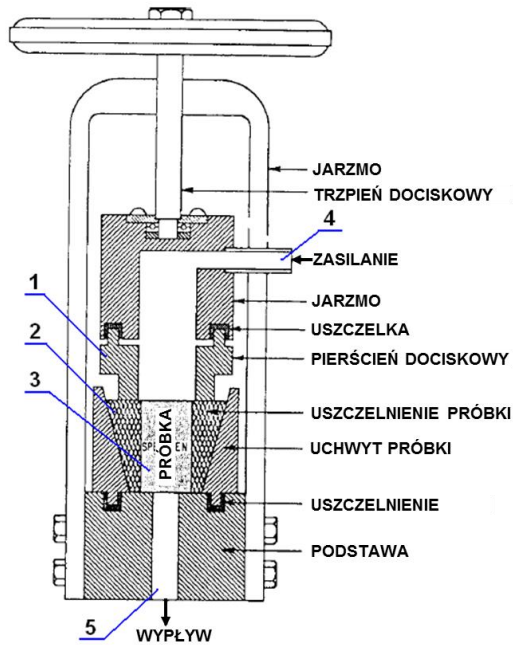
W bezpośrednim aspekcie pomiarowym metoda ASTM wykorzystuje trzy podstawowe typy przepuszczalnościomierzy, a mianowicie:

- a) *Fanchera*,
- b) *Hasslera*,
- c) typu *Compression Cell*.

Zapożyczone z pracy [164], z oryginalnym oznaczeniem elementów, schematy tego typu przepuszczalnościomierzy przedstawiono na rys. 3.10 do rys. 3.12.

Przepuszczalnościomierz typu *Fancher* – rys. 3.10, stanowi pojemnik w kształcie cylindra (1), wyposażony w specjalny pierścień uszczelniający (2), wewnątrz którego umieszczona jest próbka porowatego złoża o określonym kształcie (3) – najczęściej walcowa, o średnicy i długości 25,4 mm. Pierścień uszczelniający o stożkowym kształcie zapobiega przeciekowi gazu poza boczne ścianki próbki, co umożliwia bezpośredni pomiar całkowitego spadku ciśnienia

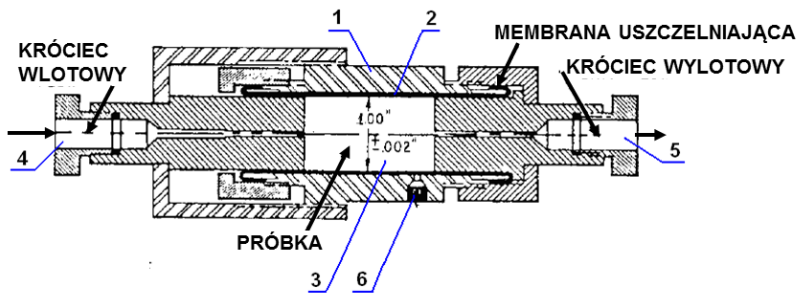
($\Delta P_{zm} = P_{wl} - P_{wyl}$) dla strumienia gazu przepływającego przez całą powierzchnię przekroju poprzecznego próbki.



Rys. 3.10. Przepuszczalnościomierz typu *Fancher*, wg ASTM [164]:

- 1 – korpus, 2 – uszczelnienie, 3 – próbka porowatego materiału,
4 – wlot gazu, 5 – wylot gazu

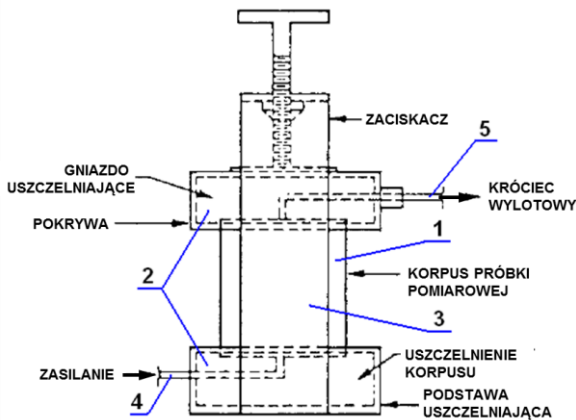
Swego rodzaju odmianą tego rozwiązania jest przepuszczalnościomierz *Hasslera*, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.11. Różnica polega na innym sposobie uszczelnienia próbki (3), która także w tym przypadku jest najczęściej walcowa o średnicy i długości 25,4 mm. Ponadto próbka ta jest osłonięta uszczelką membranową (2) mocowaną w cylindrycznym korpusie (1). W preferowanym rozwiązaniu – jak na tym rysunku – doprowadzenie gazu następuje od strony czołowej próbki, jakkolwiek nie od razu na cały jej przekrój. Pomiar ciśnienia obejmuje strefę wlotową i wylotową, a przepuszczalność odniesiona jest do całkowitego przekroju porowatego złoża. Poprzez zastosowanie dodatkowego układu uszczelniającego (6), rozwiązanie *Hasslera* pozwala także na symulacje naprężeń przeciążających w złożu.



Rys. 3.11. Przepuszczalnościomierz typu *Hassler*, wg ASTM [164]:

1 – korpus, 2 – uszczelnienie membranowe, 3 – próbka porowatego materiału, 4 – wlot gazu, 5 – wylot gazu, 6 – uszczelnienie przeciążające (bezpiecznik)

Na rys. 3.12 przedstawiono z kolei kompresyjną komorę *Compression Cell for Ring-Mounted*. Komora ta zawiera pierścień mocujący (1) o sztywnej tulei, która stanowi osłonę dla badanej próbki (3). Osłona ta jest dopasowana do wymiarów próbki, a kształt tej osłony powinien być jednolity i przylegać do ścianki próbki na całej powierzchni.



Rys. 3.12. Przepuszczalnościomierz *Compression Cell for Ring-Mounted*, wg ASTM [164]:

1 – korpus, 2 – uszczelnienia, 3 – próbka porowatego materiału, 4 – wlot gazu, 5 – wylot gazu

Metoda ta w prosty sposób pozwala zamontować próbkę i szczególnie dobrze nadaje się do testów mniej twardych próbek. Technika ta nie jest jednak zalecana dla testów wymagających symulacji naprężeń przeciążających.

W doświadczeniach z dziedziny petrofizyki, Tiab i Donaldson [174] zaobserwowali, że przepływ gazu w skalistych strukturach gazonośnych jest większy niż wynikałoby to tylko z prawa Poiseuille'a, a także większy niż wynikałoby to z teorii liniowej Darcy'ego. Efekt ten tłumaczy się tym, że przepływ rozrzedzonego gazu w mikroporach i kapilarach takich struktur podlega dodatkowo dyfuzji Knudsen'a, co przyczynia się do wzrostu poślizgu cząsteczek gazu na ścian-

kach, znanego jako efekt Klinkenberga [90, 188]. W konsekwencji przy przepływie gazu przez dostatecznie małą kapilarę jego strumień zwiększa się.

Pod względem fenomenologicznym wpływ efektu Klinkenberga na współczynnik przepuszczalności gazu może być opisany liniową zależnością [4]

$$K = K_{\infty} \left(1 + \frac{b}{\Delta P_{zm}} \right) . \quad (3.43a)$$

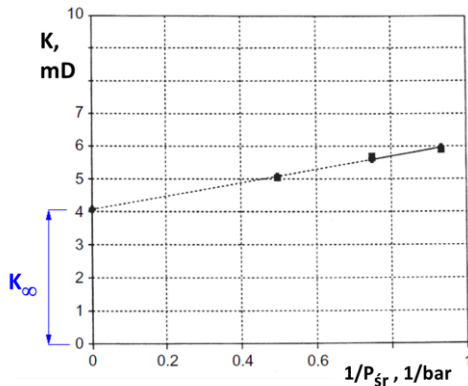
gdzie K_{∞} jest parametrem odniesienia dla przepuszczalności absolutnej, natomiast stała b zależy od rodzaju gazu i ośrodka.

W analogii do metody ASTM, wyznaczone na tej podstawie wartości współczynnika przepuszczalności gazu nanoszone są na wykres funkcji

$$K = f\left(\frac{1}{\Delta P_{zm}}\right) , \quad (3.43b)$$

jak to przykładowo zobrazowano na rys. 3.13, zaczerpniętym z pracy Tiaba i Donaldsona [174].

Punkt przecięcia prostej z osią rzędną wyznacza wówczas parametr funkcji K_{∞} , natomiast współczynnik kierunkowy (nachylenie) tej prostej określa iloczyn bK_{∞} . Interesującą ciekawostką jest fakt, że efekt Klingenberga wykorzystywany jest w technice jądrowej na etapie procesu wzbogacania uranu [10].

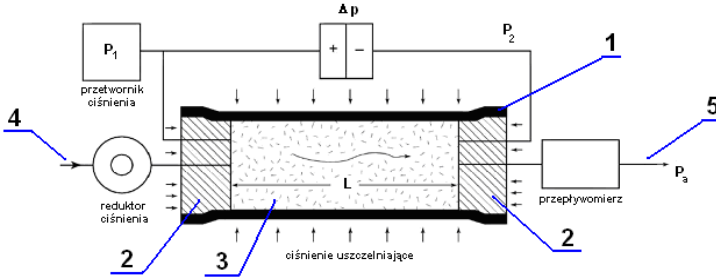


Rys. 3.13. Charakterystyka przepuszczalności materiału ziarnistego, za [174]

Podobny scenariusz badania przepuszczalności stosują Blicharski i Smulski [16], którzy urządzenie typu *Hassler* wykorzystywali w badaniach modelowych wzajemnego wypierania się gazów (argonu i ditlenku węgla) w skalnych ośrodkach porowatych – rys. 3.14. Do oceny tego zjawiska autorzy ci proponują zarazem nieco bardziej rozbudowaną postać równania ASTM (3.41), uwzględniając w nim dodatkowe parametry termiczne. Prowadzi to do zmodyfikowanej zależności

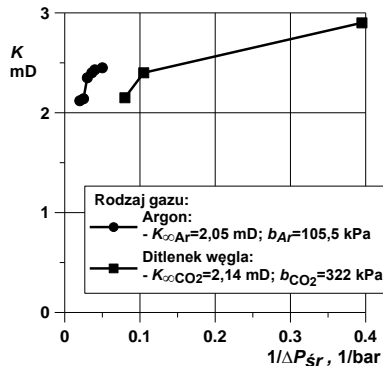
$$K = 2\eta_{sr} \frac{Q_n}{A_o} L \frac{zT}{T_n} \frac{P_n}{(P_{wl}^2 - P_{wyl}^2)}, \quad (3.44)$$

gdzie: Q_n , P_n , T_n oznaczają odpowiednio strumień, ciśnienie i temperaturę gazu w komorze próbki (w przeliczeniu na warunki normalne), a z – współczynnik pseudościśliwości gazu pod średnim ciśnieniem $P_{sr} = (P_{wl} + P_{wyl})/2$.



Rys. 3.14. Modyfikacja przepuszczalnościomierza typu Hassler, wg [16]: 1 – korpus, 2 – czopy uszczelniające, 3 – próbka porowatego materiału, 4 – wlot gazu, 5 – wylot gazu

W badaniach tych warunki pomiarowe z definicji ustalone były dla laminarnego przepływu gazu, a wynikający z funkcji (3.43) efekt Kligenberga uchwycono poprzez wyznaczenie przepuszczalności skał pod różnym ciśnieniem, przy tym samym rdzeniu wzorcowym próbki w kształcie walca o długości i średnicy 25,4 mm. Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 3.15. Wyznaczone metodami regresji liniowej parametry równania (3.43) wynoszą tu odpowiednio: $K_{\infty} = 2,14$ mD, $b = 322$ kPa dla ditlenku węgla, oraz $K_{\infty} = 2,05$ mD, $b = 105,5$ kPa dla pomiarów z użyciem argonu.

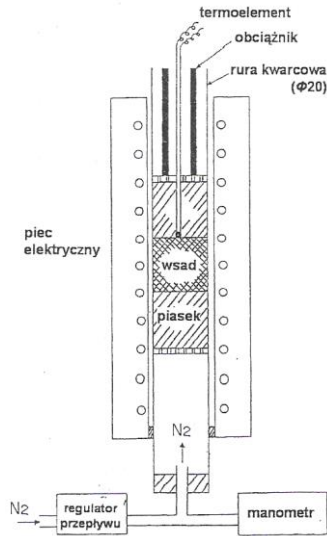


Rys. 3.15. Współczynnik przepuszczalności skał, wg [16]

W przeciwieństwie do tego typu badań modelowych, w literaturze przedmiotu prezentowane są też metody pomiaru gazoprzepuszczalności odniesione do rzeczywistych warunków procesowych. Przykładem mogą tu być wykorzystywane do oceny produktów termicznego zgazowania węgla metody opracowane

m.in. przez autorów japońskich [118, 126], europejskich [77, 155, 181], w także polskich [113].

Pierwsza z nich, opracowana przez *Osaca Iron&Steel Research Laboratories* [118], wykorzystuje urządzenie, w którym stosowana jest rurka kwarcowa o wewnętrznej średnicy 20 mm – rys. 3.16. W celu zapewnienia jednolitego nagrzewania złoża węgla oraz aby zapobiec przemieszczaniu się jego najmniejszych ziaren, próbka węgla umieszczona jest pomiędzy dwiema warstwami piasku (o grubości 10 mm każda).

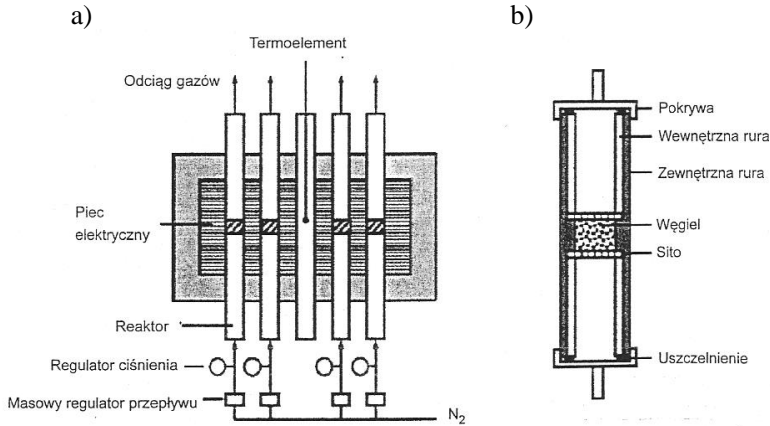


Rys. 3.16. Urządzenie *Iron&Steel Research Laboratories* [118], do badań gazoprzepuszczalności w warunkach termicznego upłynnienia węgla

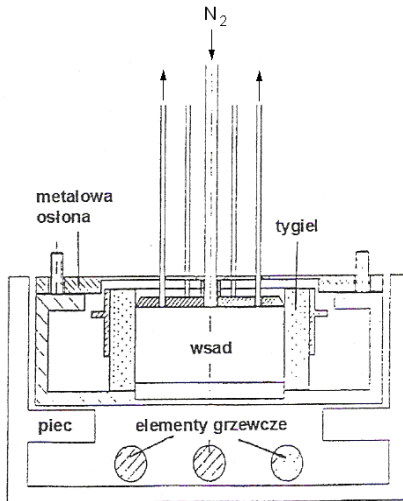
Podobną w rozwiązaniu metodę oceny gazoprzepuszczalności warstwy uplastycznionego węgla opracowano w ośrodku badawczym *Chiba Environment and Process Technology Center* [126] – rys. 3.17. W tym przypadku, próbka węgla o średnicy i długości 10 mm ładowana jest do celki reaktora (których jest kilka), a następnie ogrzewana w warunkach ograniczonej ekspansji termicznej, poprzez umieszczenie próbki pomiędzy perforowanymi płytkami (rys. 3.17b). W ocenie procesowej przepływ inertnego gazu w każdej celce jest ściśle określony i wynosi $0,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, a konstrukcja urządzenia umożliwia kontrolowany odciąg gazów procesowych.

Dla znacznie większej, bo półtechnicznej skali, metodę oceny gazoprzepuszczalności warstwy plastycznej węgla opracowano w *Centre de Pyrolyse de Marienau* w Forbach [155]. Jako urządzenie wykorzystano tu piec elektryczny z ruchomą ścianą, który w swojej konstrukcji zbliżony jest do tzw. pieca *SHO* (*Sole Heated Oven*) – rys. 3.18. Elementy grzewcze znajdują się na dnie pieca, a do pomiaru temperatury wsadu stosuje się termopary wprowadzane od góry pieca wraz z rurą doprowadzającą azot jako gaz inertny. Wykorzystanie skali

półtechnicznej pozwoliło wykazać, że w przypadku przemysłowej komory koksowniczej, gaz wydziela się przede wszystkim wewnątrz termicznie uplastycznianego złoża węgla, a ilość generowanego w ten sposób gazu wpływa na wartość procesową ciśnienia koksowania [77, 181].



Rys. 3.17. Reaktor termiczny *Nippon Steel Corporation* [126], do oceny gazoprzepuszczalności w warunkach termicznego upłynniania węgla: a) schemat układu pomiarowego, b) celka reaktora

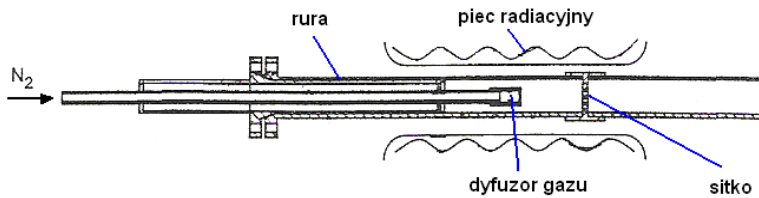


Rys. 3.18. Stanowisko *Centre de Pyrolyse de Marienau* [155], do oceny przepuszczalności upłynnianego węgla

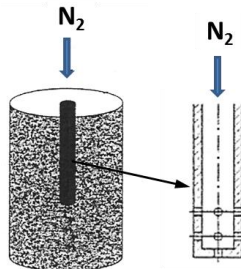
Podobną w założeniu metodę pomiaru gazoprzepuszczalności warstwy plastycznej węgla, jako parametru wpływającego na wielkość generowanego ciśnienia w złożu, opracowała grupa badaczy z Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze [113]. W tym przypadku, tzw. przepuszczalnościomierz zbu-

dowano z pieca ogrzewanego w sposób radiacyjny, dwóch sit, rury i dyfuzora gazu – rys. 3.19. Próbkę węgla umieszczono między sitami, w rurze pieca o średnicy wewnętrznej 20 mm, co odpowiada grubości warstwy plastycznej badanego złoża węgla (rys. 3.19b). Sitka ograniczają objętość próbki węgla (w badaniach o uziarnieniu 1,0–1,4 mm i masie 16 g), a gaz inertny (azot) doprowadzany jest do wnętrza złoża specjalnym dyfuzorem, aby symulować wydzielanie się składników lotnych w ściśle określonej ilości. Gazoprzepuszczalność mierzono względem warstwy uplastyczniającego się węgla, w określonym zakresie temperatur przy danym ciśnieniu oraz strumieniu przepływu gazu (w tym doświadczeniu $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$).

a)

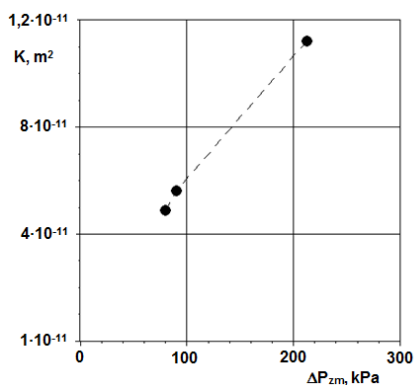


b)



Rys. 3.19. Laboratoryjny przepuszczalnościomierz opracowany przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla [113]: a) schemat układu pomiarowego, b) próbka i dystrybutor gazu

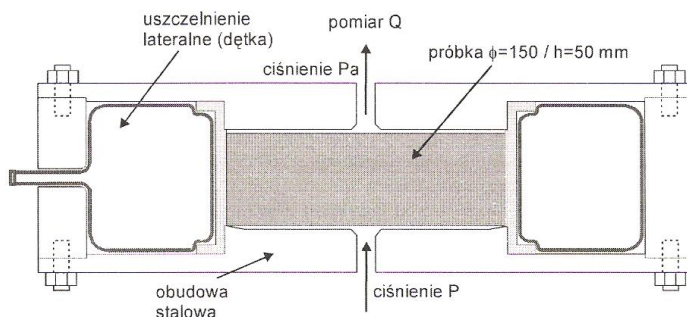
Korzystając z równania Darcy'ego (2.9), autorzy tych badań wykazują, że taki sposób pomiaru pozwala na doświadczalne wyznaczenie zależności pomiędzy tzw. ciśnieniem koksowania a współczynnikiem przepuszczalności, charakterystycznym dla termicznie uplastycznianego węgla – rys. 3.20. Z badań tych wynika, że gazoprzepuszczalność jest w tym przypadku czynnikiem istotnym z punktu widzenia występowania w złożu ciśnienia rozprężania gazu, czyli ciśnienia koksowania, którego zależność od przepuszczalności jest charakterystyczna jak dla przepływu laminarnego.



Rys. 3.20. Zależność współczynnika gazoprzepuszczalności od wartości ciśnienia rozprężania w warstwie plastycznej koksowanego węgla, wg [113]

Odrębną grupą metod pomiaru gazoprzepuszczalności, które znajdują aplikacyjne rekomendacje, są rozwiązania odnoszące się do oceny jakościowej materiałów budowlanych, zwłaszcza betonów [60, 153, 160, 173, 177].

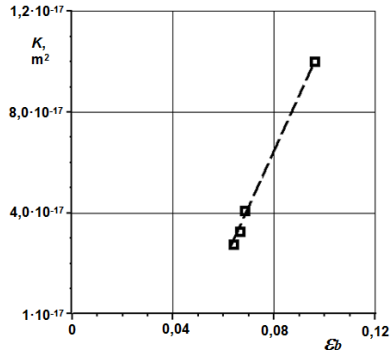
Reprezentatywnym przykładem może być tutaj wykazywana przez międzynarodowe laboratorium *RILEM Technical Committee* [153] komora ciśnieniowa przeznaczona do pomiaru przepuszczalności betonów – rys. 3.21. Poprzez zastosowanie odpowiedniego uszczelnienia pobocznic próbki (uszczelnienie lateralne), konstrukcja tej komory umożliwia wyznaczenie gazoprzepuszczalności względem przekroju próbki poprzecznego do kierunku przepływu gazu, przy standaryzowanych jej wymiarach – na ogół średnicy 150 mm i wysokości 50 mm. Przy stosunkowo bardzo małej przepuszczalności materiałów z betonu, charakteryzujących się z zasady kapilarno-porowatą strukturą, do pomiaru strumienia gazu wykorzystuje się na ogół przepływomierze typu bąbelkowego.



Rys. 3.21. Przepuszczalnościomierz ciśnieniowy *Rilem-Cembureau*, za [153]

Badania gazoprzepuszczalności betonów pozwalają także na pośrednią ocenę struktury kapilarno-porowatej betonów, jaka wynika z kompozycji ich składników, w tym rodzaju zastosowanego cementu. Przykładem takich badań są doświadczenia wykonane przez Tracza [177]. W swych badaniach autor ten gazo-

przepuszczalność betonu określał dla przepływu azotu, wykorzystując do oceny współczynnika przepuszczalności model Darcy'ego. Przedstawione na rys. 3.22 przykładowe wyniki tych badań wskazują na wyraźny wpływ porowatości wyizolowanej z betonu zaprawy (ε_b) na jego przepuszczalność.



Rys. 3.22. Zależność współczynnika przepuszczalności od porowatości dla betonu, wg [177]

W uzupełnieniu można dodać, a potwierdzają to także wyniki badań Glinickiego i wsp. [60], że betony cechują się ogólnie bardzo małą gazoprzepuszczalnością – rzędu (10^{-4} – 10^{-5}) mDa – co do opisu tego zjawiska pozwala z definicji wykorzystywać laminarny model Darcy'ego. Z drugiej strony, nie zmienia to faktu, że teza o utożsamianiu przepuszczalności porowatych materiałów względem charakteru przepływu gazu dała przyczynek do prowadzenia wielu badań doświadczalnych, które nawiązują do tej relacji. Na niektóre, najbardziej charakterystyczne w tej mierze przykłady, wskazano poniżej.

Jedno z prostszych podejść do tego problemu prezentuje Szczelkaczew – wg [138], który współczynnik gazoprzepuszczalności dla prostoliniowego przepływu płynu przez ośrodek porowaty utożsamia z laminarnym przepływem płynu przez prostoosiowy rurociąg. Dla ilościowej oceny zagadnienia autor ten definiuje dla materiałów porowatych charakterystyczną liczbą Reynoldsa

$$Re_{S_z} = \frac{10\rho w_o}{\eta \varepsilon^{2,3}} \sqrt{K_{S_z}} \quad , \quad (3.45)$$

w której wyrażenie

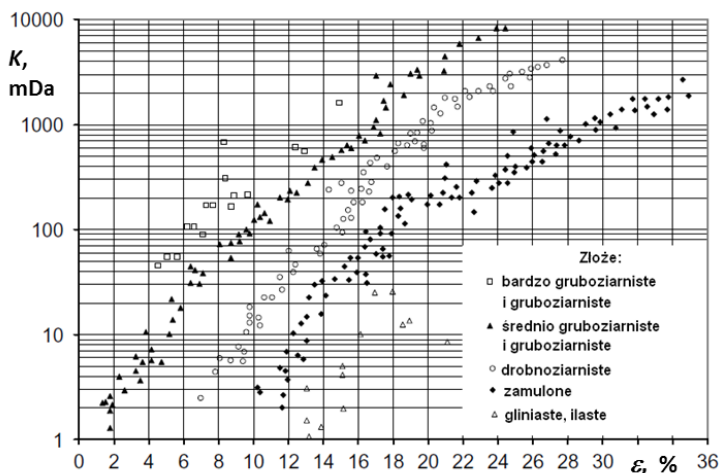
$$K_{S_z} = \frac{w_o \eta}{\hat{g} \rho} \quad . \quad (3.46)$$

opisuje współczynnik przepuszczalności.

Należy zwrócić jednak uwagę, że pomiędzy przepływem laminarnym płynu przez rurociąg, a przepływem linearnym cieczy przez ośrodek porowaty zachodzą jedynie częściowe analogie. Odnosi się to m.in. do liniowej zależności współczynnika oporów przepływu względem strumienia płynu. Z drugiej strony, przepływ płynu przez ośrodek porowaty trudno jednoznacznie uznać za upo-

rządkowany, z powodu krętości kapilar i porów, a także nieuporządkowanej geometrii mikrokanałów przepływowych, często dzielonych lub skojarzonych względem siebie, co sprzyja wzrostowi burzliwości strugi.

Dobrym tego przykładem są badania Chilingariana [29], który w ocenie gazoprzepuszczalności złóż wielozłazistych z piaskowca wykazuje, że na przepuszczalność gazu duży wpływ ma skład ziarnowy złoża, a w efekcie jego porowatość – wykres na rys. 3.23. Sugeruje to, że w złożach takich przepływ gazu występuje na ogół w zakresie ruchu burzliwego, a świadczy o tym także nieliniowa zależność zmian współczynnika przepuszczalności (na wykresie tym rozkład doświadczalnych punktów odniesiono do skali półlogarytmicznej). Oczywiście, prawo Darcy’ego mające zastosowanie do przepływu gazu przez takie złoża pozostaje słuszne jedynie dla ruchu laminarnego.



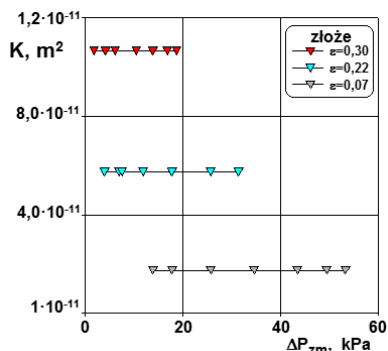
Rys. 3.23. Rozkład punktów doświadczalnych dla przepuszczalności złóż ziarnistych, za [29]

W ocenie wpływu porowatości na warunki przepuszczalności złóż porowatych, tego rodzaju badania mają bardzo duże znaczenie praktyczne, gdyż znane z literatury formuły Kozeny’ego-Carmana, korelujące te wartości, nie znajdują w większości przypadków poświadczenia dla rzeczywistych układów procesowych. Dużo korzystniej na tym tle wypadają modele Erguna (3.16) oraz empiryczny model Levy’ego (3.27).

Na przykład Chmiel i wsp. [32, 33] wykorzystując zdefiniowane przez Carmana pojęcie przepuszczalności (3.18), podają szczegółowe rozwiązanie modelu Erguna dla złóż biologicznych, które w odniesieniu do współczynnika przepuszczalności ma postać

$$K_E = \frac{1}{4} \left(\frac{1,75}{\sqrt{150}} \frac{\rho w_o^2}{\sqrt{\varepsilon^3}} \frac{L}{\Delta P} + \sqrt{\left(\frac{1,75^2}{150} \frac{\rho w_o^4}{\varepsilon^3} \frac{L^2}{\Delta P^2} \right) + \left(4w_o \eta \frac{L}{\Delta P} \right)} \right)^2. \quad (3.47)$$

Interpretację doświadczalną wyników badań dla tego rodzaju złożeń przedstawiono na rys. 3.24. Rozkład punktów doświadczalnych wyraźnie wskazuje na znaczący wpływ porowatości złożeń na efekt przepuszczalności, natomiast efekt ten nie zależy od spadku ciśnienia na złożeń. Wskazuje to na laminarny, a co najwyżej na przejściowy charakter przepływu gazu.



Rys. 3.24. Współczynnik przepuszczalności złożeń biologicznie czynnych o różnej porowatości – przeliczenie danych wg [32]

W modelu Erguna liczbowe wartości członów laminarnego i burzliwego zależą nie tylko od porowatości, ale także od pozornej prędkości gazu (w_o). Źródła literaturowe wskazują, że dla małych wartości tej prędkości człon odpowiadający za burzliwość przepływu można pominąć, natomiast dla dużych zaniechać z kolei można człon laminarny. Niemniej, występuje jednak dość szeroki obszar, w którym obydwa te człony są współmierne [54].

Jeżeli model Erguna odnieść jedynie do zakresu burzliwego, to wynikająca z równania (3.47) wartość współczynnika przepuszczalności będzie tożsama z parametrem przepuszczalności (α_e) wynikającym z korelacji Levy'ego (3.11). Porównanie to sprowadza ten parametr do relacji

$$\alpha_e = \frac{1,75}{4\sqrt{k}} \frac{1}{\varepsilon^{1,5}} \frac{1}{K_E} \quad , \quad (3.48)$$

co oznacza, że formuła Levy'ego jest szczególnym przypadkiem zależności Erguna w zakresie przepływu burzliwego.

Z powyższych rozważań wynika, że określenie współczynnika przepuszczalności (w ujęciu deterministycznym) jest również przyczynkiem do opisu strukturalnej cechy danego materiału porowatego, zwłaszcza wynikającej z porowatości złożeń oraz jego parametrów geometrycznych.

Na tej podstawie Dullien [45], korzystając z definicji średnicy ekwiwalentnej (3.31) dokonał ogólnego opisu współczynnika przepuszczalności materiałów ziarnistych w postaci

$$K_{Du} = \frac{d_e^2}{180} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad . \quad (3.49)$$

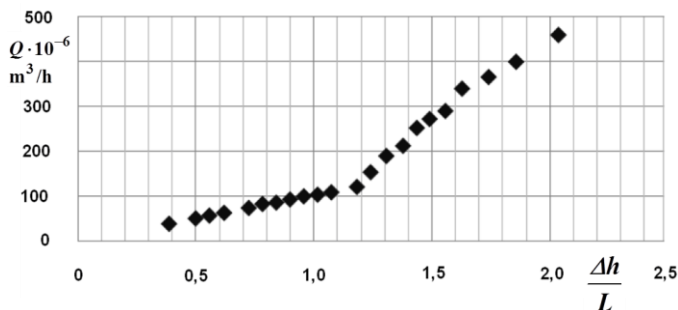
Podobny sposób podejścia proponuje Slichter [wg 197]. Autor ten, analizując dla symetrycznego złoża kul o jednakowej średnicy łączną drogę przepływu strugi gazu przez przekroje wolne (o takiej samej średnicy ekwiwalentnej), proponuje obliczać współczynnik przepuszczalności z korelacji

$$K_S = 7,8 e^{3,26 d_e^2} . \quad (3.50)$$

Jeżeli do oceny tej wykorzystać równanie Darcy'ego (2.6) na szybkość filtracji, to w odniesieniu do współczynnika przepuszczalności otrzymuje się

$$w_o = \frac{\rho \hat{g}}{\eta} K_S \frac{\Delta h_e}{L} . \quad (3.51)$$

Kierując się takim tokiem rozumowania Wilk [197], dokonując oceny przepuszczalności gruntu, podaje wyniki badań odnoszące się do pomiaru strumienia płynu w funkcji jednostkowego spadku hydraulicznego ($\Delta h/L$), jak to pokazano na rys. 3.25. Charakterystyczna zmiana rozkładu punktów doświadczalnych w okolicach wartości $\Delta h/L \approx 1,2$ wskazuje na prawdopodobne „załamanie” się złoża, wskutek skokowego ewoluowania jego struktury i prawdopodobnego szczelinowania. Wskazuje to jednocześnie na przejście w tym obszarze z zakresu przepływu laminarnego w przepływ turbulentny.



Rys. 3.25. Charakterystyka hydrauliczna ruchu płynu w porowatym złożu gruntu, wg [197]

Z kolei Chen-Yuan i wsp. [27, 28], analizując przepływ strugi gazu przez ziarniste złożo kamieni, skorelowali współczynnik gazoprzepuszczalności uwzględniając w jego postaci współczynnik kształtu mikrokanalów (porów) względem złoża kul o tej samej objętości, co badane złożo kamieni. Proponowana przez nich korelacja ma postać

$$K_{Ch-Y} = \psi d_e^2 \quad (3.52)$$

gdzie ψ – współczynnik kształtu porów, którego wartość dla różnych konfiguracji podano w tabeli 3.3.

Zgodnie z tą korelacją, dla złoża nieregularnego, jak np. luźno usypanych elementów jednakowego kształtu, przepuszczalność wynikająca z przepływu

płynu będzie zawsze większa, aniżeli przy geometrycznie regularnym upakowaniu przestrzeni wolnych. Niemniej, dla rzeczywistych układów dużą trudność stanowi właściwa ocena tej geometrii.

Tabela 3.4

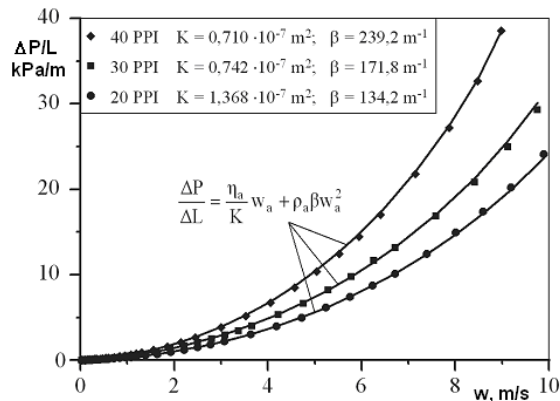
Współczynnik kształtu porów, wg [27]

Lp.	Kształt pora/kanalika	Współczynnik kształtu, ψ
1.	okrągły	1,0
2.	kwadratowy	1,27
3.	tetragonalny	1,65
4.	romboidalny	3,75
5.	owalny	5,84

Dyga i Płaczek [49] dokonywali natomiast oceny przepuszczalności pian aluminiowych o komórkach otwartych (rys. 2.6b). Wyniki ich badań pokazują, że jednostkowe opory przepływu zwiększają się monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości powietrza w sposób krzywoliniowy – rys. 3.26. Stwierdzają jednocześnie, że gazoprzepuszczalność tych pian może być opisana równaniem Forchheimera (3.32), przy współczynniku inercji strugi

$$\beta = \frac{4,872}{K_F^{1,021}} \quad (3.53)$$

Autorzy ci stwierdzają też, że zarówno przepuszczalność jak i parametr inercji (jako miara odstępstwa od przepływu turbulentnego), są wielkościami zależnymi od porowatości piany i rozmiaru jej komórek, a w mniejszym stopniu od warunków przepływu i właściwości gazu.



Rys. 3.26. Zależność jednostkowych oporów przepływu od prędkości gazu dla pian aluminiowych o różnym stopniu porowatości PPI (*Pores Per Inch*), wg [49]

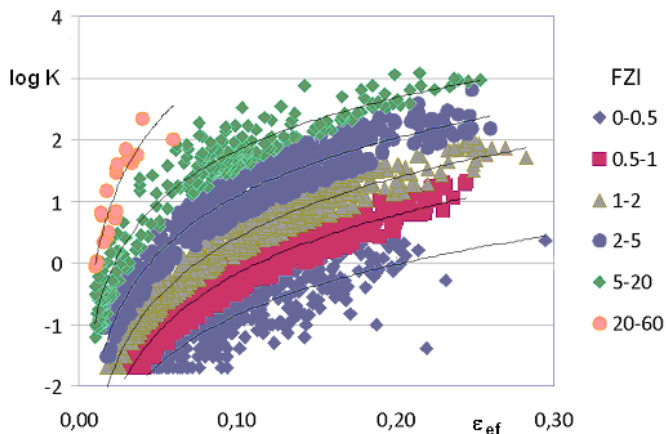
Reasumując, na podstawie powyższych przykładów można stwierdzić, że przepuszczalność złóż porowatych jest parametrem bardzo trudnym do jednoznacznego określenia, na co wpływ mają nie tylko cechy strukturalne porowatego złoża (rozmiar porów, kształt i ich wymiary), ale także parametry procesowe, w tym temperatura i ciśnienie oraz rodzaj płynu. Z drugiej strony eksperymentalne sposoby ilościowego opisu współczynnika przepuszczalności materiałów o strukturze ziarnistej, szkieletowej i kapilarno-porowatej wskazują, że współczynnik ten może stanowić jednocześnie podstawowe źródło informacji o warunkach przepływu płynów przez tego rodzaju struktury.

Jednym z obiektywnych kluczy do pozyskania takiej informacji może być tzw. wskaźnik *Flow Zone Index* (FZI), jako parametr charakteryzujący globalnie zdolność porowatego ośrodka do ruchu gazów w przestrzeni swobodnej tego ośrodka [2, 147]. Parametr ten (z definicji) łączy w sobie wszystkie cechy materiałów porowatych, o takich samych relacjach hydrodynamicznych i jest najczęściej przedstawiany w formie zależności

$$FZI = 0,0314 \left(\frac{1 - \varepsilon_{ef}}{\varepsilon_{ef}} \right) \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_{ef}}}, \quad (3.54)$$

której formalna postać wynika z przeliczenia jednostek oraz określenia wielkości zaproponowanych przez Kozeny'ego-Carmana [2]. Występująca w tej zależności wielkość ε_{ef} (porowatość efektywna) wskazuje na aktywną dla przepływu gazu objętość złoża.

W przykładowych badaniach dotyczących oceny tego wskaźnika, Jarzyna i Ujma [78] interpretują warunki procesowe dla gazoprzepuszczalności skał okruchowych, opisując wyniki z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych – rys. 3.27. Przepuszczalność w zbiorze tzw. „danych rozmytych” o jednakowym wskaźniku FZI jest w tym przypadku dokładniej wyznaczana, aniżeli wynika to jedynie z doświadczalnej relacji przepuszczalności względem porowatości złoża (por. rys. 3.22, 3.24).



Rys. 3.27. Ocena gazoprzepuszczalności skał porowatych względem wskaźnika FZI, wg [78]

Prasad [147] dodatkowo podkreśla, że układy o jednakowym wskaźniku FZI charakteryzują się ogólnie lepszym przyporządkowaniem relacji współczynnika przepuszczalności względem porowatości. Z tego m.in. powodu tradycyjne korelacje Kozeny'ego-Carmana (3.22), odniesione do bezwzględnej porowatości (ε) i powierzchni właściwej złoża (a), liczonej czy to względem całkowitej objętości (V), czy też objętości szkieletowej złoża (V_{st})

$$K_{K-C} = C_o \frac{\varepsilon^3}{V^2} \quad , \quad (3.55a)$$

$$K_{K-C} = C_o \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 V_{st}} \quad , \quad (3.55b)$$

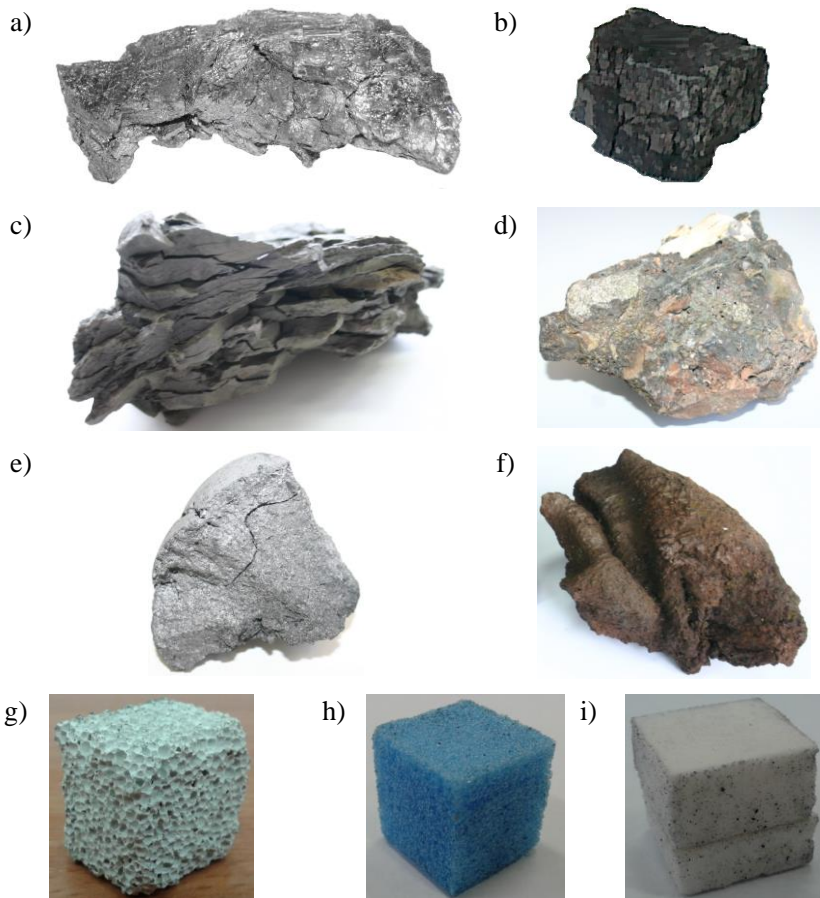
nie czynią zadość współczesnej interpretacji tego problemu.

Nie wyczerpuje to oczywiście wszystkich możliwości opisu gazoprzepuszczalności ośrodków porowatych, a liczne w tym zakresie publikacje wskazują, że badacze cały czas poszukują bardziej uniwersalnego sposobu oceny tego parametru, zarówno na drodze analitycznej jak i doświadczalnych badań laboratoryjnych i procesowych. Z kolei, w kontekście rozpatrywanych w niniejszej pracy warunków przepływu gazu odniesionych do szkieletowych materiałów porowatych stwierdzić należy, że dużym utrudnieniem dla stosowania proponowanych w literaturze modeli, a także ich adoptowania na inne niż wynika to z ich założeń warunki procesowe, związane są z bardzo zróżnicowaną strukturą tej grupy materiałów, zwłaszcza w kontekście kształtu porów, ich przekroju, braku wzajemnych połączeń uniemożliwiających przepływ płynu, czy wreszcie sam rozmiar porowatości, której relatywnie duża wartość nie zawsze świadczy o większej przepustowości szkieletowanych materiałów porowatych. Prócz tego, we wszystkich praktycznie przypadkach odczuwa się brak w literaturze jednolitego poglądu o możliwości wykorzystania w opisie hydrodynamiki przepływu przez szkieletowe materiały porowate jednakowych kryteriów charakterystycznych dla oporów przepływu, czy oceny przepuszczalności (strumienia przepływu). Ponadto w literaturze przedmiotu występują duże rozbieżności w podejściu do doświadczalnej oceny parametrów przepuszczalności. Utrudnia to znacznie możliwości porównania wyników badań, co w konsekwencji rzutuje na trudności w możliwościach adaptacji już istniejących modeli obliczeniowych na inne warunki procesowe. Dodatkowym utrudnieniem jest przy tym właściwa ocena charakteru przepływu oraz innych parametrów hydrodynamicznych (w tym prędkości), wynikających z danej struktury porowatego złoża.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

4.1. Charakterystyka materiału badawczego

Podstawowe rodzaje porowatych materiałów, jakie stosowano w badaniach własnych przedstawiono na rys. 4.1. Materiały te stanowią różnego rodzaju stałe struktury szkieletowe, zarówno naturalne, jak i pochodzące z technologii zgazowania węgla. Spośród tych ostatnich najliczniejszą grupę stanowiły karbonizaty *ex situ*- i *in situ* (te drugie pochodzące z technologii podziemnego zgazowania węgla kamiennego), skała płonna (także *ex*- i *in situ*), a poza tym porowate skały wulkaniczne, koks, pumeks naturalny i syntetyczny, a także spiek porowaty z poliamidu (dystrybutor gazu).



Rys. 4.1. Materiał badawczy: a) karbonizat *ex situ*, b) karbonizat *in situ*, c) przetopiona skała płonna *in situ*, d) przetopiona skała płonna *ex situ*, e) koks, f) spieniona skała wulkaniczna, g) pumeks naturalny, h) pumeks syntetyczny, i) spiek porowaty (poliamid)

Karbonizaty *ex situ*, pochodzące ze zgazowania węgla kamiennego (częściowego lub całkowitego), pozyskano w ramach realizowanego przez Główny Instytut Górnictwa projektu innowacyjnego Europejskiej Wspólnoty Węgla i Stali o akronimie HUGE (*Hydrogen-oriented Underground Coal Gasification for Europe*). Realizowane w tym zakresie badania, prowadzono w reaktorze powierzchniowym (*ex situ*), w którym symulowano warunki procesu podziemnego zgazowania węgla [167]. Stąd, pochodzący z tych badań materiał badawczy sklasyfikowano jako karbonizat *ex situ* – rys. 4.1a. Struktura tych karbonizatów może być bardzo zróżnicowana, na co wpływ ma stopień zgazowania węgla.

Karbonizaty *in situ* – rys. 4.1b – stanowią bezpośrednie produkty podziemnego zgazowania węgla, a pozyskano je z doświadczalnego georeaktora (skała półtechniczna) Kopalni Doświadczalnej „Barbara”. W przypadku tym warunki procesowe sprzyjały praktycznie całkowitemu zgazowaniu węgla, jakkolwiek struktura tego produktu także jest bardzo zróżnicowana, co poza warunkami procesowymi zależy od miejsca pozyskania próbek (rys. 2.12). Z georeaktora tego pochodzi też wybrana z jego ściany skała płonna *in situ* (rys. 4.1c), która została częściowo zgazowana w tych samych warunkach procesowych co karbonizat *in situ*. Z kolei, przetopiona skała płonna *ex situ* (rys 4.1d) pochodzi ze złóż byłej Kopalni Węgla Kamiennego w Nowej Rudzie k. Wałbrzycha i stanowi półprodukt wysokotemperaturowego (1200-1500°C) zgazowania węgla w piecu szybowym, przeznaczonym do prażenia łupków ogniotrwałych.

Odrębną grupę materiału doświadczalnego stanowił koks – rys. 4.1e. Materiał ten, jako karbonizat charakterystyczny dla odgazowania węgla kamiennego w baterii koksowniczej (w temperaturze 900–1200°C), stanowiły produkty z węgla kamiennych pochodzących z Polski, Czech, Kanady, USA i Australii, jakie były procesowane w Koksowni Zdziessowice Arcerol Mittal Poland S.A. Z uwagi na liczne odmiany stosowanego w badaniach koksu, dla lepszej czytelności tego materiału jego próbki sklasyfikowano na podstawie nazwy złoża węgla kamiennego, jak to zestawiono w tabeli 4.1, zgodnie do przyjętej w tabeli 4.2 numeracji całego materiału badawczego.

Przetopiona skała wulkaniczna (rys. 4.1f) stanowi tzw. tuf wulkaniczny, jaki wytwarza się podczas gwałtownego wychładzania spienionej lawy, kiedy to konsoliduje się ona do postaci porowatej skały. Materiał ten pochodził z krateru wygasłego wulkanu Vesuvio k. Neapolu, a swą strukturą przypomina pumeks, przez co nazywany jest też pumeksem wulkanicznym.

Przedstawiony na rys. 4.1g pumeks naturalny (wiedeński), stanowi mineralny węglan wapniowy z niewielką domieszką piasku kwarcowego i gliny, jaki został otrzymany z wysuszonej na wolnym powietrzu tzw. gęstwy wapiennej (producent *Top Choice*). Z kolei pumeks syntetyczny (rys. 4.1h), to produkt typowy dla celów kosmetycznych, który stanowi twarda pianka poliuretanowa nie zawierająca freonu (producent 3M Poland Sp. z o.o.).

Tabela 4.1

Oznaczenie próbek koksu

Lp.	Nr próbki	Nazwa złoża węgla	Kraj pochodzenia
1	II-4	CSM Stonawa	Czechy
2	II-5	Oaky Creek-1	Australia
3	II-6	Knurów	Polska
4	II-7	Zofiówka-1	Polska
5	II-8	Darkov	Czechy
6	II-9	Paskov-1	Czechy
7	II-10	Pniówek	Polska
8	II-11	Szczygłowice	Polska
9	II-12	Blue Creek Premium	USA
10	II-13	Borynia-1	Polska
11	II-14	Bielszowice-1	Polska
12	II-15	Rydułtowy Ruch I	Polska
13	II-16	Borynia-2	Polska
14	II-17	Peak Down	Australia
15	II-18	Bielszowice-2	Polska
16	II-19	Paskov-2	Czechy
17	II-20	Zofiówka-2	Polska
18	II-21	Jas-Mos	Polska
19	II-22	Elkviev	Kanada
20	II-23	Saraji	Australia
21	II-24	Oaky Creek-2	Australia
22	II-25	Knurów	Polska
23	II-26	Illawarra	Australia

Ostatnim rodzajem materiału stosowanego w badaniach własnych jest poliamidowy spiek porowaty – rys. 4.1i. Materiał ten pochodzi z bezpośredniej polimeryzacji materiału sypkiego o ziarnach kulistych, a jako tzw. punktowy dystrybutor gazu jest stosowany w aparatach służących do napowietrzania układów ciekłych (Przedsiębiorstwo Wdrażania Innowacji "INWET" S.A.); stosuje się też nazwy polietylen porowaty lub poliamid porowaty, w zależności od rodzaju użytego tworzywa sztucznego.

Dla wszystkich rodzajów materiałów dokonywano oceny wybranych parametrów opisujących charakterystyczne dla porowatych materiałów cechy, wynikające z fizycznej ich struktury. W ujęciu ilościowym dokonywano oceny takich parametrów jak gęstość pozorna oraz porowatość danego rodzaju materiału.

Gęstość pozorną (ρ_{poz}) porowatego materiału wyznaczano na podstawie pomiaru (poprzez zanurzenie w wodzie) objętości całkowitej próbki (V_{pr}) oraz jej masy, odpowiadającej w tym przypadku masie ciała stałego ($m_{pr} = m_{st}$). Z definicji

$$\rho_{poz} = \frac{m_{st}}{V_{pr}} \quad (4.1)$$

Porowatość wyznaczano w dwojaki sposób: w oparciu o pomiar masy próbki oraz wykorzystując metodę identyfikacji obrazu struktury porowatej. W tym drugim przypadku wykonano kilka porównawczych przeliczeń, celem wskazania na alternatywny sposób oceny porowatości stosowanych materiałów badawczych.

Zgodnie z definicją (2.1a), porowatość bezwzględna materiału porowatego (ε_b) jest wyliczana z ilorazu objętości swobodnej ($V_{swo} = V_o$) i całkowitej objętości próbki (V_{pr}). Po odpowiednich przekształceniach definicja ta może być zapisana w postaci

$$\varepsilon_b = \frac{V_o}{V_{pr}} = 1 - \frac{V_{st}}{V_{pr}} = 1 - \left(\frac{m_{st}}{\rho_{st}} \right) \left(\frac{\rho_{poz}}{m_{st}} \right) = 1 - \frac{\rho_{poz}}{\rho_{st}} \quad (4.2)$$

Przy znanej (jednocześnie stosunkowo łatwej do wyznaczenia) gęstości pozornej stałego materiału porowatego, dużym utrudnieniem w ocenie porowatości bezwzględnej wg (4.2) jest wyznaczenie rzeczywistej gęstości tego materiału, która jest na ogół wartością katalogową [9].

Odrębnym, bardzo istotnym problemem wpływającym na rzeczywistą ocenę tego rodzaju materiałów jest wskazanie na udział porowatości, jako przestrzeni swobodnej dla przepływu płynu. Skutkiem występowania w materiałach szkieletowych licznych porów ślepych i zamkniętych, udział przestrzeni wolnych dla przepływu płynu jest na ogół znacznie mniejszy, niż wynika to z samej tylko porowatości bezwzględnej. Liczne w tym względzie interpretacje doświadczalne pokazują, że miarą tego odstępstwa może być porowatość efektywna (2.1b), jako udział objętości porów wzajemnie połączonych ze sobą (a więc otwartych dla przepływu), w odniesieniu do objętości całkowitej. Jednakże, wobec oczywistych trudności w ocenie objętości swobodnej, dla materiałów porowatych o szkieletowej strukturze Łuszcz [107] wskazuje na doświadczalny zakres efektywnej porowatości jako

$$\varepsilon_{ef} = (0,5 - 0,8) \varepsilon_b \quad (4.3)$$

Uzupełnieniem tej cechy jest tzw. wskaźnik porowatości (e), który z formalnego punktu widzenia charakteryzuje stopień zagęszczenia porowatego ośrodka i jest zdefiniowany jako stosunek objętości porów do objętości szkieletu. Stąd

$$e = \frac{V_o}{V_{st}} = \frac{V_o}{V_{pr} - V_o} = \frac{V_o/V_{pr}}{1 - V_o/V_{pr}} = \frac{\varepsilon_b}{1 - \varepsilon_b} \quad (4.4)$$

Wskaźnik ten dla materiałów niespoistych waha się w granicach (0,3–1,0), aczkolwiek dla spoistych ośrodków porowato-szczelinowych jego wartość może być znacznie większa [24]. W szczególnym przykładzie, jak np. dla układu „ku-

la nad kulą” (rys. 2.3a) $e = 0,91$, natomiast dla układu romboedrycznego („kula na trzech kulach” – rys. 2.3c), wskaźnik ten ma wartość $e = 0,35$.

Wyznaczone w ten sposób charakterystyczne parametry dla próbek badanych materiałów zestawiono w tabeli 4.2, wraz z oznaczeniem numeru próbki oraz podaniem średniej wartości tych parametrów.

Tabela 4.2

Charakterystyka materiału badawczego

Materiał (oznaczenie i źródło pochodzenia surowca)		Porowatość		Wskaźnik porowa- tości	Gęstość		
		bez- względna	efektywna		pozorna	szkieletu	
nazwa	nr próbki	ε_b , %	ε_{ef} , %	e	ρ_{poz} , kg/m ³	ρ_{st} , kg/m ³	
1	2	3	4	5	6	7	
karbonizat <i>in situ</i> (KD Barbara, Mikołów)	I-1	42,2	21,1–33,7	0,7	1300	2250	
	I-2	44,9	22,5–35,9	0,8	1239		
	I-3	33,9	17,0–27,1	0,5	1487		
	I – średnia	40,3	20,2–32,2	0,7	1342		
koks (Zdzieszowice)	II-1	56,4	28,2–45,1	1,3	981	2250	
	II-2	50,5	25,3–40,4	1,0	1113		
	II-3	49,8	24,9–39,8	1,0	1130		
	II-4 – II-26	zgodnie do tabeli 4.1					
	II – średnia	52,2	26,1–41,8	1,1	1075		2250
przetopiona skała płonna <i>ex situ</i> (Nowa Ruda)	III-1	30,9	15,4–24,7	0,4	1365	1975	
	III-2	19,3	9,6–15,4	0,2	1594		
	III-3	15,2	7,6–12,1	0,2	1675		
	III – średnia	21,8	10,9–17,4	0,3	1545		
karbonizat <i>ex situ</i> (KWK Piast)	IV-1	36,2	18,1–28,9	0,5	1436	2250	
	IV-2	46,7	23,3–37,3	0,9	1200		
	IV-3	52,2	26,1–41,7	1,0	1076		
	IV – średnia	45,0	22,5–36,0	0,8	1237		
przetopiona skała płonna <i>in situ</i> (KD Barbara, Mikołów)	V-1	15,4	7,7–12,3	0,2	1438	1700	
	V-2	36,4	18,2–29,1	0,6	1081		
	V-3	42,8	21,4–34,2	0,7	973		
	V – średnia	31,5	15,8–25,2	0,5	1164		
przetopiona skała wulkanicz- na (Vesuvio)	VI-1	23,4	4,7–11,7	0,3	1429	1865	
	VI-2	0,1	0,03–0,1	0,001	1862		
	VI-3	4,6	0,9–2,3	0,05	1778		
	VI – średnia	9,4	1,9–4,7	0,1	1690		
koks z systemu karbo- test (Ruch I)	VII-1	51,8	25,9–41,4	1,1	1084	2250	
	VII-2	46,7	23,4–37,4	0,9	1199		
	VII-3	49,5	24,8–39,6	1,0	1136		
	VII – średnia	49,3	24,7–39,5	1,0	1140		

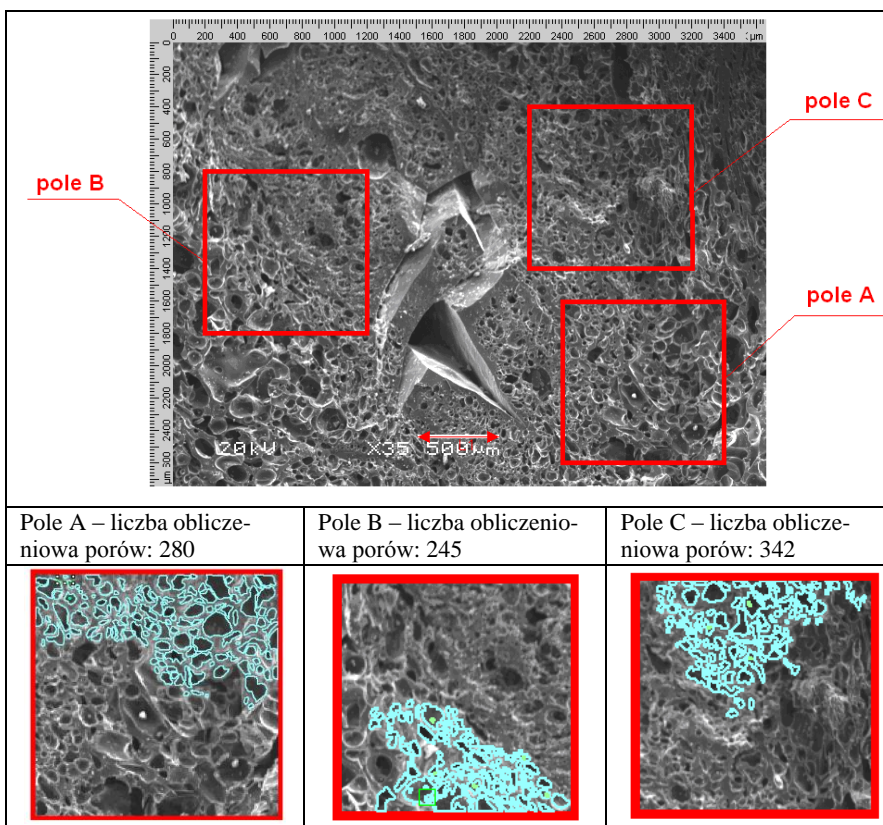
cd. tabeli 4.2

1	2	3	4	5	6	7
koks z systemu karbo- test (Oak Creek)	VIII-1	48,7	24,3–38,9	0,9	1155	2250
	VIII-2	56,9	28,4–45,5	1,3	970	
	VIII-3	56,0	28,0–44,8	1,3	991	
	VIII – średnia	53,8	26,9–43,1	1,2	1039	2250
koks z systemu zasy- powego (bat. 12)	IX-1	50,6	25,3–40,5	1,0	1111	2250
	IX-2	53,3	26,7–42,7	1,1	1050	
	IX-3	52,9	26,4–42,3	1,1	1060	
	IX – średnia	52,3	26,1–41,8	1,1	1074	2250
koks z systemu zasy- powego (bat. 78)	X-1	45,8	22,9–36,7	0,8	1219	2250
	X-2	53,9	27,0–43,1	1,2	1037	
	X-3	54,4	27,2–43,5	1,2	1027	
	X – średnia	51,4	25,7–41,1	1,1	1094	2250
koks z systemu ubija- nego (stabilizowany)	XI-1	49,8	24,9–39,9	1,0	1129	2250
	XI-2	50,5	25,3–40,4	1,0	1114	
	XI-3	47,8	23,9–38,3	0,9	1174	
	XI – średnia	49,4	24,7–39,5	1,0	1139	2250
koks z systemu ubija- nego (wysoko- reakcyjny)	XII-1	50,0	25,0–40,0	1,0	1125	2250
	XII-2	50,2	25,1–40,2	1,0	1121	
	XII-3	50,5	25,2–40,4	1,0	1114	
	XII – średnia	50,2	25,1–40,2	1,0	1120	2250
pumeks naturalny	XIII – średnia	63,3	31,7–50,7	1,7	843	2300
pumeks synte- tyczny	XIV – średnia	88,1	44,1–70,5	7,4	106	900
spiek porowaty (poliamid)	XV – średnia	32,3	16,1–25,8	0,5	772	1140

Dla części próbek materiałów przeprowadzono także fizyczną ocenę ich struktury oraz porowatości. Dokonywano tego na podstawie analizy obrazu skaningowego (SEM), jak to dla przykładowej próbki karbonizatu *ex situ* przedstawiono na rys. 4.2. Do oceny tej z całkowitego pola obrazu wyodrębniano fragmentaryczne obszary pozwalające na graficzną identyfikację struktury powierzchni porowatej. W tym celu korzystano ze specjalistycznego oprogramowania przeznaczonego do obiektowej analizy obrazu (*Iris-MediCom Wrocław*). Na przykładzie pokazanym na rys. 4.2 zakreślono trzy takie pola identyfikacyjne A, B i C, traktowane jako reprezentatywne dla przekroju danej próbki. W każdym wybranym polu (na ogół o wymiarach 1000×1000 μm) graficznie oznaczano obwód przestrzeni wolnych w danej płaszczyźnie, tak w postaci mikrokanałów jak i szczelin. Stosując programowe narzędzia graficzne, dla każdego ozna-

czzonego pola A, B, C wyznaczano sumaryczną powierzchnię porów (f_{por}) i ich średni wymiar (d_e), a na tej podstawie określano średnią porowatość odniesioną do całkowitego pola (f_e) każdego identyfikowanego obszaru, a mianowicie:

$$\varepsilon_f = \frac{f_{por}}{f_e} . \quad (4.5)$$

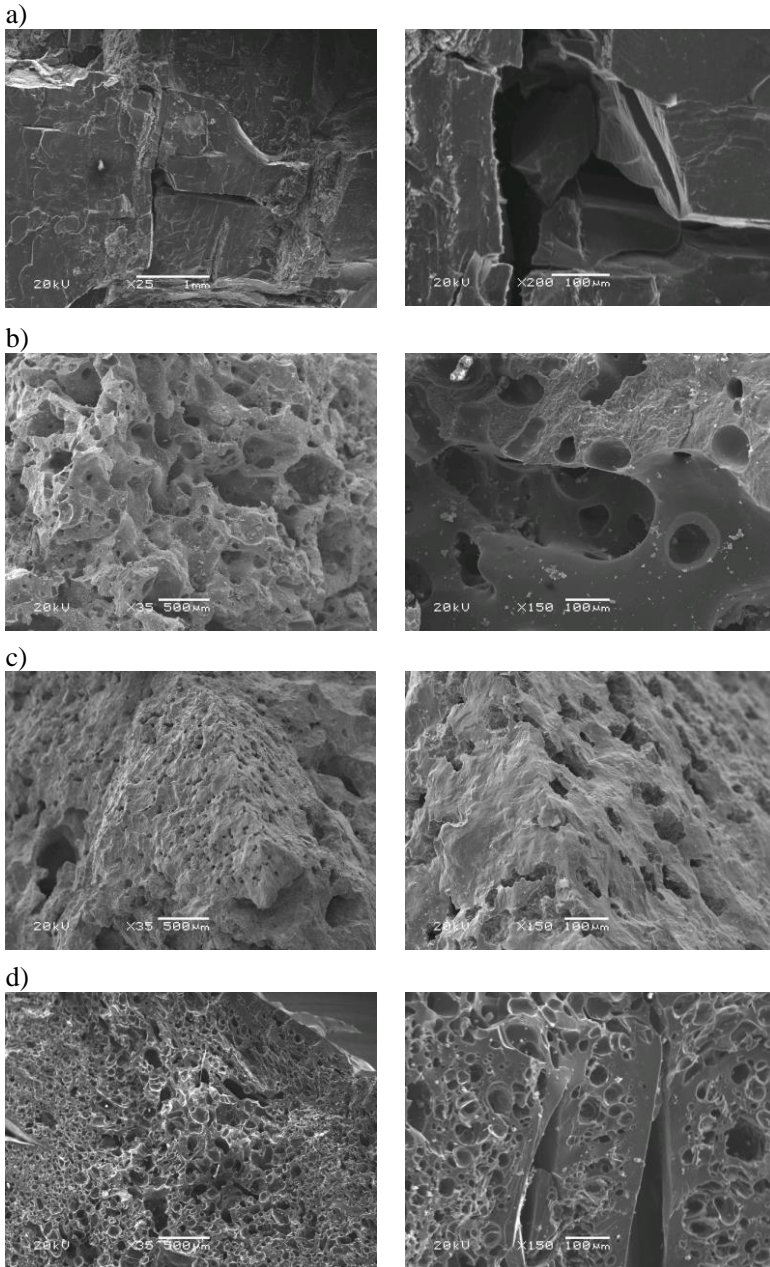


Rys. 4.2. Obraz skaningowy (SEM) karbonizatu *ex situ* (IV-1), z zaznaczonymi polami (A, B, C) do zliczania średniej porowatości (ε_f) oraz średnicy ekwiwalentnej (d_e)

Więcej przykładów skaningowej analizy struktury dla czterech wybranych materiałów przedstawiono w *Załączniku*, natomiast odpowiadające tej analizie wyniki obliczeń porowatości zestawiono w tabeli 4.3. Dodatkowo, na rys. 4.3 przedstawiono charakterystyczne obrazy SEM dla tych samych czterech grup porowatych materiałów, celem porównania ich struktury.

Otrzymane wyniki prowadzą do spostrzeżenia, że oceniane karbonizaty charakteryzują się znaczną różnorodnością struktury, a cechy ich budowy można przyporządkować wielu schematom porowatości. Karbonizaty *in situ* (rys. 4.3a)

wykazują w zasadzie strukturę szczelinową, o stosunkowo dużych przestrzeniach wolnych, które stanowią podstawowe kanały dla przepływu gazu.



Rys. 4.3. Obrazy SEM struktury karbonizatów: a) próbka I – karbonizat *in situ*, b) II – koks, c) III – skała płonna *ex situ*, d) IV – karbonizat *ex situ*

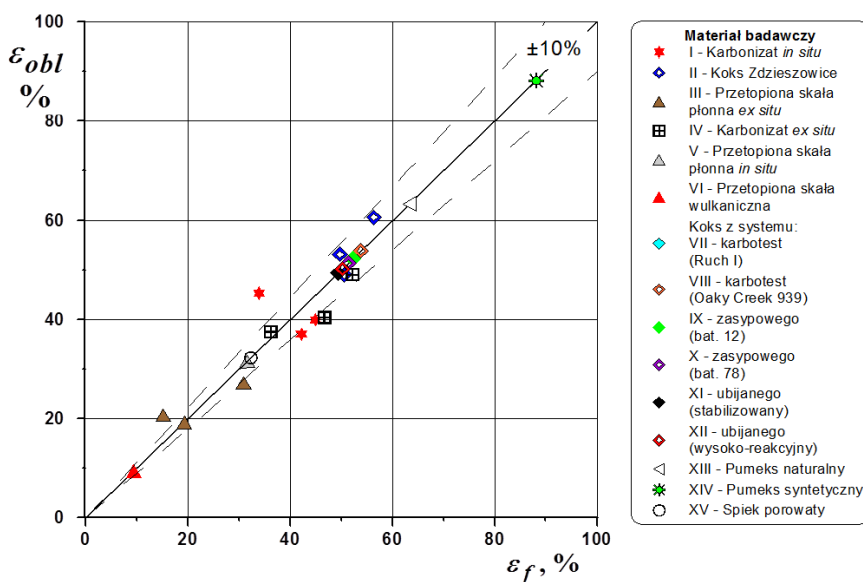
Tabela 4.3

Cechy materiału badawczego

Materiał badawczy (ozn. próbki)		Parametry	
		Porowatość ε_f , %	Zastępcza średnica porów d_e , μm
Karbonizat <i>in situ</i> (I)	1a	37,0	48,6
	1b	39,9	42,8
	1c	45,3	58,9
	średnia	40,8	50,1
Koks (II)	2a	60,6	130,4
	2b	49,0	118,0
	2c	53,1	121,9
	średnia	54,3	123,4
Przetopiona skała płonna <i>ex situ</i> (III)	3a	27,1	104,2
	3b	19,2	102,5
	3c	20,7	87,9
	średnia	22,4	98,2
Karbonizat <i>ex situ</i> (IV)	4a	37,5	61,5
	4b	40,4	67,1
	4c	49,0	76,6
	średnia	42,3	68,4

Strukturę koksu (rys. 4.3b) wyróżnia z kolei skomplikowany kształt licznych porów i kapilar o zmiennym przekroju, zdecydowanie bardziej upakowanych, niż ma to miejsce w przetopionej skale płonnej *ex situ* (rys.4.3c). Wreszcie karbonizaty *ex situ* (rys. 4.3d) praktycznie w całej objętości cechują się strukturą szczelinowo-porowatą, co pozwala zaliczyć je do grupy materiałów o najbardziej złożonym profilu porowatości. W każdym praktycznie przypadku zauważyć też można obecność ślepych porów, czy zamkniętych dla przepływu przestrzeni i kanałów.

Spostrzeżenia te utwierdzają w przekonaniu, że graficzna identyfikacja struktury materiałów porowatych dostarcza dużo więcej informacji, przydatnych w ocenie przepuszczalności tych materiałów, aniżeli wynika to tylko ze stopnia porowatości. Z drugiej strony, jak to wynika z przedstawionego na rysunku 4.4 rozkładu punktów doświadczalnych, średnia porowatość badanych materiałów wynikająca z analizy ilościowej – zgodnie z (4.2) – pokrywa się z wartością porowatości jaką uzyskano metodą doświadczalną (4.5), z wykorzystaniem graficznej identyfikacji struktury. Przedstawione na tym rysunku porównanie jednoznacznie pokazuje, że metoda obliczeniowa i metoda graficzna prowadzą praktycznie do tej samej skali wartości porowatości, a wzajemne odstępstwo nie przekracza 10%.



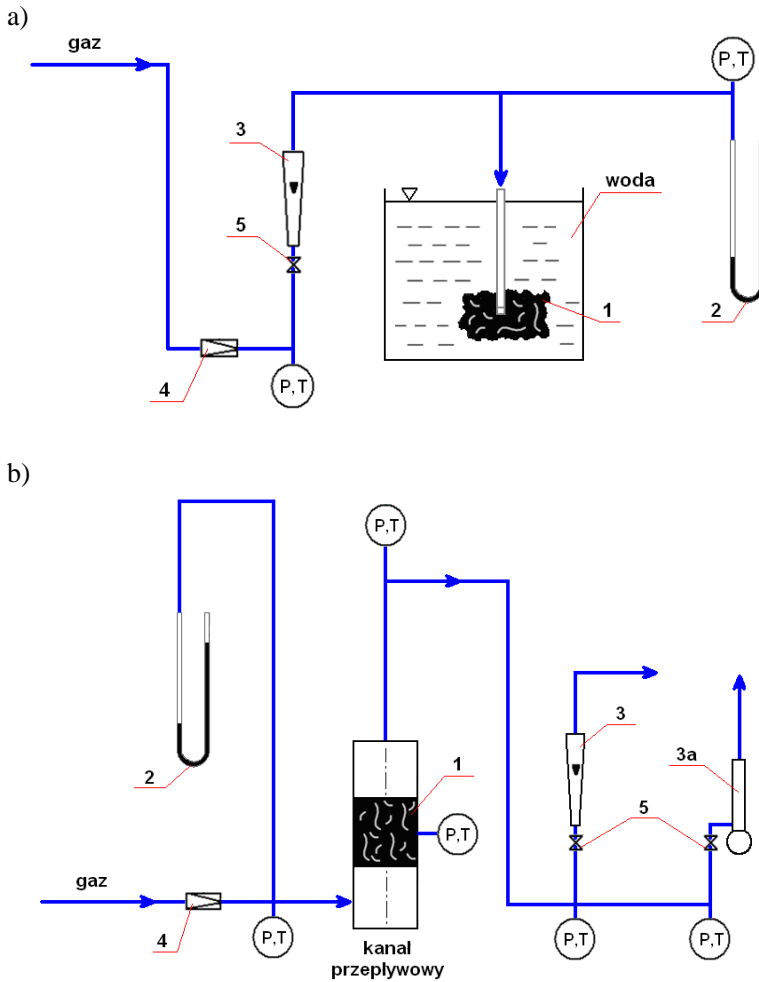
Rys. 4.4. Porównanie średniej porowatości obliczonej wg (4.2) – tabela 4.2, z porowatością wyznaczoną graficznie metodą obiektowej analizy obrazu (SEM)

4.2. Stanowisko doświadczalne

Przeprowadzone badania doświadczalne odnosiły się do dwóch odrębnych układów pomiaru gazoprzepuszczalności, dostosowanych do odmiennego kształtu próbki, jak to pokazano na rys. 4.5. Pierwszy – rys. 4.5a – stanowił układ pomiarowy przeznaczony do wyznaczania przepuszczalności materiałów w warunkach barbotażu. Taki sposób pomiaru przyjęto dla próbek nieokreślonego kształtu (tzw. objętościowych), jaki wynikał z naturalnie pozyskanych fragmentów próbek (rys. 4.1a-f). Pozwalało to ocenić zarówno intensywność przepuszczalnościową badanych próbek jak i ukierunkowanie strugi gazu względem struktury próbki.

Drugi układ pomiarowy – rys. 4.5b – wykorzystywano do badań przepuszczalności tych samych materiałów, jednakże na próbkach skonfigurowanych do kształtu bryły sześcienniej (rys. 4.1g-i). W układzie tym przepływ gazu był ukierunkowany względem arbitralnie wybranej osi bryły X, Y, Z, przy czym badania te zawsze prowadzono w odniesieniu do wszystkich trzech kierunków.

W obu przypadkach do badań gazoprzepuszczalności wykorzystano jako czynniki robocze powietrze, azot i ditlenek węgla. W każdym przypadku przepływ gazu przez próbkę (1) odbywał się w reżimie ciśnieniowo-swobodnym, przy ciśnieniu odniesienia na zaworze redukcyjnym (4) w zakresie (0,04–0,4) MPa, oraz swobodnym wypływie gazu do otoczenia. Powietrze pobierano z instalacji sprężonego powietrza, zaś azot i ditlenek węgla z butli gazowych, w zakresie temperatury odniesienia (17–25)°C.

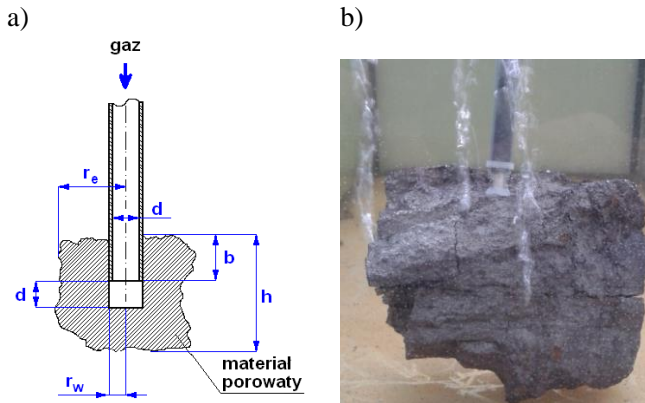


Rys. 4.5. Schemat układu pomiarowego do badań przepuszczalności materiałów porowatych: a) w warunkach barbotażu, b) dla ukierunkowanego przepływu gazu; 1 – materiał porowaty (próbka), 2 – manometr różnicowy, 3 – rotametr (3a – przepływomierz bąbelkowy), 4 – reduktor ciśnienia, 5 – zawór regulacyjny

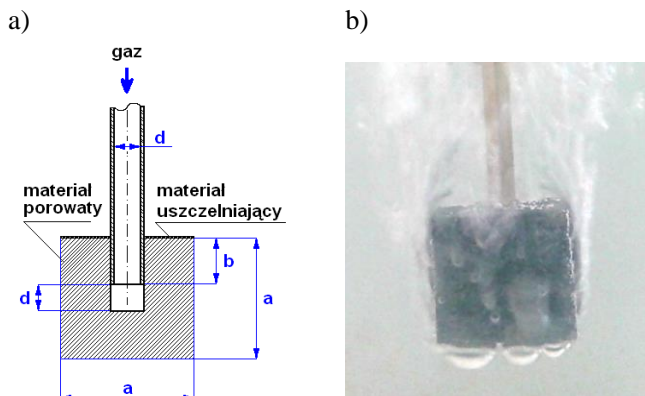
Do pomiaru spadku ciśnienia w danym układzie pomiarowym stosowano manometry różnicowe (2), zainstalowane w układzie pomiarowym strumienia przed wlotem gazu do próbki materiału. Do pomiaru strumienia gazu wykorzystywano rotametry pływakowe (3), które przed rozpoczęciem badań wyskalowano za pomocą gazomierza mieszkowego. Dla bardzo małych strumieni gazu posługiwano się przepływomierzem bąbelkowym (3a). Dla pozostałych gazów stosowano odpowiednie przeliczenie skali względem współczynnika korekcyjnego, uwzględniającego zmianę parametrów równania stanu. Poprzez regulację strumienia gazu zaworami (5) dla każdego układu wyznaczano charakterystyki

przepuszczalnościowe badanych próbek. Wszystkie wyniki pomiarów strumienia gazu odniesiono do warunków normalnych (293 K, 1013 hPa).

Standardowe układy zasilania próbek dla przepływu gazu w warunkach barbotażu (wraz z oznaczeniem umownych parametrów) pokazano na rys. 4.6 i rys. 4.7, odpowiednio dla próbki objętościowej i próbki sześcienniej. Na rysunkach tych pokazano też przykładowe efekty procesowe dla tych warunków.

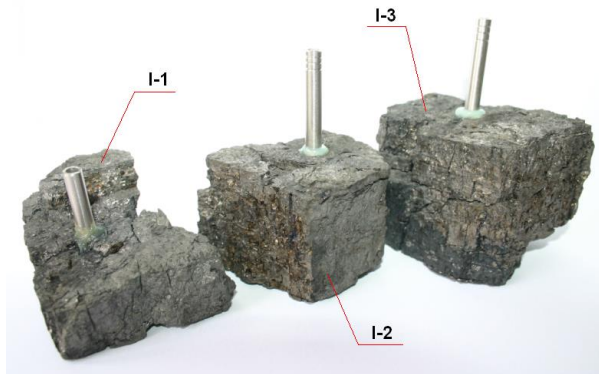


Rys. 4.6. Schemat układu zasilania próbki (a) oraz przepływ gazu w warunkach barbotażu (b)



Rys. 4.7. Schemat układu zasilania próbki sześcienniej (a) oraz odpowiadający temu przepływ gazu w warunkach barbotażu (b)

O ile próbki objętościowe z natury były przypadkowego kształtu oraz zróżnicowanej wielkości (rys. 4.8), to w przypadku próbek sześciennych zasilanych dyszą centralną stosowano ujednocnione wymiary próbek, o długości boku sześciangu 30, 40 i 50 mm (rys. 4,9).



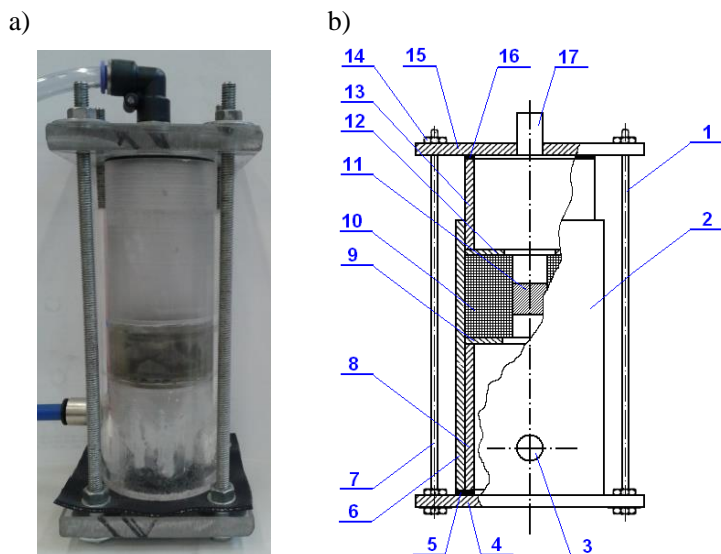
Rys. 4.8. Próbkki karbonizatu *in situ* o dowolnym kształcie



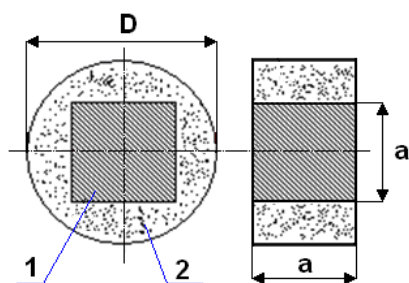
Rys. 4.9. Próbkki koksu o kształcie bryły sześcienniej:
A30 (30×30×30 mm), A40 (40×40×40 mm), A50 (50×50×50 mm)

Układ pomiarowy, a ściślej budowę przepuszczalnościomierza, jaki wykorzystywano przy przepływie gazu ukierunkowanym wzdłuż wybranej osi próbki sześcienniej (X, Y, Z), pokazano na rys. 4.10. Przepuszczalnościomierz ten, specjalnie zaprojektowany do tego celu, jest przedmiotem własnego opracowania patentowego [191], a w prezentowanym na tym rysunku wykonaniu jest przeznaczony do badań przepuszczalności próbek w postaci sześcianu w dowolnym kierunku jego osi. Jest to możliwe przez zastosowanie specjalnej celki pomiarowej, jako systemu uszczelnienia umożliwiającego pomiar przepuszczalności w każdym kierunku (X, Y, Z) ułożenia próbki pomiarowej.

Schemat takiej celki, wraz z zaznaczeniem materiału uszczelniającego i sześcienniej próbki pomiarowej, przedstawiono na rys. 4.11. Jej budowa umożliwia pomiary gazoprzepuszczalności względem każdej osi próbki, której wymiary wynosiły 20×20×20 mm, a były one wykrawane z tej samej bryły materiału badawczego, jaki wykorzystywano w warunkach barbotażu. Stąd ich budowa strukturalna była swoista dla każdego rodzaju badanego materiału, co ułatwiało porównanie zjawisk hydrodynamicznych wynikających z ich gazoprzepuszczalności.



Rys. 4.10. Przepuszczalnościomierz gazu: a) widok, b) schemat konstrukcyjny:
 1 – obudowa, 2 – cylindryczny korpus, 3 – króciec wlotowy gazu, 4 – podstawa dolna,
 5 – uszczelka dolna, 6 – nieruchoma część dolna zewnętrzna, 7 – nagwintowany pręt,
 8 – nieruchoma część dolna wewnętrzna, 9 – pierścień oporowy dolny, 10 – celka pomiarowa,
 11 – próbka materiału porowatego, 12 – pierścień oporowy górny, 13 – ruchoma tuleja górna,
 14 – nakrętka, 15 – podstawa górna, 16 – uszczelka górna, 17 – króciec wylotowy gazu

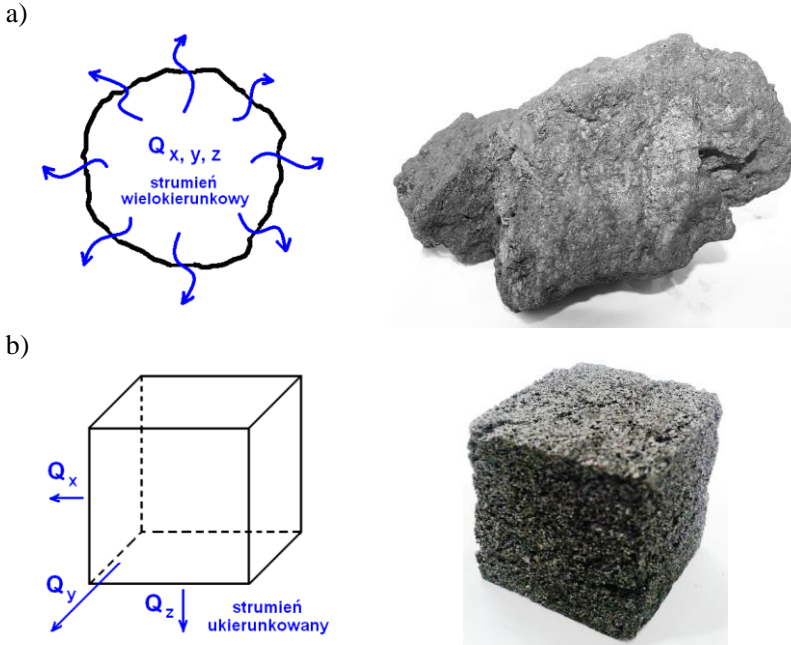


Rys. 4.11. Wkład celki pomiarowej:
 1 – materiał porowaty (próbka sześcienna), 2 – uszczelnienie; $D = 49$ mm, $a = 20$ mm

4.3. Zakres i metodyka badań

W ocenie hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate, badania wykonano zarówno w odniesieniu do próbek objętościowych o nieokreślonym kształcie (rys. 4.12a), jak i próbek w postaci sześciangu (rys. 4.12b). W obu przypadkach badania realizowano dla przepływu różnych gazów (powietrze, azot, ditlenek węgla), w zakresie pomiarowym strumienia przepuszczalności wynikającym z ciśnienia odniesienia. W obu też przypadkach dokonywano niezależnej oceny spadku ciśnienia na porowatym złożu, przyjmując umownie dla próbki

objętościowej tzw. wielokierunkowy (fraktalny) schemat przepływu gazu w warunkach barbotażu, oraz przepływ ukierunkowany (XYZ), charakterystyczny dla próbki sześcienniej. Nadmienić należy, że dla próbki sześcienniej pomiary przepuszczalności wykonywano niezależnie dla każdego wybranego kierunku przepływu (X, Y, Z), poprzez obrót takiej próbki w wybranej płaszczyźnie celki pomiarowej.



Rys. 4.12. Oznaczenie układów przepływowych:

a) wielokierunkowy-fraktalny (próbka objętościowa), b) ukierunkowany (próbka sześcienna)

Celem porównania zjawisk hydrodynamicznych wynikających z gazoprzepuszczalności złóż porowatych o zróżnicowanym kształcie próbek, dokonano odpowiedniego przeliczenia ich objętości. Za miarę tego porównania przyjęto krotność objętości próbek o sześciennym kształcie, w odniesieniu do objętości próbek o przepływie fraktalnym (objętościowych). Tak wyznaczony zastępczy wskaźnik przeliczenia parametrów objętościowych wynikających z wzajemnej przepuszczalności badanych materiałów podano w tabeli 4.4.

Niejako odrębnym, a jednocześnie niezmiernie ważnym zagadnieniem wynikającym z metodyki pomiarów jest wskazanie na sposób oceny współczynnika przepuszczalności. Ponieważ jednak parametr ten stanowi kluczowe znaczenie w opisie hydrodynamiki ośrodków o porowatej strukturze, a jednocześnie był weryfikowany względem wyników badań, metodykę jego wyznaczania przedstawiono w kolejnym punkcie.

Tabela 4.4

Charakterystyka cech objętościowych badanych próbek

Materiał badawczy		Próbka objętościowa	Bryła sześcienna
		Objętość próbki $V_{pr} \cdot 10^{-3}, m^3$	Liczba zastępcza objętości*) n_v
karbonizat <i>in situ</i> (I)	I-1	0,06	7,4
	I-2	0,10	12,7
	I-3	0,14	17,0
	średnia	0,10	12,3
koks (II)	II-1	0,06	7,0
	II-2	0,06	7,5
	II-3	0,17	20,8
	średnia	0,09	11,8
przetopiona skała płonna <i>ex situ</i> (III)	III-1	0,08	10,2
	III-2	0,12	15,5
	III-3	0,16	19,7
	średnia	0,12	15,1
karbonizat <i>ex situ</i> (IV)	IV-1	0,13	16,7
	IV-2	0,22	26,9
	IV-3	0,39	48,4
	średnia	0,25	30,7
przetopiona skała płonna <i>in situ</i> (V)	V-1	0,08	9,6
	V-2	0,16	20,3
	V-3	0,39	31,8
	średnia	0,25	20,6
przetopiona skała wul- kaniczna (VI)	VI-1	0,05	6,4
	VI-2	0,31	38,8
	VI-3	0,46	57,5
	średnia	0,27	34,2

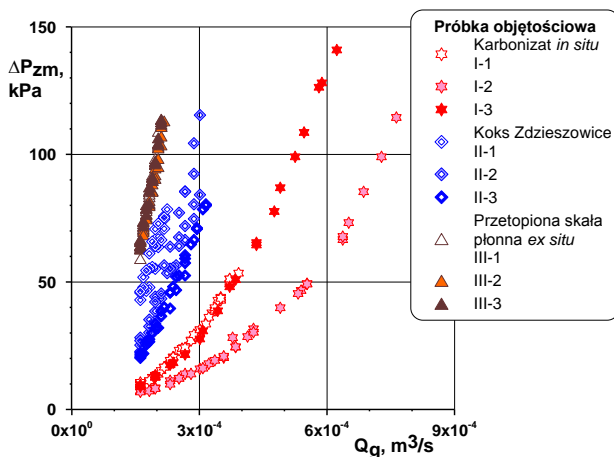
*) krotność próbki sześciennej o wymiarach 20×20×20 mm

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.1. Ocena przepuszczalności

Podstawą oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża i materiały porowate jest charakterystyka ich przepuszczalności, jaka wynika z ciśnienia wymuszającego ten przepływ. W każdym przypadku określenie tej charakterystyki polega na wyznaczeniu wpływu dyspozycyjnego nadciśnienia na osiągnięty strumień gazu, albo odwrotnie – wpływu strumienia gazu na wartość tego nadciśnienia, równoważnego spadkowi ciśnienia, jaki towarzyszy temu strumieniowi. W tym drugim przypadku jest to równoznaczne z wyznaczeniem całkowitych oporów przepływu gazu przez takie złożo.

Przedstawione na rys. 5.1 wyniki badań dla przepływu powietrza wskazują, że w odniesieniu do materiałów porowatych w postaci różnego rodzaju karbonizatów charakter zmian funkcji przepuszczalności gazu jest bardzo zróżnicowany. Dla samego już karbonizatu *in situ* (I-1, I-2, I-3) otrzymuje się silnie odmienne charakterystyki przepuszczalności, a ich wzajemne odstępstwo zależy najwyraźniej od struktury tego materiału. Ponadto charakterystyki te mają przebieg paraboliczny, co wskazuje na ich podobieństwo do hydrodynamiki przepływu przez kanały zamknięte. Z drugiej strony nieliniowa tendencja tych charakterystyk świadczy o dominacji przepływu burzliwego, z czym związane jest też odstępstwo od prawa Darcy'ego.

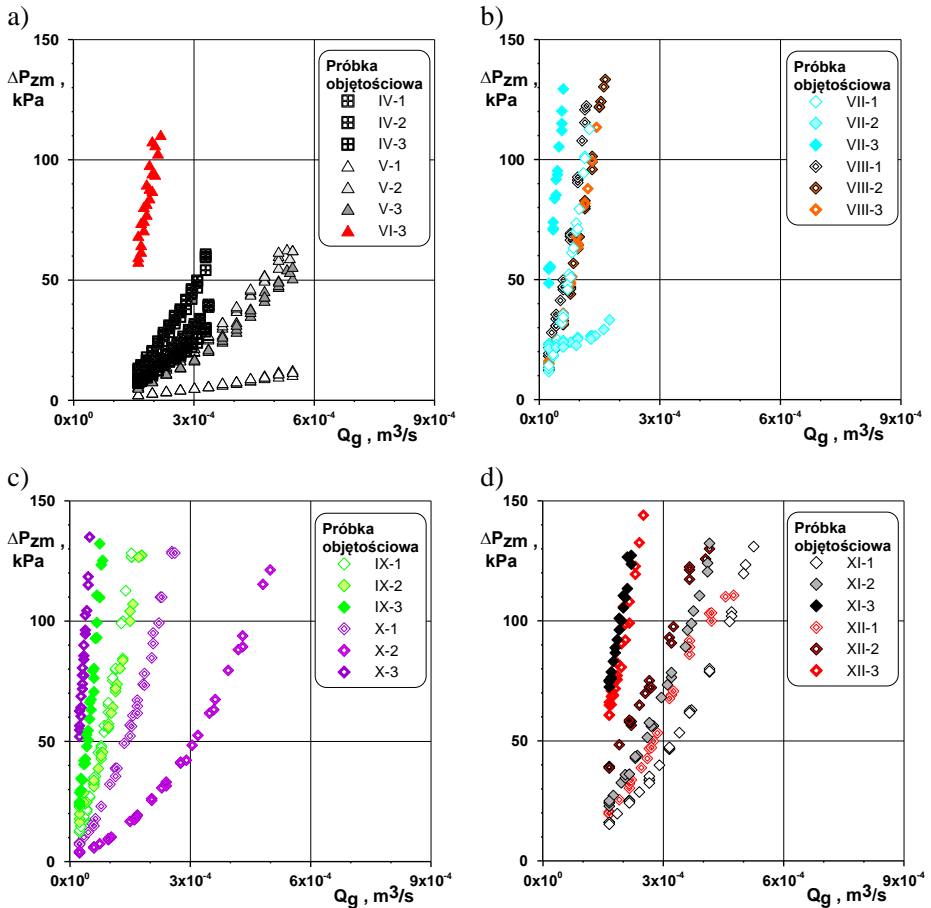


Rys. 5.1. Przepuszczalność materiałów porowatych (próbka objętościowa)

Porównanie do innych materiałów pokazuje, że karbonizaty *in situ* stanowią struktury porowate znacznie bardziej przepuszczalne, aniżeli ma to miejsce w przypadku koksu (II-1, II-2, II-3), czy przetopionej skały płonnej (III-1, III-2, III-3). W odniesieniu do koksu, który w tej grupie odznacza się największą porowatością (tab. 4.3) pokazuje to, że duża część jego porów jest dla przepływu gazu zamknięta, natomiast bardziej monolityczna i zwarta struktura karboniza-

tów nosi cechy złoża porowato-szczelinowego (rys. 4.3a), co przy tym samym ciśnieniu odniesienia sprzyja dużo większej przepuszczalności gazu dla tego materiału. Z kolei najmniejsza w porównaniu do powyższych materiałów przepuszczalność skały płonnej ma niewątpliwie swe uzasadnienie w relatywnie dużo mniejszej porowatości tego materiału, z mniejszym jednocześnie udziałem porów otwartych dla przepływu (rys. 4.3c).

Podobne wnioski i spostrzeżenia wypływają z wyników badań przedstawionych na rys. 5.2, odnoszących się do innych karbonizatów, jakie były przedmiotem doświadczalnej oceny w zakresie ich przepuszczalności, przy wielokierunkowo-fraktalnym przepływie powietrza w warunkach barbotażu.

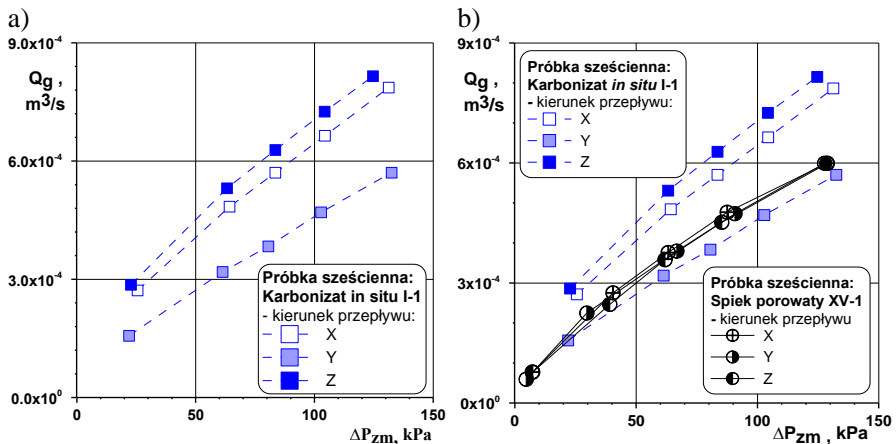


Rys. 5.2. Przepuszczalność porowatych materiałów dla próbki objętościowej (barbotażu): a) IV – karbonizat *ex situ*, V – przetopiona skała płonna *in situ*, VI – przetopiona skała wulkaniczna, b) VII – koks z systemu karbotest, VIII – koks Oaky Creek, c) IX–X koksy z systemu zasypowego, d) XI – koks stabilizowany, XII – koks wysokoreakcyjny

Wyniki te potwierdzają ocenę, że najbardziej porowate karbonizaty jakimi są koks, nie cechują się relatywnie największą przepuszczalnością. Przyczyn tego stanu rzeczy upatrywać należy w specyficznej budowie tej grupy materiałów, których struktura wykazuje cechy licznych porów zamkniętych i ślepych dla przepływu. Owszem, są i tu wyjątki, chociażby jak koks z systemu zasypowego (X-3), czy innych (koks XI, XII), ale generalnie grupa tych materiałów pomimo podobnej porowatości wykazuje dla powietrza bardzo zróżnicowane charakterystyki przepuszczalności. Podobna rzecz ma się także z innymi rodzajami materiałów, jakkolwiek dla takich ich rodzajów jak karbonizaty *in-* i *ex situ*, skały płonne, skała różnicy w tych charakterystykach jest dużo mniejsza. Wskazuje to na dużą przypadkowość struktury tego rodzaju materiałów, uzależnioną zapewne od rodzaju i warunków termicznego procesowania węgla.

Analogiczne w swej postaci charakterystyki uzyskano dla próbek o kształcie sześciianu z wykorzystaniem przepuszczalnościomierza pokazanego na rys. 4.10, umożliwiającego ocenę przepuszczalności w przepływie ukierunkowanym, czyli wg wybranej płaszczyzny bocznej takiej bryły – rys. 4.12b. W swej geometrycznej formie próbki te wybrane były z tego samego złoża próbek objętościowych i pod względem wewnętrznej struktury były z nimi porównywalne.

Przykładowe wyniki pomiarów odniesione do próbki sześciennej karbonizatu *in situ* przedstawiono na rys. 5.3, na którym pokazano charakterystyki przepuszczalności dla powietrza, w trzech kierunkach orientacji próbki (X, Y, Z). Z rozkładu punktów doświadczalnych widać, że przepuszczalność tego rodzaju materiału istotnie zależy od kierunkowości przepływu gazu.



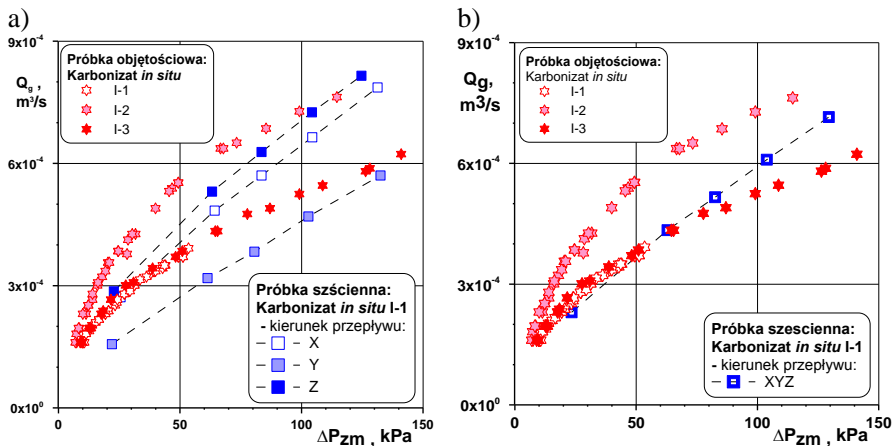
Rys. 5.3. Rozkład punktów doświadczalnych charakteryzujących asymetryczność przepływu powietrza przez złożę karbonizatu *in situ* (a) oraz porównanie tej asymetrii do poliamidu (b); próbka sześcienna o wymiarach boku 20×20×20 mm

Wskazuje to wyraźnie na efekt asymetrii przepuszczalności porowatego złoża względem wybranego kierunku (osi) przepływu, a w konsekwencji na wyraźnie anizotropową strukturę tego typu materiału.

Punktem odniesienia do oceny tej asymetrii może być poliamid porowaty (rys. 4.1i), stanowiący spiek kulistych cząstek o w miarę jednakowych wymiarach (średnicy ok. 0,1 mm). Materiał ten cechuje się porowatością bezwzględną na poziomie 32% (tab. 4.2), a jego struktura jest podobna do układu ortogonalnego (rys. 2.4a).

Jak wynika z rozkładu punktów doświadczalnych pokazanych na rys. 5.3b, charakterystyka przepuszczalności tego materiału nie zależy praktycznie od kierunku przepływu gazu, co wskazuje na symetryczną strukturę jego budowy. Wyznaczone dla wymiarowo takich samych próbek (20×20×20 mm) charakterystyki pokazują jednocześnie, że pomimo znacznie mniejszej od karbonizatu porowatości (o 10 i więcej %), poliamid ten cechuje się podobną charakterystyką przepływu gazu. Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenie, że większy efekt przepuszczalności karbonizatów bardziej wynika z ich szczelinowatej struktury, aniżeli wynikałoby to ze skali ich porowatości. Interesujące jest przy tym, że dla porowatego poliamidu charakterystyka przepuszczalności ma także nieliniowy charakter, co w odniesieniu do prostoosiowych modeli kapilarnych świadczy o przewadze burzliwego przepływu gazu nad jego ruchem laminarnym.

Z powyższych rozważań wynika ważny wniosek, że średnia przepuszczalność porowatego materiału szkieletowego nie jest uzależniona od kształtu elementarnej jednostki złoza (próbki), lecz od jego wewnętrznej struktury, co potwierdzają wyniki badań. Tytułem przykładu, na rysunku 5.4 pokazano porównanie charakterystyk przepuszczalności gazu, jakie dla karbonizatu *in situ* (I-1, I-2, I-3) otrzymano przy tych samych warunkach ciśnienia odniesienia dla próbki objętościowej i próbki w postaci sześciangu 20×20×20 mm.

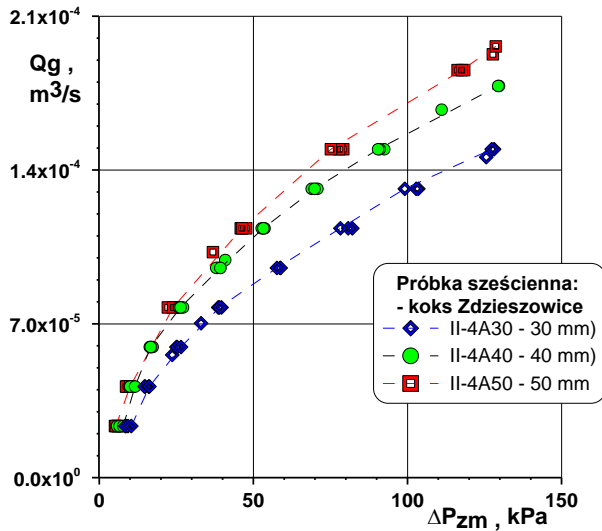


Rys. 5.4. Gazoprzepuszczalność karbonizatów różnego typu i kształtu: a) z uwzględnieniem kierunkowości przepływu gazu, b) uśrednione wartości dla próbki sześciennej

Uwzględniono przy tym uśrednione wartości dla przepływu powietrza względem osi XYZ (rys. 5.4b). Zauważyć można, że przebieg charakterystyki prze-

puszczalności tego materiału jest w obu przypadkach podobny, a kształt geometryczny próbki nie ma przy tym szczególnego wpływu na uzyskiwaną przepustowość porowatego złoża.

Potwierdzają to wyniki badań pokazane na rys 5.5, przedstawiające charakterystyki przepuszczalnościowe dla koksu przy przepływie powietrza przez próbki sześciennie o zwielokrotnionej objętości, a mianowicie 30×30×30, 40×40×40 i 50×50×50 mm.



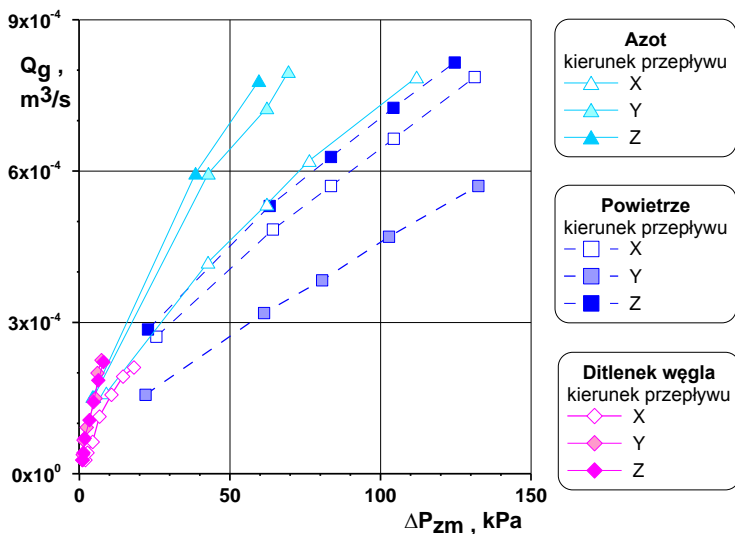
Rys. 5.5. Przepuszczalność koksu o zwielokrotnionej objętości próbek sześciennych (30×30×30, 40×40×40 i 50×50×50 mm) dla przepływu powietrza

Wyniki tych pomiarów pokazują, że wzajemne odstępstwo dla przepuszczalności gazu pomiędzy próbkami o wielokrotnie większej objętości, nie przenosi się na proporcjonalne przesunięcie charakterystyki strumienia gazu. Ma to istotne znaczenie w aspekcie przenoszenia skali a jednocześnie umożliwia ocenę hydrodynamiki przepływu gazu względem wybranego wzorca.

Doświadczalne charakterystyki porównawcze przepuszczalności dla różnego rodzaju materiałów porowatych, wyznaczone dla przepływu powietrza, azotu i ditlenku węgla przedstawiono na rys. 5.6 do rys. 5.11. Charakterystyki te odniesiono do próbek w kształcie bryły sześciennej o wymiarach 20×20×20 mm.

Na rys. 5.6 przedstawiono wyniki przepuszczalności dla karbonizatu *in situ*, odniesione do przepływu kierunkowego gazów (X, Y, Z). Niezależnie od stwierdzonego już faktu anizotropii tego materiału, można tu dodatkowo zauważyć, że w całym zakresie ciśnienia odniesienia przepuszczalność tego karbonizatu dla powietrza jest mniejsza od azotu, natomiast dużo większa niż dla ditlenku węgla. Dla tego ostatniego gazu zaobserwowano dodatkowo ograniczenie charakterystyki przepuszczalności, co związane jest zapewne ze zjawiskiem dławienia, ograniczającym dalszy wzrost przepuszczalności mimo zwiększania

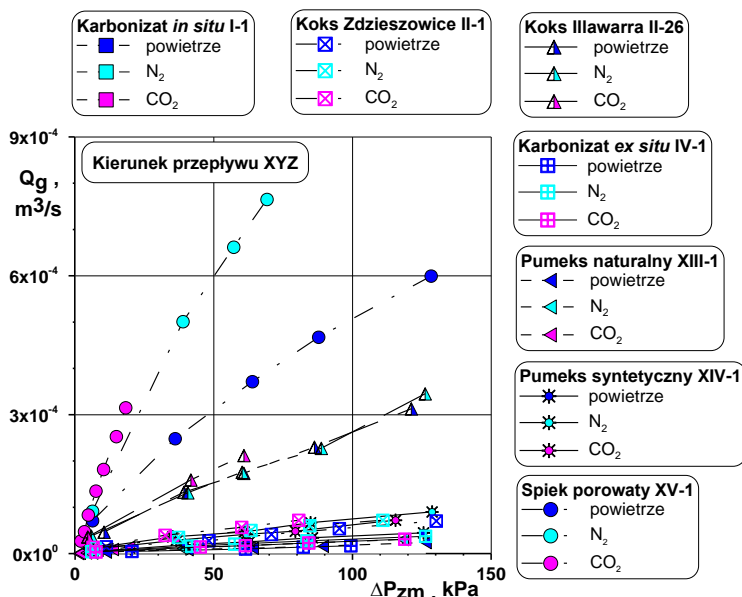
ciśnienia odniesienia. Wpływ na to może mieć znacznie większa gęstość tego gazu w porównaniu do pozostałych, ale bardziej wiarygodny wydaje się potwierdzany w literaturze fakt [115, 128], że wyrażający się spadkiem ciśnienia na porowatym materiale efekt dławienia izentalpowego jest tym większy im większy opór napotyka gaz przy przepływie przez sieć mikrokanalów (w warunkach adiatermicznych). Blicharski i Smulski [16] sugerują z kolei, że może to być wpływ efektu *Klingenberga*, jako zjawiska ograniczającego ruch molekuł gazu o wielkościach porównywalnych z wielkością porów. W tym ostatnim przypadku zwraca się jednocześnie uwagę na ważność tego zjawiska w aspekcie sekwestracji ditlenku węgla w złożach geologicznych.



Rys. 5.6. Przepuszczalność karbonizatu *in situ* w zależności od czynnika roboczego

Spostrzeżenia te potwierdzają wyniki pomiarów pokazane na rys. 5.7, odniesione do średniej przepuszczalności (XYZ) różnego rodzaju materiałów, jaka dla próbki sześciennej wynika ze strumieni kierunkowych gazu.

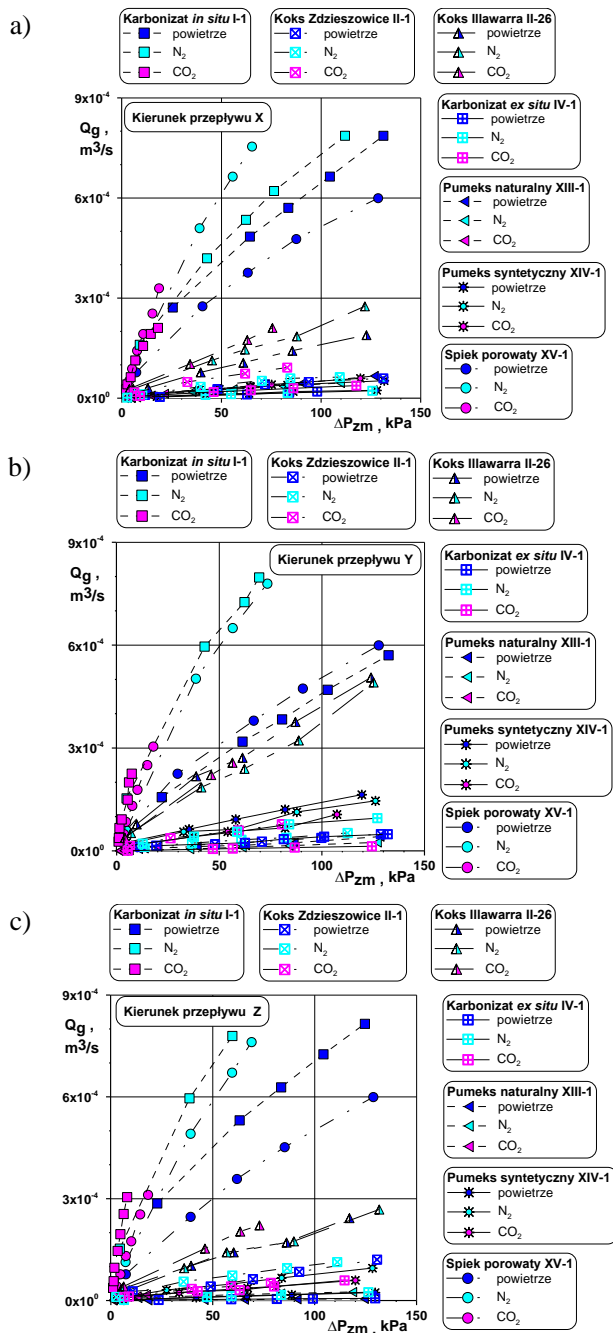
Można zauważyć, że dla wszystkich trzech gazów największą przepuszczalnością cechują się poliamid (XV) i karbonizat *in situ* (I). Dużo mniejszą granicę przepuszczalności wykazuje koks-Ilawarra (II-26), jakkolwiek dla każdego rodzaju gazu o zbliżonej charakterystyce przepływowej. Dla pozostałych materiałów granica ta jest wyraźnie mniejsza. Zwraca uwagę, że ograniczenie przepuszczalności dla ditlenku węgla wykazują wszystkie materiały, co zależy od ciśnienia odniesienia – np. dla poliamidu i karbonizatu *in situ*, ciśnienie to wynosi ok. 20 kPa, podczas gdy dla koksu Ilawarra ok. 60 kPa, a jeszcze więcej dla innych materiałów. Przy relatywnie dużej porowatości tych materiałów, wskazuje to na znaczące ograniczenie wolnej przestrzeni dla przepływu gazu, czego przyczyną jest niewątpliwie duży udział w strukturze tych materiałów porów ślepych i zamkniętych dla przepływu kanalików.



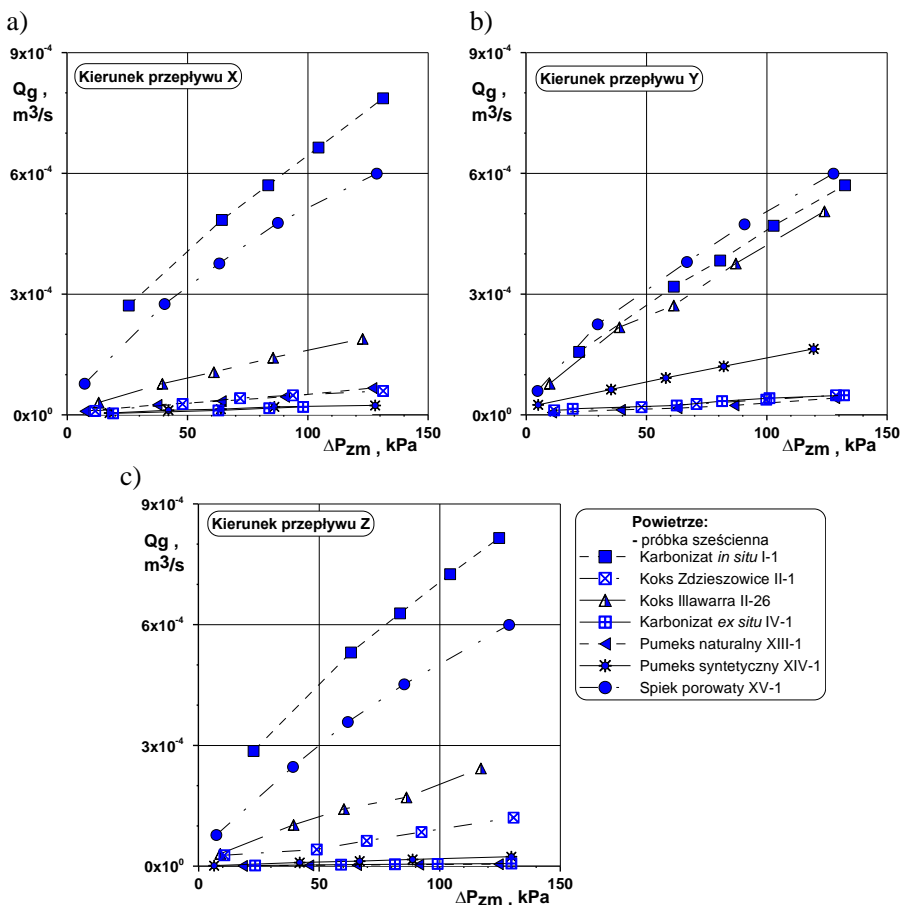
Rys. 5.7. Uśrednione charakterystyki przepuszczalnościowe (XYZ) dla powietrza, azotu i ditlenku węgla (próbka sześcienna $20 \times 20 \times 20$ mm)

Szczegółowe zestawienie wyników pomiarów przepuszczalności dla tych samych materiałów względem wybranego kierunku przepływu gazu (X, Y, Z) przedstawiono na rys. 5.8. W zasadzie nie obserwuje się w tym przypadku istotnego odstępstwa względem rozkładu punktów doświadczalnych na poprzednim rysunku, jakkolwiek kierunkowe charakterystyki przepływowe są bardziej wyraziste i łatwiej tutaj dostrzec wzajemne współzależności. Interesującym jest fakt, że w kierunku poprzecznym przepływu Y (rys. 5.8b) karbonizat *in situ*, poliamid i koks-Illawarra wykazują względem powietrza podobną charakterystykę przepuszczalności. W pozostałych przypadkach (kierunki X i Z), odstępstwa pomiędzy tymi charakterystykami są znacznie większe. Należy przypuszczać, że wpływ na to mają zarówno wewnętrzna struktura badanego złoża, jak i rodzaj przepływającego gazu.

Charakterystyki przepuszczalności ujęte odrębnie dla poszczególnych gazów przedstawiono na kolejnych trzech rysunkach – odpowiednio dla powietrza (rys. 5.9), azotu (rys. 5.10) oraz ditlenku węgla (rys. 5.11). W każdym przypadku przepływ ukierunkowany (X, Y, Z) odnosi się do tej samej wielkości próbek ($20 \times 20 \times 20$ mm), a także do takiej samej orientacji próbki względem kierunku przepływu gazu.



Rys. 5.8. Przepuszczalność materiałów porowatych dla powietrza, azotu i tlenku węgla względem kierunku przepływu gazu (próbka sześcienna): a) kierunek przepływu X, b) kierunek przepływu Y, c) kierunek przepływu Z

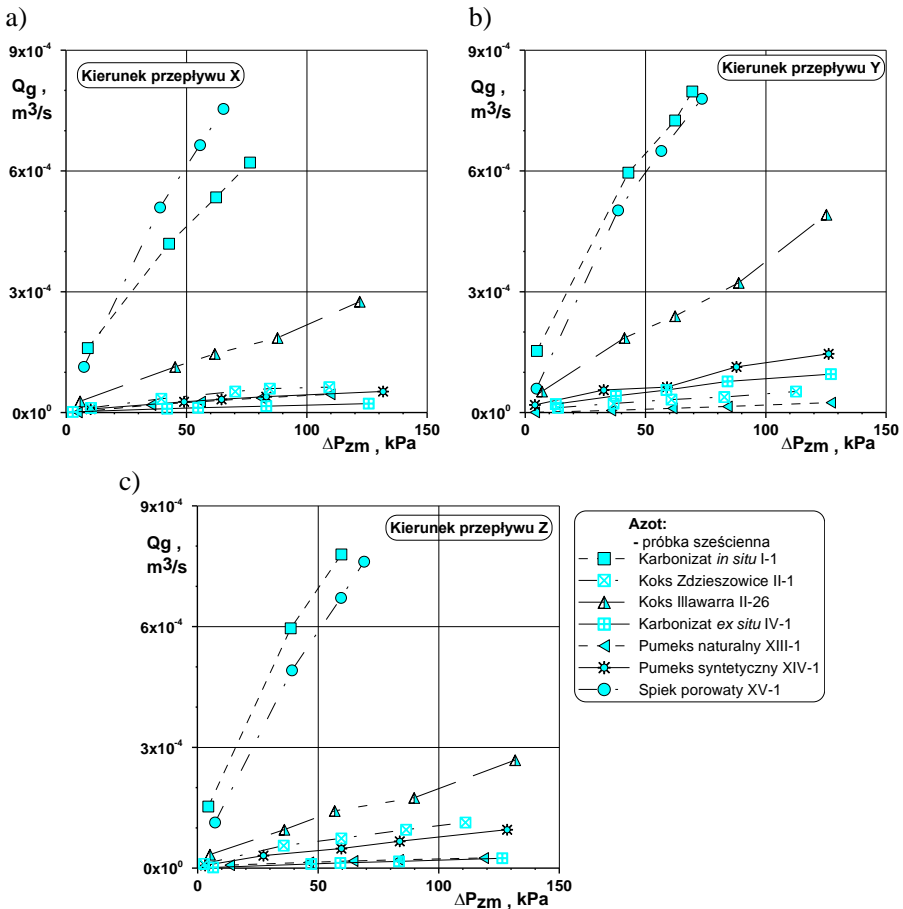


Rys. 5.9. Charakterystyki przepuszczalności dla powietrza (próbka sześcienna) odniesione do kierunku przepływu X (a), Y (b) i Z (c)

Porównanie danych pozwala stwierdzić, że najbardziej zbliżone do struktury izotropowej cechy wykazuje jedynie poliamid, jakkolwiek jego charakterystyki przepuszczalności dla poszczególnych gazów różnią się, a największą przepuszczalność (dla tego samego ciśnienia odniesienia) zanotowano dla przepływu azotu. Przyjąć można, że cechy takie wykazują także materiały typu pumeks, lecz stwierdzona bardzo mała ich przepuszczalność nie pozwala w tym przypadku na jednoznaczną ocenę. Dla reszty materiałów, odniesione do poszczególnych kierunków przepływu charakterystyki wskazują na wyraźną anizotropowość struktury ocenianych materiałów, co odnosi się zwłaszcza do takich ich rodzajów jak karbonizaty i koks.

Dodatkowo można zauważyć, że charakterystyki strumienia gazu dla kierunków X i Y wykazują podobną tendencję, dużo bardziej zbieżną aniżeli w odniesieniu do osi Z. Wynika to zapewne z faktu, że dla sześciannu przepływ taki

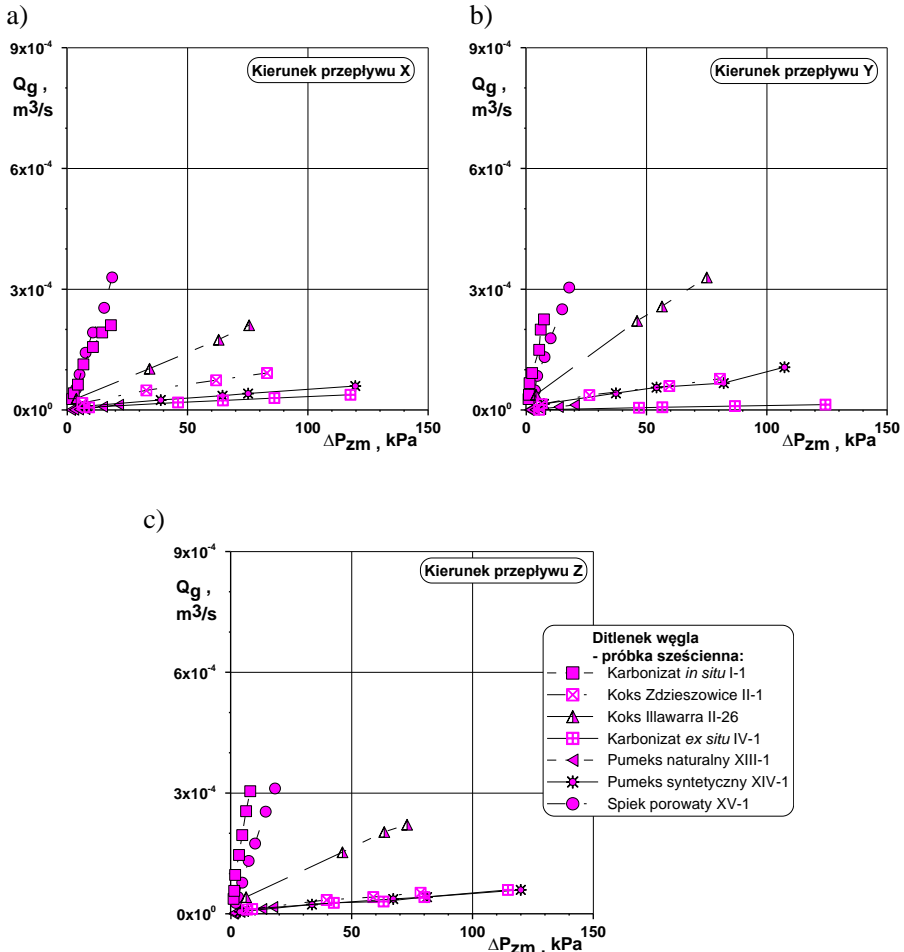
zachodzi w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach – poziomej dla kierunków X i Y oraz pionowej dla kierunku Z (rys. 4.12b). W tym pierwszym przypadku (X, Y) przekrój strukturalny materiału jest więc względem siebie dużo bardziej podobny, aniżeli w przekroju do niego prostopadłym.



Rys. 5.10. Charakterystyki przepuszczalności dla azotu (próbka sześcienna) odniesione do kierunku przepływu X (a), Y (b) i Z (c)

Z natury zjawisk towarzyszących hydrodynamicie przepływu wynika oczywiście, że charakterystyki przepuszczalności są bezpośrednio powiązane z wartościami dyspozycyjnego ciśnienia, jakie wynika z oporów przepływu gazu przez porowaty materiał. Na niektóre wynikające stąd rozważania zwrócono uwagę w p. 3.2, gdzie wskazano na modele wykorzystywane do oceny tych oporów (także jednostkowych). Oparte są one na ogół o modele kanałów prostoosiowych, w tym dla przepływu laminarnego na prawie Poissuille’a, a niejednokrotnie o modele utożsamiające ośrodek porowaty o szkieletowej postaci ze złożem ziarnistym, o tych samych, względnie podobnych cechach i parametrach prze-

plywowych złoza. Z natury rzeczy, modele te mają najczęściej postać równań korelacyjnych, weryfikowanych dla konkretnych warunków procesowych.



Rys. 5.11. Charakterystyki przepuszczalności dla ditlenku węgla (próbka sześcienna) odniesione do kierunku przepływu X (a), Y (b) i Z (c)

Korzystając z tych przesłanek, w tabeli 5.1 zestawiono wybrane modele (równania korelacyjne), które posłużyły do oceny ich przydatności dla wyznaczania oporów przepływu gazu przez wykorzystane w badaniach własnych materiały porowate. Aby w pełni zweryfikować przydatność tych modeli do opisu wyników uzyskanych w badaniach dokonano odpowiedniej adaptacji parametrów obliczeniowych tych równań na warunki wynikające ze specyfiki prowadzonych badań własnych.

Tabela 5.1

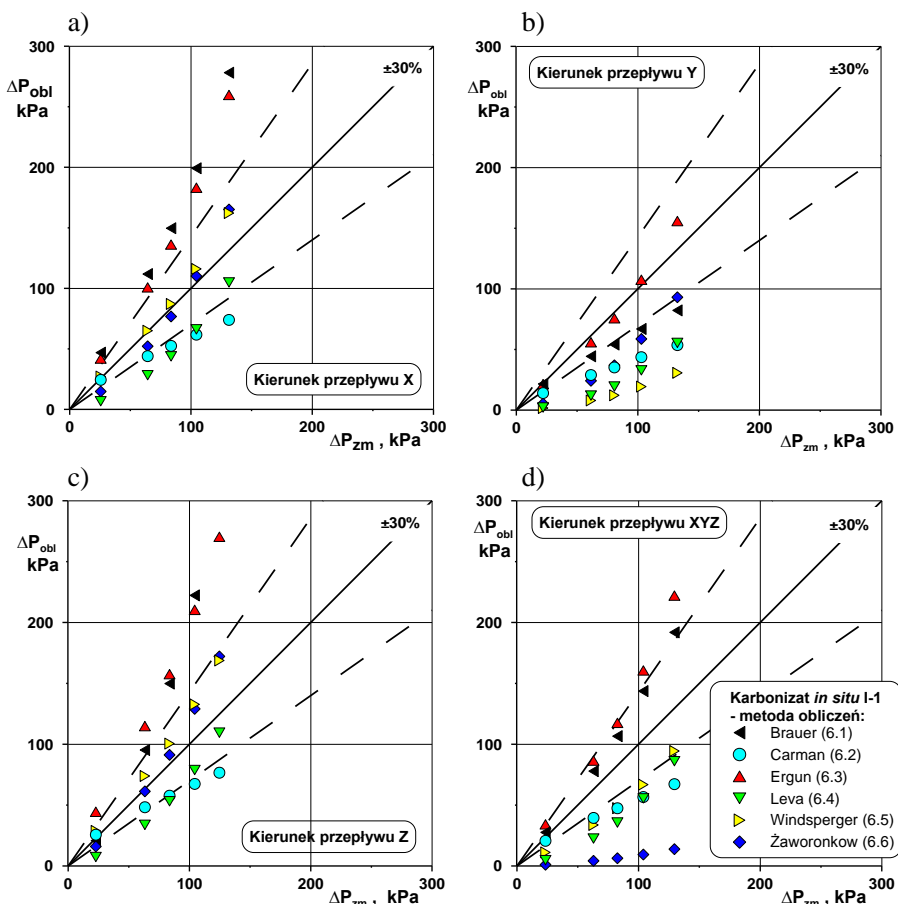
Metody obliczania oporów przepływu przez materiały porowate

Autor	Równanie korelacyjne	
Brauer [20]	$\Delta P_B = \xi_B \Delta P_E \left(\frac{(1-\varepsilon)^2 v_\varepsilon \eta H}{\varepsilon^3 d_e} \right)$	(5.1)
Carman [25]	$\Delta P_C = \frac{\eta v_\varepsilon H}{B_o} ; \quad B_o = \frac{d_e^2 \varepsilon^3}{16 \cdot k (1-\varepsilon)^2} ; \quad k = 2\phi_\varepsilon$	(5.2)
Ergun [54]	$\Delta P_E = \left(150 \frac{(1-\varepsilon)^2 v_\varepsilon \eta H}{\varepsilon^3 d_e^2} \right) + \left(1,75 \frac{(1-\varepsilon) v_\varepsilon^2 \rho H}{\varepsilon^3 d_e} \right)$	(5.3)
Leva, wg [119]	$\Delta P_L = \alpha \rho v_\varepsilon^2 H ; \quad \alpha = \frac{1,75}{4\varepsilon^{1,5} \sqrt{k B_o}}$	(5.4)
Windsperger [200]	$\Delta P_W = \frac{3}{4} \xi_W \left(\frac{(1-\varepsilon) \rho v_\varepsilon^2 H}{\varepsilon^3 d_e} \right)$	(5.5)
Żaworonkow [206]	$\Delta P_Z = \frac{2 \xi_Z \rho v^2 H}{\varepsilon^2 d_e}$	(5.6)

Uzyskane tą drogą wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.12, na którym podano porównanie wartości obliczonych z powyższych modeli, z wartościami zmierzonymi.

Jak wynika z rozkładu punktów doświadczalnych (próbka sześcienna 20×20×20 mm), dla wszystkich analizowanych warunków, zarówno dla przepływu ukierunkowanego (X, Y, Z) jak i wartości uśrednionych, wykazane w tabeli 5.1 równania nie czynią zadość opisowi oporów przepływu dla badanych materiałów porowatych. Rozkład punktów doświadczalnych znacznie odbiega od wartości obliczonych, zarówno w kierunku wartości większych, jak i mniejszych. Dopatrzyć się natomiast można, że jedynie dla kierunku X (rys. 5.12a) wystarczająco dokładnie wartości te opisuje model Windspergera (5.5) i analogicznie – model Erguna (5.3) dla kierunku Y (rys. 5.12b). Niemniej, już dla wyników uśrednionych (rys. 5.12d) oba te modele podają wartości znacznie odbiegające od zmierzonych, co odnosi się także do pozostałych metod.

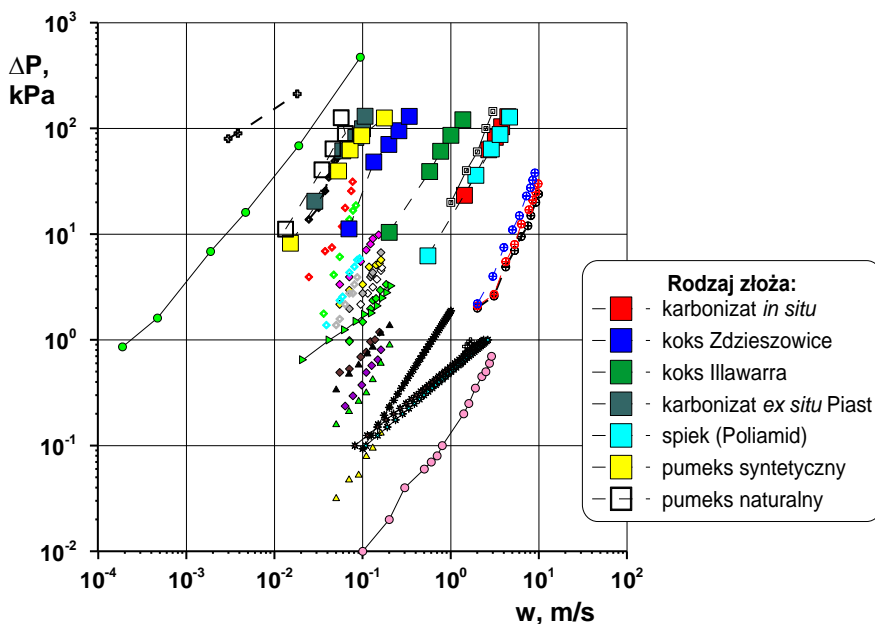
Wyniki tego porównania pokazują, że ewentualna adaptacja metod (modeli) obliczeniowych dedykowanych do porowatych złóż ziarnistych nie daje wystarczających przesłanek do stosowania tych metod w opisie hydrodynamiki przepływu gazu przez szkieletowe (stałe) złoża porowate.



Rys. 5.12. Porównanie zmierzonych wartości oporów przepływu gazu z obliczonymi wg wybranych modeli – karbonizat *in situ* (próbka sześcienna): a) kierunek przepływu X, b) kierunek Y, c) kierunek Z, d) wartość uśredniona (XYZ)

Główną przyczyną tego stanu rzeczy upatrywać należy w tym, że materiały porowate o szkieletowej budowie cechują się przepuszczalnością gazu – a potwierdzają to wyniki własnych badań – niewspółmiernie niższą do obliczeniowej wartości, jaka wynika z potencjalnej skali porowatości tego rodzaju materiałów. Jak już wielokrotnie podkreślano, spowodowane jest to występowaniem w tych materiałach mnogich porów ślepych oraz licznych zamkniętych dla przepływu gazu stref i kanałów. W efekcie straty ciśnienia na złożu porowatego materiału o budowie szkieletowej, zarówno te jakie mogą mieć związek ze stratami tarcia, jak i stratami wynikającymi z zaburzenia profilu prędkości (miejscowymi), znacznie odbiegają od oporów charakterystycznych dla przepływu pełnym przekrojem, jaki wynikałby z bezwzględnej porowatości złoża.

Tytułem uzupełnienia, na rysunku 5.13 przedstawiono rozkład punktów doświadczalnych, charakteryzujących zakres oporów przepływu dla badanych materiałów w porównaniu do danych literaturowych zestawionych w tabeli 3.2, a interpretowanych uprzednio na rys. 3.7. Z rozkładu tego wynika, że w większości przypadków analizowane w badaniach własnych porowate materiały szkieletowe charakteryzują się relatywnie znacznie większymi oporami przepływu od innych. Wynikająca z tego porównania przepuszczalność jest przy tym odniesiona do prędkości gazu, która została we wszystkich przypadkach przeliczona na średnie warunki przepływu, jakie wynikają z obliczeniowej porowatości każdego analizowanego złoża.



Rys. 5.13. Zakres własnych badań doświadczalnych na tle danych literaturowych (zgodnie do rys. 3.7)

5.2. Współczynnik gazoprzepuszczalności i własny model jego opisu

Jak podano w p. 3, sposoby oceny współczynnika przepuszczalności gazu przez złoża porowate są bardzo zróżnicowane i najczęściej wynikają z przyjętych metod pomiarowych, dostosowanych do określonych warunków procesowych. Dodatkowe ograniczenia w tej ocenie wynikają także z dużej złożoności zjawisk hydrodynamicznych, jakie towarzyszą przepływowi gazów przez porowate ośrodki, co z kolei niesie za sobą trudności w uogólnieniu tego zjawiska. Stąd metody (modele) opisu współczynnika przepuszczalności mają najczęściej postać równań korelacyjnych, których charakterystyczne przykłady (zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami) zestawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2.

Modele opisujące współczynnik przepuszczalności

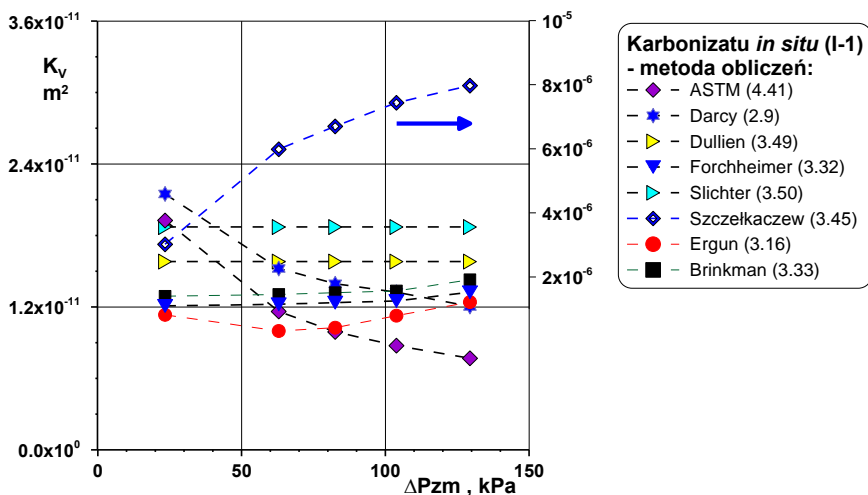
Autor	Model	Rodzaj złoża	Punkt odniesienia (równanie)
ASTM [164]	$K_A = \frac{\eta L Q_g P_{wyl}}{A_o \Delta P_{zm}} \frac{2}{(P_{wl} + P_{wyl})}$	piaski, łupki ropo- i gazonośne	(3.41)
Brinkman – wg [68, 175]	$K_B = \frac{w_o \eta}{\frac{\Delta P}{L} - (\rho \beta w_o^2) - \eta w_o}$	złoże owoców (gaz)	(3.33)
Darcy – wg [137, 168]	$K_{Da} = \frac{w_o \eta L}{\Delta P_{zm}}$	piasek (woda)	(2.9)
Dullien [45]	$K_{Du} = \frac{d_e^2}{180} \left(\frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \right)$	materiały ziarniste (gaz, ciecz)	(3.49)
Forchheimer – wg [19, 136]	$K_F = \frac{w_o \eta}{\frac{\Delta P}{L} - (\rho \beta w_o^2) + C}$	materiały ziarniste i porowate	(3.32)
Slichter – wg [197]	$K_S = 7,8 \varepsilon^{3,26} d_e^2$	złoże kuliste (gaz)	(3.50)
Szczelkaczew – wg [138]	$K_{Sz} = \frac{w_o \eta}{\hat{g} \rho}$	złoże ziarniste - (ciecz)	(3.45)

Kierując się tym zestawieniem, na rysunkach 5.14 i 5.15 przedstawiono porównanie wartości współczynnika przepuszczalności obliczonego wg tych modeli, w odniesieniu do niektórych badanych materiałów dla przepływu powietrza.

Jak można zauważyć, we wszystkich przypadkach otrzymuje się bardzo zróżnicowane wyniki, zarówno w aspekcie zastosowanej metody obliczeniowej, jak i ze względu na rodzaj materiału. Już tylko dla karbonizatu *in situ* (rys. 5.14), wyróżnić można trzy charakterystyczne tendencje zmian wartości współczynnika przepuszczalności względem spadku ciśnienia na porowatym złożu: malejącą, niezmienną oraz wzrastającą. Zgodnie z modelem Darcy'ego (2.9) tendencja malejąca wskazuje na większy efekt dławienia strumienia gazu, aniżeli wynikać by to mogło z rozporządzalnej wartości ciśnienia. Do podobnych wyników prowadzi metoda ASTM (3.41), jakkolwiek wartości współczynnika przepuszczalności są w tym przypadku wyraźnie mniejsze.

Inne opracowania nie dają tak jednoznacznych wyników, a niezmiennie wartości tego współczynnika wyznaczone wg metod Dulliena (3.49) i Slichtera (3.50) należy tłumaczyć tym, że metody te uwzględniają w swym opisie jedynie parametry strukturalne porowatego materiału. Podobną notację obserwuje się

dla modeli Forchheimera (3.32) i Brinkmana (3.33), dla których nieznaczna tendencja wzrostowa dla gazoprzepuszczalności wynika z uwzględnienia w tych modelach właściwości gazu. Z kolei całkowicie odmienny charakter zmian współczynnika przepuszczalności występuje dla modelu Szczelkaczewa (3.45), wg którego otrzymuje się też wartości tego współczynnika o kilka rzędów większe. Niemniej, w przypadku tym opis hydrodynamiki wydaje się najbliższy fizycznej strukturze karbonizatów, czyli ich znacznej szczelinowości. Wskazuje na to wzrost przepuszczalności wraz ze wzrostem ciśnienia, pozbawiony zauważalnych efektów dławienia.

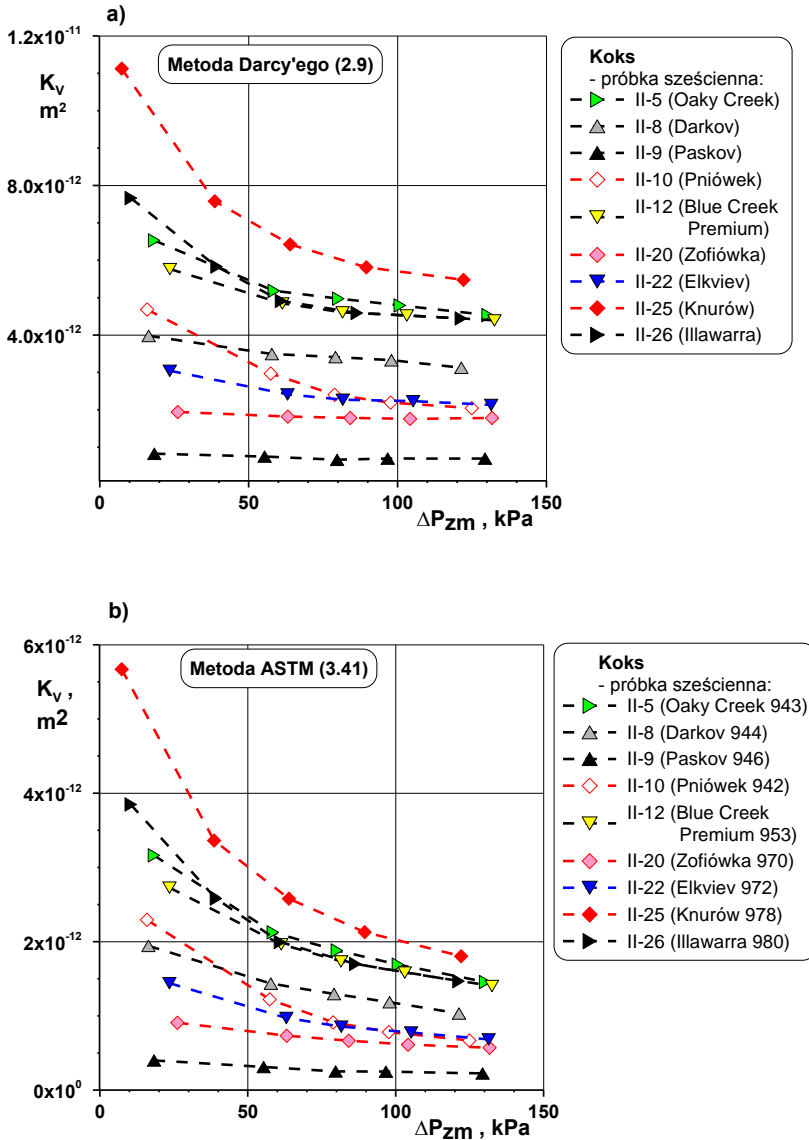


Rys. 5.14. Porównanie współczynnika przepuszczalności dla karbonizatu *in situ* względem różnych metod obliczeniowych dla przepływu powietrza (bryła sześcienna 20×20×20 mm)

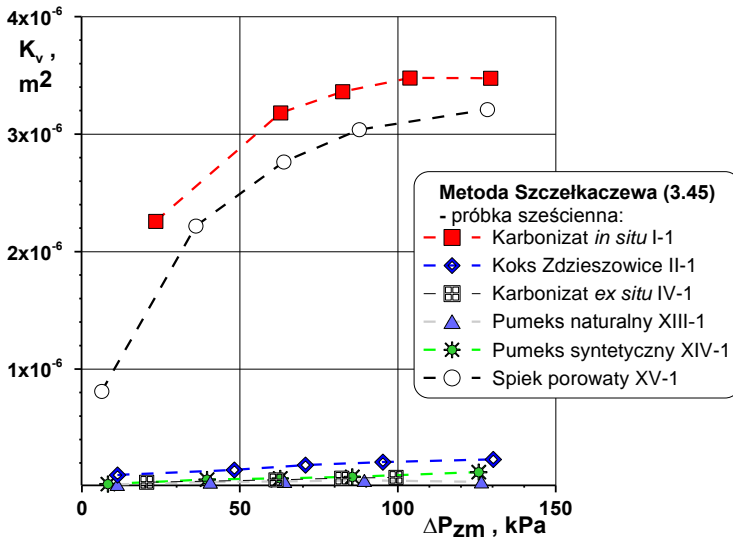
Interesującym wynikiem obliczeń pokazanych na rys. 5.15 jest to, że dla tej samej grupy materiałów – w tym przypadku koksu – otrzymuje się nie tylko bardzo rozbieżne charakterystyki współczynnika przepuszczalności, ale także ich na ogół nieliniowy charakter. Przeliczone względem metody Darcy’ego (rys. 5.15a) oraz metody ASTM (rys. 5.15b) wyniki pomiarów wskazują jednocześnie na znaczne (o rząd) zróżnicowanie wartości tego współczynnika, co wynika z wzajemnej relacji obliczeniowej tych metod. Pokazuje to też, że tylko w tej jednej grupie materiałów (koksy), istotny wpływ na warunki przepuszczalności mają zarówno miejsce pochodzenia, jak i technologia procesowania węgla.

Warte podkreślenia są odnoszące się do modelu Szczelkaczewa (3.46) charakterystyki przeliczone dla różnych materiałów – rys. 5.16. Stosunkowo bardzo małe wartości współczynnika przepuszczalności dla takich materiałów jak koks, pumeks, karbonizat *ex situ*, potwierdzają przeświadczenie o występowaniu w ich strukturze licznych obszarów zamkniętych dla przepływu (pory ślepe i zamknięte), pomimo relatywnie bardzo dużej ich porowatości (np. 63–88% dla pumeksu). Z kolei takie materiały jak karbonizat *in situ* i spiek poliamidu – pomimo stosunkowo małej porowatości, rzędu (32–42)% – cechują się znacznie

większą intensywnością przepływu gazu. Świadczy to z jednej strony o ich szczelinowo-porowatej strukturze (karbonizat), a z drugiej – jak w przypadku poliamidu – o regularnej strukturze materiału, przy powierzchni swobodnej dla przepływu w całości wynikającej z porowatości efektywnej, równoważnej w tym przypadku porowatości bezwzględnej.



Rys. 5.15. Współczynnik przepuszczalności dla koksu różnego rodzaju: a) wg metody Darcy'ego (2.9), b) wg ASTM (3.41) – przepływ powietrza (bryła sześcienna 20×20×20 mm)



Rys. 5.16. Współczynnik przepuszczalności wg Szczelkaczewa (3.45) dla wybranej grupy porowatych materiałów – przepływ powietrza (próbka sześcienna 20×20×20 mm)

W kontekście dużych rozbieżności, a zarazem licznych ograniczeń w stosowaniu analizowanych modeli, zarówno w aspekcie uwzględniania 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 do oceny spadku ciśnienia, jaki wynika z miejscowych oporów przepływu, opisanych równaniem (3.40). Przy odniesieniu współczynnika oporów (ξ_ε) oraz prędkości gazu (w_ε) do warunków związanych z wartością porowatości (ε) równanie to można zapisać jako

$$\Delta P = \xi_\varepsilon \frac{\rho_g w_\varepsilon^2}{2}, \quad (5.7)$$

Przekształcenie tego równania prowadzi do

$$\Delta P = \xi_\varepsilon \frac{\rho_g w_\varepsilon^2}{2} = \frac{1}{2} \xi_\varepsilon \rho_g \left(\frac{Q_g}{A_o} \right)^2,$$

$$\frac{\Delta P}{\xi_\varepsilon \rho_g} = \left(\frac{Q_g}{A_o} \right)^2,$$

$$\sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi_{\varepsilon}\rho_g}} = \frac{Q_g}{A_o},$$

$$Q_g = A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi_{\varepsilon}\rho_g}},$$

i ostatecznie do wyrażenia

$$Q_g = \sqrt{A_o^2 \frac{2\Delta P}{\xi_{\varepsilon}\rho_g}} = \sqrt{\frac{2A_o^2}{\xi_{\varepsilon}}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}}. \quad (5.8)$$

Efektywna powierzchnia przepływu gazu (A_o) wynika z porowatości (ε) złoża, co w przeliczeniu na całkowity przekrój kanału przepływowego daje

$$A_o = \varepsilon A.$$

Łatwo zauważyć, że składowa $\sqrt{\frac{2A_o^2}{\xi_{\varepsilon}}}$ tego wyrażenia ma wymiar powierzchni,

co w hydrodynamicznym ujęciu pozwala traktować ją jako odpowiednik współczynnika przepuszczalności. Stąd (z definicji)

$$K_V = \sqrt{\frac{2A_o^2}{\xi_{\varepsilon}}}. \quad (5.9)$$

Strumień gazu jest wówczas opisany zależnością

$$Q_g = K_V \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}}. \quad (5.10)$$

O ile więc znane są parametry hydrodynamiczne przepływu, takie jak strumień gazu i jego rodzaj, spadek ciśnienia na złożu oraz jego porowatość, to wartość tak rozumianego współczynnika przepuszczalności może być wyznaczona na drodze eksperymentalnej. Wówczas bowiem

$$K_V = \frac{Q_g}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}}. \quad (5.11)$$

Jeżeli odnieść tak zdefiniowany współczynnik przepuszczalności do kierunku przepływu (X, Y, Z), to dla każdego z nich otrzymamy

$$K_X = \frac{Q_X}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}} , \quad (5.12a)$$

$$K_Y = \frac{Q_Y}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}} , \quad (5.12b)$$

$$K_Z = \frac{Q_Z}{\sqrt{\frac{\Delta P_{zm}}{\rho_g}}} . \quad (5.12c)$$

Wynikająca stąd średnia (objętościowa) wartość współczynnika przepuszczalności może być obliczona na przykład, jako średnia geometryczna

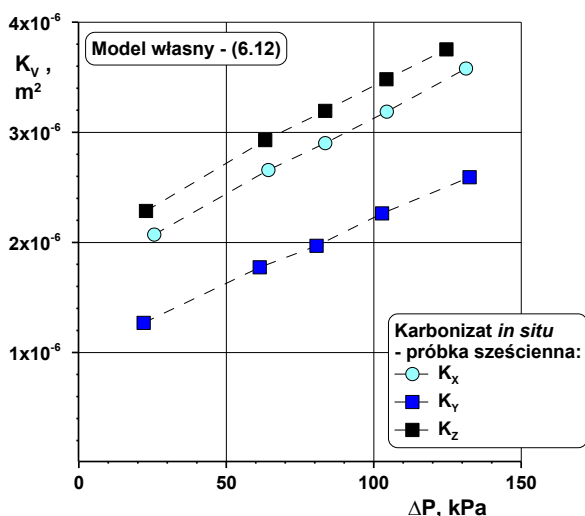
$$K_V = K_{XYZ} = \sqrt[3]{K_X K_Y K_Z} . \quad (5.13)$$

Warto jednak zauważyć, że w przypadku bardzo znacznej rozbieżności strumienia gazu dla poszczególnych kierunków przepływu, a w szczególnym przypadku nawet zaniku przepływu w jednym z nich, wykorzystanie tej średniej może prowadzić do zakłamania obliczeń, a w efekcie zaniżania średniej wartości tego współczynnika. W takim przypadku alternatywnym sposobem uśredniania współczynnika przepuszczalności może być średnia kwadratowa

$$K_V = K_{XYZ} = \sqrt{\frac{1}{3}(K_X^2 + K_Y^2 + K_Z^2)} . \quad (5.14)$$

W przeciwieństwie do niektórych innych modeli wzór (5.11) nie uwzględnia wpływu lepkości gazu na przepuszczalność, lecz ponieważ wzór ten ma charakter wielkości doświadczalnej to można przyjąć, że ujmuje on w swej postaci wszystkie charakterystyczne właściwości gazu, jakie wynikają zarówno ze zmiany temperatury jak i ciśnienia.

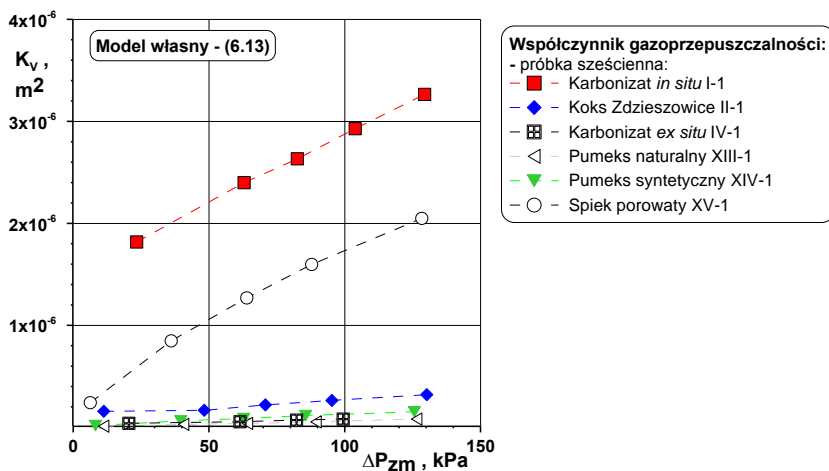
Przykładowe wyniki wyznaczonego w ten sposób współczynnika przepuszczalności dla powietrza przedstawiono na rysunku 5.17, na którym pokazano zmianę wartości tego współczynnika dla próbki sześcienniej karbonizatu względem przepływu ukierunkowanego. Widoczna zróżnicowana intensywność przepływu gazu względem każdego z kierunków (X, Y, Z), potwierdza znaczną anizotropowość struktury dla tego rodzaju materiału. Z kolei zbieżne nachylenie funkcji współczynnika przepuszczalności świadczy o podobieństwie tej struktury w każdej płaszczyźnie.



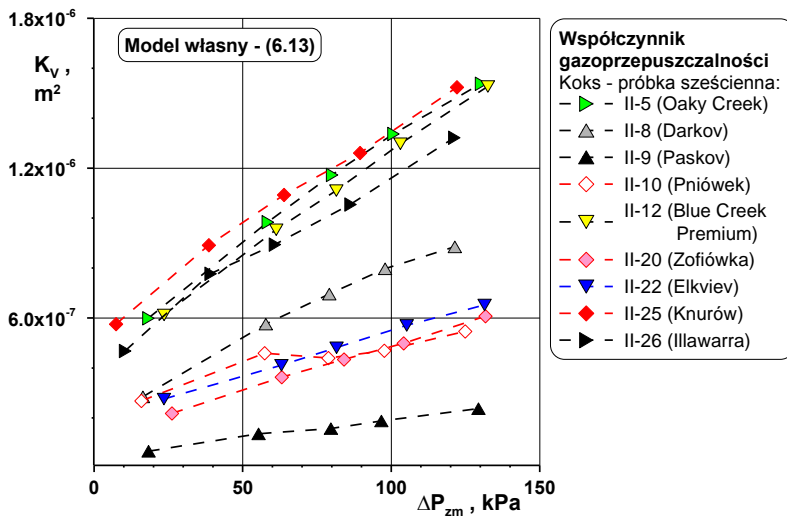
Rys. 5.17. Wielokierunkowe współczynniki gazoprzepuszczalności dla karbonizatu *in situ*, wyznaczone wg własnej metody (5.12) – próbka sześcienna 20×20×20 mm

Charakterystyczną cechą uzyskanych wyników jest monotoniczny charakter zależności współczynnika przepuszczalności wraz ze wzrostem ciśnienia, co ma miejsce także dla innych materiałów – rys. 5.18 i rys.5.19.

Wskazuje to na proporcjonalny wzrost przepuszczalności powietrza wraz ze zwiększającym się ciśnieniem odniesienia, co znacznie lepiej odpowiada zjawiskom przepływu gazu przez struktury porowate, aniżeli ma to miejsce w przypadku innych modeli. Oczywiście, współzależność taka odnosi się także do strumienia gazu, co wynika z opisu modelu (5.12).

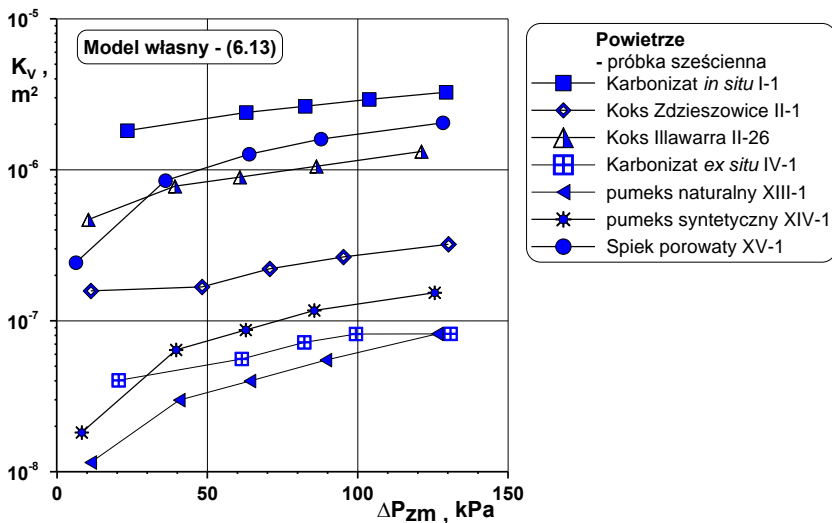


Rys. 5.18. Średni współczynnik przepuszczalności porowatych materiałów wyznaczony wg (5.13) – przepływ powietrza (próbka sześcienna 20×20×20 mm)



Rys. 5.19. Średni współczynnik przepuszczalności dla różnego rodzaju koksu wyznaczony wg (5.13) – przepływ powietrza (próbka sześcienna 20×20×20 mm)

Z bezpośredniego pomiaru tego strumienia, dla niektórych materiałów obserwuje się również bardzo niski poziom przepuszczalności, co niewątpliwie (choćby jak w przypadku pumeksu) ma swe źródło w strukturze tych materiałów. Na dokładniejszą interpretację wyników pozwala przedstawienie danych w układzie półlogarytmicznym – rys. 5.20.

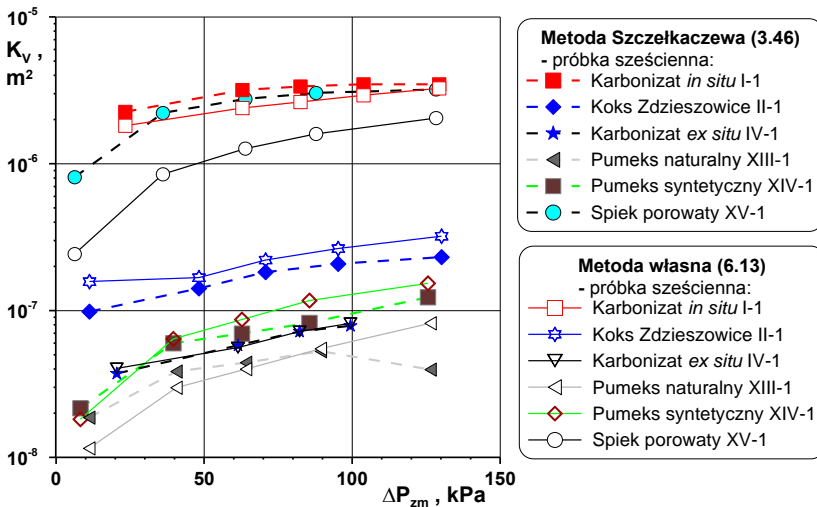


Rys. 5.20. Współczynnik przepuszczalności dla powietrza wg własnego modelu (5.13) – przepływ powietrza (próbka sześcienna 20×20×20 mm)

We wszystkich badanych przypadkach stwierdzono, że największą przepuszczalność względem powietrza wykazuje karbonizat *in situ* (I-1), nieco mniejszą porowaty poliamid (XV-1) i koks Illawarra (II-26), które można traktować jako materiały średnio przepuszczalne. Pośrednio tłumaczyć to można równomierną skalą ich porowatości. Najmniejszą przepuszczalnością dla powietrza odznaczały się natomiast materiały grupy pumeks, koksy oraz karbonizat *ex situ*.

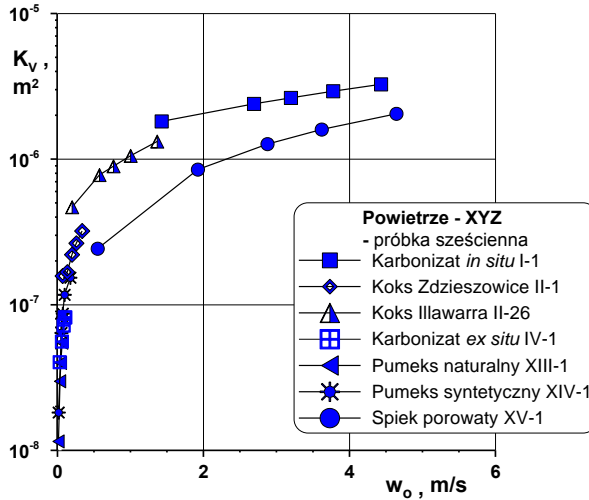
W odniesieniu do spadku ciśnienia wyniki pomiarów wskazują, że praktycznie dla każdego rodzaju materiału opory przepływu gazu wzrastają wraz ze zwiększającą się przepuszczalnością. Sugeruje to w pełni swobodny przepływ gazu, którego strumień wynika jedynie z charakteru przepuszczalności danego złoża i nie ma związku z dławieniem czynnika. Podobne w swym wyrazie wyniki otrzymuje się dla metody Szczelkaczewa (3.46).

Porównanie rozkładu punktów doświadczalnych do tej właśnie metody (rys. 5.21) wskazuje na dużą zbieżność wyników, co może mieć swe źródło w założeniach metody Szczelkaczewa, które nawiązują do analogii laminarnego przepływu w rurach małej średnicy. Świadczy o tym także duże podobieństwo modelu własnego z tą właśnie metodą w ocenie przepuszczalności materiałów o najniższym współczynniku przepuszczalności takich jak pumeks, karbonizat *ex situ*, czy koksy.



Rys. 5.21. Rozkład punktów doświadczalnych dla współczynnika przepuszczalności wg metody Szczelkaczewa (3.46) i metody własnej (5.13)

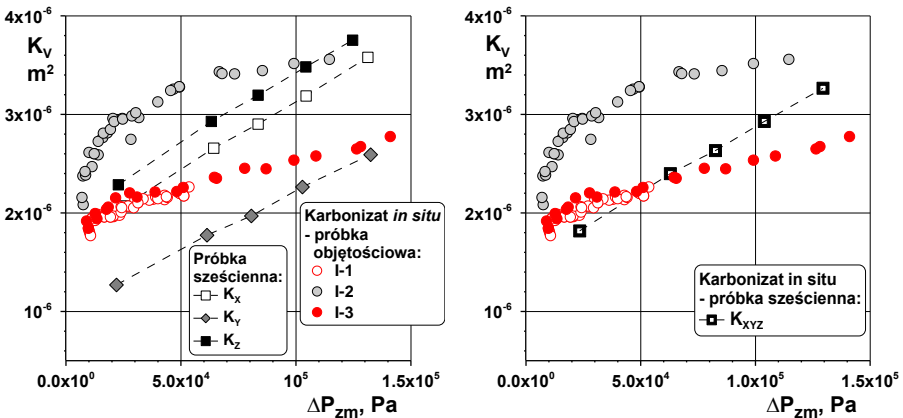
Pod względem fenomenologicznym współczynnik przepuszczalności jest miarą strumienia gazu przepływającego przez porowaty materiał, co w ujęciu formalnym charakteryzuje także wielkość powierzchni poprzecznego przekroju przestrzeni porowatej otwartej dla takiego przepływu. Wynikające z takiego określenia wartości współczynnika przepuszczalności odniesione do średniej prędkości gazu przedstawiono na rys. 5.22



Rys. 5.22. Wpływ prędkości gazu na gazoprzepuszczalność różnego rodzaju materiałów (próbka sześcienna 20×20×20 mm)

W interpretacji fizycznej wyniki tych badań są zgodne z oczekiwanymi, na co wskazuje wzrastający charakter zmian gazoprzepuszczalności wraz ze zwiększającą się prędkością przepływu.

Interesujący wynik eksperymentu to także to, że zastosowany sposób wyznaczania współczynnika przepuszczalności można odnieść do dowolnego kształtu próbki. Na rys. 5.23 przedstawiono wyniki porównawcze dla próbek karbonizatu różnego rodzaju i kształtu. Rozkład punktów doświadczalnych wskazuje, że wartości tego współczynnika dla próbki objętościowej, jak i sześciennej są ze sobą porównywalne, a ponadto mają tę samą tendencję zmian względem strumienia gazu.



Rys. 5.23. Współczynnik gazoprzepuszczalności karbonizatów różnego rodzaju i kształtu

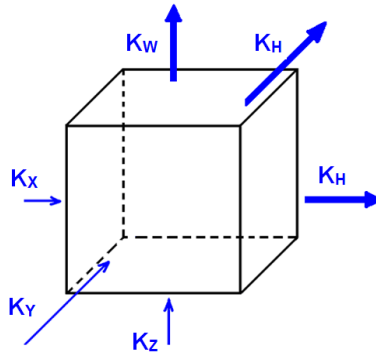
Obserwowane (praktycznie we wszystkich przypadkach) ograniczenia w przepuszczalności porowatych materiałów mogą być generalnie utożsamiane z tzw. przepuszczalnością graniczną, jaka wynika ze średniej przepuszczalności złoża przy założeniu, że cała przestrzeń wynikająca z jego porowatości jest aktywna dla przepływu gazu. Ponieważ w ujęciu analitycznym zagadnienie to powiązane jest z anizotropowością porowatego ośrodka, efekty wynikające z granicznej przepuszczalności ujęto w kolejnym punkcie.

5.3. Ocena anizotropii i jej wpływ na gazoprzepuszczalność

Ważną cechą porowatego złoża, wynikającą bezpośrednio z jego struktury, jest anizotropowość materiału porowatego oraz jej wpływ na jego przepuszczalność. W ujęciu definicyjnym cecha ta jest utożsamiana z tzw. współczynnikiem anizotropii (anizotropowości) [105, 127, 131], który wskazuje na odstępstwo względem strumienia gazu, jakie wynika z poziomej i pionowej płaszczyzny przepływu – rys. 5.24. Uwzględniając, że cechą tego odstępstwa może być wyznaczony dla każdej z tych płaszczyzn współczynnik przepuszczalności, anizotropowość porowatego ośrodka jest opisana jako

$$\beta = \sqrt{\frac{K_H}{K_W}} \quad , \quad (5.15)$$

gdzie, K_H stanowi średni współczynnik przepuszczalności odniesiony do płaszczyzny poziomej, natomiast K_W – odpowiednio taki sam współczynnik dla płaszczyzny pionowej (wertykalnej).



Rys. 5.24. Oznaczenie kierunków przepływu i odpowiadających im płaszczyzn obliczeniowych współczynnika przepuszczalności – poziomej K_H i pionowej K_W

W pierwszym przypadku, tj. dla płaszczyzny poziomej, współczynnik przepuszczalności (K_H) jest najczęściej wyznaczany jako średnia geometryczna z wartości tego współczynnika w dwóch kierunkach poziomych (X, Y).

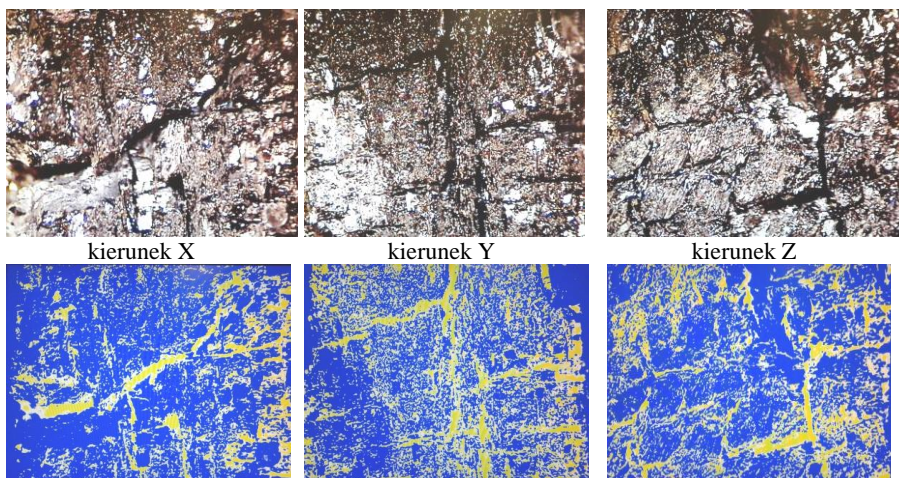
Wtedy¹⁾

$$K_H = \sqrt{K_X K_Y} \quad . \quad (5.16)$$

Z kolei dla płaszczyzny pionowej współczynnikiem przepuszczalności jest wartość wynikająca z przepływu gazu w kierunku osi Z ($K_w = K_Z$).

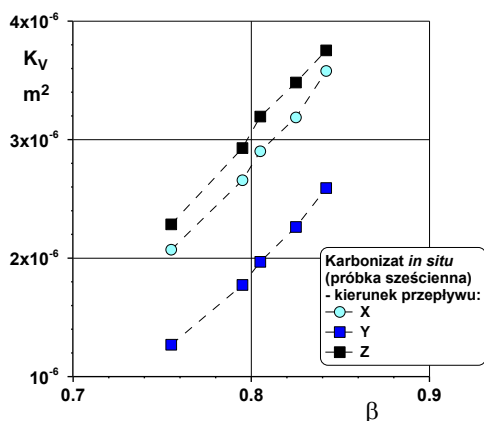
W każdym przypadku obliczeniowe kierunki przepływu ustala się dla wartości współczynnika asymetryczności w zakresie wartości $\beta = (0-1)$. Z definicji (5.15) wynika, że im większa wartość tego współczynnika tym mniejsze odstępstwo od anizotropowości struktury porowatego złoża.

Charakterystyczny – na przykładzie karbonizatu – obraz struktury anizotropowej porowatego materiału, wraz z graficznym odwzorowaniem przestrzeni wolnych (porów i kanałów) przedstawiono na rys. 5.25. Jakkolwiek obraz taki może pośrednio posłużyć do oceny efektywnej porowatości, to nie jest jednak wystarczający do ilościowego opisu anizotropii, gdyż obraz taki odnosi się jedynie do wierzchniej warstwy materiału, podczas gdy rzeczywistym miernikiem anizotropii jest potencjalna przepuszczalność złoża. Do opisu tego konieczne jest więc wyznaczenie współczynników przepuszczalności dla każdego z kierunków przepływu, co przykładowo (dla karbonizatu) pokazano na rys. 5.26 (zastosowano tu powiększenie skali dla osi anizotropowości celem lepszego uwidocznienia zmian parametrów).



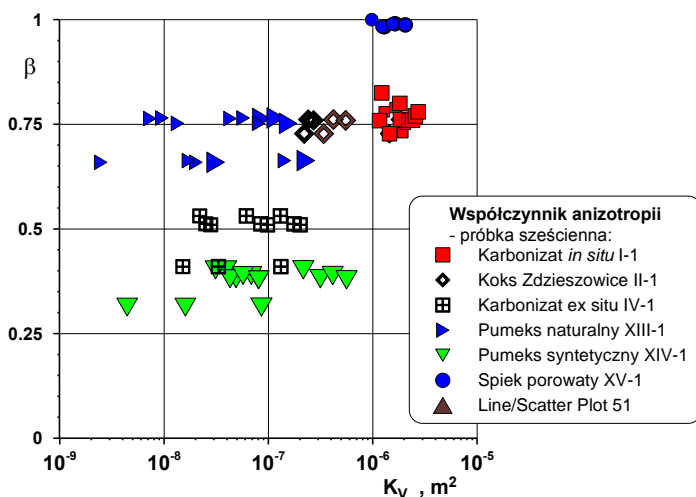
Rys. 5.25. Obraz powierzchni porowatego materiału o różnicowanej strukturze przestrzennej, wraz z odwzorowaniem przestrzeni porów

¹⁾ rzadko stosuje się w tym przypadku formułę średniej kwadratowej



Rys. 5.26. Gazoprzepuszczalność karbonizatu względem współczynnika anizotropii

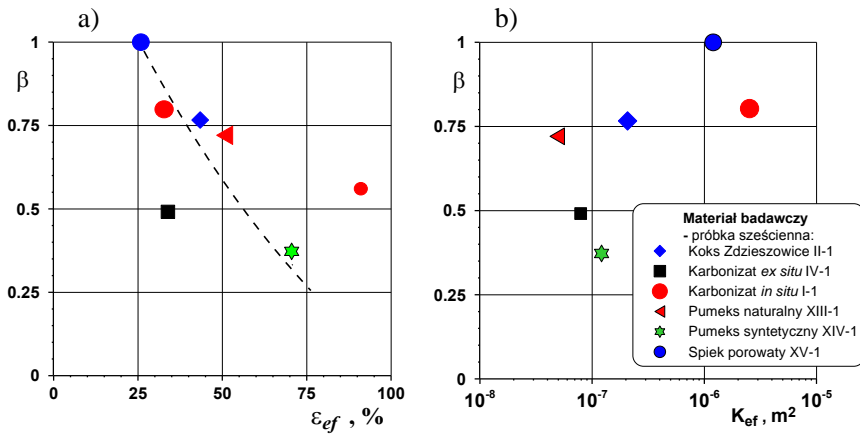
Wyniki badań charakteryzujące współczynnik anizotropowości dla różnych materiałów przedstawiono na rysunku 5.27. Rozkład punktów doświadczalnych wskazuje, że rysunek ten może stanowić swego rodzaju mapę identyfikującą strukturę każdego z materiałów względem ich anizotropii. Można przy tym zauważyć, że dla spieku z poliamidu anizotropia praktycznie nie występuje ($\beta \approx 1$), natomiast dla innych materiałów (koks, pumeks, karbonizaty) względnie dużo mniejsze wartości współczynnika anizotropii wskazują na silny wpływ płaszczyzny przepływu na przepuszczalność. Zwraca też uwagę, że dla każdej grupy materiałów współczynnik anizotropii zachowuje podobną wartość w całym zakresie przepuszczalności, a więc i strumienia gazu, co może świadczyć o w miarę powtarzalnej strukturze każdej z tych grup materiałów.



Rys. 5.27. Współczynnik anizotropii odniesiony do przepuszczalności materiałów porowatych

Jeżeli przyjąć, że gazoprzepuszczalność jest w pewnym sensie miarą anizotropowości, to duży wpływ na jej wartość ma efektywna porowatość złoża, decydująca o skali tej przepuszczalności. Przykładowe w tej mierze wyniki (wartości uśrednione) przedstawiono na rys. 5.28. Wskazują one, że w grupie rozpatrywanych materiałów tendencja zmian współczynnika anizotropowości jest malejąca względem ich efektywnej porowatości (rys. 5.28a). Można przy tym wyróżnić niejako trzy strukturalnie odmienne grupy materiałów.

Pierwszą, poniekąd samodzielną grupę, stanowi poliamidowy spiek o porowatości efektywnej ok. 25%, którego cechuje jednocześnie współczynnik anizotropii bliski jedności.



Rys. 5.28. Współczynnik anizotropii względem efektywnej porowatości (a) oraz przepuszczalności (b) – wartości uśrednione

Wynika to niewątpliwie z jednorodnej (zblizonej do ortogonalnej) struktury tego materiału, wykazującą w miarę równomierną krętość mikrokanalów w całej jego objętości. Odrębną grupę stanowią materiały pochodzące z termicznego procesowania węgla, tj. karbonizat i koks. Przy ich porowatości efektywnej rzędu (30–45)% wartość współczynnika anizotropii zawiera się w granicach (0,5–0,8). Karbonizat *in situ* wykazuje przy tym strukturę znacznie bardziej szczelinową (rys. 5.3a), o dużo większych mikro-kanalach, aniżeli karbonizat *ex situ* (rys. 5.3d), zawierający znacznie więcej drobnych i krętych mikrokanalów o zmiennej średnicy, niekiedy połączonych z mikroszczelinami. Koks cechuje zaś umiarkowana anizotropia, na poziomie karbonizatu *in situ*, pomimo znacznie odmiennej struktury (rys. 5.3b). Wpływ na to ma niewątpliwie kręta struktura kanalików koksu, o znacznie większej średnicy porów niż w przypadku karbonizatów, ale jednocześnie częstokroć ślepych i zamkniętych dla przepływu. Trzecią grupę stanowią pumeksy o porowatości efektywnej rzędu (50–70)%. Cechy strukturalne tych materiałów wyraźnie się różnią, przy czym anizotropowość naturalnego pumeksu jest umiarkowana (na poziomie koksu), natomiast pumeksu syntetycznego okazuje się najmniejsza. W tym ostatnim przypadku

wynika to zapewne z kierunkowej struktury tego materiału, jaka powstaje w procesie wydmuchiwania pianki pumeksu.

Do podobnych wniosków dochodzi się analizując stopień anizotropowości porowatych materiałów względem tzw. współczynnika przepuszczalności efektywnej, który charakteryzuje średnie warunki hydrodynamiczne, jakie wynikają z przepuszczalności przy poziomo-pionowej konfiguracji przepływu gazu [129]. Współczynnik ten (z definicji) opisany jest zależnością

$$K_{ef} = \sqrt{K_H K_W} . \quad (5.17)$$

Zestawione względem tego współczynnika wyniki anizotropowości tych samych co poprzednio materiałów przedstawiono na rys. 5.28b. Wyniki te pokazują, że materiały o nadmiernej szczelinowości, jakimi są m.in. karbonizaty *in situ*, wykazują znaczną anizotropię struktury, ale jednocześnie są bardzo dobrze przepuszczalne. Świadczy to z jednej strony o znacznym stopniu tej szczelinowości, a z drugiej o relatywnie dużej dla karbonizatów tego typu powierzchni swobodnej dla przepływu gazu, porównywalnej z porowatym poliamidem. Z kolei materiały typu koks, pumeks naturalny oraz karbonizat *ex situ*, należące do grupy materiałów o umiarkowanej anizotropii, cechują się względnie ograniczoną przepuszczalnością. Zdecydowanie przeciwną anizotropią cechuje się natomiast pumeks syntetyczny, którego zamknięta struktura ogranicza warunki przepływu gazu, z opisanymi już konsekwencjami.

Z rozkładu punktów doświadczalnych przedstawionych na rys. 5.28 wynika, że skala anizotropii szkieletowych materiałów porowatych może być bardzo duża, co w sposób oczywisty zależy od struktury materiału oraz od jego porowatości efektywnej.

Dodatkową cechą procesową powiązaną z anizotropowością ośrodków porowatych, jest tzw. graniczna przepuszczalność. Jako wskaźnik ograniczenia (dławienia) przepływu na skutek zmieniającego się ciśnienia w złożu jest ona często utożsamiana z ruchem gazów w naturalnych złożach (odwiertach) geologicznych [44, 201]. Uwzględniając hydrodynamiczne warunki dla takiego przepływu Chaperon i Joshi [26, 80], Dupuit i Polubarinowa-Kochina [47, 140], Hagoort i Schols [68, 157] podają szczegółowe modele do obliczania wartości tak rozumianej granicznej przepuszczalności. Przykłady takich modeli przedstawiono w tabeli 5.3. Jak widać, modele te uwzględniają kryteria anizotropowości złóż porowatych, jaka wynika z ich poziomej (K_H) i pionowej (K_W) przepuszczalności.

Tabela 5.3

Przepuszczalność graniczna dla przepływu gazu w porowatych złożach

Lp.	Autor	Model porowatego ośrodka anizotropowego	
1.	Chaperon, Joshi [26, 80]	$Q_{ChJ} = \frac{\hat{g}K\rho h^2}{\eta B_g} \left[0,7311 + \frac{1,9434}{\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \left(\sqrt{\frac{K_W}{K_H}}\right)} \right]$	(5.18)
2.	Dupuit, Polubarinowa -Kochina [47, 140]	$Q_{DP-K} = \frac{\pi \hat{g}K\rho(h^2 - b^2)}{\eta B_g \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \sqrt{\frac{K_W}{K_H}}}$	(5.19)
3.	Hagoort, Schols [68, 157]	$Q_{SH} = \frac{\hat{g}K\rho(h^2 - b^2)}{\eta B_g} \left[0,432 + \frac{\pi}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \frac{\left(\frac{h}{r_e}\right)^{0,14}}{\left(\frac{K_H}{K_W}\right)^{0,07}} \right]$	(5.20)

W każdym praktycznie ujęciu graniczna wartość przepuszczalności charakteryzuje przepustowość złoża przy założeniu, że cała jego przestrzeń wynikająca z porowatości średniej jest aktywna dla przepływu. W zestawieniu z wykonanymi badaniami pozwoliło to na opracowanie własnego modelu oceny takiej przepuszczalności, opartego o średni (wielokierunkowy) współczynnik, wyznaczany zgodnie do zależności (5.13). Uwzględniono przy tym kryteria (bądź poczyniono odpowiednie założenia) wynikające z modeli literaturowych, w tym charakterystyczny parametr anizotropii [186].

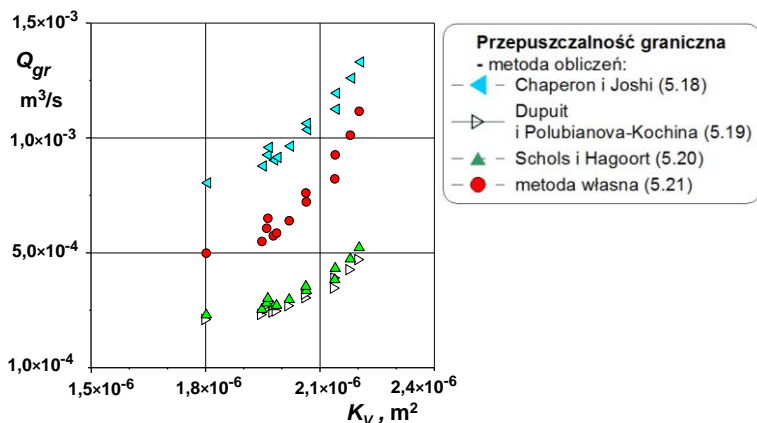
Ostatecznie, proponowany model własny ma postać

$$Q_V = \beta^\varepsilon K_V \frac{\hat{g}}{B_g} \frac{\rho h^2}{\eta}, \quad (5.21)$$

gdzie współczynnik $B_g = \frac{\rho_n}{\rho}$ stanowi przeliczenie na warunki normalne.

Celem porównania wyników obliczeń wg równań (5.18)–(5.20) i (5.21), wykonano odpowiednie obliczenia. Za współczynnik przepuszczalności przyjmowano jego wartość wyznaczoną doświadczalnie ($K = K_V$), natomiast parametry geometryczne układu przepływowego – zgodnie do konfiguracji zasilania próbek, wg oznaczeń parametrów jak na rys. 4.6.

Uzyskane w ten sposób wyniki obliczeń przepuszczalności granicznej karbofizatu *in situ*, w funkcji średniego współczynnika przepuszczalności przedstawiono na rys. 5.29.



Rys. 5.29. Przepuszczalność graniczna karbonizatu *in situ*

Na podstawie rozkładu punktów można wnioskować, że wynikające z badań własnych założenia modelu (5.21) dość dobrze korelują tę funkcję w różnym aspekcie procesowym, jaki wynika z modeli źródłowych. Wyniki własne mieszczą się w obszarze opisanym przez te modele, dając względem nich w miarę średnie wartości przepuszczalności granicznej.

5.4. Model ekwiwalentnego współczynnika oporów przepływu

Warunki hydrodynamiczne wynikające z przepuszczalności porowatych materiałów mają swoje podłoże nie tylko w ocenie strumienia przepływu gazu przez takie materiały, ale dotyczą też straty energii ciśnienia w tym przepływie. Bezpośrednim miernikiem tej straty są opory przepływu, które w szczegółowej ocenie ilościowej mogą być różnie interpretowane, czego liczne przykłady podano w p. 3. Z przykładów tych wynika, że dla rozpatrywanych we własnych badaniach warunków przyjęte do analizy porównawczej równania (tab. 5.1) nie czynią zadość opisowi hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate o szkieletowej strukturze (rys. 5.13). Przyczyn takiego stanu rzeczy upatrywać należy zarówno w dużej złożoności hydrodynamiki przepływu gazu przez tego rodzaju materiały, jak i w ograniczonej możliwości adaptacji modeli (metod) obliczeniowych, charakterystycznych dla przepływu płynów w układach zamkniętych.

Jedną z takich możliwości jest uwzględnienie w opisie hydrodynamiki warunków wynikających ze zjawiska dyssypacji energii, z jaką ma się do czynienia podczas ruchu gazu w przestrzeniach porowato-kapilarnych materiałów o porowatej strukturze. Od strony fenomenologicznej, zjawisko to może być utożsamiane z pewnym zastępczym (ekwiwalentnym) współczynnikiem oporu, ujmującym w swej postaci warunki wynikające zarówno z oporu tarcia płynu o ścianki kanałków przepływowych, jak i spadku ciśnienia spowodowanego zaburzeniem profilu prędkości, charakterystycznym dla dławienia strumienia.

W takim ujęciu, całkowity opór przepływu gazu na złożu porowatym może być utożsamiany z zależnością (5.7)

$$\Delta P = \xi_\varepsilon \frac{\rho_g w_\varepsilon^2}{2} . \quad (5.7)$$

Uzasadnieniem dla takiego podejścia jest także to, że w odniesieniu do mikrokanalów udział tarcia w oporach przepływu jest marginalnie mały.

W bezpośrednim wykorzystaniu równania (5.7), konieczna jest jego adaptacja do warunków przepływu przez porowate struktury, poprzez odniesienie współczynnika oporów (ξ_ε) i prędkości gazu (w_ε) do warunków związanych z porowatością takich struktur.

W ogólnym przypadku prędkość przepływu (w_ε) może być obliczana względem przekroju otwartego (efektywnego) dla tego przepływu (A_ε), wynikającego z porowatości złoża (ε) i jego całkowitego przekroju (A_o).

Stąd

$$w_\varepsilon = \frac{Q_g}{A_\varepsilon} = \frac{Q_g}{\varepsilon A_o} . \quad (5.22)$$

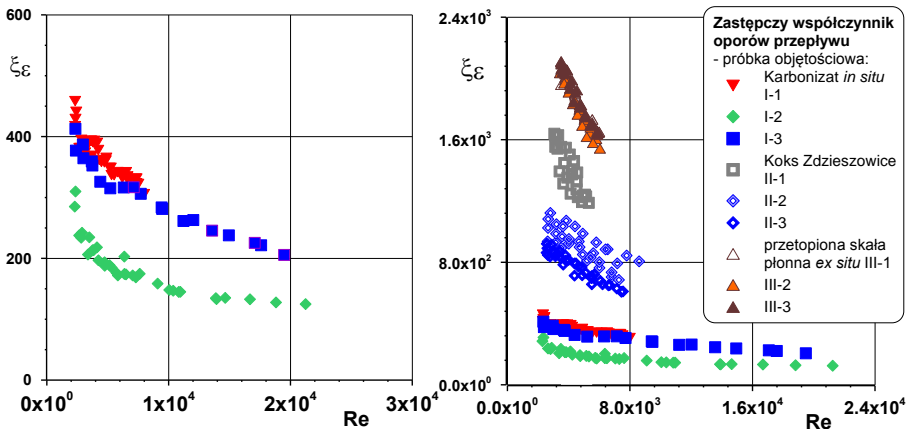
Dla tak interpretowanych warunków, równanie (5.7) może posłużyć do wyznaczenia na drodze doświadczalnej wartości współczynnika oporów przepływu (ξ_ε), jako jego pewnej ekwiwalentnej wartości, traktującej w sposób sumaryczny wszystkie mechanizmy wynikające z hydrodynamiki ruchu gazu przez porowate materiały. Wówczas

$$\xi_\varepsilon = \frac{2}{\rho_g w_\varepsilon^2} \Delta P_{zm} . \quad (5.23)$$

Przykładowe wyniki dla wyznaczanego w ten sposób współczynnika oporu przepływu dla powietrza podano na rys. 5.30. Wykorzystano przy tym odniesienie wartości tego współczynnika do liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{w_o d \rho_g}{\eta} , \quad (5.24)$$

przy prędkości gazu (w_o) wynikającej ze średnicy (d) dyszy zasilającej (rys. 4.6).



Rys. 5.30. Zastępczy współczynnik oporów przepływu gazu (próbka objętościowa)

Przedstawione na rys. 5.30 wyniki wskazują na malejącą tendencję zmian wartości współczynnika oporów wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa, co jest zgodne z fizyką badanego zjawiska, jakkolwiek skala tych zmian jest niekiedy bardzo duża. Wskazuje to na silne uzależnienie oporów przepływu od dynamiki ruchu gazu przez porowate materiały, zwłaszcza od zaburzeń profilu prędkości. Tendencja ta, a także zakres pomiarowy wskazują jednocześnie, że dla karbonizatu *in situ* notuje się w zasadzie turbulentny charakter ruchu gazu, na co wskazuje nieliniowy charakter zmiany tego współczynnika. Dla innych materiałów przewaga liniowego ułożenia punktów wskazuje, że ruch ten jest bliższy laminarnemu. Odnotować przy tym można, że karbonizat węgla wykazuje najmniejsze opory przepływu. Wynika to niewątpliwie z faktu, że materiał ten – pomimo niewielkiej jego porowatości – ma bardzo rozbudowany system szczelinowych porów i kanałów otwartych dla przepływu gazu. Z kolei koks, podobnie jak i przetopiona skała płonna, charakteryzujące się bardziej rozwiniętym układem mikroporowatych kanałów i szczelin, wykazują znacznie większe opory przepływu. Spowodowane jest to niewątpliwie tym, że duża część tych mikrokanałów jest w tym przypadku zamknięta dla przepływu.

Analizując opisane w p. 3 prace badawcze dotyczące modelowania oporów przepływu przez złoża porowate można zauważyć, że autorzy tych prac uwzględniają w różny sposób kryterium ruchu jakim jest liczba Reynoldsa, a jednocześnie w różny sposób interpretują warunki hydrodynamiczne tego przepływu. Z drugiej strony, modyfikacje równania Darcy-Weisbacha (3.2) umożliwiające obliczanie oporów przepływu odnoszą się najczęściej do struktur ziarnistych albo złożów w postaci luźno usypanego wypełnienia w aparatach kolumnowych. Brak jest natomiast jakiegos szczególnego odniesienia tego problemu do materiałów porowatych o stałej strukturze szkieletowej.

Przyjmując, że opisany równaniem (5.23) współczynnik oporów, jako pewna ekwiwalentna miara hydrodynamiki przepływu przez ośrodki porowate, może być reprezentatywny dla wszystkich tego typu przypadków, dokonano odpo-

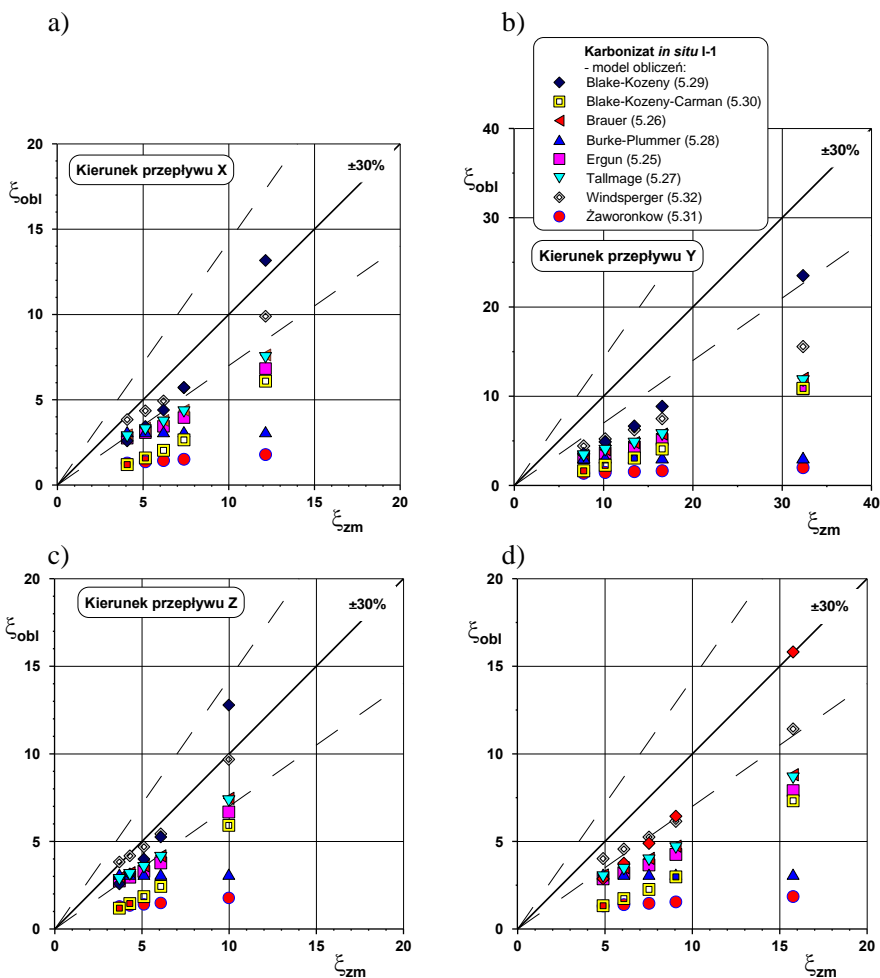
wiedniego porównania niektórych z takich modyfikacji względem własnych wyników pomiarów. W porównaniu tym wykorzystano definicje współczynnika oporów zestawione w tabeli 5.4. Definicje te odpowiadają współczynnikom oporu korelowanym wg wyszczególnionych w tej tabeli modeli opisanych w pkt. 3.2, przy stałej (z założenia) wartości ilorazu liniowych wymiarów odniesienia – $L/d_\varepsilon = 1$.

Tabela 5.4

Równania korelacyjne do obliczania współczynnika oporów przepływu przez ziarniste struktury porowate

Autor	Równanie modelowe	Liczba kryterialna	Równ.
Ergun [54]	$\xi_E = \frac{150}{Re_\varepsilon} + 1,75$	$Re_\varepsilon = \frac{w_o d_\varepsilon \rho}{(1-\varepsilon)\eta}$	(5.25)
Brauer [20]	$\xi_B = \frac{160}{Re_\varepsilon} + \frac{3,1}{Re_\varepsilon^{0,1}}$		(5.26)
Tallmadge – wg [82]	$\xi_T = \frac{150}{Re_\varepsilon} + \frac{4,2}{Re_\varepsilon^{0,1666}}$		(5.27)
Burke- Plummer – wg [65]	$\xi_{B-P} = 0,878 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2}$		(5.28)
Black- Kozeny – wg [65]	$\xi_{B-K} = 75 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{1}{Re_\varepsilon}$	$Re_\varepsilon = \frac{w_o d_\varepsilon \rho}{\eta}$	(5.29)
Black-Kozeny- Carman – wg [86]	$\xi_{B-K-C} = \frac{180}{Re_\varepsilon}$		(5.30)
Żaworonkow [206]	$\xi_Z = \frac{3,8}{Re_\varepsilon^{0,2}}$	$Re_\varepsilon = \frac{w_o d_\varepsilon \rho}{\varepsilon \cdot \eta}$	(5.31)
Windsperger [200]	$\xi_W = 2,2 \left(\frac{0,4}{\varepsilon} \right)^{0,78} \left(\frac{64}{Re_\varepsilon} + \frac{1,8}{Re_\varepsilon^{0,1}} \right)$	$Re_\varepsilon = \frac{2}{3} \frac{w_o d_\varepsilon \rho}{(1-\varepsilon)\eta}$	(5.32)

Przedstawione na rys. 5.31 wyniki tego porównania dla próbki sześcienniej ($a = 20$ mm) pokazują, że praktycznie żadna z analizowanych metod obliczeniowych nie czyni zadość weryfikacji uzyskanym wynikiom doświadczalnym. Dotyczy to zarówno oceny wynikającej z ukierunkowanego przepływu gazu przez poszczególne płaszczyzny bryły sześcienniej (rys. 5.31a, b, c), jak i wyników uśrednionych (rys. 5.31d). Jedynie model Windspergera (5.31), dla kierunku pionowego (Z), a częściowo także poziomego (X), wykazuje w miarę zadowalające powiązanie z wynikami badań własnych.



Rys. 5.31. Porównanie doświadczalnych wartości współczynnika oporów przepływu gazu z obliczonymi wg różnych modeli – przepływ powietrza (próbka sześcienna: $a = 20$ mm):
 a) kierunek X, b) kierunek Y, c) kierunek Z, d) wartości średnie XYZ

Przedstawiony na rys. 5.30 charakterystyczny dla współczynnika oporów rozkład punktów doświadczalnych względem liczby Reynoldsa, a pośrednio także porowatości (reprezentowanej w tym względzie przez materiały o zróżnicowanej strukturze) pokazuje, że w modelowaniu oporów przepływu gazu przez szkieletowe materiały porowate konieczne jest uwzględnienie podwójnej relacji parametrycznej, a mianowicie

$$\xi_{\varepsilon} = f(\text{Re}, \varepsilon) . \quad (5.33)$$

Z zagadnieniem tym bezpośrednio wiąże się odpowiednie określenie liczby Reynoldsa, która może być w tym przypadku różnie definiowana (tab. 5.4).

Ponieważ dla porowatych materiałów szkieletowych ocena średnicy porów i kapilar oraz wynikającej stąd rzeczywistej prędkości przepływu jest bardzo utrudniona, a często wręcz niemożliwa, Bear i Cheng [11] sugerują, aby w takim przypadku występujący w liczbie Reynoldsa charakterystyczny wymiar liniowy definiować względem objętości porowatego materiału i aktywnego dla przepływu przekroju, tj. jako

$$d_{\varepsilon}^* = \frac{V_c}{\varepsilon A_o} \quad (5.34)$$

Wówczas

$$Re_{\varepsilon} = \frac{w_{\varepsilon} d_{\varepsilon}^* \rho_g}{\eta} \quad (5.35)$$

gdzie prędkość przepływu wynika z porowatości złoża i z prędkością pozorną (liczoną na cały przekrój złoża) powiązana jest zależnością

$$w_{\varepsilon} = \varepsilon w_o \quad (5.36)$$

Własne analizy w tym zakresie wskazują, że wynikający z wzorów (5.34) do (5.36) sposób wyznaczania liczby kryterialnej Reynoldsa nie odzwierciedla najlepiej warunków hydrodynamicznych, jakie towarzyszą przepływowi gazu przez porowate materiały o szkieletowej strukturze. Wynika to niewątpliwie z faktu, że przedmiotem badań były próbki o zróżnicowanym kształcie. Zwłaszcza w przypadku bryły objętościowej ustalenie przekroju poprzecznego do kierunku przepływu jest bardzo utrudnione, a jednocześnie (jak wskazują pomiary) obciążone dużym błędem.

Wychodząc naprzeciw tym problemom, podjęto próbę opracowania alternatywnego modelu, opartego o zmianę energii kinetycznej jaka odpowiada całkowitym oporom przepływu gazu przez ośrodek porowaty.

Zgodnie do (5.23) można zatem napisać

$$\xi_{\varepsilon}(Re) = \frac{2\Delta P_c}{\rho_g w_{\varepsilon}^2} \quad (5.37)$$

Jeżeli uwzględnić zróżnicowany kształt porowatego złoża, a także jego charakterystyczne cechy strukturalne, wynikające zarówno z porowatości jak i przepuszczalności, to równanie (5.37) można zmodyfikować, wprowadzając współczynnik korekcyjny w postaci tzw. parametru krętości

$$\Psi_{\varepsilon} = f(K_V, \varepsilon) \quad (5.38)$$

Wówczas równanie na współczynnik oporu przepływu ma postać

$$\xi_{\varepsilon}(Re) = \frac{2\Delta P_c}{\rho_g w_{\varepsilon}^2} \Psi_{\varepsilon} \quad (5.39)$$

Względem tak opisanego równania przeprowadzono rachunek wyrównawczy, odrębnie dla próbek w postaci bryły dowolnego kształtu (objętościowej) oraz bryły sześciiennej. Niestety nie udało się uzyskać jednolitej formy rozwiązania dla obu tych przypadków.

Analiza rachunkowa wykazała, że dla bryły objętościowej parametr krętości należy wyliczać z zależności

$$\Psi_{\varepsilon} = \frac{\chi_{\varepsilon}^a}{Re_{\varepsilon}} \quad , \quad (5.40)$$

gdzie funkcja pomocnicza ma postać

$$\chi_{\varepsilon} = K_V^{(1-\varepsilon)} \quad , \quad (5.41)$$

przy wykładniku $a = 1,5$ dla karbonizatu *in situ* oraz $a = 2$ dla koksów.

Liczba Reynoldsa jest w tym przypadku zdefiniowana wzorem

$$Re_{\varepsilon} = \frac{w_{\varepsilon}^* d \rho_g}{\eta} \quad . \quad (5.42)$$

Występująca w tym wzorze prędkość pozorna jest umownie odniesiona do całkowitej przestrzeni zasilania próbki objętościowej, jako przekroju wynikającego z czołowego i boczного pola dyszy zasilającej – rys. 4.6a.

Stąd

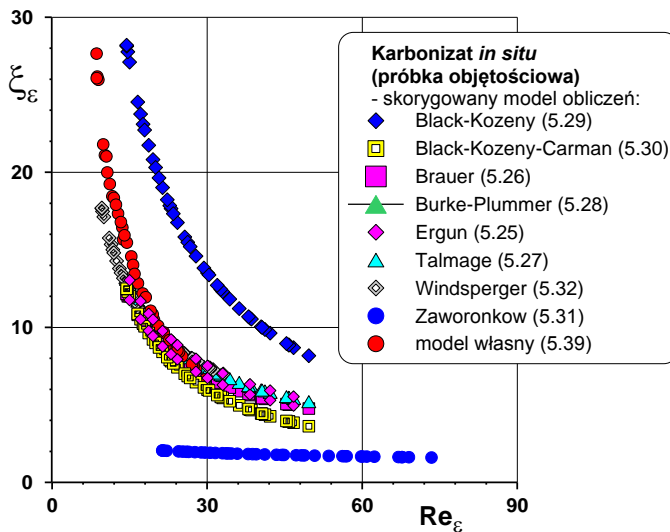
$$w_{\varepsilon}^* = \frac{Q_g}{A_o^*} \quad , \quad (5.43)$$

gdzie

$$A_o^* = \varepsilon_b \left(\frac{\pi d^2}{4} + \pi d^2 \right) \quad . \quad (5.44)$$

Uzyskane tą drogą wyniki obliczeń współczynnika oporów w funkcji liczby Reynoldsa (przepływ powietrza) przedstawiono na rysunku 5.32, na którym dla porównania naniesiono też punkty wynikające z innych modeli obliczeniowych (tab. 5.4), skorygowanych o parametry wynikające z badań własnych.

Z rozkładu punktów doświadczalnych widać, że poza modelem Żaworonkowa i Blacka-Kozeny'ego, pozostałe wykazują analogiczny trend zmian tego współczynnika, co świadczyć może o poprawności przyjętych założeń.



Rys. 5.32. Zastępczy współczynnik oporów przepływu gazu przez karbonizat *in situ* (I-1)

W przypadku wyznaczania współczynnika oporów przepływu dla próbek w postaci sześcianu, kryteria oceny są nieco inne. Po pierwsze wyznaczano wartości tego współczynnika względem zróznicowanego kierunku przepływu (X, Y, Z), przy parametrach wynikających z geometrii sześcianu ($a = 20$ mm). Po drugie, uwzględniając w miarę zadawalającą zgodność modelu Windspergera (5.32) z niektórymi wartościami eksperymentalnymi (rys. 5.31), zdecydowano się w tym przypadku na addytywną korelację

$$\xi_{\varepsilon}(Re) = \xi_g + \xi_W \quad , \quad (5.45)$$

uwzględniającą w swej postaci współczynnik oporu przepływu (ξ_g), wynikający z konfiguracji tego przepływu, a mianowicie

$$\xi_g = C_1 \sqrt[3]{\xi_X \xi_Y \xi_Z} \quad , \quad (5.46)$$

oraz współczynnik (ξ_W) obliczany wg modelu Windspergera.

W szczegółowym ujęciu funkcja pomocnicza pierwszego z tych współczynników wynika z wartości wyznaczonych dla każdego kierunku przepływu, zgodnie z zależnością:

$$\xi_{\varepsilon}(X) = \frac{2\Delta P_{c,X}}{\rho_g w_{\varepsilon,X}^2} C_2 \quad ; \quad \xi_{\varepsilon}(Y) = \frac{2\Delta P_{c,Y}}{\rho_g w_{\varepsilon,Y}^2} C_2 \quad ; \quad \xi_{\varepsilon}(Z) = \frac{2\Delta P_{c,Z}}{\rho_g w_{\varepsilon,Z}^2} C_2 \quad . \quad (5.47)$$

Rachunek wyrównawczy wykazał, że obliczeniowe wartości współczynników krętości są w tym przypadku stałe i wynoszą odpowiednio $C_1 = 2 \cdot 10^{-4}$, $C_2 = 1 \cdot 10^{-3}$.

Funkcyjną zależność (5.45) odnoszono zarówno do liczby Reynoldsa dla każdego kierunku przepływu

$$\text{Re}_\varepsilon(X) = \frac{w_{\varepsilon,X} d_{e,X} \rho_g}{\eta}; \quad (5.48a)$$

$$\text{Re}_\varepsilon(Y) = \frac{w_{\varepsilon,Y} d_{e,Y} \rho_g}{\eta}; \quad (5.48b)$$

$$\text{Re}_\varepsilon(Z) = \frac{w_{\varepsilon,Z} d_{e,Z} \rho_g}{\eta} \quad (5.48c)$$

jak i jej uśrednionej wartości

$$\text{Re}_\varepsilon = \sqrt[3]{\text{Re}_{\varepsilon,X} \text{Re}_{\varepsilon,Y} \text{Re}_{\varepsilon,Z}} \quad (5.49)$$

Występującą we wzorach (5.48) prędkość przepływu gazu wyznaczano względem aktywnego przekroju przepływu (A_o) dla każdego kierunku (X, Y, Z), zgodnie do zależności

$$w_{\varepsilon,X} = \frac{Q_g}{A_\varepsilon} = \frac{Q_g}{\varepsilon_X A_o}; \quad (5.50a)$$

$$w_{\varepsilon,Y} = \frac{Q_g}{A_\varepsilon} = \frac{Q_g}{\varepsilon_Y A_o}; \quad (5.50b)$$

$$w_{\varepsilon,Z} = \frac{Q_g}{A_\varepsilon} = \frac{Q_g}{\varepsilon_Z A_o} \quad (5.50c)$$

Z kolei charakterystyczny wymiar liniowy stanowi średnica ekwiwalentna, jaka wynika z promienia hydraulicznego kapilar i kanałów przepływowych.

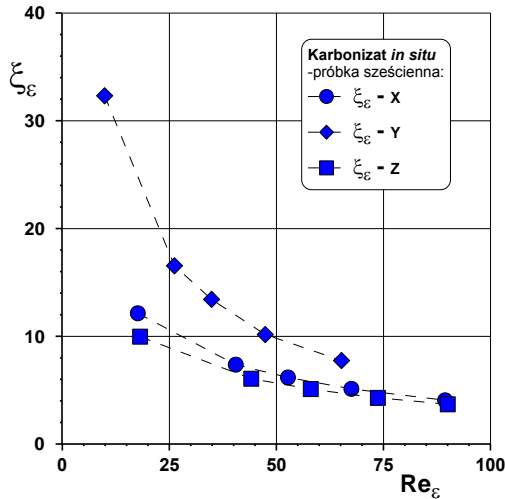
Stąd

$$d_e = \frac{4A_o}{O} = \frac{4a^2}{\pi d_k n_k} \quad (5.51)$$

Średnicę kapilar (d_k), stanowi w tym przypadku ekwiwalentna wartość średnia, wyznaczana na podstawie rzeczywistego obrazu (SEM) przekroju próbki, zgodnie z przyjętą metodyką oceny struktury badanych materiałów (rys. 4.2). Liczbę kapilar (n_k) wyliczano natomiast z zależności

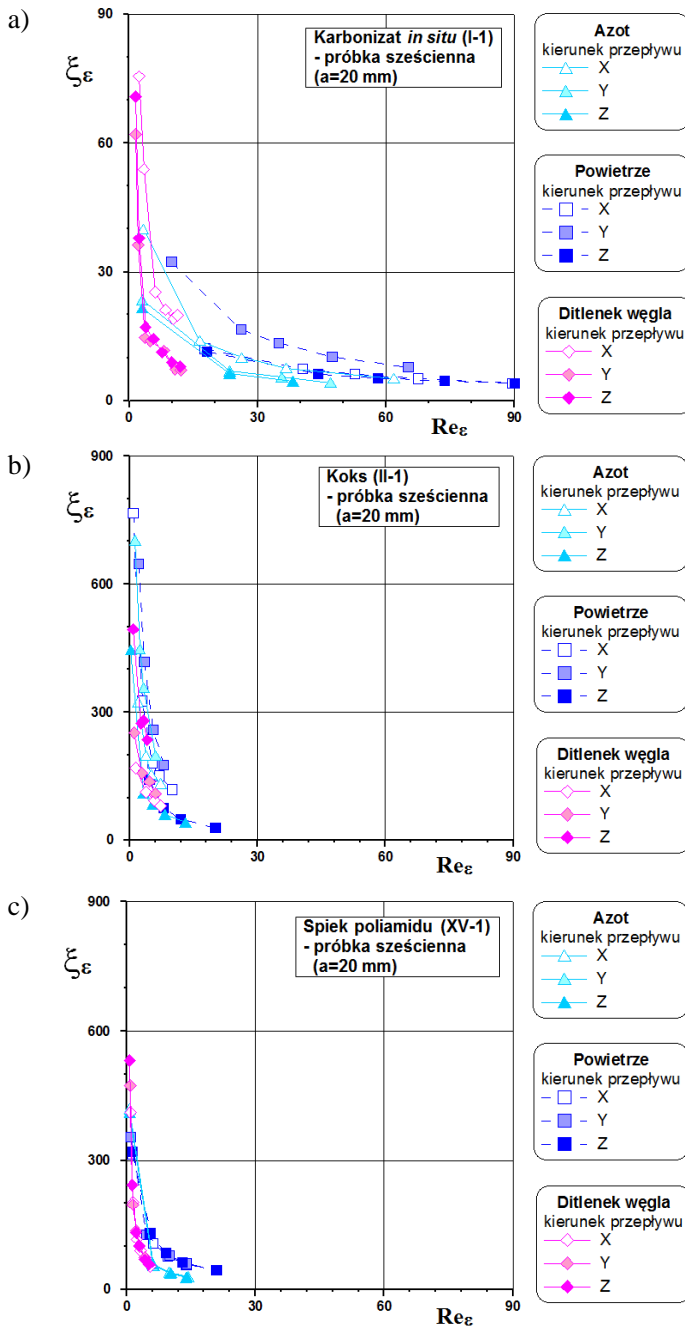
$$n_k = \frac{4\varepsilon A_o}{\pi d_k^2} \quad (5.52)$$

Otrzymane tą drogą wyniki obliczeń współczynnika oporów dla przepływu powietrza, azotu i ditlenku węgla przedstawiono na rysunkach 5.33 i 5.34, odpowiednio dla karbonizatu, koksu i poliamidu – całość w odniesieniu do próbki sześcienniej $20 \times 20 \times 20$ mm.



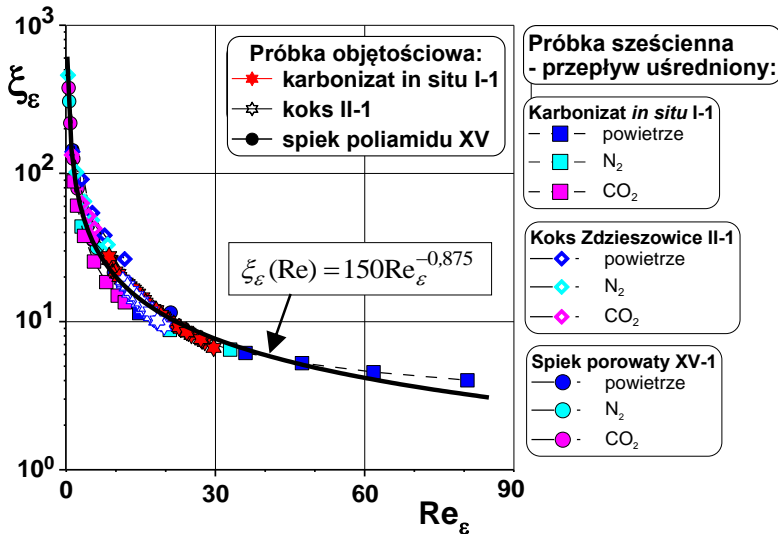
Rys. 5.33. Zastępczy współczynnik oporów dla ukierunkowanego przepływu powietrza: karbonizat *in situ* (I-1) – próbka sześcienna ($a=20$ mm)

We wszystkich przypadkach otrzymano charakterystyczny rozkład punktów doświadczalnych, wskazujący na wyraźną zależność współczynnika oporów przepływu od liczby Reynoldsa. Dla karbonizatu *in situ* (rys. 5.33 i rys. 5.34a), zwraca jednocześnie uwagę wyraźny wpływ kierunkowości przepływu (X, Y, Z) na wartość tego współczynnika, co ma miejsce w odniesieniu do przepływu każdego rodzaju gazu, jakkolwiek w przypadku ditlenku węgla rozbieżność tych wartości jest mniej zauważalna. Tłumaczyć to można znacznie mniejszą gazo-przepuszczalnością karbonizatu dla tego gazu (rys. 5.7 i rys. 5.8), co w porównaniu do innych materiałów nie prowadzi w efekcie do tak wyraźnej dysproporcji współczynnika oporów przepływu. Zwraca też uwagę wyraźna zgodność w tendencji zmian tego współczynnika dla koksu i spieku poliamidu (rys. 5.34b, c) i to niezależnie od rodzaju gazu. Świadczy to o podobieństwie hydrodynamicznym tej grupy materiałów, pomimo ich znacznie zróżnicowanej struktury wewnętrznej.



Rys. 5.34. Rozkład punktów doświadczalnych:
a) karbonizat *in situ* I-1, b) koks II-1, spiek poliamidu XV-1

Celem ukazania pełnego obrazu zmian funkcji współczynnika oporów przepływu względem liczby Reynoldsa, otrzymane wyniki dla wszystkich badanych pod tym względem układów pomiarowych zestawiono na jednym porównawczym wykresie, pokazanym na rys. 5.35.



Rys. 5.35. Rozkład punktów doświadczalnych dla współczynnika oporów przepływu

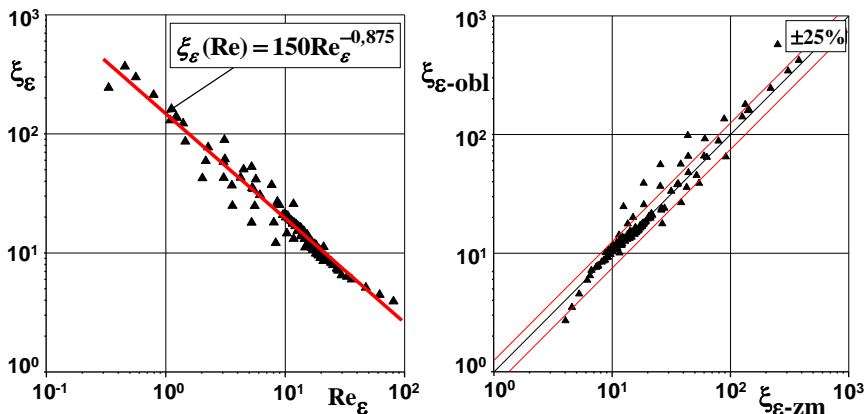
Zbieżna w rozkładzie tych punktów tendencja zmian pozwoliła przeprowadzić rachunek wyrównawczy i wyznaczyć korelacyjną zależność tej funkcji. Na podstawie rachunku wyrównawczego otrzymano

$$\xi_\epsilon(Re) = \frac{150}{Re^{0,875}} \quad (5.53)$$

W swej formalnej postaci zależność ta jest podobna do niektórych modeli opisujących warunki ruchu gazu przez złoża ziarniste (tab. 5.4). Niemniej, modele te opisują tę funkcję na ogół przy wykładniku potęgowym dla liczby Reynoldsa równym jedności, co wskazuje na przewagę ruchu laminarnego dla takiego wypełnienia. Natomiast skorelowany w badaniach własnych wykładnik przy tej liczbie różny od jedności świadczy, że dla porowatych materiałów szkieletowych zakres hydrodynamiki przepływu zwiększa na obszar ruchu burzliwego.

Z przedstawionego na rys. 5.36 porównania obliczonego współczynnika oporów z wartościami doświadczalnymi można wnioskować, że proponowana do oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate zależność funkcyjna (5.53) dość dobrze koreluje te wartości. Rozkład punktów doświadczalnych, a także statystyczna ocena wyników badań i obliczeń, według której

ponad 82% danych doświadczalnych zawiera się w granicach $\pm 25\%$ błędu względnego wskazują, że dedykowany do obliczania współczynnika oporów przepływu model spełnia kryteria ilościowe wynikające z przepływu gazów przez szkieletowe materiały porowate.



Rys. 5.36. Rozkład punktów doświadczalnych

6. NUMERYCZNE BADANIA MODELOWE

6.1. Problem skali

Przedstawione w poprzednim punkcie wyniki i powiązania pomiędzy hydrodynamicznymi parametrami opisującymi przepływ gazu w szkieletowych materiałach porowatych odniesione zostały do niedużej laboratoryjnej skali geometrii próbek, co w aspekcie ewentualnej aplikacji tych wyników na rzeczywiste warunki wymaga oceny możliwości przeniesienia skali.

W kontekście oceny gazoprzepuszczalności porowatych materiałów pochodzenia węglowego (koks, karbonizaty itp.), wskazanie na taką możliwość znacznie zwiększa perspektywy adaptacji proponowanych metod oceny hydrodynamiki tego przepływu na warunki procesowo-technologiczne.

W literaturze przedmiotu panuje ogólna opinia, że opis procesów fizycznych zachodzących w szerokim obszarze niejednorodnego materiału porowatego jest niezwykle trudny, stąd brak tu jednoznacznych interpretacji modelowych. Ułatwieniem dla tej interpretacji jest idea określenia porowatego materiału jako ośrodka makroskopowo-ekwiwalentnego, co wg Strzeleckiego [168] stanowi jedno z klasycznych założeń modelowania przepływu w takich ośrodkach o dużej geometrii. Trykozko [178] zwraca przy tym uwagę, że ważną cechą w takim modelowaniu jest tzw. wieloskalowość, jako miara dopasowania skali procesu do warunków wynikających z geometrii złoża. W zależności od tej skalowości, a także rozpatrywanych warunków procesowych, modelowanie to jest oparte o zróżnicowane kryteria hydrodynamiczne. Łydźba [109] uzupełnia, że w dużej skali materiał niejednorodny po odpowiednim uśrednieniu geometrii można traktować jako homogeniczny, co w przypadku ośrodków skalno-gruntowych stanowi w zasadzie podstawowe założenie dla stosowanych w geotechnice metod i modeli obliczeniowych. Zasadniczym celem tej tzw. teorii homogenizacji jest takie makroskopowe określenie niejednorodnej struktury porowatego ośrodka, które uwzględni w swym opisie cechy takiej struktury występujące w skali lokalnej.

Metodologicznie ujmując proces homogenizacji, jako ukierunkowany na opis wpływu złożonej i zróżnicowanej struktury materiałów porowatych na ich przepuszczalność, formułowany jest w literaturze przedmiotu na dwa sposoby [7, 8, 15, 73, 108].

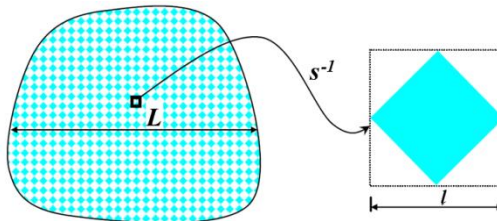
Pierwszy polega na wyznaczeniu tzw. reprezentatywnej elementarnej objętości (REO), przez co rozumie się najmniejszą objętość, która zawiera wszystkie informacje potrzebne do kompletnego opisu struktury i własności porowatego ośrodka. Najczęściej polega to na objętościowym uśrednieniu analizowanych pól fizycznych w obrębie elementarnej jednostki. W rezultacie tego uśrednienia nieciągłe pola opisu mikroskopowego ulegają „wygładzeniu” (stąd też taka nazwa tej metody). De Buhan, Drugan i ich wsp. [40, 43] uzupełniają, że w statystycznej ocenie mikrostruktury porowatych ośrodków, objętość REO powinna zawierać wszystkie elementy wynikające z mikrostrukturalnej konfiguracji porowatego ośrodka, tj. pory, kapilary, szczeliny itp. Równocześnie REO

powinna być takiej objętości, aby można było zdefiniować ekwiwalentny ośrodek jako makroskopowo jednorodny.

Drugi sposób podejścia polega na modelowaniu teoretycznym, a więc wykorzystaniu matematycznej teorii homogenizacji. Tym razem, w przeciwieństwie do metody wygładzania, proces przejścia ze skali mikroskopowej do makroskopowej dokonuje się poprzez parametryzację opisu matematycznego. Jedną z powszechniej stosowanych metod poszukiwania takiego opisu jest metoda asymptotycznej homogenizacji. Podstawowym założeniem tej metody jest periodyczność struktury, a ściślej jej dyskretyzacja. Za podstawę tej dyskretyzacji przyjmuje się parametr skali

$$s = \frac{l}{L}, \quad (6.1)$$

reprezentujący stosunek wielkości pojedynczej komórki periodyczności (l), z której wygenerowany jest cały ośrodek, do wymiaru (L) będącego miernikiem objętości makroskopowego ośrodka porowatego – rys. 6.1.



Rys. 6.1. Koncepcja modelu asymptotycznej homogenizacji – transfer ze skali o strukturze periodycznej do podstawowej komórki periodyczności, wg [109]

Współcześnie alternatywnym sposobem podejścia dla problemu wieloskalowości są metody oparte o numeryczne symulacje transportu płynów w układach porowatych, wspomagane przez mikrotomografię komputerową [179]. Dominujące przy tym są dwie metody, a mianowicie [150, 183]:

- a) *Pore Network Method* (PNM),
- b) *Lattice Boltzmann Method* (LBM),

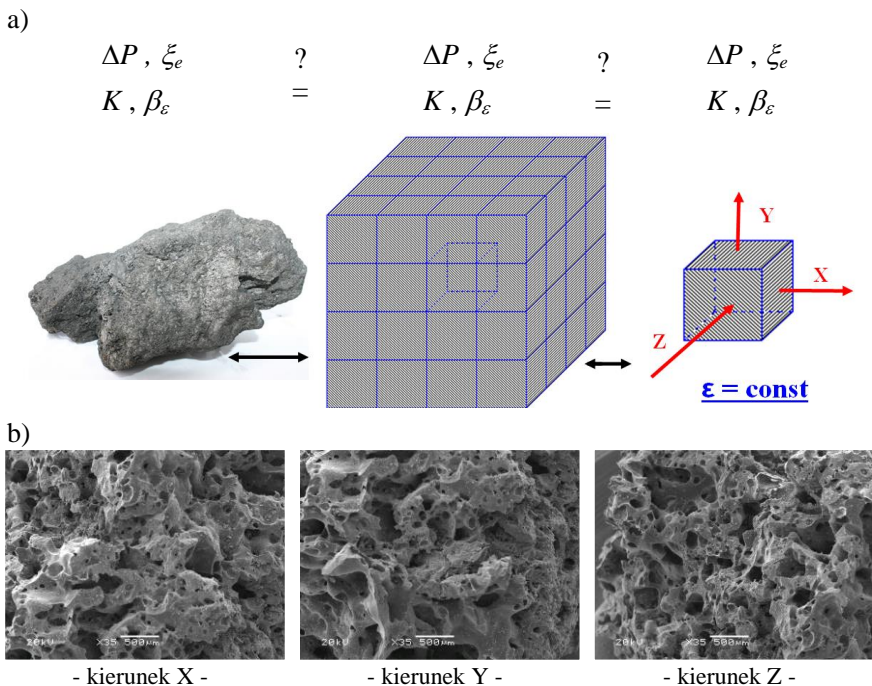
W pierwszym przypadku, na podstawie tomograficznej oceny struktury porowatego ośrodka tworzone są numeryczne modele sieci porowej (PNM), wykorzystywane do obliczania ruchu płynów w takim ośrodku. Wg Dohnalika i wsp. [42], zdolność prognozowania tych modeli zależy od dokładności, z jaką sieć odzwierciedla cechy geometryczne i topologiczne przestrzeni porowej ośrodka. Mikrotomografia rentgenowska (podobnie jak fotografia skaningowa) jest jednocześnie narzędziem instrumentalnym, pozwalającym na walidację tych modeli w zakresie zdolności prognozowania ruchu płynów w porowatym złożu.

Druga metoda (LBM) – tzw. metoda gazu sieciowego *Boltzmann* – jest w dziedzinie algorytmiki jedną z ważniejszych metod symulacji transportu płynów w układach o złożonej geometrii. Jest ona ściśle związana z kinetyczną teorią gazu sieciowego, dla której równanie *Boltzmann* zostało wyprowadzone,

a zarazem narzędziem numerycznej mechaniki płynów (CFD). Metoda ta jest też techniką umożliwiającą rozwiązanie równania *Naviera-Stokesa* (N-S) dla przepływów nieściśliwych lub quasi-ściśliwych, gdy efekt lepkości objętościowej jest pomijalny [170]. W metodzie tej zmienne dyskretne określające ruch i prędkość cząstek płynu zostały zastąpione zmiennymi ciągłymi interpretowanymi jako prawdopodobieństwa, że cząstki te podążają w określonym kierunku sieci. Znając te relacje, można wyznaczyć parametry makroskopowe przepływu, takie jak lokalna prędkość i gęstość płynu.

Uwzględniając wynikające z teorii homogenizacji cechy porowatego ośrodka oraz dysponując jego fenomenologicznym obrazem pozyskanym technikami fotografii skaningowej (SEM), własną koncepcję przeniesienia skali oparto o modelowanie numeryczne, stosując strukturalny model zmiany skali, jak to schematycznie zobrazowano na rys. 6.2.

W swym podstawowym założeniu koncepcja ta obejmuje transformację skali porowatego złoża o objętościowym kształcie do postaci bryły sześcienniej (rys. 6.2a), na którą składają się takie same elementarne jednostki o strukturze opisanej parametrami, jakie wynikają z rzeczywistego obrazu strukturalnego danego materiału (rys.7.2b).



Rys. 6.2. Koncepcja przeniesienia skali dla próbek różnej geometrii:
a) charakterystyka parametrów procesowych, b) elementarna struktura dla różnej orientacji (X,Y,Z) próbki

Zwrócenie uwagi na problem wieloskalowości wynikający z obu tych sposobów podejścia (strukturalny i numeryczny), stanowi swego rodzaju innowacyjne spojrzenie na problem przenoszenia skali w aspekcie hydrodynamiki ruchu gazu w porowatym złożu.

6.2. Wybór modelu numerycznego

Ruch burzliwy płynu lepkiego, nieściśliwego opisany jest równaniami *Naviera-Stokesa* (N-S) (6.2), które wraz z równaniem ciągłości (6.3) stanowią kompletny układ zależności, pozwalający wyznaczyć m.in. ciśnienie oraz pole prędkości przepływu takiego płynu [55]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + (u \cdot \nabla)(\rho u) = -\nabla p + \eta \nabla^2 u + \rho b, \quad (6.2)$$

gdzie: $u = u_1 e_1 + u_2 e_2 + u_3 e_3$ – wektor prędkości przepływu,

$p = p(x_1, x_2, x_3)$ – ciśnienie,

e_1, e_2, e_3 – jednostkowe wektory bazowe.

Wektorowe operatory *Hamiltona* i *Laplace'a* mają postać:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} e_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} e_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} e_3, \quad (6.2a)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} e_1 + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} e_2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} e_3. \quad (6.2b)$$

Równanie ciągłości:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0. \quad (6.3)$$

Przyjmując hipotezę *Reynoldsa*, która pozwala zapisać składowe wektora prędkości oraz pole ciśnienia jako skalarnie sumy wielkości uśrednionych, mamy

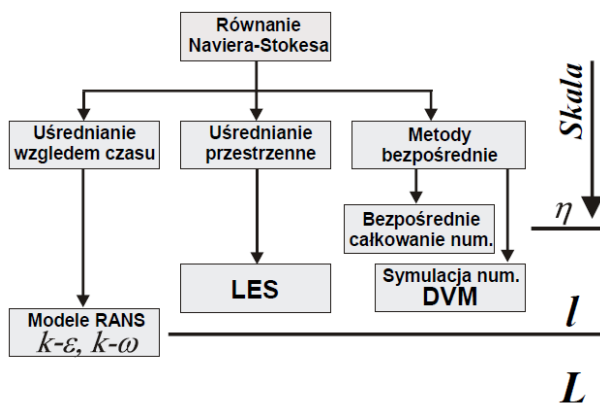
$$u_i = \bar{u}_i + u_i'. \quad (6.4a)$$

$$p_i = \bar{p}_i + p_i'. \quad (6.4b)$$

W zależności od potrzeb i rodzaju rozpatrywanego problemu (np. płyn nieściśliwy lub ściśliwy) stosuje się różne sposoby uśrednień tego układu równań. I jakkolwiek numeryczne rozwiązania wymagają bardzo gęstej siatki dyskretyzującej rozpatrywany obszar przepływu, to współczesna technika komputerowa zezwala na rozwiązywanie problemów o kilka rzędów wielkości mniejszych, niż wymaga tego praktyka inżynierska. Tym samym modele zastępcze wymagają znacznie mniejszych siatek dyskretyzacyjnych.

Najczęściej korzysta się z równań uśrednionych w czasie lub w przestrzeni, stosownie do metody opartej na hipotezie *Reynoldsa*, jak np. modelu $k-\varepsilon$, albo też drobnoskalowych metod aproksymacji, zgodnie do modelu LES – *Large Eddy Simulation*. Uśrednienie w czasie pola prędkości prowadzi do równań *Reynoldsa* wyrażających zasadę zachowania pędu, w uśrednionym przepływie turbulentnym [123].

Powodem stosowania modeli ruchu turbulentnego – zwykle bardziej skomplikowanych niż przejrzysty model N-S – jest problem skali, jaki należy rozwiązać w przypadku przepływu gazu – rys. 6.3.



Rys. 6.3. Skala problemu dla numerycznych modeli przepływu turbulentnego, wg [55]:
 η – skala Kolmogorowa, l – skala wiru, L – skala tunelu

Od skali tej zależy bowiem zakres obliczeń dla zastosowanego modelu. W skali Kolmogorowa (η) w równaniu N-S dominujący jest człon lepkościowy. Ruch gazu w tej skali odbywa się w warunkach laminarnych i charakteryzuje się wysokim czynnikiem dyssypacji energii, która jest zamieniana na ciepło. Ruch gazu w skali wiru – skala o pośrednich rozmiarach – zachodzi praktycznie przy całkowitym pominięciu członu zawierającego lepkość w równaniu N-S. Zatem sprawia to, że ruch gazu ma charakter bezwładnościowy: energia ruchu odbierana jest ze stref przestrzennie rozciągniętych, następnie poprzez mechanizm kaskady wirów transportowana bez dyssypacji do obszarów przestrzennie mniejszych. Dla dużych skal przestrzennych (skala tunelu) obecne są struktury koherentne w postaci wirów, które częściowo synchronizują swoje tempo ruchu. W skali tej na gaz działają siły wymuszające ruch, który jest napędzany za pośrednictwem struktur wielkoskalowych.

Zakładając jednorodność i nieściśliwość płynu oraz stałość jego właściwości ($\rho = const.$, $\eta = const.$), uśrednianie czasowe

$$\bar{u}(x, \tau) = \frac{1}{\Delta \tau} \int_t^{t+\Delta t} u(x, \tau) d\tau, \quad (6.5)$$

przy wykorzystaniu równania ciągłości (6.2), prowadzi dla hipotezy Reynoldsa (6.4) do równania wiążącego średnie wartości składowych wektora prędkości, a mianowicie:

$$\nabla \cdot \bar{u} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = \bar{u}_{i,j} = 0 \quad . \quad (6.6)$$

Podstawianie do równania *Naviera-Stokesa* (6.2) daje

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_{j,i} \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho} \bar{p}_{,j} + \left(\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^* \right)_i \quad , \quad (6.7)$$

gdzie: $\bar{\tau}_{i,j} = \eta \left(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i} \right)$ i $\tau_{ij}^* = -\overline{\rho u_i' u_j'}$ oznaczają naprężenia występujące w płynie.

Tensor naprężeń *Reynoldsa* występujący w równaniu (6.7) jest przyczyną pewnych trudności modeli opartych na takim uśrednieniu (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations* – RANS), gdyż dodaje nowe niewiadome do układu równań (6.2) – (6.3), który staje się teraz niezamknięty, co wymaga stosowania dodatkowych równań wiążących składowe tensora τ_{ij}^* .

Kompromisowy w tej sytuacji wydaje się model k - ε . Zaproponowany przez Chou [30], a następnie wielokrotnie modyfikowany [100], jest jednym z najpopularniejszych i z pewnością najczęściej obecnie stosowanym modelem turbulencji przepływu płynu nieściśliwego, o nieznacznych prędkościach.

Tensor naprężeń turbulentnych *Reynoldsa* opisany jest tu opisany równaniem

$$\tau_{ij}^* = \eta_T \left(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad . \quad (6.8a)$$

przy
$$\eta_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad . \quad (6.8b)$$

gdzie k oznacza energię kinetyczną turbulencji, natomiast ε oznacza dyssypację tej energii, a C_m jest stałą.

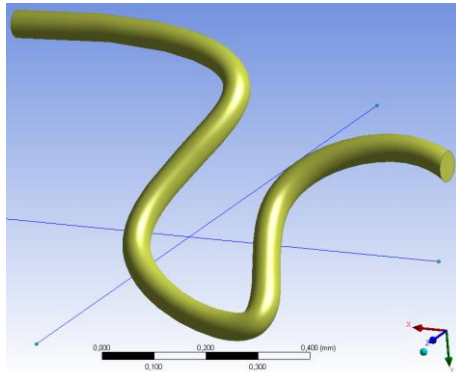
Pomimo bezpośredniej dedykacji modelu k - ε do płynów nieściśliwych, model ten z powodzeniem stosowany jest także w obszarze przepływu gazów, zwłaszcza w kontekście poszukiwania rozwiązań ukazujących wpływ lokalnych zaburzeń na parametry hydrodynamiki ruchu płynu. W koncepcji tego modelu wykorzystuje się zamknięcie układu równań N-S dwoma dodatkowymi równaniami różniczkowymi transportu energii kinetycznej turbulencji (k) oraz transportu szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji (ε), która to wielkość może być oszacowana z wykorzystaniem hipotezy Kolmogorowa [53]. Hipoteza ta wskazuje na powiązanie makroskopowej struktury przepływu wyrażonej po-

przez skalę liniową przepływu z dyssypacją, która charakteryzuje najdrobniejsze skale wirowe.

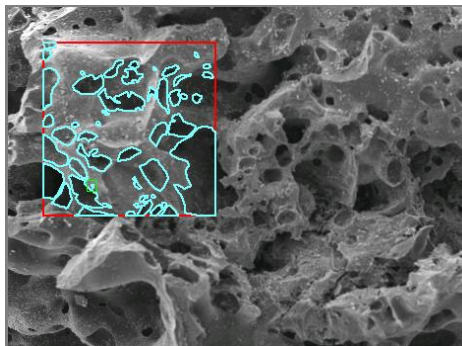
Warto zauważyć, że inny model grupy *RANS*, a mianowicie model *k- ω* , jest też modelem dwurównaniowym transportu energii kinetycznej turbulencji (*k*), powiązanej w tym przypadku z wirowością (ω). Jednakże jego stosowanie w odniesieniu do wielu typów przepływów nie daje zadowalająco dokładnych rozwiązań z uwagi na założenie o skalarnym charakterze lepkości wirowej [18].

6.3. Geometria kanału krętego

Obliczenia numeryczne wymagają utworzenia szczegółowej postaci geometrycznej modelowanego obiektu. W programie ANSYS Fluent służy temu moduł *DesignModeler*. Tytułem przykładu, na rys. 6.4 przedstawiono model geometryczny kanału krętego ośrodka porowatego (koks), jaki utworzono na podstawie rzeczywistych profili (szkiców) w płaszczyznach odpowiadających temu obiektowi – w zależności od schematu wymiarowane są długość i średnica projektowanego mikrokanalu. Opracowany model badanego obiektu odpowiada wymiarom mikrokanalu zamodelowanego wg analizy obrazu struktury porowatej pokazanej na rys. 6.5 – por. Załącznik, pkt 2a (pole B).



Rys. 6.4. Geometria mikrokanalu krętego – $d_g = 123 \mu\text{m}$



Rys. 6.5. Obraz skaningowy porowatego obiektu z zaznaczonym polem identyfikacji jego cech: $\varepsilon = 54,3\%$, $d_g = 123 \mu\text{m}$ (wartości średnie w odniesieniu do analizowanego obszaru)

Otrzymane w ten sposób dane geometryczne mikrokanalów zostały wykorzystane do ich dyskretyzacji a następnie numerycznej analizy, ukierunkowanej na modelowanie objętościowej sieci mikrokanalów krętych. Dokonano przy tym odpowiedniej oceny parametrów uzyskanych na drodze doświadczalnej względem wielkości fizycznych (danych), wymaganych do stosowanego programu obliczeniowego (ANSYS-Fluent).

6.4. Model dyskretny mikrokanalu

Siatka numeryczna powinna wiernie odtwarzać cały obszar zajmowany przez gaz, przez zapewnienie odpowiedniej smukłości kształtu mikrokanalu i jego jednakowej wielkości, jako komórki obliczeniowej. Ważne jest przy tym uzyskanie kompromisu między stopniem szczegółowości a liczbą węzłów w siatce numerycznej.

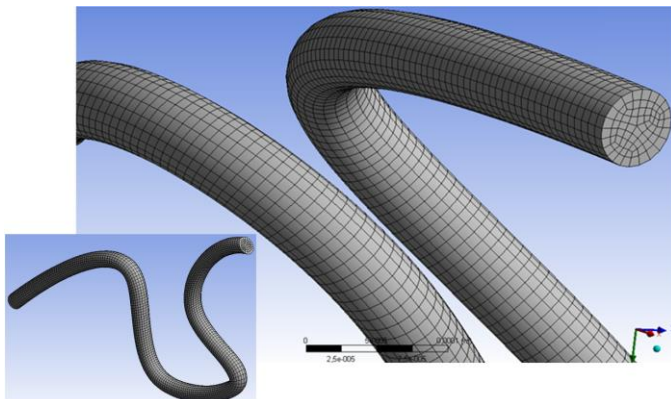
Generacja siatki polega na dyskretyzacji przestrzeni modelu, czyli jej podziału na elementy stanowiące objętość kontrolną. Każdy taki element większej części – jaką jest geometria – stanowi przestrzeń do bilansowania przepływu gazu, zgodnie z równaniami zachowania masy, pędu i energii. Siatka numeryczna stanowi jeden z ważniejszych elementów budowy modelu, gdyż jej gęstość oraz gradient określają dokładność obliczeniową oraz czas, po którym dochodzi się do uzyskania właściwego rozwiązania. Siatka powinna być jednocześnie największej gęstości w miejscach, gdzie będzie dochodzić do procesów wymiany, w tym ruchów turbulentnych, nagłych zmian kierunku przepływu strumieni itp. [162].

Na siatkę numeryczną składają się objętości kontrolne (elementy), dla których obliczane są wartości zmiennych zależnych. Do tego celu wykorzystano specjalistyczny moduł przygotowania danych (komponent *Mesh*), pozwalający uzyskiwać numeryczne rozwiązania złożonych zagadnień transportu gazu, poprzez odpowiednie wykorzystanie modułu *Solver Preference* na opcję *Fluent*. Poprawność wyników rozwiązania numerycznego zależy w zasadzie od właściwego doboru metody – w tym przypadku *Insert Method*. Warto wybrać przy tym opcję obliczeniową typu *Sweep*, gdyż ma to wpływ na układ elementów tworzących siatkę, przy jej generowaniu dla mikrokanalu.

W analizowanym przypadku zastosowano siatkę utworzoną z elementów geometrycznych bazując na kwadratach (opcja *Tetra*). Zapewniało to uzyskanie komórki obliczeniowej o foremnych kształtach i jednakowej wielkości. Efekty wygenerowanej w ten sposób siatki numerycznej (odpowiadającej geometrii mikrokanalu jak na rys 6.4) przedstawiono na rys. 6.6.

Jak wiadomo [79], dokładność uzyskanego rozwiązania numerycznego w głównej mierze zależy od gęstości siatki numerycznej oraz kształtu poszczególnych elementów geometrycznych odwzorowujących model obiektu. Zagęszczenie siatki numerycznej gwarantuje wprawdzie zwiększenie dokładności obliczeń w wyniku aproksymowania funkcji na krótszych odcinkach, lecz czyni się to kosztem zwiększenia czasu niezbędnego do przeprowadzenia obliczeń.

W efekcie niezbędny jest pewien kompromis pomiędzy skalą odzwierciedlenia obiektu a dokładnością obliczeń.



Rys. 6.6. Fragment siatki mikrokanalu krętego o parametrach: węzłów 19068, komórek 16272

6.5. Warunki początkowe i brzegowe modelu

W celu przeprowadzenia analizy hydrodynamiki przepływu gazu przez mikrokanaly kręte porowatych ośrodków należy zdefiniować własności materiałowe, ustawić warunki otoczenia oraz brzegowe. Jest to jeden z ważniejszych etapów stosowania metody CFD, gdyż zakres warunków początkowych i brzegowych ma duży wpływ na jakość uzyskiwanego rozwiązania numerycznego. Pozwala to wówczas na inicjalizację obliczeń oraz uzyskanie obrazów obliczeniowych pól ciśnienia i prędkości.

W analizowanym zagadnieniu zdefiniowano kryteria powierzchniowe niezbędne dla określenia warunków brzegowych typu wlot (*pressure – inlet*, *velocity – inlet*). W tym celu w obiekcie modelowym wydzielono powierzchnie, które można nazwać strefami. Powierzchnie te uznawano w procedurze obliczeniowej za granice, na których definiuje się wybrane wielkości wejściowe, zarówno mierzalne jak i obserwowalne. Warunek brzegowy typu *inlet* zdefiniowano jako prędkość gazu na wlocie $w_{inlet} = 0,195 \text{ ms}^{-1}$ oraz ciśnienie odniesienia $P = 173,1 \text{ kPa}$. Warunek brzegowy typu *outlet* przyjęto jako stałe ciśnienie statyczne oraz zerowe gradienty wszystkich zmiennych zależnych, prostopadłych do tej powierzchni.

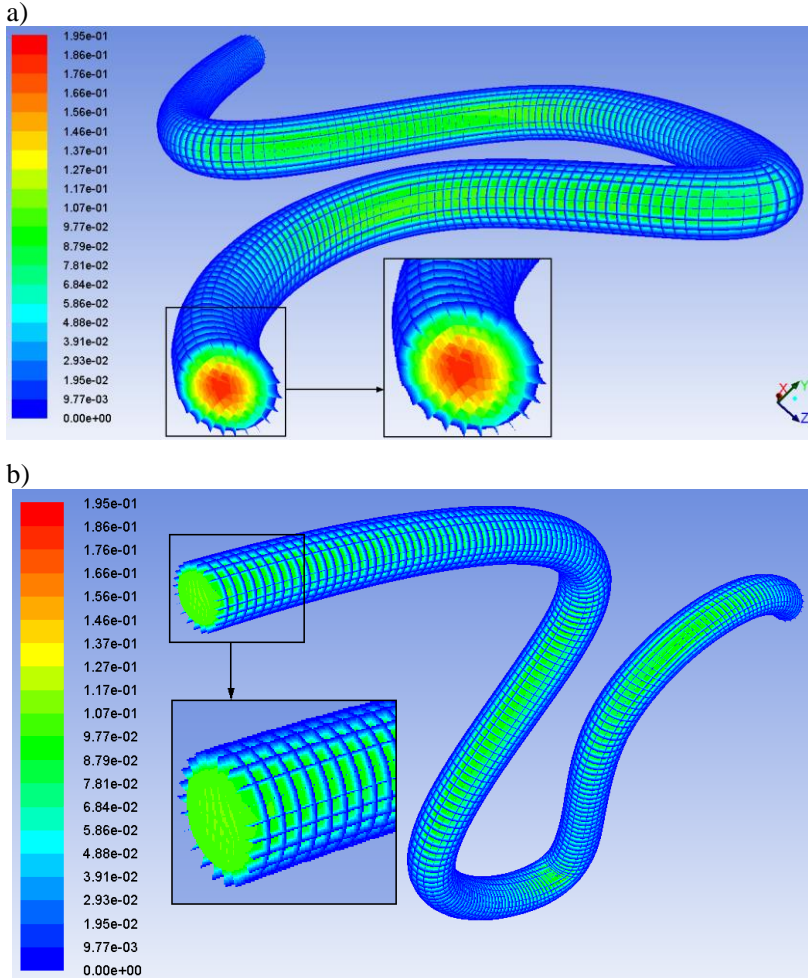
Uzyskane przy tych warunkach wyniki obliczeń rozkładu prędkości gazu na wlocie i wylocie dla kanału krętego przedstawiono na rys. 6.7. Dla tak zadanych warunków przepływu prędkość w_{inlet} jest ustalona w rdzeniu mikrokanalu, zaś średnia prędkość gazu o wartości ok. $w_{outlet} = 0,095 \text{ ms}^{-1}$ występuje na wylocie mikrokanalu.

Model *standard k-ε* wymaga znacznie mniejszych siatek dyskretyzacyjnych, gdyż korzysta on z uśrednionych w czasie równań N-S. Uśrednienie w czasie pola prędkości prowadzi do równania Reynoldsa, przy czym liczba punktów węzłowych odpowiedniej siatki przestrzennej powinna być proporcjonalna do

liczby $Re^{9/4}$ [31, 123], liczonej względem wymiaru liniowego odpowiadającego całkowitej drodze przepływu (L), tj.:

$$Re = \frac{wL\rho}{\eta}, \quad (6.9)$$

co wynika ze statystycznych teorii ruchu turbulentnego.



Rys. 6.7. Pole prędkości dla mikrokanalu krętego – $d_g = 123 \mu\text{m}$:
a) wlot ($w_{inlet} = 0,195 \text{ ms}^{-1}$), b) wylot ($w_{outlet} = 0,097 \text{ ms}^{-1}$)

6.6. Koncepcja geometrii sieci kanałów krętych

Uwzględniając procesowe właściwości materiału porowatego, w tym przepuszczalność i jego anizotropię, podjęto próbę stworzenia zespolonego obszaru krętej sieci wielowarstwowej. Opracowana metodyka tworzenia mnogiej sieci

mikrokanalów, szczegółowo opisana w innej pracy własnej [190], obejmuje trzy warianty, jak to przedstawiono na rys. 6.8. Wykorzystano przy tym opcje tworzenia modelu geometrycznego jednego mikrokanalu krętego (rys. 6.6) o takiej samej gęstości siatki geometrycznej (węzłów 19068, komórek 16272).

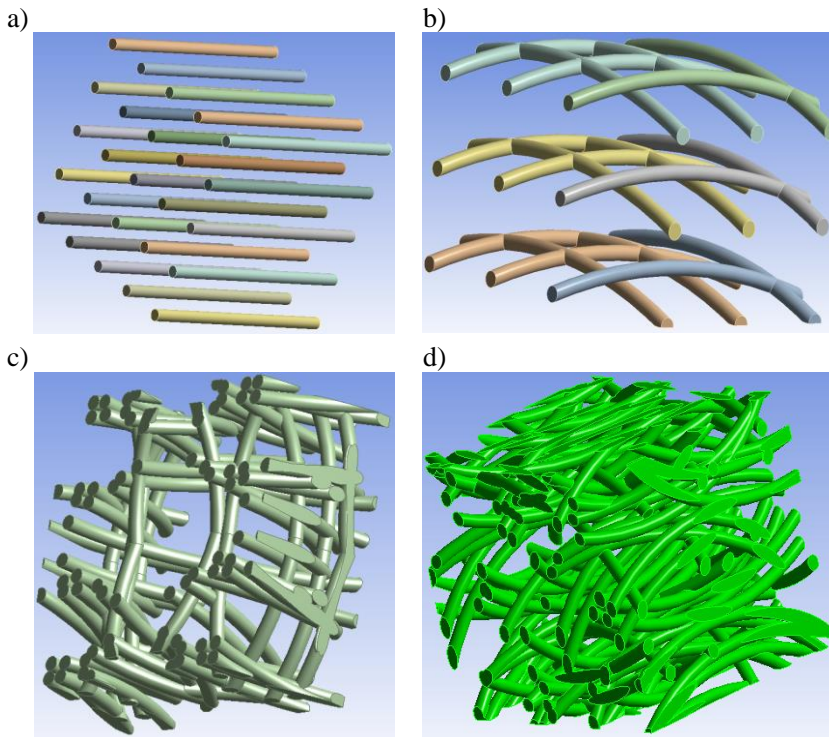
Opracowany model przestrzenny badanego obiektu odpowiada jednocześnie wymiarom sześciangu o krawędzi $a = 20$ mm oraz średnicy obliczeniowej każdego mikrokanalu $d_e = 123$ μm (rys. 6.5). Wykorzystano w tym celu przeliczenie liczby mikrokanalów wynikających z objętości przepływu gazu względem rzeczywistej porowatości takiej próbki. Założono, że geometria sieci odpowiada porowatej strukturze, analogicznej do symetrycznego rozplywu gazu przez mikrokanaly o konfiguracji porów prostych, zakrzywionych i krętych – rys. 6.8. W tym celu zamodelowano geometrię kształtu przepływu gazu wewnątrz takiego sześciangu. Przyjęto przy tym konfigurację odpowiadającą sieci mikrokanalów regularnie rozmieszczonych (rys. 6.8a, rys. 6.8b) oraz rozmieszczonych losowo, które w skrajnych przypadkach częściowo nachodziły na siebie, tworząc quasi-fraktalną sieć mikrokanalów krzywoliniowych (rys. 6.8c, rys. 6.8d), a w konsekwencji quasi-fraktalną sieć mikrokanalów krętych pokazaną na rys. 6.9 – wyznaczoną dla dwóch wartości porowatości.

Uzyskano w ten sposób geometrię przestrzeni porowatej – rys. 6.10 – w której mikrokanaly są izolowane od siebie oraz stanowią system wzajemnych połączeń, jak ma to miejsce w rzeczywistym ośrodku porowatym. Skutkiem tego możliwe jest modelowanie kryteriów powierzchniowych dla takiej struktury (rys. 6.11) a w konsekwencji tworzenie geometrii przestrzennej odpowiadającej szkieletowej strukturze porowatego materiału (rys. 6.12).

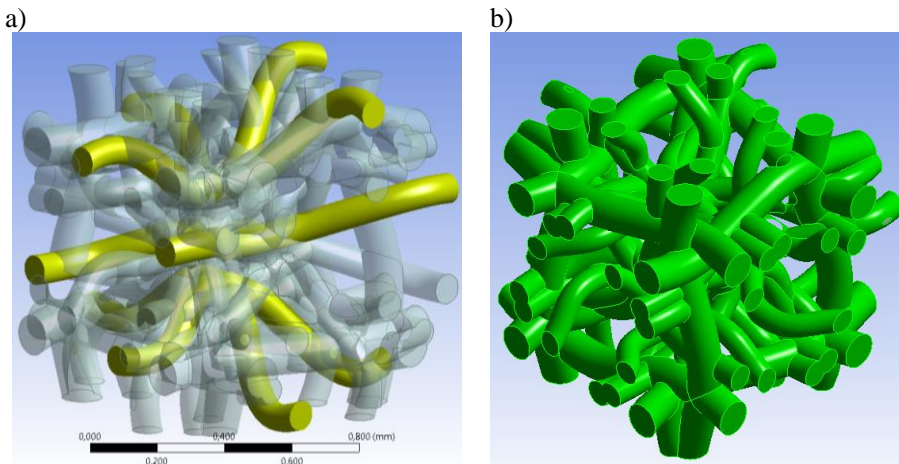
Opracowana metodyka tworzenia geometrii sieci mikrokanalów wskazuje na możliwość dalszego procedowania obliczeń zgodnie z adekwatnymi metodami numerycznymi w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate materiały. Stanowić to może ważny przyczynek do walidacji wyników badań w warunkach rzeczywistych złóż porowatych.

Tytułem przykładu (dla powietrza), na rys. 6.13 podano wyniki obliczeń rozkładu ciśnienia i prędkości dla ruchu gazu, w odniesieniu do materiału o przestrzennej sieci fraktalnej, symulującej strukturę karbonizatu ($a = 20$ mm, $d_e = 123$ μm , $\varepsilon = 54,3\%$). Można zaobserwować, że w zależności od rozpatrywanego przekroju ciągłość przepływu gazu w strukturze szkieletowej zachodzi dla połączonych mikrokanalów, co świadczy o poprawności obliczeń.

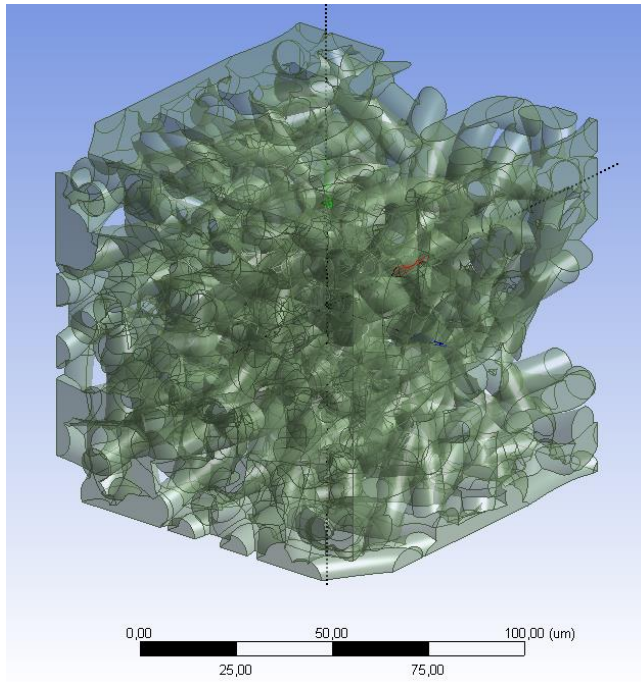
Na podstawie opracowanej koncepcji tworzenia sieci geometrycznej złoża porowatego, a także poprzez ustalenie należytych ścieżek dostępu dla potrzeb modelowania hydrodynamiki przepływu gazu w złożu porowatym o sztywnej strukturze, stworzono odpowiedni algorytm obliczeń i symulacji w środowisku programowym *ANSYS WORKBENCH*, z wykorzystaniem „bloków obliczeniowych” *Geometry*, *Mesh* i *Fluent*. Pozwoliło to zamodelować warunki przepływu wynikające z gazoprzepuszczalności różnych jakościowo materiałów porowatych. Wyniki takich obliczeń podano w kolejnym punkcie.



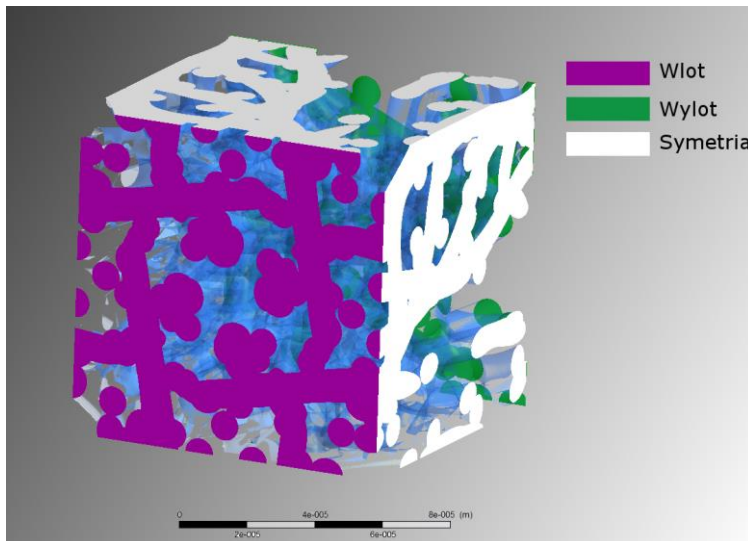
Rys. 6.8. Geometria wielowarstwowej sieci mikrokanałów: a) równoległa mikrokanałów prostych ($\varepsilon = 6,6\%$), b) równoległa mikrokanałów krzywoliniowych ($\varepsilon = 40,8\%$), c, d) quasi-fraktalna mikrokanałów krzywoliniowych: c) $\varepsilon = 15,6\%$, d) $\varepsilon = 27,4\%$



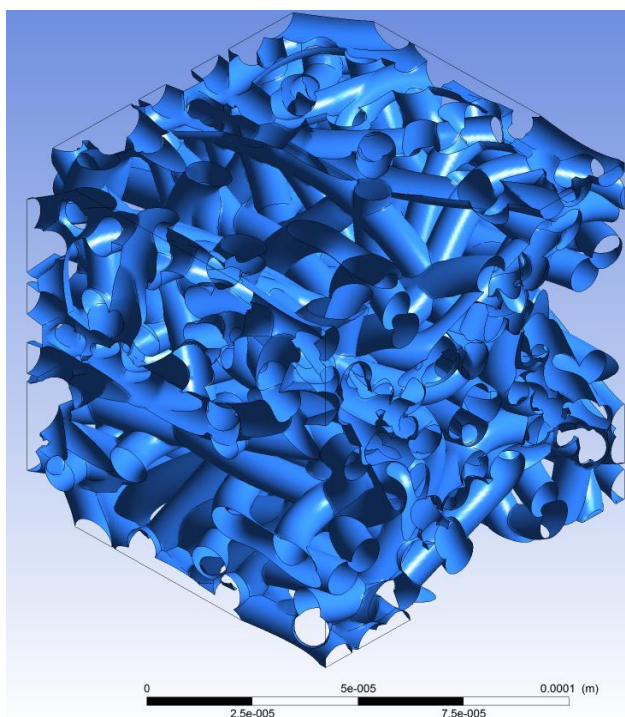
Rys. 6.9. Geometria wielowarstwowej sieci quasi-fraktalnej mikrokanałów krętych: a) $\varepsilon = 2,8\%$, b) $\varepsilon = 39,5\%$



Rys. 6.10. Struktura modelowa geometrii wielowarstwowej sieci fraktalnej mikrokanalów
 ($a = 20 \text{ mm}$, $d_g = 123 \text{ }\mu\text{m}$, $\varepsilon = 54,3\%$)



Rys. 6.11. Kryteria powierzchniowe sześcienniej sieci fraktalnej mikrokanalów
 ($a = 20 \text{ mm}$, $d_g = 123 \text{ }\mu\text{m}$, $\varepsilon = 54,3\%$)



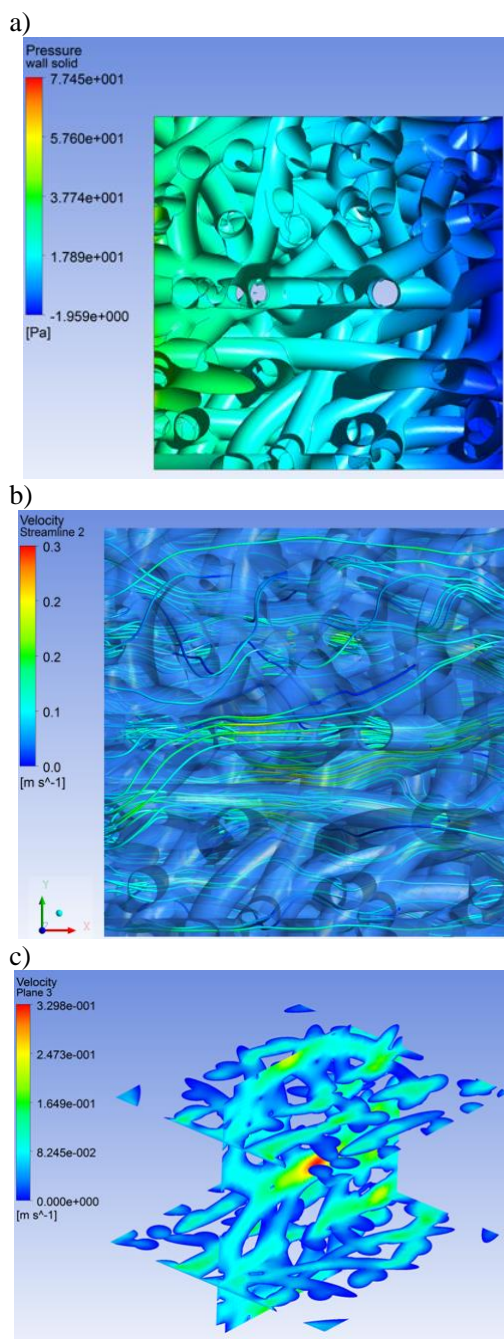
Rys. 6.12. Struktura szkieletowa sieci fraktalnej złoża porowatego ($a = 20 \text{ mm}$, $d_g = 123 \text{ }\mu\text{m}$, $\varepsilon = 54,3\%$)

6.7. Wyniki analizy numerycznej

Do analizy numerycznej wybrano trzy charakterystyczne rodzaje materiałów typu karbonizat, koks i porowaty spiek poliamidu, które pod względem swej struktury są odpowiednio reprezentatywne dla wielowarstwowej sieci mikrokanałów o układzie równoległym (rys. 6.8d), fraktalnym (rys. 6.10) oraz ortogonalnym, charakterystycznym dla spieku poliamidu – rys. 6.14.

Charakterystykę obliczeniową tych materiałów podano w tabeli 6.1, wraz z podaniem dla próbek objętościowych tzw. współczynnika krotności objętości próbki sześcienniej o wymiarach $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$ (por. tab. 4.4).

Wykazujący cechy izotropii spiek stanowi przy tym wzorzec sieci o symetrycznej strukturze (rys. 6.14a), co prowadzi do powtarzalnej geometrii sieci obliczeniowej, jaka dla tego materiału wynika z przestrzeni wolnej (rys. 6.14b). Dyskretyzacja tej przestrzeni, dokonywana dla różnej gęstości siatki obliczeniowej (w tym przypadku o polach trójkąta), pozwoliła wyznaczyć najmniejszą wymaganą liczbę komórek siatki, przy której uzyskuje się powtarzalne wyniki obliczeń. Na przykład, z oceny wpływu liczby komórek takiej siatki na rozkład ciśnienia stwierdzono, że powtarzalne wyniki obliczeń uzyskuje się dla ok. $85 \cdot 10^3$ i więcej komórek – rys. 6.15.



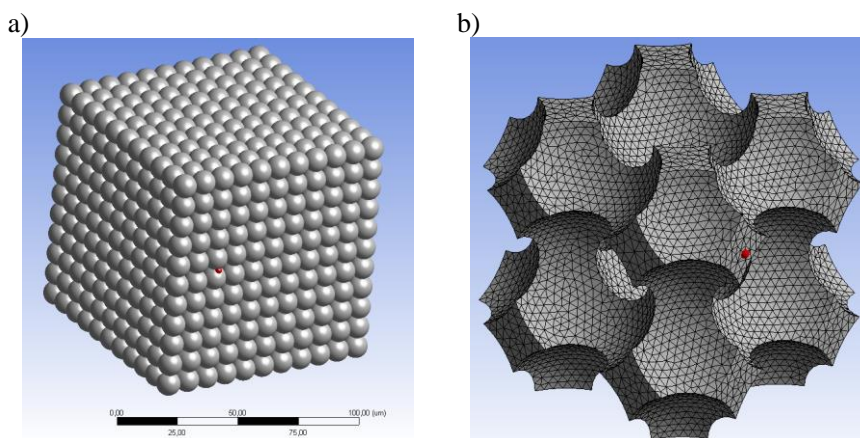
Rys. 6.13. Wyniki obliczeń numerycznych dla przepływu gazu w strukturze szkieletowej: a) pole ciśnienia, b) linie prędkości, c) pole prędkości względem płaszczyzny przepływu

Tabela 6.1

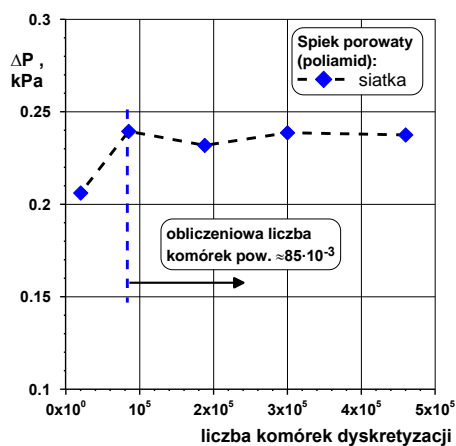
Charakterystyka materiału badawczego (wartości średnie)

Material	Porowatość bezwzględna ε_b , %	Zastępcza średnica porów d_ε , μm	Objętość próbki V , dm^3	Liczba zastępcza objętości (próbka objętościowa)*, n_v
Karbonizat <i>in situ</i>	40,8	50,1	0,100	12,3
Koks	54,3	123,4	0,090	11,8
Poliamid	32,2	10,0	0,008	1,0

*- krotność próbki sześcienniej o wymiarach $20 \times 20 \times 20$ mm,

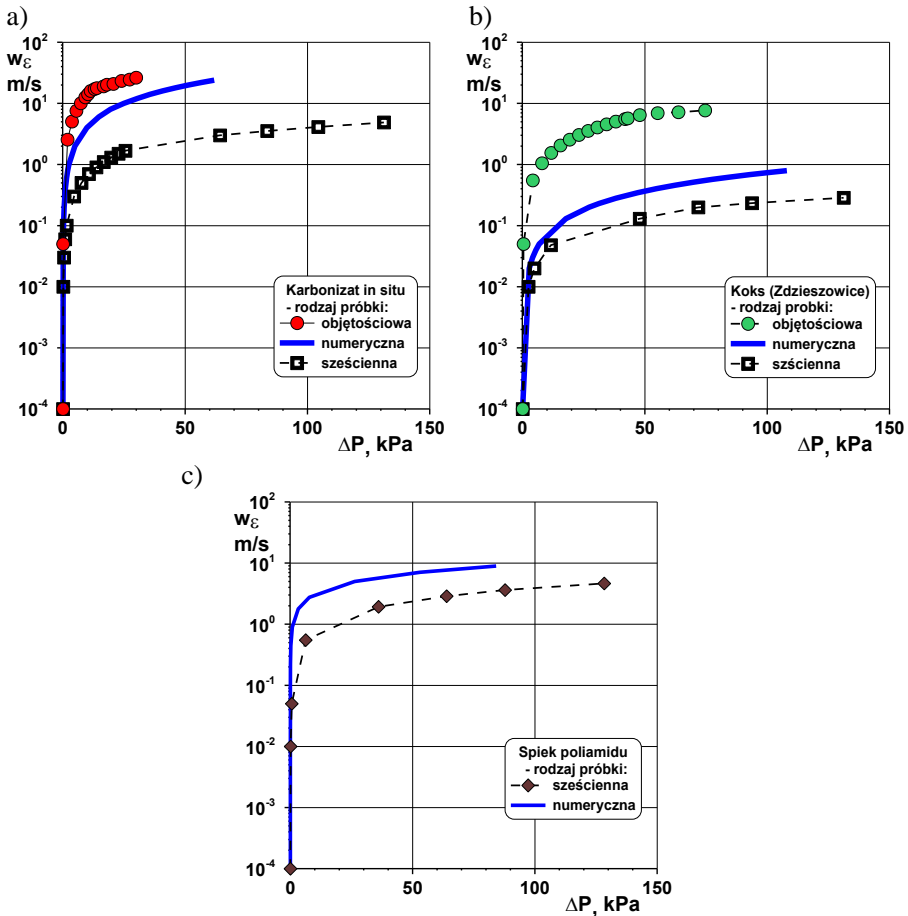


Rys. 6.14. Geometria złoża o symetrycznej strukturze sześcienniej: a) struktura modelowa, b) sieć geometryczna przestrzeni wolnych



Rys. 6.15. Parametry dyskretyzacji siatki typu sześciennego ($a = 20$ mm, $d_k = 10$ μm , $\varepsilon = 32,2\%$)

Wyniki obliczeń charakteryzujące warunki hydrodynamiczne względem oporów przepływu, odniesione do trzech badanych układów porowatych (koks, karbonizat i spiek) przedstawiono na rys. 6.16. Dla karbonizatu i koksu dokonano przy tym zestawienia danych doświadczalnych odrębnie dla próbki objętościowej oraz próbki kształtu sześciennego (w przypadku poliamidu przedmiotem badań były jedynie próbki sześciennie).



Rys. 6.16. Charakterystyka porównawcza danych eksperymentalnych i wyników obliczeń numerycznych dla karbonizatu *in situ* (a), koksu (b) i porowatego spieku (c)

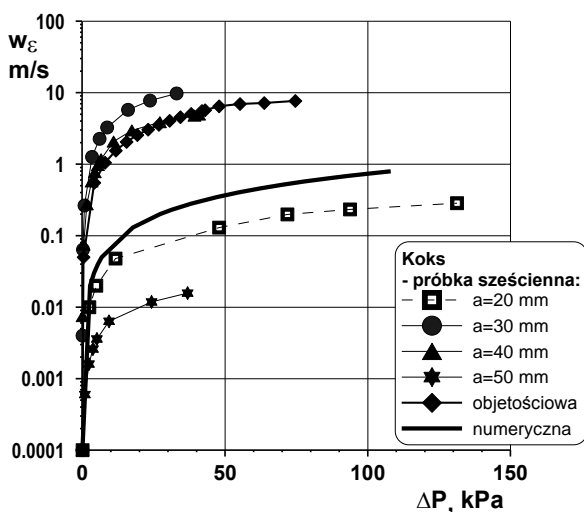
Uzyskane wyniki obliczeń, odniesione do średniej struktury tych materiałów (tab. 6.1) oraz zadanej geometrii wielowarstwowej sieci fraktalnej mikrokanałów, dość dobrze oddają warunki wynikające z hydrodynamiki przepływu gazu przez wszystkie te złoża. Tendencja zmian funkcji przepuszczalności, reprezentowana w tym przypadku przez prędkość przepływu gazu, jest powtarzalna i niewiele odbiega od wartości doświadczalnych. Dodatkowo, w przypadku

karbonizatu i koksu krzywa obliczeniowa mieści się w średnim obszarze danych doświadczalnych, co świadczy o poprawności ustalania paramentów skali dla badanych próbek objętościowych.

Nieco zaniżone wyniki eksperymentu w przypadku poliamidu (rys. 6.16c) są niewątpliwie powodem nieidealnie ortogonalnej struktury tego materiału. Jako termiczny spiek kulistych ziaren, materiał ten zawiera liczne defekty strukturalne wywołane deformacją kulistych cząstek podczas ich spiekania. Może to prowadzić do asymetrii struktury tego materiału, czego nie uwzględniano w obliczeniach numerycznych.

Analiza przedstawionych na rys. 6.16 wyników pozwala również na stwierdzenie, że dla każdego rodzaju materiału występuje pewien graniczny zakres prędkości gazu, poniżej której zależność funkcyjna przepuszczalności ma charakter liniowy, a jednocześnie przy której opory przepływu przyjmują najmniejszą wartość. Dla koksu występuje to przy średniej prędkości gazu do ok. 0,01 m/s, podczas gdy dla karbonizatu ok. 0,1 m/s, a poliamidu nawet do ok. 1 m/s. Rozbieżność tych wartości wynika niewątpliwie z odmiennej struktury tych materiałów (od szczelinowo-porowatej dla karbonizatów do sześcienniej dla poliamidu), a ściślej zróżnicowanej wartości efektywnej porowatości, jak wynika z aktywnej dla przepływu gazu powierzchni swobodnej. Natomiast liniowy charakter tej zależności świadczy o laminarnym ruchu gazu w takim zakresie prędkości.

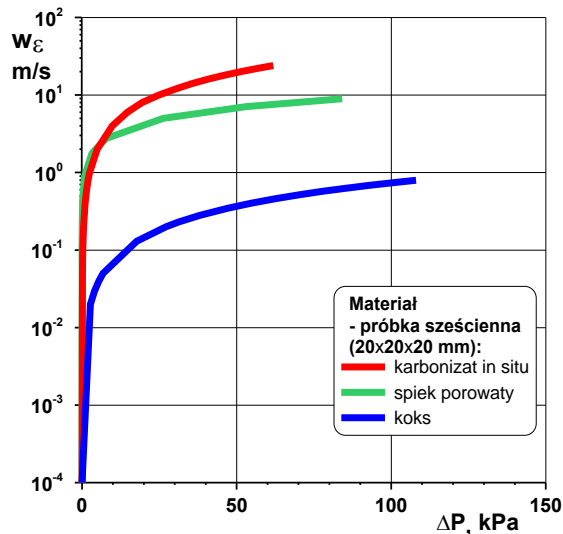
Spostrzeżenia te znajdują potwierdzenie także w przypadku próbek o zróżnicowanej objętości, jak to na przykładzie koksu pokazano na rys. 6.17. W przypadku tym charakterystyka wynikająca z numerycznych obliczeń zawiera się w średnim zakresie rozkładu punktów doświadczalnych, których odstępstwo od wartości obliczeniowej jest stymulowane wcześniej opisanymi przyczynami.



Rys. 6.17. Charakterystyki hydrodynamiczne dla koksu o zróżnicowanych wymiarach próbek

Z drugiej strony, rozbieżność rozkładu tych punktów względem siebie jest niewątpliwie następstwem relatywnie zróżnicowanej dla każdej objętości próbki powierzchni aktywnej dla przepływu, pomimo podobnej porowatości bezwzględnej.

Porównawcze zestawianie wyników obliczeń numerycznych pokazano na rys. 6.18. Wyniki te wskazują, że w zakresie w pełni rozwiniętego przepływu największą przepuszczalnością cechuje się karbonizat, dla którego prędkość gazu w strukturze szkieletowej klasyfikuje ten materiał do grupy wyższej od poliamidu i koks. Z kolei najmniejsze wartości tej przepuszczalności są charakterystyczne dla koks, co jest zgodne z wynikami doświadczeń w zakresie bezpośredniej oceny przepuszczalności tych materiałów (pkt 5).



Rys. 6.18. Zestawienie wyników obliczeń numerycznych

Pokazuje to, że opracowana metodyka tworzenia geometrii sieci mikrokanałów krętych stanowi poprawną drogę do oceny przepuszczalności materiałów porowatych, a jednocześnie stwarza możliwość dalszego procedowania obliczeń zgodnie z adekwatnymi metodami numerycznymi w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate. Stanowić to może ważny przyczynek do walidacji wyników badań w warunkach rzeczywistych złóż porowatych.

7. OCENA PROCESOWA WYNIKÓW BADAŃ

Wynikająca z hydrodynamiki przepływu gazu przez różnego rodzaju karbonizaty ocena zjawisk procesowych może dotyczyć wielu aspektów technologicznych, odnoszących się do cech właściwościowych takich materiałów. Z jednej strony są to zjawiska związane z ruchem (migracją) gazów w naturalnych i przetwarzanych *in situ* pokładach węgla, szczególnie pod kątem bezpiecznej eksploatacji złóż (zwłaszcza w odniesieniu do metanu) oraz oceny rozprężenia gazu (syngazu) pochodzącego z podziemnego zgazowania węgla. Z drugiej zaś strony, zagadnienia te są przedmiotem oceny ruchu gazów poreakcyjnych w warunkach termicznego procesowania substancji węglowych. W tym drugim przypadku dodatkowym aspektem tej oceny są także zjawiska odnoszące się do wyznaczenia przepuszczalności karbonizatów w kontekście ich wykorzystania w innych procesach technologicznych, jak np. koksu w cyklu hutniczym.

W kontekście własnych badań odnoszących się do hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate materiały, podjęto próbę powiązania wyników tych badań z zagadnieniami procesowymi, wynikającymi z technologicznych przesłanek wykorzystania różnego rodzaju karbonizatów. Powiązanie to odniesiono do dwóch zasadniczych aspektów technologicznych, a mianowicie:

- a) oceny technologicznej jakości koksu powiązanej z jego właściwościami dla technologii wielkopiecowej,
- b) oceny cech procesowych syngazu z podziemnego zgazowania węgla.

W obu przypadkach za podstawę dokonanej oceny, której niektóre elementy zawarto też w pracy Wałowskiego [185], posłużyły wyniki badań własnych, odnoszące się do pomiaru cech strukturalnych badanych karbonizatów oraz hydrodynamiki wynikającej z ich gazoprzepuszczalności.

7.1. Ocena jakości koksu

W przemysłowej kontroli jakości koksu szczególną uwagę przywiązuje się nie tylko do właściwości mechanicznych, ale także do jego cech procesowych, powiązanych z wykorzystaniem tego paliwa w technologii wielkopiecowej. W kontekście tej technologii cechy koksu wynikające z jego gazoprzepuszczalności mają duże znaczenie, gdyż stanowią bezpośrednią miarę jakości koksu dla tych procesów.

Wysokotemperaturowe właściwości koksu wielkopiecowego oznaczane są według standardowego testu *Nippon Steel Corporation* (NSC) [76, 117, 143, 165]. Testy te prowadzone są w czasie ok. 2,5 h, w temperaturze (930–980)°C, przy masie próbki mieszanki węglowej 4 kg. Otrzymany w tych warunkach koks chłodzony jest przez okres doby do temperatury ok. 50°C. W ten sposób oznacza się ilość i jakość chemicznych produktów koksowania węgla i mieszanek węglowych, w warunkach zbliżonych do przemysłowych.

Na podstawie tych testów określa się następnie dwa wskaźniki określające technologiczną jakość koksu, a mianowicie [23, 114]:

- a) reakcyjność wobec ditlenku węgla – *Carbon Reactivity Index* (CRI) – jako wskaźnik odzwierciedlający ubytek masy próbki koksu poddanej dwugodzinemu działaniu ditlenku węgla w temperaturze 1100°C,
- b) wskaźnik wytrzymałości poreakcyjnej – *Coke Strength after Reaction* (CSR) – określający uzysk koksu o uziarnieniu pow. 10 mm, po jego mechanicznej obróbce w określonych standardami NSC warunkach.

Oba wskaźniki wyznacza się względem zmiany masy próbki z następujących zależności:

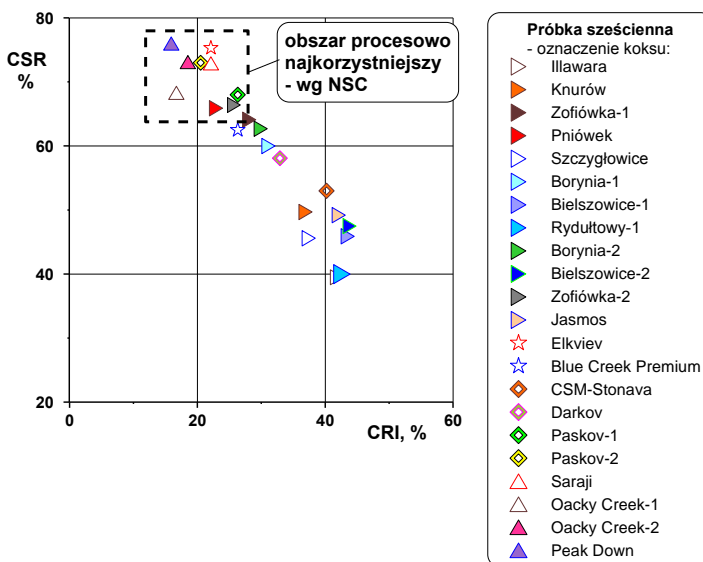
$$CRI = \frac{m_{R1} - m_{R2}}{m_{R1}} \cdot 100\% . \quad (7.1)$$

$$CSR = \frac{m_{R3}}{m_{R2}} \cdot 100\% . \quad (7.2)$$

gdzie: m_{R1} – masa próbki koksu przed oznaczeniem reakcyjności, m_{R2} – masa po oznaczeniu reakcyjności, m_{R3} – masa frakcji o uziarnieniu powyżej 10 mm.

Uwzględniając technologiczne wymagania jakościowe koksu przyjmuje się [117], że koks o najwyższej jakości procesowej posiada parametry dla wskaźnika reakcyjności $CRI < 28\%$ (optymalne przy $CRI \approx 24\%$), a odpowiednią wytrzymałość gdy $CSR > 60\%$, przy optymalnych parametrach $CSR \approx 70\%$.

Tytułem przykładu na rys 7.1 przedstawiono rozkład tych parametrów, odniesiony do próbek koksu scharakteryzowanych w tabeli 4.1 Można zauważyć, że wg metody NSC najlepsze jakościowo są w tym przypadku koksy: Peak Down, Oaky Creek-1/2, Saraji, Elkview, Paskov-1/2, Pniówek, Zofiówka-1.



Rys. 7.1. Wskaźniki CSR i CRI jakości koksu
(wg danych Koksowni ArcelorMittal O/Zdzieszowice - materiały niepublikowane)

Pomimo że metoda NSC jest obecnie wiodącą w branży koksowniczej, to problematyka prognozowania jakości koksu w oparciu o wyżej podane parametry stanowi nadal otwartą dyskusję [149]. Jej granicę wytyczają problemy wynikające ze sztywnej struktury koksu, wykazującej cechy znacznej anizotropii, co w wielu przypadkach stwarza trudności w jednoznacznej ocenie jego jakości, niezależnie od stosowanych kryteriów i metod o charakterze „standardowym”. Ocena ta wymaga jednocześnie prowadzenia testów wysokotemperaturowych (pow. 1000°C), co znacząco podnosi koszty wykonywanych analiz, czemu nie sprzyja też ich czasochłonność, oraz związane z tym ograniczenia w szybkim pozyskiwaniu informacji na temat badanego surowca.

Wszystkie te okoliczności sprawiają, że wciąż poszukuje się nowych, bardziej skutecznych, metod tej oceny oraz efektywnego powiązania ww. wskaźników reakcyjności z innymi cechami jakościowymi koksu, których wyznaczenie byłoby prostsze, a jednocześnie znacznie mniej pracochłonne.

Możliwość taką dostrzeżono w powiązaniu hydrodynamicznych parametrów wynikających z gazoprzepuszczalności koksu z jego parametrami jakościowymi, co stanowi pewną alternatywę dla obecnie stosowanych metod.

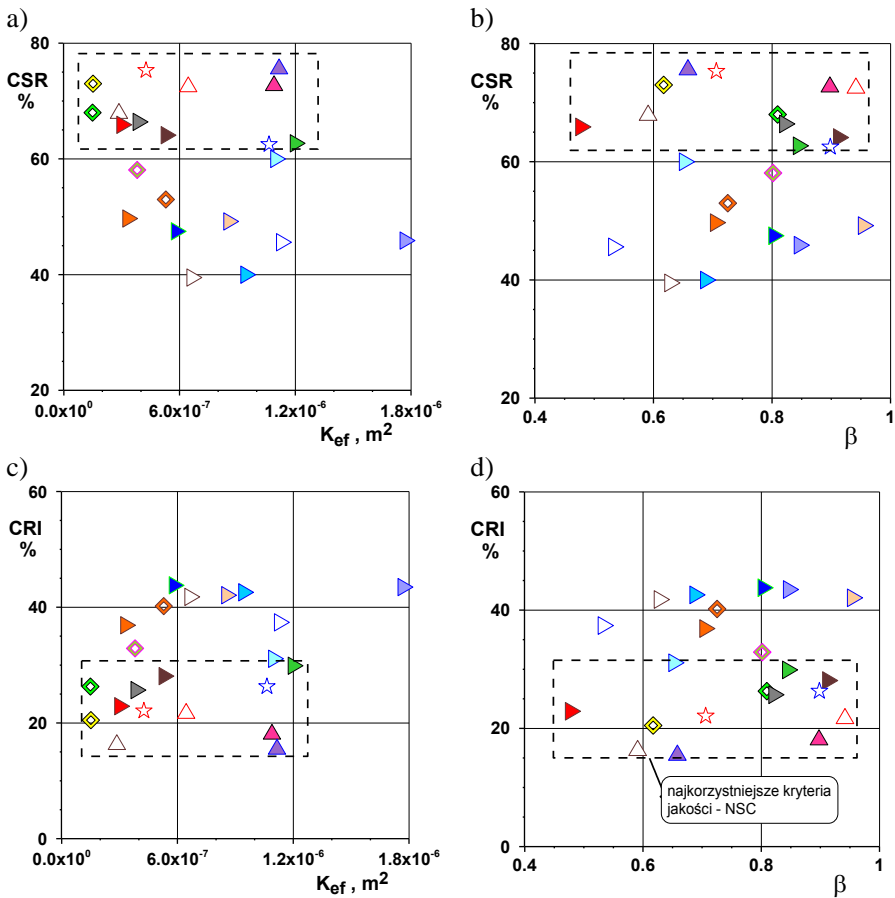
W szczegółowym ujęciu wynikająca z badań własnych metoda oceny jakości koksu polega na bezpośrednim skorelowaniu wskaźników CRI i CSR względem współczynnika gazoprzepuszczalności (K) oraz współczynnika anizotropii (β). Jako nowatorska metoda oceny tych wskaźników, oparta tylko o cechy koksu wynikające z parametrów hydrodynamicznych, jest ona przedmiotem autorskiego wynalazku [193].

Wynikający z takiego podejścia rozkład punktów doświadczalnych pokazano na rysunku 7.2, zaznaczając na nim:

- a) wskaźnik wytrzymałości poreakcyjnej (CSR) w funkcji współczynnika przepuszczalności efektywnej koksu (rys. 7.2a) oraz współczynnika anizotropii (rys.7.2b),
- b) wskaźnik reakcyjności koksu (CRI) względem współczynnika przepuszczalności efektywnej (rys.7.2c) oraz współczynnika anizotropii (rys. 7.2d).

Z rozkładu punktów doświadczalnych wynika, że dla każdego przypadku można wyodrębnić liczne grupy materiałów (w granicach oznaczonych prostokątów), o cechach spełniających kryteria jakości koksu, jakie wynikają z najkorzystniejszych wartości wskaźników CSR/CRI.

Zwraca przy tym uwagę praktycznie pełna powtarzalność rodzajów koksu o takich samych cechach, zarówno względem współczynnika efektywnej przepuszczalności (K_{ef}) jak i współczynnika anizotropowości (β). Świadczy to o potencjalnie dużej przydatności proponowanego sposobu do oceny omawianych wskaźników technologicznych koksu.



Rys. 7.2. Korelacja pomiędzy wskaźnikami jakości koksu a parametrami hydrodynamicznymi i strukturalnymi (oznaczenie punktów doświadczalnych zgodnie do rys. 7.1): a–b) wskaźnik wytrzymałości poreakcyjnej (CSR), c–d) wskaźnik reakcyjności koksu (CRI)

7.2. Ocena jakościowa syngazu

Wynikające z podziemnego zgazowania węgla (UCG) kryteria procesowe ruchu gazu w porowatych strukturach karbonizatów pozyskiwanych w tym procesie mogą być bardzo różnorodne, a jednocześnie są wysoce złożone. Na niektóre najważniejsze w tym względzie uwarunkowania wskazano w p. 2.4. Jak wynika z tych uwarunkowań, technologię podziemnego zgazowania węgla wyróżniają przede wszystkim te kryteria procesowe, które wskazują na wymagany dla celów energetycznych skład oraz wartość opałową pozyskiwanego tą drogą paliwa gazowego (syngazu). W tym kontekście dużego znaczenia nabiera wskazanie na możliwość przewidywania tych kryteriów przez wzgląd na kaloryczną jakość wytwarzanego produktu gazowego.

Pewne możliwości w tym względzie dostrzeżono w powiązaniu warunków hydrodynamicznych wynikających z gazoprzepuszczalności karbonizatów *in situ* (jako produktu takiego zgazowania), z ich parametrami energetycznymi. Innowacyjność takiego podejścia polega na wykorzystaniu do tego celu kryterium efektywnego współczynnika gazoprzepuszczalności (K_{ef}) oraz parametru anizotropii (β), charakteryzującego strukturę produktu. Odpowiednia w tej mierze metodologia postępowania jest przedmiotem autorskiego wynalazku [192].

Bezpośredniej ocenie jakościowej poddano trzy produkty gazowe: dwa pochodzące z technologii UCG, realizowanej w ramach projektu HUGE i HUGE 2 [166, 167] oraz jeden – celem porównania – z technologii *ex situ*, pośrednio realizowanej także w ramach tych samych projektów.

Podstawową charakterystykę badanych produktów podano w tabeli 7.1, zaznaczając w niej wynikające z własnych badań charakterystyczne dla dokonywanej oceny parametry hydrodynamiczne, a mianowicie: efektywny współczynnik przepuszczalności karbonizatów (K_{ef}) oraz ich współczynnik anizotropii (β).

Jak można dostrzec, odmienność eksperymentów implikowała różne produkty z obu tych technologii. Eksperyment w warunkach reaktora *ex situ* polegał na zgazowywaniu na zewnątrz bloku węgla kamiennego pochodzącego z Kopalni Węgla Kamiennego Piast w Bieruniu. Z kolei w warunkach *in situ* (UCG) zgazowywano węgiel z pokładów Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w Mikołowie. Stosowano przy tym dwie odmienne technologie – jedna (projekt HUGE) dotyczyła zgazowania węgla w georeaktorze o kanale ogniowym prostym, druga natomiast (HUGE 2) – zgazowania złoża węgla w georeaktorze o dwóch kanałach ogniowych w układzie „V”.

Charakterystyczny dla dokonywanej oceny korelacyjny rozkład punktów doświadczalnych przedstawiono na rys. 7.3. Z rozkładu tego wynika, że w zakresie jednorodności struktury badanych materiałów (wartości średnie) karbonizaty *in situ* wykazują znacznie mniejsze odstępstwo od anizotropii, co wskazuje na ich dobre cechy przepuszczalnościowe. Z kolei odniesienie tych wyników do wartości opałowej syngazu (KS) pokazuje, że największą kalorycznością odznacza się karbonizat *in situ* z póltechnicznej próby podziemnego zgazowania węgla (HUGE 2). Kaloryczność ta jest jednocześnie tym większa im większy jest efektywny współczynnik przepuszczalności.

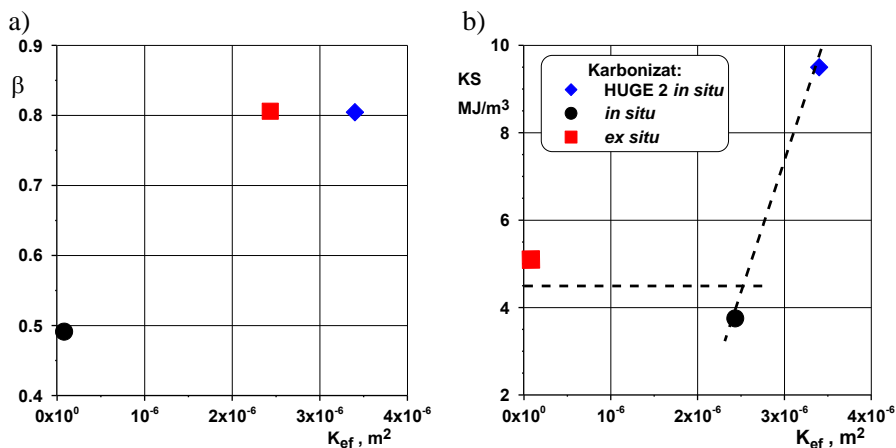
Ograniczenie liczby danych doświadczalnych odnoszących się do produktów podziemnego zgazowania węgla uniemożliwia wyciąganie w tym przypadku dalej idących wniosków.

Podobnie jak to miało miejsce w ocenie technologicznej koksu, tak i w odniesieniu do syngazu proponowane metody oceny jakości tych produktów stanowią pewien pośredni sposób postępowania, którego główną zaletą jest możliwość uzyskania w miarę poprawnych rezultatów jedynie oparciu o pomiar parametrów hydrodynamicznych. Stanowiąc to może istotną alternatywę dla obecnie stosowanych kosztownych i czasochłonnych metod termicznych.

Tabela 7.1

Charakterystyka karbonizatu z technologii UCG, wg [167]

Parametr		Miara	Karbonizat		
			<i>ex situ</i>	<i>in situ</i> (HUGE)	<i>in situ</i> (HUGE 2)
Części lotne węgla		%	31,2	30,5	30,5
Wartość opałowa węgla		MJ/kg	24,0	23,9	23,9
Czynnik zgazowujący			para wodna	powietrze-para wodna	powietrze-tlen
Skład gazu procesowego	wodór	%	53,77	34,08	27,16
	tlenek węgla		15,78	2,10	14,40
	metan		9,77	3,42	5,04
	diltlenek węgla		14,40	31,05	8,21
	etan		0,24	1,25	0,23
	tlen		-	4,53	5,68
	azot		-	23,57	39,29
Wartość opałowa surowego gazu (KS)		MJ/m ³	5,10	3,75	9,5
Dane doświadczalne					
Efektywny współczynnik gazoprzepuszczalności, (K_{ef})	wartość średnia	m ²	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Współczynnik anizotropii (β)		-	0,49	0,81	0,80



Rys. 7.3. Rozkład punktów doświadczalnych:
a) współczynnik anizotropii, b) obliczeniowa kaloryczność syngazu (KS)

8. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone rozpoznanie zagadnienia przepływu gazu przez złoża porowate wykazało, że w literaturze przedmiotu niewiele jest prac bezpośrednio odnoszących się do hydrodynamiki przepływu gazu przez stałe (szkieletowe) materiały porowate. Większość dostępnych prac dotyczy bowiem zagadnień hydrodynamicznych wynikających z działania aparatów kolumnowych oraz wynikającego stąd przepływu przez upakowaną warstwę wypełnienia, albo też odnosi się do ruchu płynu w porowatych ośrodkach ziarnistych o luźnym ułożeniu złoża. Niewiele jest też prac doświadczalnych stanowiących potencjalne źródło danych, a jeżeli już to najczęściej odnoszą się do migracji płynów w złożach geologicznych albo termicznych procesów przetwarzania materiałów pochodzenia węglowego (albo innych substancji), co uniemożliwia dokonanie stosownych porównań procesowych.

W tym świetle – w opinii autorów – niniejsza praca wychodząc naprzeciw tym brakom, znacznie uzupełnia tę lukę, a przeprowadzone badania doświadczalne stanowią oryginalne źródło danych, możliwych do weryfikacji w innych warunkach procesowych.

Myśl przewodnią dla badań własnych stanowiła ocena hydrodynamiki przepływu gazu przez stałe materiały porowate, jako przyczynek do oceny przepuszczalności tej grupy materiałów względem ich szkieletowej struktury. W badaniach tych za podstawę tej oceny posłużyły materiały porowate pochodzące z technologii termicznego przetwarzania węgla (karbonizaty) oraz ich pochodne, a także – celem porównania – materiały naturalne (skała wulkaniczna, pumeks) oraz sztucznie przetworzone (pumeks, spiek poliamidu).

Dla wszystkich tych materiałów wykonano badania doświadczalne pod kątem oceny ich gazoprzepuszczalności, z uwzględnieniem takich czynników jak powietrze, azot i ditlenek węgla. W każdym przypadku podstawa tej oceny wynikała z całkowitej straty ciśnienia na złożu, w odniesieniu do której zamodelowano ekwiwalentny współczynnik oporów przepływu. Uogólniony charakter tego współczynnika może stanowić podstawę szerszej interpretacji zjawisk hydrodynamicznych towarzyszących ruchowi gazu przez szkieletowe złoża porowate.

W ocenie hydrodynamiki przepływu gazu przez takie złoża uwzględniono także wpływ struktury materiałów oraz ich porowatości na charakterystyki procesowe. Stwierdzono, że na warunki ilościowej oceny wpływ mają tak charakterystyczne parametry złoża porowatego jak skala porowatości oraz anizotropia jego struktury. Oba te parametry w istotny sposób wpływają na gazoprzepuszczalność badanych materiałów, co zostało uwzględnione w teoretycznej ocenie hydrodynamiki, poprzez identyfikację parametrów przepływowych względem zróżnicowanej płaszczyzny (osi) przepływu gazu. Analiza porównawcza wykazała, że ukonstruowane na tej podstawie modele obliczeniowe, opisujące w swej podstawowej postaci współczynnik przepuszczalności oraz współczyn-

nik oporów przepływu, wykazują dobrą zgodność wyników badań z wynikami obliczeń.

Badania doświadczalne zostały uzupełnione o numeryczne obliczenia modelowe, symulujące warunki ruchu gazu w kanałach krętych porowatego materiału o szkieletowej strukturze wewnętrznej. W obliczeniach tych zastosowano własne oryginalne podejście do budowy geometrii (struktury) siatki obliczeniowej, opartej o fraktalny profil kanałów krętych, co nie znajduje odpowiednika w literaturze. Względem tak opracowanej metodyki wykonano obliczenia numeryczne w zakresie oceny prędkości przepływu gazu przez materiały porowate dla różnych warunków procesowych. Uzyskane wyniki dość dobrze korelują dane doświadczalne i mieszczą się w zakresie doświadczalnych wartości średnich.

Przeprowadzona ocena procesowa wyników badań, ukierunkowana na identyfikację technologicznych parametrów dla koksu pozwoliła wykazać, że wykorzystanie takich cech hydrodynamicznych jak współczynnik gazoprzepuszczalności oraz współczynnik anizotropii (opisany względem tej przepuszczalności), mogą być wykorzystane do identyfikacji technologicznych wskaźników jakości, odnoszących się zarówno do koksu jak i syngazu, jako podstawowych produktów zgazowania węgla niosących cechy czystych technologii.

Tego rodzaju zagadnienia procesowe niosą za sobą wiele więcej możliwości, które w zakresie własnych badań są dostrzegane także w aspekcie przydatności materiałów porowatych w obszarze dotąd nierozpoznanym dla rozwoju czystych źródeł energii, a wynikającym z wykorzystania złóż porowatych jako hydrodynamicznego nośnika hodowli bakterii w bioreaktorach stosowanych przy produkcji biogazu.

Autorzy wyrażają przekonanie, że szerokie spektrum rozpoznanych problemów znacznie zwiększa aplikacyjny charakter pracy, zwłaszcza w aspekcie przydatności proponowanych modeli obliczeniowych do wyznaczania współczynników przepuszczalności i oporów przepływu gazów przez porowate materiały o anizotropowej strukturze, które to modele mogą być pomocne zarówno przy dalszych pracach badawczych, jak i w praktyce inżynierskiej.

LITERATURA

- [1] AKSIELRUD G.A., ALTSZULER M.A.: Ruch masy w ciałach porowatych, WNT, Warszawa, 1987
- [2] AMAEFULE J.O. i in.: Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncured intervals/wells: SPE Paper 26436, 1993, pp. 1–16
- [3] AMAO A.M.: Mathematical model for Darcy Forchheimer flow with applications to well performance analysis. Master's Thesis, Department of Petroleum Engineering, Texas Technology University, Misato, 2007
- [4] American Petroleum Institute: Recommended practices for core analysis. 2nd ed., 1998
- [5] AMINIAN K.: Evaluation of Coalbed Methane Reservoirs. Petroleum & Natural Gas Engineering Department, West Virginia University, 2009
- [6] ANDERSON B.A. i in: Commercial-scale forced-air cooling of packaged strawberries. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 47 (1), 2004, pp. 183–190
- [7] AURIAULT J.L., CAILLERIE D.: Quelques remarques sur les méthodes d'homogénéisation. Rev. Franç. Geotech., No. 49, 1989, pp. 43–50.
- [8] AURIAULT J.L., STRZELECKI T., BAUER J., HE S.: Porous deformable media saturated by a very compressible fluid: quasi-statics, Eur. J. Mech. A/Solids, Vol. 9, No. 4, pp. 373–392, 1990
- [9] BANASZAK J.: Inżynieria materiałów porowatych – Laboratorium. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2005
- [10] BEAR J.: Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, Pub. Co., New York, 1972
- [11] BEAR J., CHENG A.: Modeling groundwater flow and contaminant transport, Springer, 2010
- [12] BEZPALKO N.: Zastosowanie techniki TDR do badania procesów przenoszenia masy i energii przez wybrane przegrody budowlane. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2009
- [13] BĘBENEK B., BĘBENEK H.: Straty energii w przepływach płynów, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1987
- [14] BHUTTO A.W., BAZMI A.A., ZAHEDI G.: Underground coal gasification: From fundamentals to applications. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 39, 2013, pp. 189–214
- [15] BIELSKI R.W., TELEGA J.J.: Effective properties of geomaterials: rocks and porous media. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci., A–26 (285), 1997
- [16] BLICHARSKI J., SMULSKI R.: Stanowisko laboratoryjne wypierania się płynów w ośrodkach porowatych w aspekcie sekwestracji CO₂. AGH Drilling Oil Gas, t. 29, n. 1, 2012, s. 89–96
- [17] BŁASZCZYK M.: Badanie procesów migracji substancji ropopochodnych i ich emulsji w strukturach porowatych. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź, 2014
- [18] BOGUSŁAWSKI A., DROBNIAK S., TYLISZCZAK A.: Turbulencja – od losowości do determinizmu. Modelowanie Inżynierskie, Gliwice, 36, 2008, s. 41–48
- [19] BONET J-P, TOPIN F., TADRIST L.: Flow laws in metal foams: Compressibility and pore size effects. Transp. Porous Med., 73, 2008, p. 233–254
- [20] BRAUER H.: Grundlagen der Einphasen – und Mehrphasen Strömungen. Verlag Sauerländer, Frankfurt am Main, 1971

- [21] BURDINE N.T.: Relative permeability calculation from pore size distribution data. *Trans. Am. Inst. Min. Eng.* 198, 1953, pp. 71–78
- [22] BURTON E., FRIEDMANN J., UPADHYE R.: *Best Practice in Underground Coal Gasification*. Univ. of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2006
- [23] BUSZKO R., MIANOWSKI A.: Wskaźniki CRI i CSR wysokogatunkowego koksu wielkopieczowego jako kryterium oceny właściwości węgla koksujących. *Karbo*, nr 2, 2001, s. 66
- [24] CAŁA M.: *Mechanika gruntów*. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, AGH, Kraków, 2012
– http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/1wyklad_ZG.pdf (05.2012)
- [25] CARMAN P.C.: *Flow of gases through porous media*. Butterworths Sc. Public., London 1956
- [26] CHAPERON I.: Theoretical study of coning toward horizontal and vertical wells in anisotropic formations: subcritical and critical rates. SPE Paper 15377, 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. New Orleans, October 5–8, 1986
- [27] CHEN-YUAN CH., CHUNG-PAN L., CHENG-WU CH.: On the permeability inside the granular media. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 10, No. 2, 2002, pp. 136–145
- [28] CHEN Y., SHEN CH., LU P., HUANG Y.: Role of pore structure on liquid flow behaviors in porous media characterized by fractal geometry. *Chemical Engineering and Processing*, Elsevier, 87, 2015, pp. 75–80
- [29] CHILINGARIAN G.V.: Relationship between porosity, permeability and grain size distribution of sands and sandstones. In: Van Straaten JU, Editor, *Deltaic and shallow marine deposits*, Amsterdam, NY: Elsevier Science; 1963, pp. 71–75
- [30] CHOU (ALSO ZHOU) P.Y.: On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation. *Quart. Appl. Math.* 3, pp. 38–54, 1945
- [31] CHUNG T.J.: *Computational Fluids Dynamics*, Cambridge University Press 2002
- [32] CHMIEL K., PALICA M., WALUŚ J.: *Hydraulika i biofiltracja tri-etyloaminy na złożu modyfikowanym EKOSORB – 100*. Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, *Rocznik Ochrony Środowiska*, Koszalin, t. 1, 1999, s. 125–164
- [33] Chmiel K. i in.: Ujęcie zależnością kryterialną oporów przepływu wybranych złóż naturalnych używanych w biofiltracji. VI Ogólnopolska konferencja naukowa nt. Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska. Koszalin – Ustronie Morskie 2003. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2003, s. 507–520
- [34] CIEŚLICKI K.: Investigations of the effect of inertia on flow air through porous bearing sleeves. *Elsevier, Wear*, 172, 1994, p. 73–78
- [35] CIEŚLICKI K., LASOWSKA A.: The effect of inertia on flows in tubes with periodic step changes in diameter. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Fluid Mechanics*, Vol. 43, No. 4, 1995, pp. 445–458
- [36] COREY A., KLUTE A.: Application of the potential concept to soil water equilibrium and transport, *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 49, 1985, p. 3–11
- [37] CYBULSKI A., MOULIJN J.A.: Monoliths in heterogeneous catalysis. *Catal. Rev.-Sci. Eng.*, 36(2), 1994, p. 179
- [38] CZAPLICKA K., STAŃCZYK K. Stan aktualny i perspektywy rozwoju technologii podziemnego zgazowania węgla. Realizacja Zadania Badawczego nr 3 pt.: Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej, AGH Kraków, 2011
- [39] DARCY H.: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Valmont, Paris, 1856
- [40] DE BUHAN P., TALIERCIO A.: A homogenization approach to the yield strength of composite material. *Eur. J. Mech. A/Solids*, 10, 1991, pp. 129–154

- [41] DINIS DA GAMMA C., NAVARRO TORRES V., FALCAO NEVES A.P.: Technological innovations on underground coal gasification and CO₂ sequestration. *Dyna*, Year 77, No.161, March 2010, pp. 101–108
- [42] DOHNALIK M., KACZMARCZYK J., ZALEWSKA J.: Metodyka ekstrakcji parametrów geometrycznych sieci porowej z obrazów micro-CT (program MAVI). *Nafta-Gaz*, nr. 6, czerwiec 2010, Rok LXVI, s. 441–448
- [43] DRUGAN W.J., WILLIS J.R.: A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites. *J. Mech. Phys. Solids*, 44, 1996, pp. 497–524
- [44] DUBIEL S., CHRZĄSZCZ W., RZYCZNIK M.: Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2003
- [45] DULLIEN F.A.L.: *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. 2nd ed. Academic, San Diego, 1992
- [46] DULNIEW G.N., NOWIKOW W.W.: *Prociessy pierienosa w nieodnorodnych sriedach*. Energiatomizdat, 1991, s. 248
- [47] DUPUIT J.: *Etudes theoretiques et pratiques sur le mouvement des eaux des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables*. Paris, 1865
- [48] DYŁĄG M., ROSIŃSKI J.: Model fenomenologiczny transportu piany przez ośrodek porowaty. *Czasopismo Techniczne Mechanika*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, z. 2-M, 2008, s. 75–86
- [49] DYGA R., PŁACZEK M.: Przepuszczalność i współczynnik inercji pian aluminiowych o komórkach otwartych. *Inż. i Ap. Chem.*, 52, 4, 2013, s. 300–301
- [50] DYRKA I.: Cechy petrofizyczne skał łupkowych. Państwowa służba geologiczna o gazie w łupkach. *Środowisko występowania łupków gazonośnych*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, rozdz. 3, 2013, s. 44–47
- [51] DZIUBIŃSKI M., PRYWER J.: *Mechanika płynów dwufazowych*, WNT, Warszawa, 2009
- [52] DZIUNIKOWSKI K.: *Eksploatacja węgla kamiennego sposobem podziemnego zgazowania*. Monografia Polskiego Górnictwa Węglowego, 1968
- [53] ELSNER J.W.: *Turbulencja przepływów*, PWN, Warszawa, 1987
- [54] ERGUN S.: Fluid flow through packed columns. *Chemical Eng. Progress*, Vol. 48, No. 2, 1952, pp. 89–94
- [55] FERZIGER J.H., PERIC M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 1999
- [56] FILIPEK W.: *Badania modelowe hydrodynamicznych własności ośrodków porowatych zbudowanych z sieci komórek elementarnych*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 2011
- [57] FITZNER B.: Porosity properties and weathering behavior of natural stones-Methodology and examples. In *Papers collection of the Second Course Stone material in monuments: diagnosis and conservation*. Heraklion-Crete, Scuola Universitaria C.U.M. Bari, Italy, Conservazione dei Monumenti, 1993, pp. 43–53
- [58] FRANCHI F., STRAUGHAN B.: Structural stability for the Brinkman equations of porous media. *Mathematical methods in the applied sciences*, Vol. 19, 1996, pp. 1335–1347
- [59] GIANNI L., GROPPI G., TRONCONI E.: Mass-transfer characterization of metallic foams as supports for structured catalysts. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 2005, p. 4993
- [60] GLINICKI M.A., JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA D., GIBAS K.: Ocena przepuszczalności betonu z popiołem lotnym wapniowym. V Konferencja Energia i środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych, 2010, s. 229–240

- [61] GRUNBERG L., NISSAN A.H.: The permeability of porous solids to gases and liquids. *Journal of Institute Petroleum*, 1943, Vol. 29, No. 236, pp. 193–225
- [62] GONET A. i in. *Technologia wydobycia metanu z pokładów węgla (CBM)*. *Górnictwo i Geologia*, t. 5, z. 3, 2010, s. 5–25
- [63] GRUNEWALD J., BOMBERG M.: An engineering approximation of material characteristics for input to heat, air and moisture transport simulations. *Materials of symposium for building physics*. Dresden, September 2002, pp. 272–285
- [64] GRUNEWALD J. i in.: Implementierung eines Modells für den Salztransport in kapillarporösen Baustoffen im Simulation Programm Delphin4. *Materials of symposium for building physics*. Dresden, September 2002, pp. 514–525
- [65] GUIMARD P. i in.: Pressure drop for flow through packed beds. *Transport Process Laboratory*, Carnegie Mellon University, 18 March 2004, pp. 1–14
- [66] HADRO J.: Trudny, ale opłacalny gaz.
Online: <http://niezalezna.pl/article/show/id/34971> (data dostępu 20.06.2009)
- [67] Hadro J.: Strategia poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach. *Przegląd Geologiczny*, t. 58, nr 3, 2010, s. 250–258
- [68] HAGOORT J.: *Fundamentals of Gas Reservoir Engineering*. *Developments in Petroleum Science* 23, Elsevier, Amsterdam, 1988
- [69] HANSEN T.E.: Flow in micro Porous silicon carbide. Master Thesis, Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, March 2nd 2007
- [70] HAPANOWICZ J.: Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych. *Studia i Monografie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, z. 204, Opole, 2007
- [71] HEHLMANN J. i in.: Aparat hybrydowy ze złożem ziarnistym w instalacji spalania odpadów. *Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska*. *Rocznik Ochrony Środowiska*, Koszalin, t. 11, 1999, s. 281–297
- [72] HEHLMANN J., PIETRASIK E.: *Ekologiczne paliwa formowane*. Wybrane aspekty inżynierii produktu. Monografia, Gliwice, 2005
- [73] HORNUNG U.: *Homogenization and porous media*. *Interdisciplinary Applied Mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, Vol. 6, 1997
- [74] <https://docplayer.pl/docs-images/74/70162279/images/16-1.jpg>
(data dostępu 06.2019)
- [75] <http://webharvest.gov/peth04/20041019082332/http://energy.usgs.gov/factsheets/Illinois/mt.simon.html> (data dostępu 09.2019)
- [76] ISO 18894:2006 Coke. Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)
- [77] JANSEN M.W.J., MEERTENS J.L.J.G., WILMS A.H.: *Brennstoff-Chemie*, Vol. 45, 1964, s. 151 – za [113]
- [78] JARZYNA J., UJMA M.: Wyznaczanie przepuszczalności skał klastycznych czerwonego spągowca z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. *Nafta-Gaz*, nr 2, 2012, s. 85–96
- [79] JAWORSKI Z.: *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*. Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2005
- [80] JOSHI S.D.: *Horizontal well technology*. *Penn Well Publ. Comp.* Oklahoma, 1991
- [81] KAPUSTA K., STAŃCZYK K.: Uwarunkowania i ograniczenia rozwoju procesu podziemnego zgazowania węgla w Polsce. *Przemysł Chemiczny* 88/4, 2009, s. 331
- [82] KASIECZKA W.: Badanie hydrodynamiki złoża fluidalnego. *Laboratorium. Kotły i wytwornice pary*. Ćwiczenie nr K-07, Politechnika Łódzka, Łódź, 2011, s. 1–18
- [83] KASIMIERSKA-DROBNY K.: Symulacja procesów chemomechanicznych w porowatych żelach i identyfikacja parametrów modelu. *Rozprawa doktorska*, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, 2011
- [84] KAWIK M.: *Badania hydrauliki wybranych złóż biologicznych*, Praca dypl. mag. pod kierunkiem M. Palicy, OBR „BAROWENT”, Katowice, 1998

- [85] KAZIUK H. i in.: Warunki występowania metanu pokładów węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowymi jego zasoby. Materiały Międzynarodowej Konferencji: Wykorzystanie metanu z pokładów węgla. Katowice, 1994
- [86] KEMBŁOWSKI Z. i in.: Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej. WNT, Warszawa, 1985
- [87] KHADSE A. i in.: Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India, Elsevier – Energy. Vol.32, No. 11, 2007, pp. 2061–2071
- [88] KLIMENKO A.Y.: Early ideas in underground coal gasification. Energies; 2, 2009, p. 456–476
- [89] KLIMKIEWICZ A, KORCZAK K.: Technologiczne i środowiskowe aspekty wykorzystywania wody w procesie wydobywania gazu łupkowego, Prace Naukowe GIG (Research Reports of Mining and Environment), 3/2012, s. 43–54
- [90] KLINKENBERG L.J.: The permeability of porous media to liquids and gases. American Petroleum Institute, Drilling Production Practice, Dallas, 1944, p. 200
- [91] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne inżynierii chemicznej, WNT Warszawa, rozdz. 7, 1992, s. 189–192
- [92] KOŁODZIEJ A.: Strukturalne wypełnienia krótkokanałowe w reaktorach katalitycznych o intensywnym transporcie masy. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej PAN, z. nr 12, Rozprawy Naukowe, z. 3. Gliwice, 2009
- [93] KOVSCEK A.R., RADKE C.J.: Fundamentals of From Transport in Porous Media. In: LL Schramm (Ed.), Foam: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. American Chemical Society, Washington, D.C., 1994
- [94] KOZŁOWSKI B., GRĘBSKI Z.: Odmetanowanie górotworu w kopalniach. Wyd. Śląsk, Katowice, 1982
- [95] KRAUSE E.: Technologie ujmowania metanu w polskich kopalniach węgla kamiennego – doświadczenia oraz perspektywy. XXI Światowy Kongres Górniczy, Kraków – Katowice, 2008
- [96] KRAUSE E.: Ocena i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG nr 878, Katowice, 2009
- [97] KUROPKA J.: Oczyszczanie gazów odlotowych z zanieczyszczeń gazowych. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1996
- [98] KUSIŃSKA E. i in.: Opory przepływu powietrza podczas wietrzenia śruty pszennej. Inżynieria Rolnicza, 4, (129), 2011, s. 159–165
- [99] LAMBE T., WHITMAN R.V.: Mechanika gruntów, Wyd. Arkady, Warszawa, t 1, 2, 1978
- [100] LAUNDER B.E., REECE G.J., RODI W.: Progress in development of a Reynolds-stress turbulent closure. J. Fluid Mech, Vol. 68, 1975, pp. 537–566
- [101] LECH R.: Zastosowanie modelu kapilarno-porowatego ciała stałego do obliczeń przepływu ditlenku węgla przez warstwę tlenku wapniowego. Cement Wapno Beton, nr 3/2008, s. 111–123
- [102] LIN W.: Gas sorption and the consequent volumetric and permeability change of coal. Dissertation of Stanford University, 2010
- [103] LISZKA K.: Podstawy eksploatacji złóż ropy, Skrypt nr 869, AGH Kraków, 1982
- [104] LORENZI A., SOTGNIA G.: Comparative investigation of some characteristic quantities of two-phase cocurrent upward and downward flow. Two-Phase Flow and Heat Transfer Symposium – Workshop, 1976
- [105] LU J., TIAB D., ESCOBAR F.H.: Productivity equation for a horizontal well inside a closed-anisotropic box-shaped reservoir under pseudo steady-state conditions. Asian Research Publishing Network (ARPN), Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 8, No. 6, June 2013, pp. 425–434
- [106] ŁUKASZUK J., MOLENDĄ M., SZWED G.: Zależność oporu przepływu powietrza od gęstości złoża nasion. Acta Agrophysica, 4, (1), 2004, s. 77–83

- [107] ŁUSZCZ M.: Rozpoznawanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, 2007:
http://naftowka.pl/zsp4/media/pomoce/miner/zloza_ropy_i_gazu.pdf (08.2019)
- [108] LYDŹBA D.: Constitutive Equation of Gaz-coal medium, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XIII, n. 3–4, pp. 51–62, 1991
- [109] LYDŹBA D.: Zastosowania metody asymptotycznej homogenizacji w mechanice gruntów i skał. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki*, nr 74, Monografie, nr 23, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002
- [110] MACHOWSKA H.: Gaz ziemny – gaz z łupków. *Karbo*, nr 3, 2013, s. 244–248
- [111] MASAGUMOW R.M.: *Aljunosilikatnyie katalizatory i izmienienie ich swojstw pri krieikingie nieftieproduktow*. *Chimija*, 1975, s. 272
- [112] MEI C.C., ARIAULT J.: Effect of weak inertia on flow through a porous medium. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 222, 1991, pp. 647–663
- [113] MERTAS B., SOBOLEWSKI A., RÓŻYCKI G.: Badania gazoprzepuszczalności warstwy plastycznej węgla jako czynnika wpływającego na wielkość generowanego ciśnienia rozprężania. *Karbo*, nr 2, 2013, s. 163–171
- [114] MICHALIK A., BRONNY M.: Parametry koksu spełniające wymagania procesu wielkopieczowego, a właściwości fizykochemiczne dostępnej bazy węglowej. *Karbo*, nr 2, 2001, s. 53
- [115] MICHAŁOWSKI S., WAŃKOWICZ K.: *Termodynamika procesowa*. Inżynieria Chemiczna, WNT Warszawa, 1993
- [116] Mid-Term report for project GRD1-1999-11149. Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation, 1999
- [117] MINKINA M. i in.: Parametry reakcyjności (CRI) i następczo oznaczanej wytrzymałości (CRS) dla kokсів z węgla o zróżnicowanym składzie petrograficznym pochodzących z różnych okresów geologicznych. *Karbo*, nr 2, 2006, s. 98
- [118] MIURA K., NISHIOKA K.: Measurements of permeability of coal. *Plastic and coke layers*. *Cokemaking International*, Vol. 4, 1992, p. 45
- [119] MOKROSZ W.: Badania procesu absorpcji SO₂ w absorberach alkalicznych z wykorzystaniem współprądowego aparatu z wypełnieniem komórkowym. *Praca doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice, 1996
- [120] MOZHAEV A. P.: Chaotic Homogeneous Porous Media. 2. Theory of Dispersion Turbulence: Basic Propositions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 75, No. 2, 2002, pp. 371–383
- [121] MOZHAEV A. P.: Chaotic Homogeneous Porous Media. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 77, No. 1, 2004, pp. 84–92
- [122] MUALEM Y.: Modeling the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, in *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Lund L.J. (Ed.), University of California, Riverside, CA, 1992, pp. 15–36
- [123] MURAKAMI S., MOCHIDA A.: Applications of CFD to bluff body aerodynamics. *A State of Art in Wind Eng. New Delhi*, Wiley Eastern Limited: Ninth International Conference on Wind Engineering. *A State of the Art in Wind Eng.* 1995, pp. 65–89
- [124] NIELD D.A., BEJAN A.: *Convection in Porous media*, Springer, 2006
- [125] NIEZGODA T. i in.: Polska metoda wydobywania gazu łupkowego opracowana przez zespół naukowy WAT. I Krajowa Konferencja nt. Propozycje wdrożeń odnawialnych źródeł energii na obszarze Polski, Białystok, 2012
- [126] NOMURA S. i in.: The mechanism of coking pressure generation I: Effect of high volatile matter coking coal, semi-anthracite and coke breeze on coking pressure and plastic coal layer permeability. *Fuel*, Vol. 89, 2010, p. 1549
- [127] OAIKENA E.E., OOLORO J.: A Comparative study of the productivity index of horizontal well. *Greener Journal of Physical Sciences*, Vol. 3 (3), 2013, pp. 97–109

- [128] OCHEJEDUSZKO S.: Termodynamika stosowana. Wyd. 3, WNT, Warszawa 1970
- [129] OKWANANKE A., ISEHUNWA S.O.: Analysis of water cresting in horizontal wells. Society of Petroleum Engineers Inc., 32nd Annual SPE International Technical Conference and Exhibition in Abuja, Nigeria, 2008, pp. 1–10
- [130] OLNESS D.U.: The Angrenskaya Underground Coal Gasification Station. Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-53300, 1982
- [131] OLUFEMI BAMIDELE A., OLUGBENGA A.F., OLUSEGUN O.: Effects of oil field scale deposition on oil production from horizontal wells. *Petroleum & Coal*, 51 (2), 2009, pp. 91–99
- [132] ORZECZOWSKI Z., PRYWER J., ZARZYCKI R.: *Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska*, WNT, Warszawa, 2009
- [133] PALARSKI J.: Pozyskiwanie metodami niekonwencjonalnymi energii z pozabilansowych pokładów węgla z uwzględnieniem ograniczenia emisji CO₂. *Górnictwo i Geologia. Politechnika Śląska*, t. 5. z. 1, 2010, s.103–121
- [134] PALICA M., CHMIEL K., WALUŚ J.: *Hydraulika wybranych złóż biologicznie czynnych. Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska. Rocznik Ochrony Środowiska*, Koszalin, t. 1, 1999, s. 85–121
- [135] PARYLAK K. i in.: Weryfikacja wyznaczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych za pomocą wzorów empirycznych w ujęciu ich mikrostruktury. *Scientiarum Polonorum, Architectura* 12, (2), 2013, s. 43–51
- [136] PESZYŃSKA M., TRYKOZKO A., SOBIESKI W.: Forchheimer law in computational and experimental of flow through porous media at pore-scale and meso-scale. *GAKUTO International Series. Mathematical Sciences and Applications*, Vol. 32 2010, pp. 463–482
- [137] PIECUCH T.: Równanie Darcy jako podstawa analizy teoretycznej szczególnych przypadków procesu filtracji. *Rocznik Ochrona Środowiska*, t 11, 2009
- [138] PISARCZYK S.: *Mechanika gruntów*. Wyd. 4. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005
- [139] POLLASTRO R.M. i in.: Assessing Undiscovered Resources of the Barnett-Paleozoic Total Petroleum System. Bend Arch-Fort Worth Basin Province. Online adaptation of presentation at AAPG Southwest Section Meeting, Fort Worth, Texas, USA, 2003, www.southwestsection.org
- [140] POLUBARINOVA-KOCHINA P.: *Theory of Water Movement*. Princeton University Press, 1962
- [141] POPIELSKI P.: Model sufozji mechanicznej w ujęciu metody elementów skończonych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2000
- [142] PORĘBSKI S.J., STEEL R.J.: Shelf-margin deltas: their strati-graphic significance and relation to deep water sands. *Earth Science Reviews*, Vol. 62, No. 3–4, 2003, pp. 283
- [143] POZNAŃSKA M.: Badania jakości węgla z Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. metodą Nippon Steel Corporation. Praca dyplomowa, AGH Wydział Paliw i Energii, Kraków, 2003
- [144] PRACA ZBIOROWA: Badania suszarki z przesuwym złożem. NBW-325, Politechnika Śląska, Gliwice, 1993
- [145] PRACA ZBIOROWA: Nowe paliwa formowalne o zmniejszonej emisji substancji szkodliwych. Badania własne BW-477, Pol. Śl., Gliwice, 1995
- [146] PRAKASH A., BRIENS C.L.: Porous gas distributors in bubble columns. Effect of liquid presence on distributor pressure drop. Effect of startup procedure on distributor performance, *Can. J. Chem. Eng.*, No. 68, 1990, p. 204–210
- [147] PRASAD M.: Velocity-permeability relations within hydraulic units. *Geophysics*, Vol. 68, No. 1, 2003, pp. 108–117

- [148] PRASER H-M., KREPPER E., LUCAS D.: Evolution of the two-phase flow in a vertical tube-decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire – mesh sensors, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 41, 2002, pp. 17–28
- [149] PUSZ S., BUSZKO R.: Reflectance parameters of cokes in relation to their reactivity index (CRI) and the strength after reaction (CSR), from coals of the Upper Silesian Coal Basin. *Int. Journal of Coal Geology*, 90–91, 2012, pp. 43–49
- [150] RAOOF A., HASSANIZADEH S.M.: A new method for generating pore-network models of porous media. *Springer – Transp. Porous Med.*, 81, 2010, pp. 391–407
DOI 10.1007/s11242-009-9412-3,
- [151] RAUK J.: Optymalne wymiary generatora przy podziemnym zgazowaniu węgla powietrzem. *Prace GIG Komunikat nr 660*, Katowice, 1976
- [152] REICH M.H. i in.: A fractal interpretation of the effect of drying on the pore structure of Victorian brown coal. *Fuel* 71 (6), 1992, pp. 669–672.
- [153] RILEM Technical Committee Recommendation: Tests for gas permeability of concrete. TC 116-PCD: Permeability of concrete as criterion of its durability. *Materials and Structures*, Vol. 32, April 1999, pp. 174–179
- [154] ROGA B., WŃĘKOWSKA L.: Analiza paliw stałych, PWT, Katowice, 1952
- [155] ROZHKOVA T.: Mid-term Periodic Report on Realization of RFCS – Research Found for Coal and Steel. Project SPRITKO No. RFCR-CT-2010-00006, EU 2010
- [156] SADATOMI M., SATO Y.: Two-phase flow in vertical noncircular channels. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 8, No. 6, 1982, pp. 641–655
- [157] SCHOLS R.S.: Water coning – an empirical formula for the critical oil-production rate. *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, January, Vol. 88, No. 1, 1972, pp. 6–11
- [158] SEEWALD H., KLEIN I.: Methansorption an Stainkohle und Kennzeichnung der Porenstrukture. *Gluckauf – Forschungshefte*, 47, 1985, p. 149
- [159] SERWIŃSKI M.: *Zasady inżynierii chemicznej i procesowej*, WNT, Warszawa, 1982
- [160] SHI H., XU B., SHI T., ZHOU X.: Determination of gas permeability of high performance concrete containing fly ash. *Materials and Structures* 41, 2008, pp. 1051–1056
- [161] SIMONS G.A.: Pore structure model for water and contaminant transport in soil. Report 19951101-095, 1995, pp.1–21
- [162] SIUDA T.: Możliwości wykorzystania programu FLUENT w pracach realizowanych w Instytucie Nafty i Gazu. *Kraków, Nafta-Gaz*, rok LXVII, nr 1/2011, 2011, s. 53–63
- [163] SKOTNICZY P.: Model przepływu powietrza w ośrodku porowatym z uwzględnieniem wewnętrznych źródeł ciepła. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, Kraków, t. 10, nr 1–4, 2008, s. 103–113
- [164] Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air. Designation: D 4525 – 90, ASTM, Reapproved 2001
- [165] Standard test method for measuring coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR). Designation: D 5341-93a, ASTM
- [166] STAŃCZYK K. i in.: Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara. *Polityka Energetyczna*, t. 13, z. 2, 2010, s. 423–433
- [167] STAŃCZYK K. i in.: Hydrogen-oriented underground coal gasification for Europe (HUGE). Final Report. European Commission. Research Found for Coal and Steel. EUR 25044 EN, 2012
- [168] STRZELECKI T., KOSTECKI S., ŻAK S.: *Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008

- [169] SUCH P., LEŚNIAK G.: Badania petrograficzne dla złóż niekonwencjonalnych. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, nr 3, 2011, s. 4-7
- [170] SZAFRAN R., TOMCZAK T.: Wykorzystanie metody lattice-Boltzmann do symulacji mikroprzepływów w kanałach układów lab-on-a-chip. *Inż. i Ap. Chem.*, 52, nr 6, 2013, s. 568–569
- [171] SZOTT W., GOŁĄBEK A.: Symulacje procesu eksploatacji złóż gazu ziemnego w formacjach łupkowych (*shale gas*). *Nafta-Gaz*, rok LXVIII, nr 12/2012, s. 923–936
- [172] SZYJKO C.T.: Priorytety gazowo-naftowego dialogu UE – Rosja w okresie polskiej prezydencji. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, nr 6, 2011, s. 42–47
- [173] ŚLIWIŃSKI J., TRACZ T.: Wpływ szlifowania powierzchni betonu na ocenę jego przepuszczalności określanej metodą Torrenta. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna, Awarie budowlane, Szczecin 2013, s. 873–880
- [174] TIAB D., DONALDSON E.C.: *Petrophysics. Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Elsevier, 3 ed., 2012
- [175] TOBIŚ J.: Badania kinetyki ogrzewania strumienia cieczy w kolumnie wypełnionej nieruchomym złożem. Instytut Chemii Fizycznej PAN, Warszawa 1981
- [176] TOPOLNICKI J., WIERZBICKI M., SKOCZYŁAS N.: Testy aparatury do pomiaru kinetyki uwalniania CO₂ z próbek węgla kamiennego. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, t. 6, nr 1–2, 2004, s. 71–78
- [177] TRACZ T.: Wpływ rodzaju cementu na gazoprzepuszczalność betonów wysokowartościowych. *Reologia w technologii betonu*. VII Sympozjum naukowo-techniczne. Gliwice, 2005, s. 31–42
- [178] TRYKOZKO A.: Modelowanie przepływów w ośrodkach porowatych w mikroskali: dane mikroobrazowe, symulacje, wizualizacja. Seminarium: Wyzwania modelowania inżynierskiego i biznesowego, Politechnika Warszawska, 2015
- [179] TRYKOZKO A., PESZYŃSKA M.: Pore-scale simulations of pore clogging and upscaling with large velocities. *Gakuto International Series, Mathematical Sciences and Applications*, Vol. 36, 2013, p. 277–300
- [180] TRZCIŃSKI P.: Wyznaczanie oporu właściwego i porowatości ściśliwego ośrodka filtracyjnego w zależności od ciśnienia zgniatania ośrodka. *Laboratorium podstaw budowy urządzeń*, Politechnika Warszawska, Płock, 2004
- [181] TUCKER J., EVERITT G.: *International Cokemaking Congress*, London, Vol. 2, 1992, s. 40
- [182] USOWICZ B.: *Statystyczno-fizyczne modele przepływu masy i energii w ośrodku porowatym*, Lublin, 2000
- [183] WAGNER A.: A practical introduction to the lattice-Boltzmann method. Dept. of Physics, North Dakota State University, Fargo, March 2008, p. 1–46
- [184] WAKEMAN R.: Packing densities of particles with log-normal size distributions. *Powder Technol.*, 11, No. 3, 1975, p. 297–299
- [185] WAŁOWSKI G.: Assessment of coke quality related to of effective permeability coefficient and anisotropy coefficient. *Fuel* 236 (2019), p. 82–91
- [186] WAŁOWSKI G.: *Hydrodynamika przepływu gazu przez złożę porowate*. Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2015
- [187] WAŁOWSKI G.: Metody pomiaru oraz oceny gazoprzepuszczalności złóż porowatych. *Przemysł Chemiczny* 2017, t. 96, nr 7, s. 1543–1549
- [188] WAŁOWSKI G., FILIPCZAK G.: Klinkenberg effect in hydrodynamics of gas flow through anisotropic porous materials. *E3S Web Conference*, 19, 03008 (2017)
- [189] WAŁOWSKI G., FILIPCZAK G.: *Techniczno-technologiczne aspekty procesowania węgla in situ*. XXI Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Materiały konferencyjne. Kraków, 2012, s. 389–396

- [190] WAŁOWSKI G., FILIPCZAK G., KRAUSE E.: Numeryczna ocena hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate struktury karbonizatów. Modelowanie Inżynierskie, t. 20, nr 51, 2014, s. 123–232
- [191] WAŁOWSKI G., FILIPCZAK G., KRAUSE E.: Układ do wyznaczania współczynnika przepuszczalności gazów przez porowate materiały o anizotropowej strukturze zwłaszcza przez karbonizaty. Patent 225980, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2017
- [192] WAŁOWSKI G., FILIPCZAK G., KRAUSE E.: Sposób oznaczania współczynnika gazoprzepuszczalności karbonizatu. Patent 234381, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2019
- [193] WAŁOWSKI G., FILIPCZAK G., KRAUSE E.: Sposób oznaczania współczynnika gazoprzepuszczalności koksu. Patent 234382, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2019
- [194] WARPECHOWSKI K., JOPKIEWICZ A.: Wyznaczanie współczynnika oporu przepływu w złożu koksu. Archiwum Odlewnictwa. PAN, Katowice, Rocznik 2, nr 5, 2002, s. 124–131
- [195] Werner H., Gertis K.: Energetische Kopplung von Feuchte- und Wärmeübertragung an Außenflächen. In: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 258, Berlin 1976
- [196] WIEZIROW D.SZ., KOCZIESZKOW A. A.: *Miechanika i maszynostrojenije*. Izv. AN SSSR, No. 6, 1963, s. 87–90
- [197] WILK T.: Tarowanie numerycznego modelu gruntu sypkiego na podstawie badań laboratoryjnych. Czasopismo Techniczne: Środowisko. Wyd. Politechniki Krakowskiej, z. 16, rozdz. 107, 2010, s. 157–170
- [198] WILLIAMS R., AHUJA L., NANEY J.: Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 153, No. 3, 1992, pp.172–184
- [199] WILLIAMS J.L.: Monolith structures, materials, properties and uses. Catalysis Today, 69, 2001, p. 3
- [200] WINDSPERGER A.: Abschätzung von spezifischer Oberfläche und Lückengrad bei biologischen Abluftreinigungsanlagen durch Vergleich von berechneten und experimentell erhaltenen Druckverlustwerten. Chemie Ingenieur Technik 63, 1, 1991, pp. 80–81
- [201] WOJNAROWSKI P.: Metody intensyfikacji wydobycia węglowodorów. Przemysł Naftowy w Polsce, Wyd. AKNET, Kraków, 2011, s. 28–29
- [202] WOŹNICKA M., KONIECZYŃSKA M.: Eksploatacja gazu z łupków a środowisko naturalne. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, rozdz. 7, 2013, s. 94–101
- [203] WYRWAŁ J.: Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych, WSI w Opolu, Studia i monografie, z. 31, Opole, 1989
- [204] YOUNGER P.L.: Hydrogeological and geomechanical aspects of underground coal gasification and its direct coupling to carbon capture and storage. Mine Water Environ, 30, 2011, pp. 127–140
- [205] ZAWORA J.: Podstawy technologii maszyn, WSiP, Warszawa, 2001
- [206] ŻAWORONKOW M.N.: *Gidrawliczeskije osnovy skrubbernego processa i tieplo-pieredacza w skrubberach*. Izd. Sow. Nauka, Moskwa 1944

HYDRODYNAMIKA PRZEPLYWU GAZU PRZEZ ZŁOŻA POROWATE

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez sztywne (szkieletowe) materiały porowate o anizotropowej strukturze. Scharakteryzowano warunki procesowe wynikające z przepływu gazu przez takie materiały oraz przedstawiono wyniki badań w zakresie oceny gazoprzepuszczalności tego rodzaju szkieletowych materiałów porowatych.

Badania odniesiono do materiałów o zróżnicowanej charakterystyce petrograficznej, zarówno pochodzenia naturalnego (skała płonna, pumeks), jak i procesowego (koksy i karbonizaty). Badania prowadzono dla różnych warunków hydrodynamicznych, z wykorzystaniem powietrza, a także azotu i ditlenku węgla. Za podstawę oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez badane materiały porowate przyjęto strumień gazu, jaki wynika z nadciśnienia wymuszającego ten przepływ. Wyniki pomiarów wskazują na wyraźny wpływ rodzaju materiału na gazoprzepuszczalność, a dodatkowo – co wynika z ich anizotropowej struktury wewnętrznej – na wyraźny wpływ kierunkowości przepływu na wartość strumienia gazu.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano własny model do obliczania współczynnika przepuszczalności, oparty na zmianie energii kinetycznej strugi gazu. Niezależnie wskazano na nowy sposób hydrodynamicznej oceny współczynnika oporów przepływu, który skorelowano modelem doświadczalnym.

W aspekcie oceny fenomenologicznej zjawisk hydrodynamicznych oraz problemu przenoszenia skali, podjęto próbę odwzorowania na drodze numerycznej geometrii przepływowej porowatych materiałów o sztywnej strukturze oraz dokonano oceny przydatności numerycznego modelowania hydrodynamiki przepływu gazu przez porowate materiały o budowie szkieletowej. Opracowano metodę odwzorowania fraktalnej przestrzeni kanałów krętych stałych materiałów porowatych, co dało przyczynek do wyznaczania na drodze numerycznej rozkładu ciśnienia i prędkości przepływu gazu. Uzyskane wyniki wskazują na poprawność przyjętej metodyki obliczeniowej.

HYDRODYNAMICS OF GAS FLOW THROUGH POROUS DEPOSITS

Abstract

The results of experimental studies in the field on hydrodynamics assessment of gas flow through skeletal (backbone) porous material with anisotropic structure are presented. The main effects of hydrodynamics evaluation are referenced to the permeability of porous materials with respect to air flow however tests using nitrogen and carbon dioxide were also used. The research material comprised different types of skeletal media especially those deriving from the thermal carbonization technology of hard coal (as coke and chars in situ and ex situ), and also – for comparison – model materials such as pumice and sintered polyamide. The tested materials were different in structure and their internal form was evaluated on the basis of a scanning image. Based on the above, the porosity of each material was determined and its

effective value resulting from the openings of the pores. For all types of materials the average absolute porosity was within the limits (22-56) %.

The laboratory tests were carried out on a specially prepared measuring set-up with the possibility of measurements of gas permeability with respect to the different flow orientations referring to specimens on symmetrical cubic form. For a measure of permeability a gas volume flow rate was assumed, resulting from allowable pressure drop on the porous specimen body. The results of the measurements showed that there is a considerable effect of the flow directionality on the permeability of coke and coal chars, which results from their internal anisotropic structure.

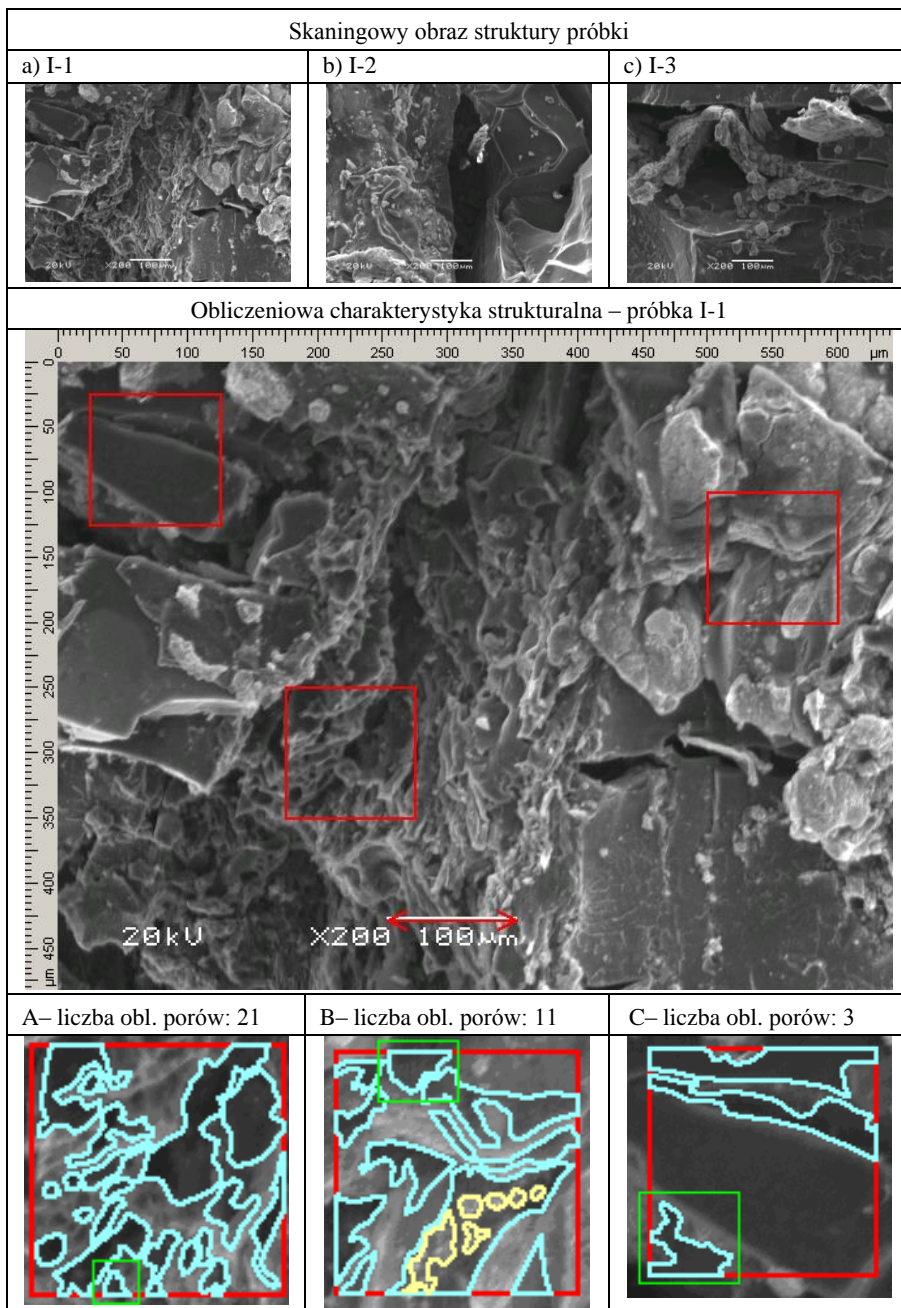
It has been found that the scale of permeability of the skeleton porous materials is determined by characteristic parameters such as the degree of effective porosity for gas flow and also the anisotropic structure of these materials. Both these quantities have a considerable effect on the permeability coefficient, which was taken into account during the theoretical assessment of the issue. The experimental assessment of the value of this coefficient against gas flow rate and the total pressure drop on a porous bed is presented.

At the same time, the assessment of hydrodynamic parameters showed that none of the models available in the literature satisfies the correct correlation with the results of the experimental studies. This can be explained by the limited scope of these models to skeletal porous material characterized by significant anisotropy of the internal structure. The usefulness of computational methods characterizing the hydrodynamics of gas flow through porous materials is evaluated. An additionally, the numerical mapping of the flow geometry of solid materials with tortuous structure is considered.

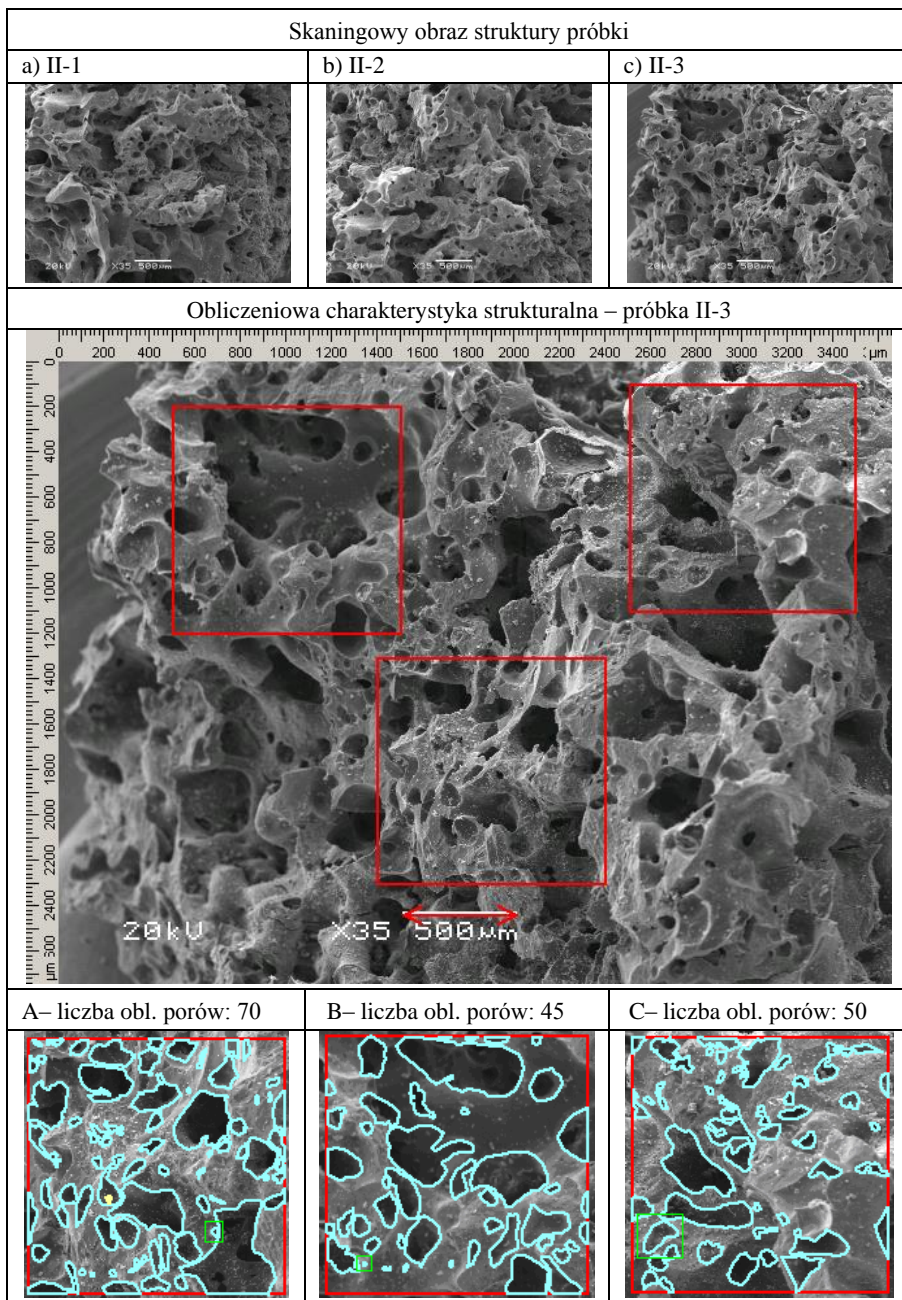
ZAŁĄCZNIK

Charakterystyka strukturalna SEM materiału badawczego

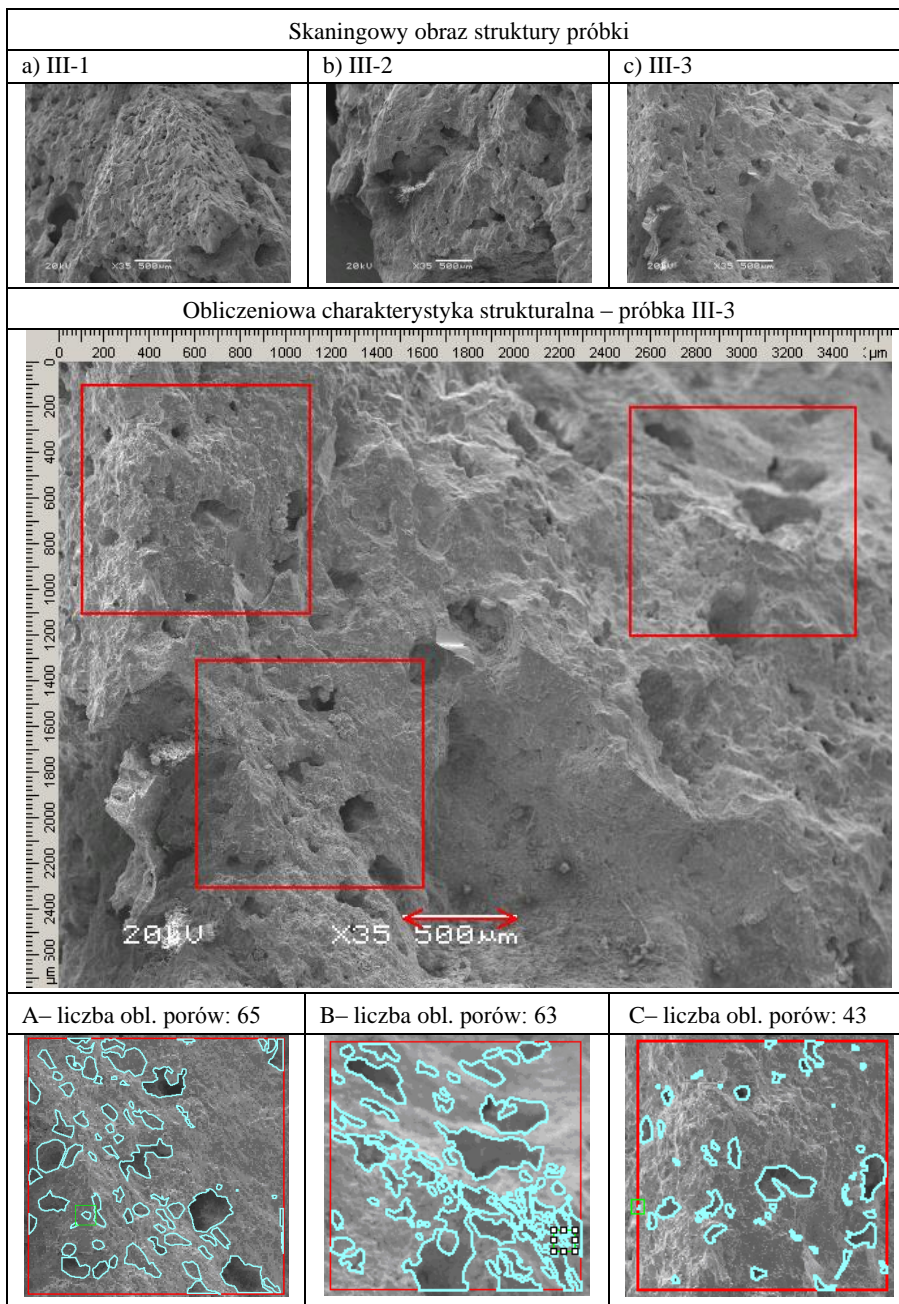
1. Karbonizat *in situ*



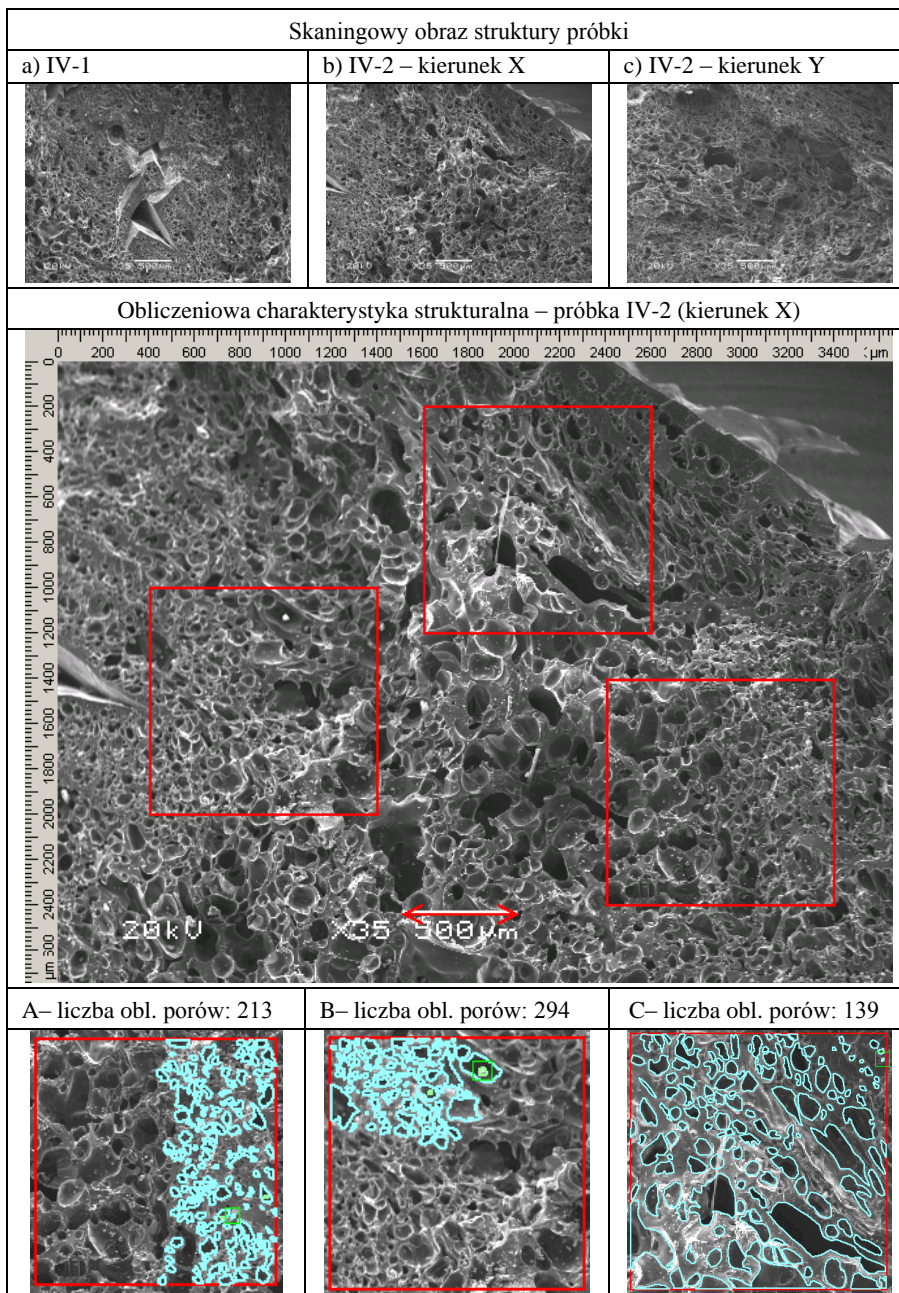
2. Koks



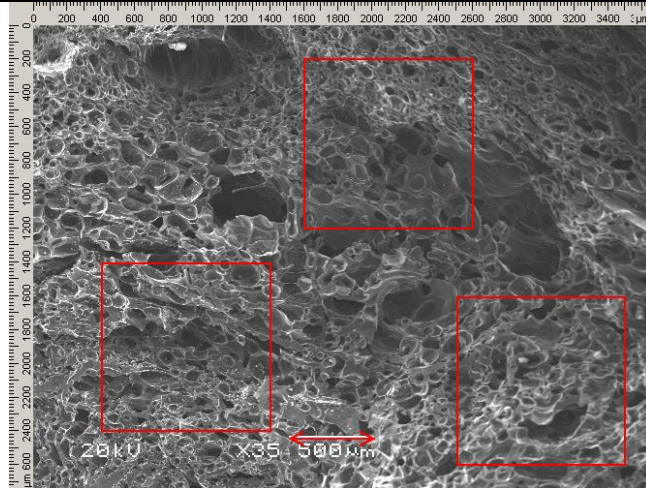
3. Przetopiona skała płonna – próbka III-3



4. Karbonizat *ex situ*



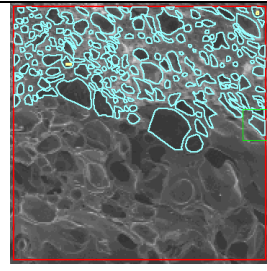
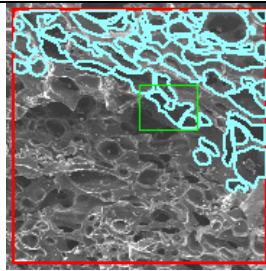
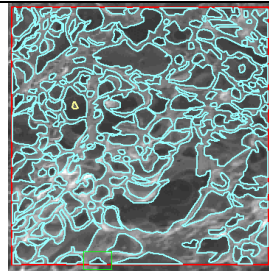
Obliczeniowa charakterystyka strukturalna – próbka IV-2 (kierunek Y)



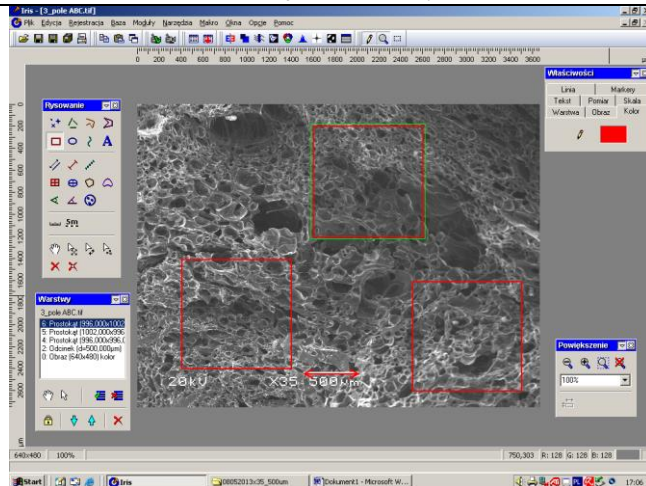
A– liczba obl. porów: 187

B– liczba obl. porów: 204

C– liczba obl. porów: 177



Interfejs obliczeniowy





Grzegorz Wałowski – adiunkt w Zakładzie Odnawialnych Źródeł Energii w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach – Oddział w Poznaniu. Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej (2010 r.) oraz studiów doktoranckich na tym samym wydziale, na którym w 2015 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych. Autor (współautor) licznych publikacji i patentów z zakresu oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez materiały porowate, zwłaszcza produkty termicznego procesowania węgla (karbonizaty, koksy itp.). Z ramienia Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w ramach programu BIOSTRATEG 1 kieruje badaniami nad poprawą efektywności energetycznej oraz zwiększeniem udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym polskiego rolnictwa, czego efektem jest wdrożenie technologii oraz instalacji do produkcji biogazu w wybranym gospodarstwie rolnym. Jest ekspertem Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi ds. Biogazu rolniczego i sieci gazowych, a także biegłym z zakresu technologii produkcji biogazu.



Gabriel Filipczak – profesor uczelni w Katedrze Inżynierii Procesowej Politechniki Opolskiej, od 1978 r. związany z Wydziałem Mechanicznym tej uczelni. Absolwent Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, gdzie w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych uzyskał też stopień doktora nauk technicznych (1979 r.). Mechanik, specjalizujący się w inżynierii i aparaturze chemicznej oraz inżynierii procesów wielofazowych, z którego to obszaru uzyskał na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej stopień naukowy doktora habilitowanego nauk technicznych (2008 r.). Autor (współautor) licznych publikacji i patentów z zakresu operacji jednostkowych inżynierii chemicznej i procesowej, odnoszących się zwłaszcza do identyfikacji zjawisk ciepło-przepływowych zachodzących w układach jedno- i wielofazowych. Kierownik i wykonawca wielu projektów badawczych z zakresu oceny procesów wymiany pędu, ciepła i masy w przepływie wielofazowym z udziałem faz ciekłej i gazowej, w aparaturze o różnej konfiguracji przepływu.