

Analiza pęcznienia węgla kamiennych i brunatnych w oparciu o analizę izoterm sorpcji CO₂

PAWEŁ BARAN, KATARZYNA ZARĘBSKA

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: pawel.baran@agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy poddano analizie eksperymentalne izotermy sorpcji ditlenku węgla na 3 próbkach węgla kamiennego i 2 brunatnego zmierzone w dwóch temperaturach. Dokonano formalnego opisu danych eksperymentalnych przy użyciu równania Dubinina i Raduszkiewicza w formie oryginalnej oraz zmodyfikowanej. Zmodyfikowana forma równania DR pozwala ocenić skłonność próbki do pęcznienia pod wpływem pochłanianego gazu. Stwierdzono że najwyższą rozszerzalnością cechuje się próbka Pn z kopalni Pniówek. Otrzymane wyniki pozwalają również stwierdzić, że węgle wyżej uwęglone, o niskiej zawartości wityrnytu, w temperaturze nadkrytycznej praktycznie nie pęcznią pod wpływem ditlenku węgla.

Słowa kluczowe: pęcznienie, węgiel kamienny, węgiel brunatny, sorpcja, ditlenek węgla

1. Wprowadzenie

Proces pęcznienia jest efektem dwóch przeciwnych zjawisk zwiększania objętości matrycy węglowej w wyniku adsorpcji oraz kompresji matrycy związanej z ciśnieniem gazów w porach. Obserwacje wykazały że pęcznienie początkowo związane jest z kształtem izotermy adsorpcji. Przy wysokich ciśnieniach gdy szybkość zmian zawartości zaadsorbowanego gazu maleje dominuje kurczenie się matrycy, co może zmniejszyć efekt wzrostu objętości. Przepuszczalność złoża węgla pierwotnie zdeterminowana jest obecnością szczelin/spękań, a ich wielkość zależy od efektywnego nacisku/ciśnienia, którego zwiększenie poprzez obniżenie ciśnienia w porach prowadzi do ich zamknięcia. Pęcznienie i kurczenie się węgla pod wpływem nacisku/ciśnienia może zmienić charakter szczelin, a niektóre efekty zmian objętościowych muszą być kompensowane zmianą porowatości, której znacząca część jest właśnie porowatością tych szczelin. W praktyce znaczące zmiany przepuszczalności zaobserwowano podczas pozyskiwania metanu z pokładów węgla (CBM – *Coal Bed Methane*) oraz wprowadzania ditlenku węgla do złoża (Pekot i Reeves, 2002).

Zjawisko pęcznienia węgla pod wpływem CO₂ ma istotne znaczenie w kontekście geologicznego magazynowania ditlenku węgla, gdyż przypuszczalnie wpłynie ono znacząco na transport gazu w pokładzie węgla. Istnieje bowiem duże prawdopodobieństwo, że w wyniku pęcznienia system porów może ulec zamknięciu, co spowoduje znaczne obniżenie przepuszczalności (Larsen, 2004; Pan i Connell, 2007). Ponadto pęcznienie węgla powoduje zmianę objętości próbki, co dodatkowo wpływa na dokładność szacowania chłonności sorpcyjnej podczas badań eksperymentalnych. Badania dotyczące rozszerzalności węgla pod wpływem CO₂ prowadzone są wiele lat, jednak ich ukierunkowanie i praktyczne zastosowanie ulegały zmianie. Początkowo rozważano problem pęcznienia w kontekście wpływu tego zjawiska na pomiar powierzchni właściwej otrzymanej z adsorpcji CO₂. Reucroft i Patel (1986) zbadali pęcznienie trzech próbek węgla o różnym stopniu metamorfizmu dla ciśnień do 0,15 MPa. Stwierdzili, że maksymalna rozszerzalność węgla w tych warunkach eksperymentu wynosi 1,3% i maleje ona wraz ze wzrostem zawartości pierwiastka C w węglu. Rozszerzeniem tej pracy były badania Reucroft'a i Sethuraman'a (1987), którzy badając rozszerzalność węgla dla ciśnień do 1,5 MPa, stwierdzili wzrost pęcznienia wraz ze wzrostem ciśnienia. Wyliczyli, że dla ciśnienia 1,5 MPa maksymalna rozszerzalność wynosi 1,33 % dla węgla bitumicznego i 4,18% dla węgla brunatnego. Wpływ

ciśnienia oraz stopnia metamorfizmu na rozszerzalność zanotował Walker (Walker i in., 1988). Maksymalne wydłużenie próbki węgla brunatnego dla ciśnienia 4,8 MPa wyniosło ok. 4%. Przy niższym ciśnieniu zmiany wymiarów były nieco mniejsze niż w przypadku badań Reucroft'a i Sethuraman'a. Stwierdzono również nieodwracalność procesu rozszerzania. Dodatkowo zaobserwowano, że ponowienie eksperymentu na tej samej próbce wywołuje większe wydłużenie próbki, od mającego miejsce w poprzedzającym cyklu. Nieodwracalność zjawiska pęcznienia tłumaczono częściowym rozpuszczaniem się ditlenku węgla w matrycy węglowej. Nieodwracalność rozszerzalności węgla pod wpływem metanu i ditlenku węgla zaobserwowała również Ceglarska-Stefańska (Ceglarska-Stefańska, 1974, 1990). Celem jej badań było wyjaśnienie lokowania cząsteczek sorbatu w substancji węglowej. Autorka stwierdziła, że rozszerzalność pod wpływem metanu jest niższa w całym zakresie ciśnień od rozszerzalności mierzonej pod wpływem CO₂. Zaobserwowano również, że rozszerzalność w kierunku prostopadłym do uławicenia jest wyższa niż w kierunku równoległym. Interpretacje wyników przeprowadzono w oparciu o polimeryczny model budowy węgla.

Interesujące są badania, dotyczące pęcznienia węgla, wykonywane dla ciśnień, które w rzeczywistości mogą występować w złożu. Mazumdar wraz ze współpracownikami (Mazumdar i in., 2006) podjęli próbę zasymulowania pomiarów pęcznienia węgla pod wpływem CO₂ w obecności metanu, czyli w takich warunkach, jakie występują w technologii intensyfikacji wydobywania metanu z węgla ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane*). Eksperyment wykonany był dla ciśnień mieszaniny obu gazów w przedziale od około 4 MPa do ok. 23 MPa. Rozszerzalność, zmierzona w kierunku równoległym do uławicenia, wyniosła ok. 0,6%, co w przeliczeniu na wszystkie kierunki dałoby zmianę objętości ok. 2%. Siemons i Busch (2007) również zbadali rozszerzalność dla wysokiego ciśnienia CO₂ (do 20 MPa). W tym przypadku pęcznienie węgla nie było mierzone bezpośrednio ale w oparciu o wyniki adsorpcyjne. Rezultaty wskazują, że zmiany objętości są zróżnicowane i w zależności od rodzaju węgla wynoszą od ok. 3 do 13%. Należy jednak dodać, że wyniki wyznaczone tą metodą nie są pochodną tylko samego pęcznienia, ale również objętości skondensowanego adsorbentu możliwej kompresji próbki przy wyższym ciśnieniu. Jednoczesny pomiar zmian sorpcyjnych i dylatometrycznych jest trudnym eksperymentem, dlatego też w literaturze jest mało doniesień na ten temat (Ceglarska-Stefańska i Czaplinski, 1993; Karacan, 2003; Kelemen i Kwiatek, 2007). Wyniki prac pokazują, że efekt zmian objętościowych próbki dla badanych ciśnień (do 5 MPa) jest stosunkowo mały. Według Romanova (Romanov i in., 2006) większych efektów można spodziewać się dla wyższych ciśnień. Zespół Majewskiej i Ceglarskiej-Stefańskiej (Majewska i in., 2009), oprócz równoległego pomiaru kinetyk sorpcji i rozszerzalności w układzie mierzył towarzyszący tym zmianom poziom emisji akustycznej. Pomiarów dokonano dla próbek węgla w formie kostek, a sorbatem był metan, ditlenek węgla oraz ich mieszanina. Stwierdzono nieliniową zależność między rozszerzalnością a ilością zasorbowanego gazu oraz nieodwracalność procesu pęcznienia. Wykazano również preferencyjną sorpcję metanu dla ciśnienia 2,6 MPa oraz porównywalne powinowactwo CH₄ i CO₂ dla wyższego ciśnienia (4 MPa). Pomiar rozszerzalności australijskich węgla pod wpływem CO₂ w warunkach nadkrytycznych (55°C, ciśnienie do 15 MPa) przeprowadził Day (Day i in. 2008). Dla wszystkich próbek rozszerzalność była większa w kierunku prostopadłym do uwarstwienia i wynosiła od 1,7 do 1,9%. Potwierdzono również większą podatność na pęcznienie węgla niżej uwęglonych. Zaobserwowano także liniową zależność między ilością zasorbowaną do ciśnienia 8 MPa a rozszerzalnością węgla. Wzrost ciśnienia powyżej 8 MPa, powodował dalszy wzrost sorpcji przy niezmiennych wymiarach próbki.

Określenie wielkości zmian objętościowych masy węglowej wywołanych obecnością gazów oraz czynników wpływających na te zmiany ma znaczenie dla praktyki górniczej. Nawet niewielkie zmiany temperatury w górotworze mogą naruszyć równowagę sorpcyjno/desorpcyjną, powodując tym samym zmiany objętościowe węgla. Konsekwencją tych zmian będzie występowanie naprężeń górotworu, co prowadzić może do rozszczelnienia pokładu, a w przypadku odsłonięcia, do wyrzutu skalno-gazowego.

Zjawisko pęcznienia węgla nie pozostaje również bez wpływu na dokładność pomiarów chłonności sorpcyjnej zmierzonej metodą Sieverta (metoda wolumetryczna). W metodzie tej istotne jest wyznaczenie objętości martwej aparatu, a następnie ilość zasorbowaną wylicza się za pomocą praw gazowych. W momencie gdy wraz ze wzrostem ciśnienia następować będzie pęcznienie węgla, wówczas objętość martwa aparatu nie będzie wielkością stałą, a wyliczona chłonność sorpcyjna będzie obciążona błędem. Problem ten przedyskutowany został w pracy (Sakurovs i in., 2006) którzy do opisu układu pęczniący węgiel-gaz zaproponowali modyfikację równania Dubinina i Raduszkiewicza.

Celem niniejszej pracy jest ocena zachowania układu węgiel-ditlenek węgla pod kątem jego pęcznienia, przez zastosowanie zmodyfikowanego równania Dubinina i Raduszkiewicza (Sakurovs i in., 2009).

2. Materiał badawczy

Materiał badawczy pracy stanowiło 5 próbek węgla: 3 próbki węgla kamiennego oraz 2 próbki węgla brunatnego. Próbki węgla kamiennego pochodziły z Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (próbki NR1 – Nowa Ruda i Th – Thorez) oraz Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (próbka Pn – Pniówek), natomiast węgla brunatnego pochodziły z kopalń w Bełchatowie i Turowie. W dalszym ciągu pracy poszczególne próbki będą sygnowane: NR1, Th, Pn, Tu, Be.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono wybrane parametry analizy chemicznej, technologicznej oraz petrograficznej badanych węgla.

Tab. 1. Wybrane wyniki analizy chemicznej i technologicznej badanych próbek

Węgiel	C^{daf} [%]	H^{daf} [%]	V^{daf} [%]	A^a [%]	W^a [%]
Nowa Ruda (NR1)	88,70	3,51	18,00	11,20	0,95
Thorez (Th)	86,40	4,65	29,30	7,89	1,13
Pniówek (Pn)	84,24	4,58	27,12	3,01	1,75
Turów (Tu)	70,2	6,00	54,06	12,3	8,3
Bełchatów (Be)	65,9	5,78	57,39	3,8	21,1

Tabela 2 Analiza petrograficzna badanych próbek

Węgiel	Grupa macerałów [%]			Substancja mineralna [%]	Refleksyjność [%]
	witrynit/huminit*	liptynit	inertynit		
Nowa Ruda (NR1)	45,9	3,6	40,9	9,6	1,51
Thorez (Th)	54,4	15,7	24,9	5,0	1,04
Pniówek (Pn)	72,3	6,9	19,8	1,0	0,92
Turów (Tu)	76,4*	4,4	3,8	15,4	0,29
Bełchatów (Be)	77,6*	4,7	7,4	10,3	0,26

Próbki węgla charakteryzują się różnym stopniem uwęglenia co pokazują wartości refleksyjności. Można je zaliczyć do nisko-, średnio- i wysokouwęglonych. Wydaje się jednak, że próbkę węgla Pn można uznać za węgiel nisko uwęglony. Mimo że zawartość C^{daf} może wskazywać że węgiel ten posiada średni stopień uwęglenia, to jednak duży udział witrynitów pozwala zaklasyfikować próbkę Pn jako węgiel o niskim stopniu uwęglenia.

3. Badania sorpcyjne

Badania sorpcji ditlenku węgla zostały wykonane metodą objętościową w temperaturze 298 i 323 K przy użyciu aparatury zaprojektowanej i wykonanej dostępnej na Wydziale Energetyki i Paliw AGH. Pomiar przeprowadzono dla próbek ziarnistych o uziarnieniu 0,5-0,7 mm dla węgla kamiennych i 0,5-1,5 mm dla węgla brunatnych. Szczegółowy sposób pomiaru izoterm sorpcji został przedstawiony we wcześniejszych pracach autora (Baran i in. 2010, 2013).

4. Metodologia obliczeń

Wyniki eksperymentalne zostały poddane formalnemu opisowi przy użyciu równania Dubinina i Raduszkiewicza (DR) (równanie 1) oraz zmodyfikowanego równania DR (równanie 2) (Sakurovs i in. 2009)

$$W = W_0 \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \exp \left[-D \left(\ln^2 \frac{\rho_a}{\rho_q} \right) \right] \quad (1)$$

$$W = W_0 \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \exp \left[-D \left(\ln^2 \frac{\rho_a}{\rho_q} \right) \right] + k \rho_g \quad (2)$$

gdzie:

W – objętość zaadsorbowanej substancji znajdującej się w fazie ciekłej [dm^3/kg],

W_0 – objętość graniczna mikroporów [dm^3/kg],

ρ_g – jest to gęstość fazy gazowej [kg/m^3],

ρ_a – jest to gęstość fazy zaadsorbowanej [kg/m^3],

D – stała, która jest funkcją ciepła adsorpcji,

k – współczynnik korekcyjny skorelowany ze zmianą objętości.

W prezentowanych równaniach zamiast ciśnień przyjęto gęstości. Umożliwia to zastosowanie równań dla wyników izoterm wyznaczonych w temperaturze nadkrytycznej. W oryginalnej postaci równania logarytmuje się stosunek ciśnienia równowagowego do ciśnienia pary nasyconej, co uniemożliwia opis izoterm zmierzonych w temperaturze nadkrytycznej. Gęstość fazy zaadsorbowanej przyjęto równą $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$. Stwierdzono że równanie izotermy DR zmodyfikowane daje bardzo dobre wyniki w szerokim zakresie temperatur i ciśnienia. Wyrażenie $(1 - \rho_g/\rho_a)$ koryguje objętość fazy zaadsorbowanej, która wyparła z obszaru przypowierzchniowego gaz wolny natomiast stała k gromadzi w sobie niepewności wynikające z wyliczeń fazy zaadsorbowanej w zakresie podwyższonych i wysokich ciśnień. W tym przypadku dochodzi do zjawisk absorpcyjnych (rozpuszczania się ditlenku węgla w matrycy węglowej), co z punktu widzenia obliczeń chłonności sorpcyjnej nie wymaga rozróżnienia. Jednak zjawisku absorpcji towarzyszy zmiana objętości węgla, co skutkuje zmianą objętości martwej, a to przekłada się na wyliczoną wartość sorpcji.

5. Wyniki badań

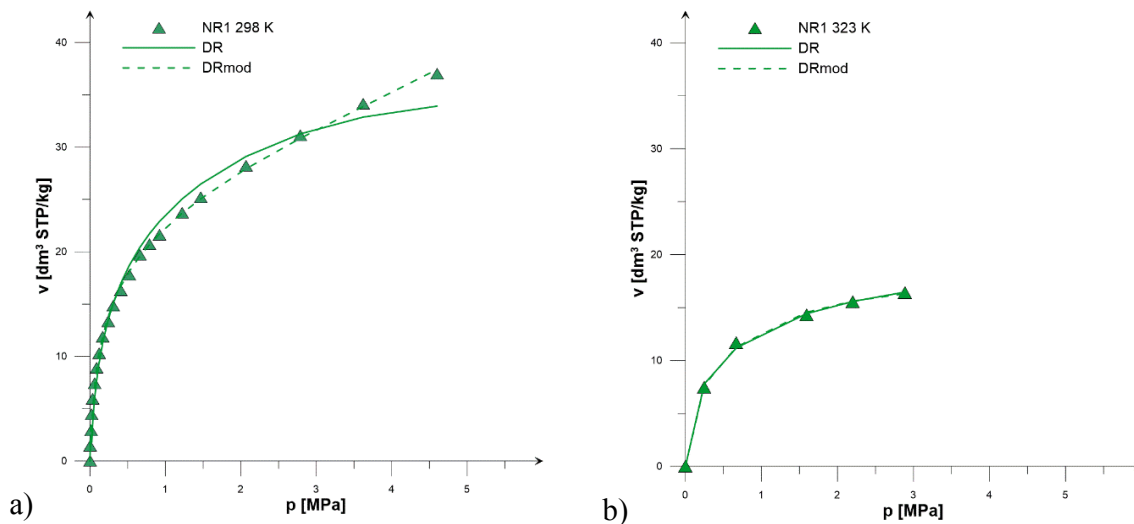
Przeprowadzona optymalizacja pozwoliła wyznaczyć stałe dla wszystkich izoterm eksperymentalnych. Wyznaczone stałe zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie stałych równania Dubinina-Raduszkiewicza dla formy ogólnej i zmodyfikowanej

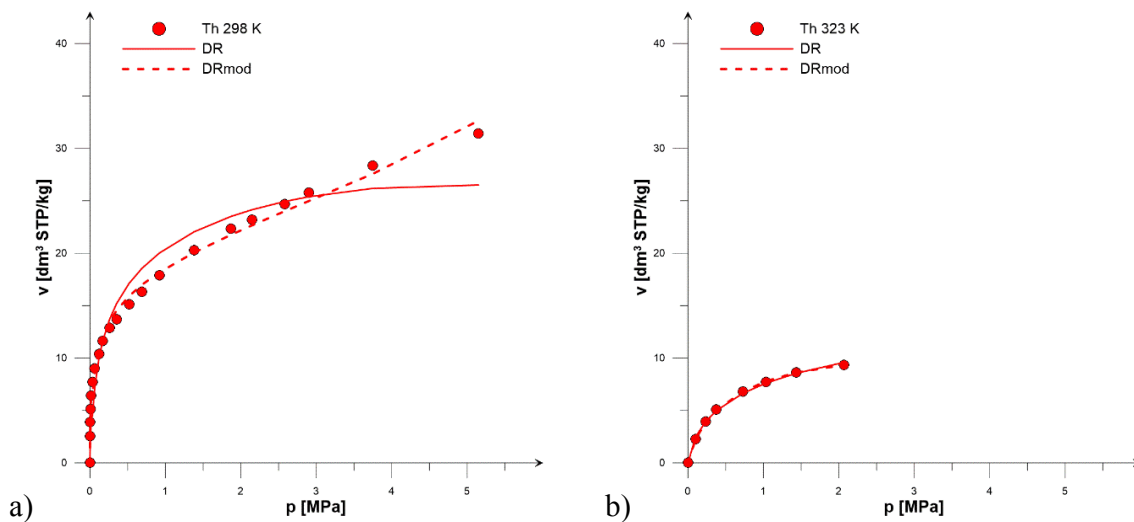
Wyznaczony parametr	Temperatura [K]	DR					DR zmod				
		NR1	Th	Pn	Tu	Be	NR1	Th	Pn	Tu	Be
W_0 [dm^3/kg]	298	46,60	34,82	51,76	40,52	33,24	34,83	23,44	28,13	36,21	21,11
	323	23,94	16,55	67,06	35,02	28,82	26,37	22,36	23,78	27,51	17,05
D [-]	298	0,0413	0,0320	0,0504	0,0416	0,0452	0,0318	0,0201	0,0329	0,0382	0,0305
	323	0,0366	0,0458	0,0726	0,0628	0,0625	0,0398	0,0539	0,0336	0,0548	0,0463
k [cm^3/g]	298	0	0	0	0	0	0,0947	0,1004	0,2660	0,0444	0,1184
	323	0	0	0	0	0	-0,0246	-0,0676	0,2664	0,0613	0,1076

Rysunki 1-5 przedstawiają izotermy sorpcji nadmiarowej CO_2 dla badanych próbek węgla, wyznaczonych w temperaturze 298 K i 323 K. Punkty ilustrują dane eksperymentalne, linia przerywana ogólną izotermę DR natomiast ciągła postać izotermy zmodyfikowanej. Widać że wzrost temperatury powoduje znaczne obniżenie chłonności sorpcyjnej. Najwyższą chłonnością sorpcyjną cechuje się próbka Pn. Również dla tej próbki obserwuje się najmniejsze obniżenie chłonności sorpcyjnej ze wzrostem temperatury.

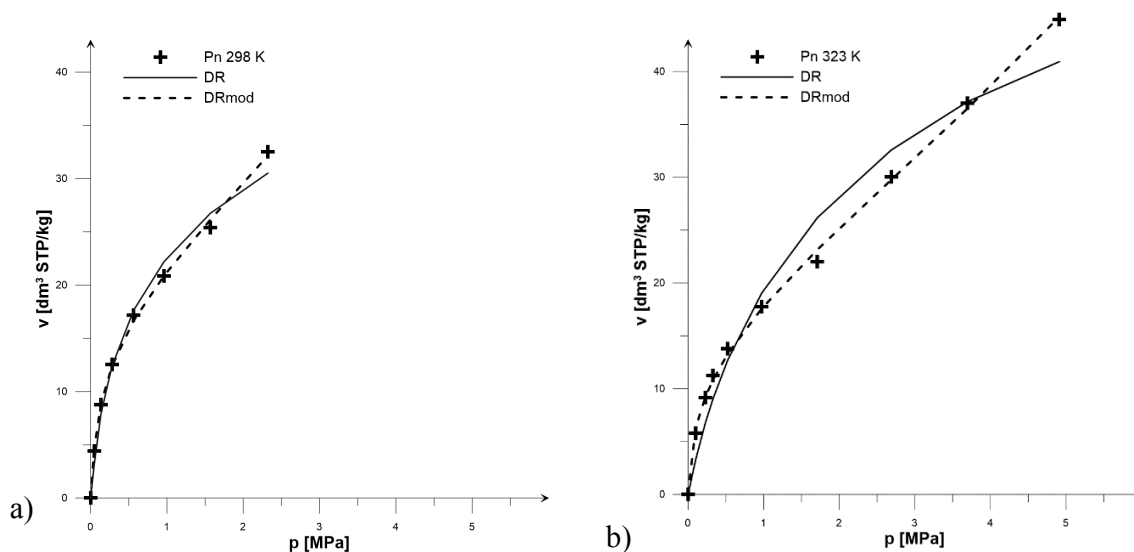
Na przedstawionych izotermach można zaobserwować różną jakość dopasowania obu równań: DR i DRmod. Widoczne jest iż ogólna postać równania nie opisuje wyników doświadczalnych w zadowalający sposób, a odchylenia te są wyższe w niższej temperaturze. Dobrze ilustruje to rysunek 6, na którym zesta-



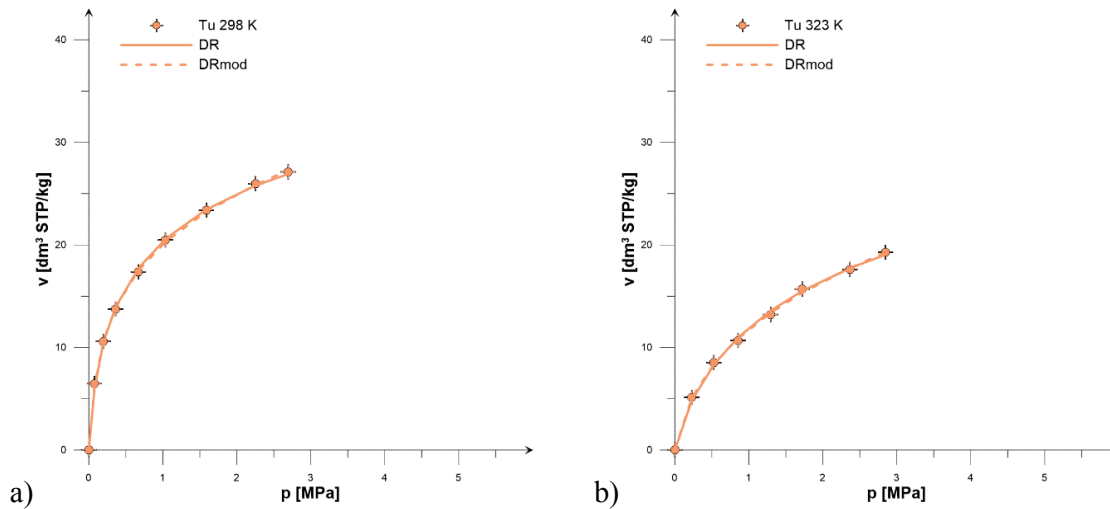
Rys. 1. Izoterm sorpcji CO₂ na próbce węgla NR1 w temperaturze a) 298 K, b) 323 K



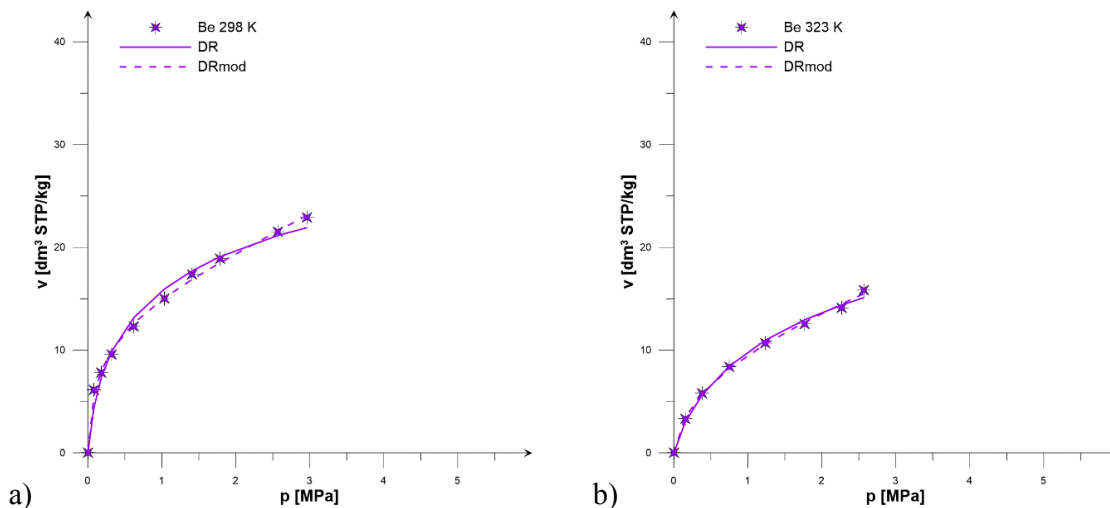
Rys. 2. Izoterm sorpcji CO₂ na próbce węgla Th w temperaturze a) 298 K, b) 323 K



Rys. 3. Izoterm sorpcji CO₂ na próbce węgla Pn w temperaturze a) 298 K, b) 323 K



Rys. 4. Izotermi sorpcji CO₂ na próbce węgla Tu w temperaturze a) 298 K, b) 323 K

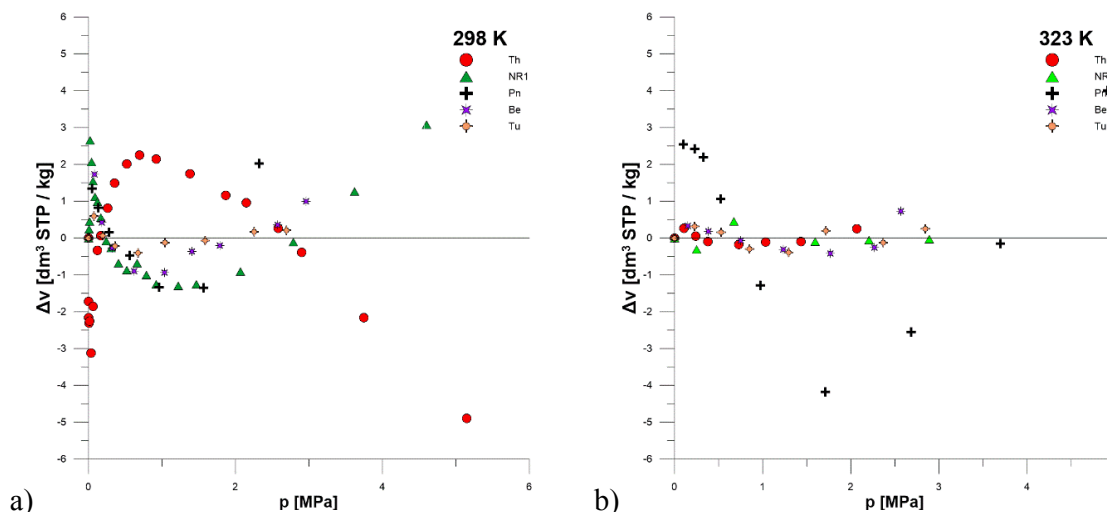


Rys. 5. Izotermi sorpcji CO₂ na próbce węgla Be w temperaturze a) 298 K, b) 323 K

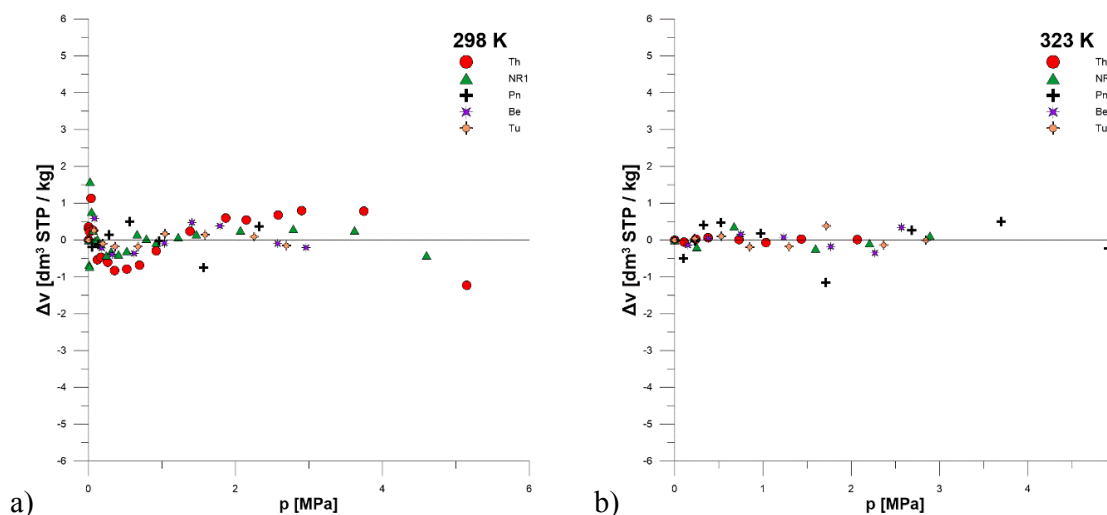
wiono różnice chłonności sorpcyjnej pomiędzy wartością eksperymentalną a wyliczoną z równania DR. Dla obu temperatur najlepsze dopasowanie obserwujemy dla próbki węgla brunatnego Tu, natomiast najgorsze, dla próbki Pn pochodzącej z kopalni Pniówek.

Znacznie lepsze wyniki dopasowania obserwuje się dla izoterm wykreślonych przy zastosowaniu zmodyfikowanego równania izotermi DR. W tym przypadku praktycznie dla wszystkich układów węgiel-gaz oraz dla obu temperatur obserwujemy bardzo dobrą jakość dopasowania. Niewielką wartość odchyłań ilustruje rysunek 7.

Słabej jakości dopasowania ogólnej formy równania DR należy upatrywać w pęcznieniu węgla pod wpływem CO₂. Zastosowanie izotermi zmodyfikowanej w której stała k odzwierciedla ilościowo rozszerzalność węgla daje dużo lepsze efekty. Wyliczone wartości stałej k , zestawione w tabeli 3, pozwalają stwierdzić że największą rozszerzalnością cechuje się próbka Pn. Patrząc na jakość dopasowania przy zastosowaniu obu równań można również stwierdzić, że węgiel brunatny Tu praktycznie nie pęcznieje pod wpływem CO₂. Bardzo duża zawartość substancji mineralnej oraz niski stopień uwęglenia pozwalają przypuszczać że sorpcja ma charakter jedynie powierzchniowy, zwłaszcza że w przypadku tak młodych węgli udział mikroporów jest często niewielki. W przypadku próbek NR1 i Th, węgli wyżej uwęglonych, w temperaturze nadkrytycznej stała k przyjmuje wartości ujemne, co można by interpretować jako skurcz próbki pod wpływem sorpcji ditlenku węgla. Tą niewielką anomalię tłumaczyć należy raczej niższym od pozostałych próbek zakresem ciśnienia w którym zmierzono izotermi. Wartości te są bardzo niewielkie, bliskie zeru. Mimo to można wysunąć tezę, że w wyższej temperaturze pęcznienie węgla wyżej uwęglonego jest dla tych próbek znacznie niższe, lub nie występuje.



Rys. 6. Porównanie odchylenia chłonności sorpcyjnej próbek dla izoterm opisanych równaniem DR w temperaturze: a) 298 K, b) 323 K



Rys. 7. Porównanie odchylenia chłonności sorpcyjnej próbek dla izoterm opisanych zmodyfikowanym równaniem DR_{mod} w temperaturze: a) 298 K, b) 323 K

6. Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia z zastosowaniem równania Dubinina i Raduszkiewicza: oryginalnego oraz zmodyfikowanego pokazują, że modyfikacja równania korzystnie wpływa na jakość dopasowania. Interpretacja wyznaczonych z równania stałych pozwala stwierdzić, że największą rozszerzalnością cechowała się próbka Pn. W zachowaniu pozostałych próbek węgla kamiennego obserwuje się interesujące właściwości. Próbki NR1 i Th w temperaturze 298 K cechują się podobnymi wartościami stałej k , czyli można ocenić że pęcznią w podobny sposób. W temperaturze 323 K dla obu próbek stała k jest bliska zera. Pozwala to postawić tezę, że w przypadku temperatury nadkrytycznej węgle wyżej uwęglone pęcznią pod wpływem ditlenku węgla w bardzo niewielkim stopniu. Wyniki dla próbek węgla kamiennego potwierdzają też wpływ składu petrograficznego na właściwości dylatometryczne węgla. Znany jest fakt, że macerały grupy wityritu pęcznią pod wpływem CO₂ co obserwujemy dla próbki Pn. W przypadku próbek węgla brunatnego obserwuje się praktycznie brak pęcznienia dla próbki Tu. Brak pęcznienia może być spowodowany dużą zawartością substancji mineralnej. Niewielka wartość zmian wymiarów objętościowych próbki Be może być efektem dużej zawartości wilgoci.

Afiliacja finansowania

Praca finansowana z Badań Statutowych AGH nr 11.11.210.244

Literatura

- Baran P., Broś M., Nodzeński A. (2010). *Studies on CO₂ sorption on hard coal in the near-critical area with regard to the aspect of sequestration*. Archives of Mining Sciences, 55, s. 59-68.
- Baran P., Cygankiewicz J., Zarębska K. (2013). *Carbon dioxide sorption on polish ortholignite coal in low and elevated pressure*. Journal of CO₂ Utilization, 3-4, s. 44-48.
- Ceglarska Stefańska G. (1974). *Rozszerzalność węgla kamiennych o różnym stopniu metamorfizmu pod wpływem sorpcji metanu przy wysokich ciśnieniach*. Praca doktorska, Biblioteka Główna AGH, Kraków.
- Ceglarska Stefańska G. (1990). *Współzależność procesów sorpcyjnych i dylatometrycznych zachodzących w układach: para wodna, dwutlenek węgla, metan*. ZN AGH, Chemia z. 16, Kraków.
- Ceglarska-Stefańska G., Czapliński A. (1993). *Correlation between sorption and dilatometric processes in hard coals*. Fuel, 72, s. 413-417.
- Day S., Fry R., Sakurovs R. (2008). *Swelling of Australian coals in supercritical CO₂*. International Journal of Coal Geology, 74, s. 41-52.
- Karacan C.O. (2003). *Heterogeneous sorption and swelling in a confined and stressed coal during CO₂ injection*. Energy Fuels, 17, s. 1595-1608.
- Kelemen S.R., Kwiatek L.M. (2007). *Physical properties of dry block Argonne premium bituminous coal related to CO₂, CH₄ and N₂ adsorption*. Paper 0711, Proceedings of the 2007 International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa.
- Larsen J.W. (2004). *The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties*. International Journal of Coal Geology, 57, s. 63-70.
- Majewska Z., Ceglarska-Stefańska G., Majewski S., Zietek J. (2009). *Binary gas sorption/ desorption experiments on a bituminous coal: simultaneous measurements on sorption kinetics, volumetric strain and acoustic emission*. International Journal of Coal Geology, 77, s. 90-102.
- Majewska Z., Ceglarska-Stefańska G., Majewski S., Zietek J. (2009). *Binary gas sorption/ desorption experiments on a bituminous coal: simultaneous measurements on sorption kinetics, volumetric strain and acoustic emission*. International Journal of Coal Geology, 77 s. 90-102.
- Mazumder S., Siemons N., Wolf K.H. (2006). *Differential swelling and permeability change of coal in response to CO₂ injection for enhanced coalbed methane*. Paper 0602, Proceedings of the 2006 International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa.
- Mazumder S., Siemons N., Wolf K.H. (2006). *Differential swelling and permeability change of coal in response to CO₂ injection for enhanced coalbed methane*. Paper 0602, Proceedings of the 2006 International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa.
- Pan Z., Connell L.D. (2007). *A theoretical model for gas adsorption induced coal swelling*. International Journal of Coal Geology, 69, s. 243-252.
- Pekot L.J., Reeves S.R. (2002) *Modeling coal matrix shrinkage and differential swelling with CO₂ injection for enhanced coalbed methane recovery and carbon sequestration applications*. Topical Report, DOE Contract No. DE-FC26-00NT40924.
- Reucroft P.J., Patel H. (1986). *Gas-induced swelling in coal*. Fuel, 65, s. 816-820.
- Reucroft P.J., Sethuraman A.R. (1987). *Effect of pressure on carbon dioxide induced coal swelling*. Energy Fuels, 1, s. 72-75.
- Romanov V.N., Goodman A.L., Larsen J.W. (2006) *Errors in CO₂ adsorption measurements caused by coal swelling*. Energy Fuels, 20, s. 415-416.
- Sakurovs R., Day S., Weir S. (2009). *Causes and consequences of errors in determining sorption capacity of coals for carbon dioxide at high pressure*. International Journal of Coal Geology, 77, s. 16-22.
- Siemons N., Busch A. (2007). *Measurement and interpretation of supercritical CO₂ sorption on various coals*. International Journal of Coal Geology, 69, s. 229-242.
- Siemons N., Busch A. (2007). *Measurement and interpretation of supercritical CO₂ sorption on various coals*. International Journal of Coal Geology, 69, s. 229-242.
- Walker P.L., Verma S.K., Rivera-Utrilla J., Khan M.R. (1988). *A direct measurement of expansion in coals and macerals induced by carbon dioxide and methanol*. Fuel 67, s. 719-726.

Analysis of the swelling of hard coal and lignite based on the analysis of CO₂ sorption isotherms

Abstract

In the paper the experimental sorption isotherms of carbon dioxide for 3 samples of coal and 2 samples of lignite measured at two temperatures have been analyzed. A formal description of the experimental data has been made using the original and modified form of equation Dubinin and Radushkevich. A modified form of the DR equation allows to evaluate the tendency of the sample to swell under sorbed gas. It was found that the highest expansion is characterized by Pn sample from Pniówek mine. The obtained results allow also conclude that the high rank coals with low vitrinite content in the supercritical temperature practically does not swell under the influence of carbon dioxide.

Keywords: swelling, hard coal, lignite, sorption, carbon dioxide