

Łukasz OSUCHOWSKI¹, Paweł RYTEL¹, Kamil JÓŹWIK¹, Radosław SZMIGIELSKI¹
Wioletta KWIATKOWSKA-WÓJCIK², Władysław HARMATA³

¹ Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii

al. gen. Antoniego Chruściela "Montera" 105, 00-910 Warszawa

² PSO MASKPOL S.A., Konieczki, 42-140 Panki

³ Wojskowa Akademia Techniczna

ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

Synteza i właściwości adsorpcyjne mikroporowatych węgli aktywnych otrzymywanych z żywic jonowymiennych na bazie kopolimeru styrenu i diwinylobenzenu

W pracy podjęto próby wykorzystania materiału rezydualnego w postaci żywicy jonowymienniej Amberjet 1200H na bazie kopolimeru styrenu i diwinylobenzenu. Celem badań było uzyskanie węgla aktywnych o wysokich właściwościach adsorpcyjnych. Ocenę przydatności uzyskanych materiałów przeprowadzono z użyciem izoterm adsorpcji azotu w 77 K i wodoru w 77 K. Uzyskano pyliste węgle aktywne, z których najlepszy posiadał powierzchnię właściwą na poziomie $2900 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ oraz adsorpcji wodoru na poziomie 3% masowych. Otrzymane materiały porównano z komercyjnie dostępnymi węglami aktywnymi uzyskanymi z innych materiałów odpadowych.

Słowa kluczowe: węgiel aktywny, struktura porowata, żywice jonowymiennie

Wstęp

Ważnym tematem badań prowadzonych przez ośrodki naukowe na świecie są metody pozyskiwania materiałów i energii z użyciem odnawialnych, ekologicznych i tanich surowców. Prace ukierunkowane są pod kątem przetwarzania surowców odpadowych oraz możliwości ponownego zastosowania ich w przemyśle i nauce. Jedną z form przetwarzania odpadów może być karbonizacja materiałów o dużej zawartości węgla. Podejmuje się badania dotyczące przetwarzania odpadów, tj. żywic jonowymiennych [1], PVC, PET, opon, płyt meblowych, pestek owoców do wytwarzania węgla aktywnych [2].

Materiały węglowe są bardzo efektywnymi adsorbentami [2-4] oraz nośnikami [5, 6]. Stosuje się je jako substancje adsorbujące zanieczyszczenia z powietrza, wody oraz środowiska reakcji. W zależności od użytego materiału wyjściowego - prekursora - otrzymuje się węgle aktywne o różnej strukturze, właściwościach mechanicznych i adsorpcyjnych. W pracy [2] autorzy przedstawiają możliwości

otrzymywania z różnych prekursorów adsorbentów na drodze karbonizacji i aktywacji do oczyszczania wody z substancji organicznych i metali ciężkich. Kolejnym zastosowaniem węgla aktywnych jest oczyszczanie powietrza, zwłaszcza jako wypełnienie filtropochłaniaczy w zbiorowych i osobistych systemach ochrony dróg oddechowych [3]. Innowacyjnym zastosowaniem staje się adsorpcja ditlenku węgla z powietrza, który jest jednym z czynników przyczyniających się do powstawania dziury ozonowej [4].

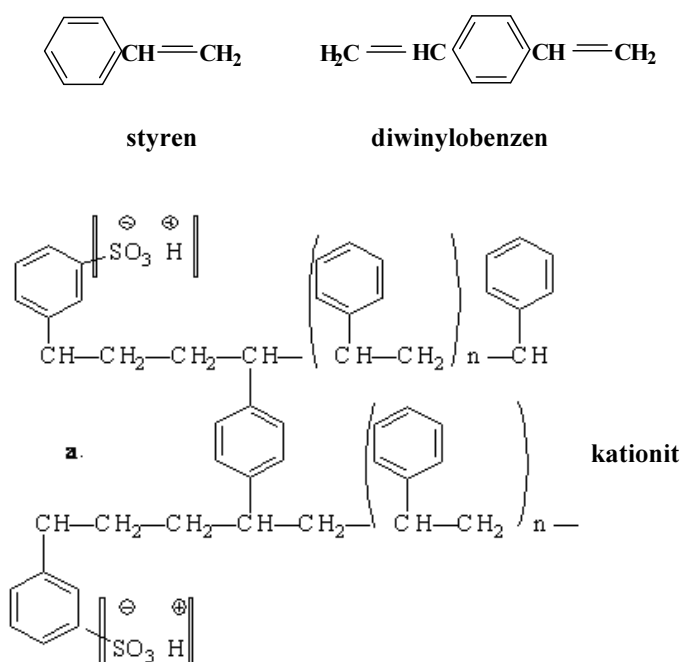
W ostatnich latach prowadzi się prace nad możliwościami aplikacyjnymi materiałów węglowych do magazynowania wodoru jako paliwa [7]. Jednak wodór jest substancją, która nastęrcza wiele problemów związanych z jej magazynowaniem i efektywnym transportem [8-11]. Skraplanie wodoru jest procesem niebezpiecznym oraz wymagającym dużych nakładów energii, natomiast sprężanie, ze względu na mały rozmiar cząsteczek wodoru, jest procesem nieefektywnym, ponieważ szczelność wykorzystywanej aparatury jest niewystarczająca [9, 10, 12, 13]. Wykorzystanie węgla aktywnych jest zasadne z powodów ekonomicznych, stosunkowo taniej i nieskomplikowanej syntezy, łatwej modyfikacji czy też odporności na ewentualnie niekorzystną obecność wilgoci w wysokich temperaturach. Jedną z metod przechowywania wodoru jest adsorpcja na nanoporowatych węglach aktywnych. Rozwinięta struktura mikroporowata tych materiałów pozwala na magazynowanie większej ilości wodoru niż w przypadku materiałów o innych właściwościach [8-13, 15-21].

Magazynowanie maksymalnej ilości wodoru w możliwie najmniejszej objętości adsorbentu stanowi obecnie duże wyzwanie. Według DOE (U.S. Department of Energy), najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby osiągnięcie pułapu 6,5% masy użytego adsorbentu. Taka wartość odpowiada adsorpcji ciekłego wodoru w temperaturze 20,5 K przy ciśnieniu atmosferycznym bądź sprężonego do 150 MPa w temperaturze pokojowej. W celu uniknięcia tak skrajnych warunków magazynowania poszukuje się nowych materiałów węglowych o właściwościach pozwalających na adsorpcję odpowiedniej ilości wodoru. Materiał ten musi odznaczać się bardzo dobrze rozwiniętą powierzchnią właściwą. Ważnym parametrem jest również średnia wielkość porów. W pracach [18, 19] stwierdzono, że najlepsza adsorpcja wodoru następuje w porach o średnicach bliskich 0,7 nm.

W związku z powyższym celem zaplanowanych badań było zdeterminowanie wpływu parametrów aktywacji na strukturę węgla aktywnych. Badania opierały się na wyznaczeniu wpływu parametrów prowadzenia procesu aktywacji chemicznej (czas, temperatura, atmosfera, stosunek użytych substratów) na proces rozwijania struktury mikroporowatej. Powierzchnia aktywna była rozwijana metodą chemiczną z wykorzystaniem wodorotlenku potasu [22-27]. W procesach optymalizacji syntezy otrzymywano węgle o wysokim stopniu rozwinięcia struktury mikroporowatej i wąskim zakresie szerokości porów. Zmiany struktur i charakter powierzchni węgla był wyznaczany na podstawie izoterm adsorpcji-desorpcji azotu 77 K. Dodatkowym aspektem rozpatrzonym w pracy jest zdolność adsorpcji wodoru w 77 K na otrzymanych materiałach.

1. Część doświadczalna

Żywice jonowymienne użyte w badaniach to masa polimerowa, zbudowana z kopolimeru styrenu i diwinylobenzenu (rys. 1). Substancja ta charakteryzuje się dużą gęstością właściwą i warunkuje powstanie trwałego szkieletu węglowego. Już podczas procesu karbonizacji kształtuje się wspomniana wyżej pierwotna struktura węglowa. Wnikliwe badania nad karbonizacją i aktywacją pozwolą otrzymać materiał o możliwie najlepszych parametrach struktury porowatej wraz z małymi stratami surowca. Tak zaplanowana praca umożliwi zakwalifikowanie materiałów do ewentualnych zastosowań aplikacyjnych.



Rys. 1. Wzory szkieletowe styrenu i diwinylobenzenu oraz struktura jonitu

Fig. 1. Patterns of styrene and divinylbenzene, and the structure of the ion exchange

Materiałem wyjściowym do otrzymania produktu końcowego były komercyjne żywice jonowymienne Amberjet 1200 H. Poddano je karbonizacji w piecu w temperaturze 350°C w czasie 90 min pod atmosferą azotu. Na koniec uzyskany karbonizat przemyto 500 cm³ wody i wysuszono w temperaturze 100°C w czasie 1 h.

Próbki karbonizatu poddano procesowi aktywacji chemicznej przy użyciu wodorotlenku potasu (KOH). Proces aktywacji prowadzono przez 3 h w temperaturze 700°C. W każdej partii użyto innej ilości KOH względem masy karbonizatu. Przyjęto następujące stosunki masowe wodorotlenek potasu:karbonizat (KOH:C) - 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 6:1.

Karbonizat nazwano KAR1563, natomiast grupa materiałów po aktywacji otrzymała kolejno nazwy KARNIx1, gdzie x to kolejna ilość wodorotlenku potasu w stosunku masowym do karbonizatu użyta do aktywacji.

1.1. Wyznaczanie izoterm azotowych

Izotermy adsorpcji azotu zmierzono w temperaturze 77 K. Pomiary przeprowadzono na aparacie ASAP 2020 firmy Micromeritics. Zaimplementowane metody matematyczne i modele obliczeniowe umożliwiły uzyskanie wyników w postaci wykresów:

- izoterm adsorpcji, tj.: zależność adsorpcji cm^3/g STP w funkcji ciśnień względnych p/p_0 ,
- różniczkowych rozkładów porów względem szerokości porów.

Dodatkowo wyznaczono powierzchnię właściwą metodą BET (S_{BET}) i całkowitą objętość porów (V_T).

1.2. Wyznaczanie izoterm wodorowych

Izotermy adsorpcji wodoru wyznaczono przy użyciu aparatu ASAP 2020 firmy Micromeritics. Badanie przeprowadzono w temperaturze 77 K, aby mieć możliwość odniesienia wyników oraz parametrów struktury mikroporowatej do odpowiednich danych uzyskanych dla azotu. Umożliwi to otrzymanie zależności wzrostu ilości zaadsorbowanego wodoru wobec wzrastającej powierzchni właściwej, a co za tym idzie wpływu udziału użytego wodorotlenku potasu do syntezy.

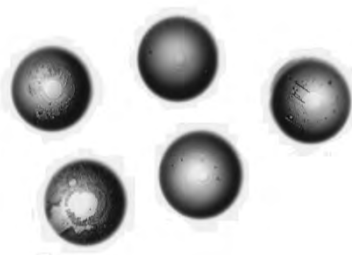
1.3. Elektronowa mikroskopia skaningowa

Obraz struktury porowatej węgla wykonano dla reprezentatywnej próbki KARNI51 o najwyższych parametrach struktury mikroporowatej z użyciem wysokorozdzielczego mikroskopu skaningowego Quanta 3D FEG (SEM/FIB) w powiększeniu 50x. Dodatkowo wykonano zdjęcia prekursora i karbonizatu za pomocą mikroskopu optycznego Motic BA310 przy czterokrotnym powiększeniu.

2. Analiza danych i wyniki badań

2.1. Morfologia powstałych materiałów węglowych

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednio zdjęcia prekursora (żywica jonowymienna Amberjet 1200H) i karbonizatu KAR1563, wykonane z użyciem mikroskopu optycznego. Proces karbonizacji nie wpływa destrukcyjnie na kształt i formę karbonizatu. Widoczne jest skurczenie materiału prekursora oraz utrzymanie wytrzymałości mechanicznej. Kulisty kształt cząstek po procesie aktywacji zostaje zniszczony, lecz powstaje dobrze rozwinięta struktura mikroporowata. Rysunek 4 przedstawia zdjęcie reprezentatywnej próbki, tzn. węgla KARNI51, wykonane przy użyciu mikroskopu SEM w powiększeniu 50-krotnym.



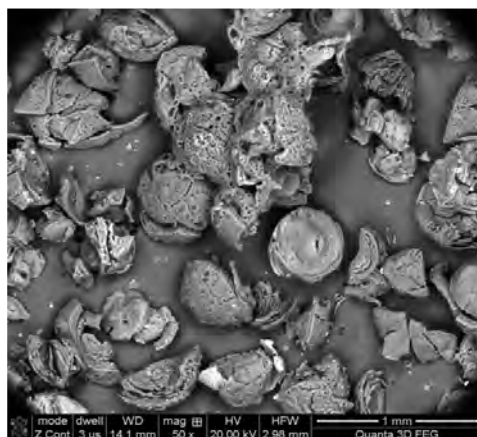
Rys. 2. Zdjęcie próbek prekursora, tj. jonitu 1200 H

Fig. 2. Image of samples precursor - ion exchanger 1200 H



Rys. 3. Zdjęcie karbonizatu 1563 wykonane pod mikroskopem optycznym

Fig. 3. Image of char 1563 under an optical microscope



Rys. 4. Zdjęcie próbki węgla aktywnego KARNI51 w powiększeniu 50-krotnym

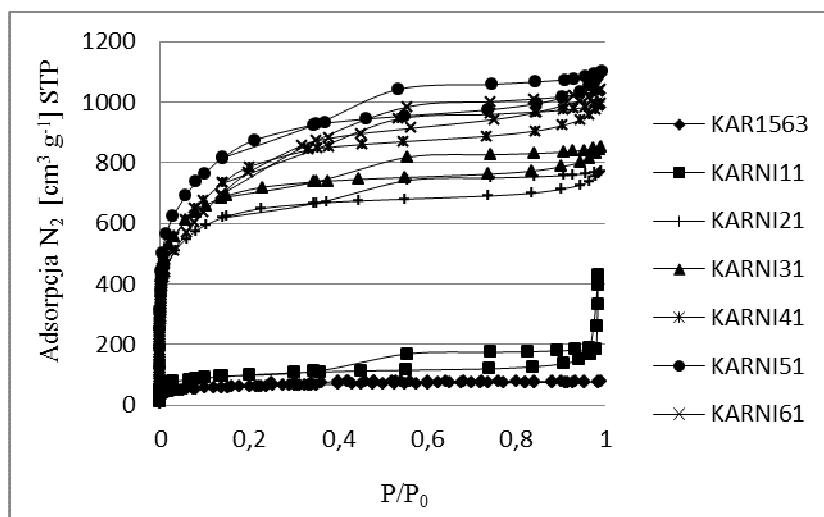
Fig. 4. Image of activated carbon KARNI51 sample enlarged 50 times

2.2. Struktura otrzymanych węgli aktywnych

Proces aktywacji wodorotlenkiem potasu prowadzi do otrzymania węgla o bardzo dużej powierzchni właściwej S_{BET} , rzędu 2200÷2900 m²/g (tab. 1). Wartości przyjęte do obliczeń były z zakresu ciśnień względnych od 0,05 do 0,15. Zsyntetyzowane węgle charakteryzują się wąskim rozkładem rozmiaru porów w zakresie 0,5÷3,5 nm. Według literatury, najbardziej optymalnym rozmiarem porów wykorzystywanych do celów adsorpcji wodoru jest wymiar porów o wielkości 0,7 nm [16]. Potwierdzają to wykresy na rysunkach 6 i 7 dla węgla KARNI51, dla którego udział objętościowy tych porów w otrzymanej serii węgli jest największy.

Na rysunku 5 przedstawiono izotermy adsorpcji-desorpcji azotu w temperaturze 77 K dla grupy węgli KARNI oraz karbonizatu KAR1563. Przedstawione izotermy

są izotermami I typu wg klasyfikacji IUPAC, co potwierdza mikroporowaty charakter otrzymanych węgli aktywnych - można zauważyć wysokie wartości adsorpcji w zakresie niskich ciśnień względnych. Pętla histerezy w ciśnieniach względnych bliskich jedności świadczy o obecności niewielkiej ilości wąskich mezoporów.

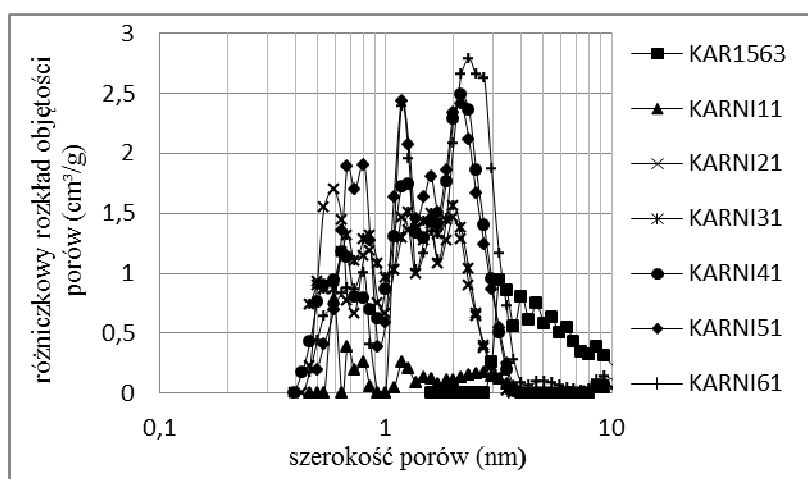


Rys. 5. Izotermy adsorpcji-desorpcji azotu w temperaturze 77 K dla węgli KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61 oraz karbonizatu KAR1563

Fig. 5. Adsorption-desorption isotherms of nitrogen at 77 K for series carbons: KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61 and char KAR1563

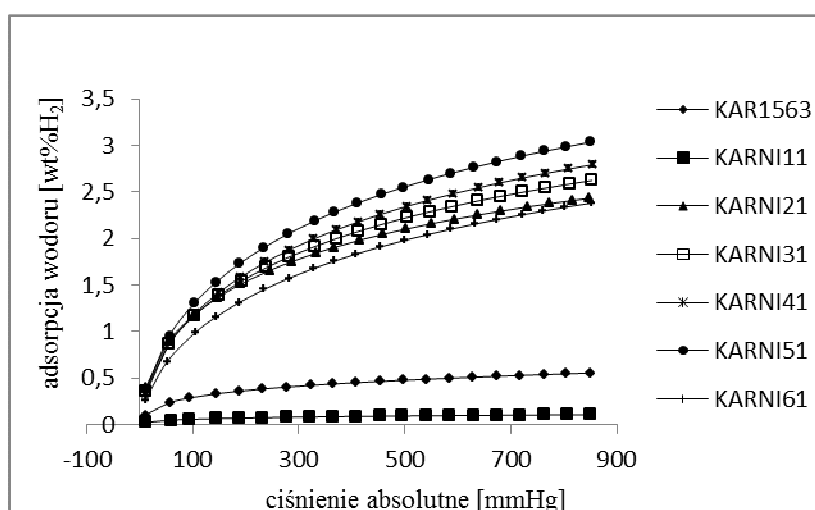
Na rysunku 6 przedstawiono wykres zależności różniczkowego rozkładu objętości porów w funkcji szerokości porów wyznaczonych za pomocą metody DFT. Wzrost stężenia substancji aktywującej powoduje rozwinięcie struktury mikroporowatej, co potwierdza znaczny udział objętościowy porów o szerokości rzędu $0,5 \div 2$ nm. Dla próbki węgla KARNI61 zauważalny jest spadek wartości powierzchni właściwej S_{BET} oraz wzrost udziału wąskich mezoporów. Spowodowane jest to zbyt dużą ilością wodorotlenku potasu użytego do aktywacji. Nadmiar substancji aktywującej powoduje poszerzenie mikroporów do mezoporów o szerokości z zakresu $2 \div 4$ nm.

Zastosowanie różnych ilości wodorotlenku potasu w procesie aktywacji karbonizatu KAR1563 ma decydujący wpływ na ostateczną strukturę porowatą. Wzrost adsorpcji wodoru jest następstwem użytej coraz większej ilości substancji aktywującej (rys. 7 i 8). Rysunek 8 uzasadnia fakt, iż ze wzrostem stężenia substancji aktywującej oraz powierzchni właściwej węgiel aktywny posiada coraz większą objętość porów oraz zdolność magazynowania wodoru. W tabeli 1 przedstawiono parametry struktury porowatej węgli: KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61 oraz karbonizatu KAR1563.



Rys. 6. Wykres zależności różniczkowego rozkładu objętości porów w funkcji szerokości porów dla karbonizatu KAR1563 oraz serii węgli KARNI11 - KARNI61

Fig. 6. Graph of the relationship of differential pore volume distribution as a function of the pore width of the char KAR1563 and series of activated carbons: KARNI11 - KARNI61

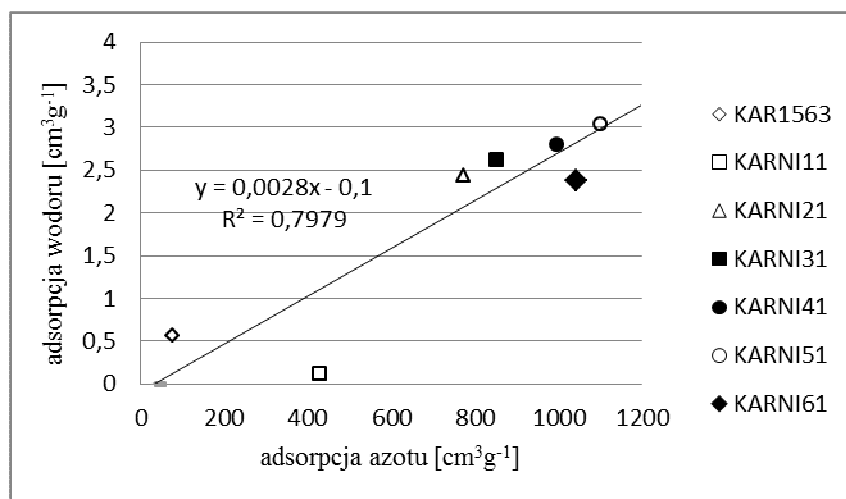


Rys. 7. Izotermy adsorpcji wodoru w temperaturze 77 K dla węgli KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61

Fig. 7. Hydrogen adsorption isotherms at 77 K for carbons KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61

Wraz ze wzrostem ilości wodorotlenku potasu użytego do aktywacji karbonizatu zauważalny jest wzrost wartości powierzchni właściwej (S_{BET}) obliczonej metodą BET. Wyjątkiem jest próbka KARNI61, której szkielet uległ zniszczeniu ze względu na zbyt dużą ilość agresywnego środowiska KOH. Z żywicy Amberjet

1200H otrzymano karbonizat o zakresie wąskich mezoporów (rys. 6), powstałych podczas pirolizy już pierwotnie porowatych jonitów. Natomiast w przypadku węgla KARNI11 spadek wartości powierzchni właściwej wynika ze zbyt małej ilości wodorotlenku potasu i kontaktu z powietrzem podczas aktywacji. Ma tutaj miejsce destrukcja wstępnej struktury karbonizatu KAR1563, która została niedostatecznie rozwinięta podczas aktywacji z powodu małej koncentracji substancji aktywującej.



Rys. 8. Zależność adsorpcji wodoru (77 K, 760 mm Hg) w funkcji adsorpcji azotu (77 K, 760 mm Hg) dla karbonizatu KAR1563 oraz węgli KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61

Fig. 8. The relationship of the adsorption of hydrogen (77 K, 760 mm Hg) as a function of the adsorption of nitrogen (77 K, 760 mm Hg) for char KAR1563 and carbons KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61

Na ostateczne właściwości produktów syntezy mają szczególny wpływ ilość oraz dobór substancji aktywującej. Zaproponowany wodorotlenek potasu generuje strukturę porowatą o średniej wartości wymiarów porów z zakresu od 2 do 13 nm (tab. 1). Porównanie parametrów struktury porowatej węgli aktywnych wyznaczonych przy użyciu izoterm azotowych (rys. 5 i 6) pozwala określić najlepsze predyspozycje materiału do magazynowania w swojej masie wodoru (rys. 8). Izotermy adsorpcji wodoru potwierdzają, że próbka KARNI51 charakteryzująca się najwyższymi parametrami strukturalnymi posiada najlepsze właściwości sorpcyjne z fazy gazowej jednocześnie dla azotu i wodoru (rys. 8). Wynika to z dużej wartości powierzchni właściwej $S_{\text{BET}} = 2971 \text{ m}^2/\text{g}$ zdolnej do efektywnego magazynowania w swojej strukturze porowatej gazów.

Wartości parametrów strukturalnych wytworzonych węgli przewyższają komercyjnie dostępne materiały pozyskane z prekursorów ligninocelulozowych, takich jak pestki śliwek, czy łupin orzecha kokosowego (tab. 2).

Tabela 1. Parametry struktury porowatej węgla KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61 oraz karbonizatu KAR1563

Table 1. The parameters of the porous structure of carbons KARNI11, KARNI21, KARNI31, KARNI41, KARNI51, KARNI61 and char KAR1563

Nazwa próbki	Powierzchnia właściwa	Całkowita objętość porów	Średnia wartość szerokości porów*
	S_{BET} , m ² /g	V_{T} , cm ³ /g STP	D, nm
KAR1563	510	0,12	7,73
KARNI11	349	0,4	8,04
KARNI21	2298	1,35	2,36
KARNI31	2384	1,3	12,95
KARNI41	2818	1,53	5,00
KARNI51	2971	1,68	2,25
KARNI61	2434	1,6	2,18

* średnia ważona

Tabela 2. Porównanie parametrów strukturalnych wytworzonych materiałów węglowych do komercyjnych węgla aktywnych

Table 2. Comparison of structural parameters of produced carbon materials with commercial activated carbons

Nazwa próbki	Powierzchnia właściwa	Całkowita objętość porów	Objętość mikroporów
	S_{BET} , m ² /g	V_{T} , cm ³ /g	V_{μ, N_2} , cm ³ /g
Karbonizat 1563	510	0,397	0
KARNI51	2971	1,68	0,9
PLWK*	1197	0,52	0,41
NORIT R0,8*	1599	0,8	0,49

* dane otrzymane z pomiarów autorskich

Podsumowanie i wnioski

Zsyntezowano grupę węgla aktywnych, wykorzystując jako materiał wyjściowy żywicę jonowymienną Amberjet 1200 H. Uzyskane węgle poddano badaniom mającym na celu poznanie i optymalizację procesu rozwijania powierzchni przy użyciu wodorotlenku potasu. Największą powierzchnią właściwą (2971 m²/g) charakteryzował się węgiel KARNI51 uzyskany przy stosunku stężeń karbonizat: wodorotlenek potasu 1:5. Tak duża wartość powierzchni BET jest spowodowana dużym udziałem mikroporów o wymiarach od 0,5 do 2 nm i pewnej ilości, bardzo wąskim, mezoporów od 2 do 4 nm. Pozwala to na adsorbowanie cząsteczek wodoru co obrazuje izoterma adsorpcji (rys. 7). Zależność pomiędzy wyznaczoną adsorpcją wodoru na węglach a parametrami obliczonymi za pomocą aparatów matematycznych, wykorzystujących dane z badań azotu w temperaturze skroplenia,

przedstawia rysunek 8. Rozwinięcie struktury mikroporowatej - objętość porów warunkuje lepsze zmagazynowanie wodoru na adsorbencie.

Zasadniczą różnicą między zsyntezowanymi a powszechnie używanymi węglami jest powierzchnia właściwa oraz rozkład porów. Sorbenty pozyskiwane z materiałów lignocelulozowych charakteryzują się strukturą mikro-mezoporowatą, zaś te zsyntezowane z żywic jonowymiennych są mikroporowate o niewielkim udziale wąskich mezoporów z zakresu 2 do 13 nm. Rozwinięcie struktury porowatej węgla w zakresie mikroporów pozwala na znaczną poprawę adsorpcji małych cząsteczek wodoru.

Niestety mimo prób sprostania wymogom DOE nie udało się osiągnąć stawianych granic aplikacyjnych tzn. adsorpcji wodoru na poziomie 6,5% masy użytego adsorbentu.

Literatura

- [1] Wang Q., Liang X., Qiao W., Liu Ch., Liu X., Zhan L., Ling L., Preparation of polystyrene-based activated carbon spheres with high surface area and their adsorption to dibenzothiophene, *Fuel Processing Technology* 2009, 90, 381-387.
- [2] Dias J.M., Alvim-Ferraz M.C.M., Almeida M.F., Rivera-Utrilla J., Sanchez-Polo M., Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review, *J. Environ. Manage.* 2007, 85, 833-846.
- [3] Szmigielski R., Zietek S., Swiatkowski A., Palijczuk D., Kielczewski M., Non-carcinogenic carbon sorbents for respiratory protection, *J. Hazard Mater.* 2009, April, 30, 163(2-3).
- [4] Bratek W., Świątkowski A., Pakuła M., Biniak S., Bystrzejewski M., Szmigielski R., Characteristics of activated carbon prepared from waste PET by carbon dioxide activation, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2013, 100, 192-198.
- [5] Jincheng Wei, Peng Liang, Xiaoxin Cao, Xia Huang, Use of inexpensive semicoke and activated carbon as biocathode in microbial fuel cells, *Bioresource Technology* 2011, 102, 10431-10435.
- [6] Centeno T.A., Rubiera F., Stoeckli F., Recycling of residues as precursors of carbons for supercapacitors, *Proceedings of the 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco-Energy, Madrid 2009, S04-2.*
- [7] Parra J.B., Ania C.O., Arenillas A., Rubiera F., Pis J.J., High value carbon materials from PET recycling, *Applied Surface Science* 2004, 238, 304-308.
- [8] Nowicki J.P., Wodór jako nowy nośnik energii, Ossolineum, Wrocław 1983.
- [9] Surygała J., Wodór jako paliwo, WNT, Warszawa 2008.
- [10] Sevilla M., Fierrez A.B., Mokaya R., Preparation and hydrogen storage capacity of highly porous activated carbon materials derived from polythiophene, *International Journal of Hydrogen Energy* 2011, 36.
- [11] Jorda-Beneyto M., Suarez-Garcia F., Lozano-Castello D., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A., Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressures, *Carbon* 2007, 45.
- [12] Buczek B., Czepirski L., Cryoadsorption of hydrogen on carbonaceous materials, [w:] *Paliwa i Energia XXI wieku*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2004, 195-198.
- [13] Jimenez V., Ramirez-Lucas A., Sanchez P., Valverde J.L., Romero A., Hydrogen storage in different carbon materials: Influence of the porosity development by chemical activation, *Applied Surface Science* 2012, 258.
- [14] Czepirski L., Buczek B., Adsorpcja wodoru na materiałach węglowych, *Mat. konf. Węgiel aktywny w ochronie środowiska i przemyśle*, Częstochowa-Ustroń 2004.

- [15] Czepirski L., Porowate materiały węglowe w układach magazynowania energii, Gospodarka surowcami mineralnymi, Kraków 2007.
- [16] Sevilla M., Fuertes A.B., Mokaya R., Preparation and hydrogen storage capacity of highly porous activated carbon materials derived from polythiophene, *International Journal of Hydrogen Energy* 2011, 36.
- [17] Texier-Mandoki N., Dentzer J., Piquero T., Saadallah S., David P., Vix-Guterl C., Hydrogen storage in activated carbon materials: Role of the nanoporous texture, *Letters to the Editor, Carbon* 2004, 42.
- [18] Zubizarreta L., Arenillas A., Pis J.J., Carbon materials for H₂ storage, *International Journal of Hydrogen Energy* 2009, 34, 4575-4581.
- [19] Marsh H., Yan D.S., O'Grady T.M., Wennerberg A., Formation of active carbons from cokes using potassium hydroxide, *Carbon* 1984, 22, 603-611.
- [20] Maciá-Agulló J.A., Moore B.C., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A., Chemical activation by KOH and NaOH of carbon materials with different crystallinity, *Proceedings of Carbon'03, Int. Conf. on Carbon, CD-ROM, Oviedo* 2003.
- [21] Lozano-Castello D., Lillo-Rodenas M.A., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A., Preparation of activated carbons from Spanish anthracite I. Activation by KOH, *Carbon* 2001, 39, 741-749.
- [22] Khezami L., Chetouani A., Taouk B., Capart R., Production and characterisation of activated carbon from wood components in powder: Cellulose, lignin, xylan, *Powder Technology* 2005, 157, 48-56.
- [23] Evans M.J.B., Halliop E., MacDonald J.A.F., The production of chemically-activated carbon, *Carbon* 1999, 37, 269-274.
- [24] Teng H., Wang S., Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation, *Carbon* 2000, 38, 817-824.
- [25] Wu M., Zha Q., Qiu J., Guo Y., Shang H., Yuan A., Preparation and characterization of porous carbons from PAN-based preoxidized cloth by KOH activation, *Carbon* 2004, 42, 205--210.
- [26] Verheyen V., Rathbone R., Jagtoyen M., Derbyshire F., Activated extrudates by oxidation and KOH activation of bituminous coal, *Carbon* 1995, 33, 763-772.
- [27] Texier-Mandoki N., Dentzer J., Piquero T., Saadallah S., David P., Vix-Guterl C., Hydrogen storage in activated carbon materials: Role of the nanoporous texture, *Carbon* 2004, 42, 2744-2747.
- [28] Dillon A.C., Heben M.J., Hydrogen storage using carbon adsorbents: past, present and future, *Appl. Phys. A* 2001, 72, 133-142.

Synthesis and Adsorption Properties of Microporous Activated Carbons Obtained from Ion Exchange Resins Based on a Copolymer of Styrene and Divinylbenzene

In this work was attempted to use the residual material in the form of an ion exchange resin Amberjet 1200H-based copolymer of styrene and divinylbenzene. The aim of this study was to obtain activated carbons with high values of adsorption parameters. Assessments of the suitability of the materials were derived using nitrogen adsorption isotherms at 77 K and hydrogen at 77 K. There were obtained powdered activated carbons, which had the best surface area of 2900 m² at g⁻¹ and a hydrogen adsorption at 3 wt. %. The resulting material was compared to commercially available activated carbons derived from other waste materials.

Keywords: activated carbon, porous structure, ion exchange resin