

WŁAŚCIWOŚCI POWIERZCHNIOWE KORZENI WYBRANYCH ROŚLIN
JEDNOLIŚCIENNYCH I DWULIŚCIENNYCH, OZNACZANE METODĄ
ADSORPCJI-DESORPCJI PARY WODNEJ I AZOTU

Alicja Szatanik-Kloc

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

e-mail: akloc@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W badaniach wykorzystano materiał korzeniowy roślin jednoliściennych (pszenica jara Lanca, jęczmień jary Ars) i roślin dwuliściennych (rzepak jary Star, gorczyca biała Nakielska). Wzrost i rozwój roślin odbywał się w kulturach wodnych o pH = 7, przy ściśle kontrolowanym składzie pożywki (Marshner i Remhold), w cyklu dobowym 16h nocy/8h dnia, w temperaturze 23°C (dzień) i 16°C (noc). Izotermmy adsorpcji-desorpcji wyznaczano dwoma adsorbatami; parą wodną i azotem. Powierzchnie właściwe materiału korzeniowego, funkcję rozkładu energii adsorpcji i średnią jej wartość, wyznaczano w oparciu o teorię adsorpcji Aranowicza. Powierzchnie właściwe badanego materiału korzeniowego oznaczane azotem (tzw. swobodne) były mniejsze od powierzchni właściwych oznaczanych parą wodną (tzw. pozornych), podobnie jak średnie energie adsorpcji. Wielkości powierzchni właściwej wyznaczanych azotem bardziej różniły się w obrębie obu grup badanych korzeni roślin jedno i dwuliściennych (większe u roślin dwuliściennych).

Słowa kluczowe: korzenie roślin jedno i dwuliściennych, specyficzna powierzchnia właściwa, energia adsorpcji azotu i pary wodnej

WSTĘP

Do opisu poboru i transportu wody oraz składników pokarmowych przez rośliny, najczęściej stosuje się dwie wielkości: pojemność jonowymienną korzeni (CEC) i powierzchnię właściwą (S). Z reguły uważa się, że korzenie roślin dwuliściennych posiadają dwukrotnie większą pojemność jonowymienną, niż korzenie roślin jednoliściennych, pobierają więc one kationy jednowartościowe we względnie mniejszych ilościach. Z tego powodu, w siedliskach naturalnych, gdzie występuje istotny deficyt kationów jednowartościowych (głównie K⁺), rośliny jednoliściennne eliminują dwuliściennne z populacji mieszanych. Gdy istnieje niedobór jonów wielowartościowych, sytuacja odwraca się na korzyść korzeni roślin

dwuliściennych [20]. Pojemność kationowymienna korzeni zależy od grup karboksylowych pektyn, hemicelulozy, protein ściany komórkowej, fosfolipidów i protein membran plazmatycznych [9,18]. Powierzchnia właściwa w fizjologii roślin jest rzadziej stosowaną wielkością. Niemniej jednak wykorzystuje się ją w wielu modelach matematycznych opisujących pobór wody i składników pokarmowych przez roślinę [1,12]. Różnice w wielkości CEC korzeni roślin jednoliściennych i dwuliściennych [9,20] pozwalają przypuszczać, że i powierzchnie właściwe korzeni tych roślin mogą być różne.

Celem niniejszej pracy było określenie różnic pomiędzy wielkościami powierzchni właściwej i jej charakterystykami energetycznymi dla roślin jednoliściennych i dwuliściennych mierzonymi przy użyciu dwóch adsorbatów o różnych właściwościach (pary wodnej i azotu).

MATERIAŁY I METODY

W badaniach wykorzystano korzenie dwóch roślin jednoliściennych (pszenicy jarej Lanca i jęczmienia jarego Ars), oraz dwóch roślin dwuliściennych (rzepaku jarego Star i gorczycy białej Nakielska) Wzrost roślin odbywał się w kulturach wodnych, o ściśle kontrolowanym składzie i odczynie pożywki, w cyklu dobowym 16godzin nocy/8godzin dnia, temperaturze 23°C (dzień) i 16°C (noc) [8,15,16]. Nasiona wysiano do napowietrzanych polietylenowych pojemników (o pojemności 5 dm³) zaopatrzonych w styropianowe wkładki z nawierconymi otworami. Spodnią stronę wkładki zabezpieczała siatka. Pomiędzy wkładką a siatką umieszczono bibułę filtracyjną. Do każdego pojemnika wysiano: dla roślin gruboziarnistych po 80 nasion, a dla roślin drobnoziarnistych wysiano 1g nasion na pojemnik. Po sześciu tygodniach od skiełkowania rośliny zebrano. Oddzielono korzenie od części nadziemnych. Doświadczenie przeprowadzono w trzech powtórzeniach. Zebrane korzenie roślin przepłukano 0,001N kwasem solnym i trzykrotnie wodą destylowaną w celu odmycia zaadsorbowanych wymiennie jonów powierzchniowych (standaryzacja próbki).

Do określenia wielkości powierzchni właściwej badanych korzeni zastosowano dwa adsorbaty – parę wodną i azot. Jednym z wymogów metody pomiarów izoterm adsorpcji azotu jest usunięcie wody, co osiąga się najczęściej w procesie wstępnego suszenia adsorbentów w temperaturze 387 K. Chociaż w fizjologii roślin przyjmuje się, że usunięcie z tkanek roślinnych wody nie związanej chemicznie czyli otrzymanie tzw. suchej masy następuje w temperaturze 105°C [21], tak wysoka temperatura suszenia może prowadzić do nieodwracalnych zmian materiału korzeniowego, między innymi w wyniku denaturacji białek i zmian strukturalnych związków organicznych. W konsekwencji może to prowadzić do zmniejszenia powierzchni badanego materiału. Również z punktu widzenia fizjologii roślin

wstępna maceracja tkanek korzeniowych byłaby błędem. Badany materiał korzeniowy suszono zatem w łagodniejszych warunkach. Zebrane korzenie (o tzw. świeżej masie) umieszczono w suszarce w temperaturze 30°C na 48 godzin¹. W ten sposób uzyskano materiał o tzw. Powietrznie suchej masie (usunięto wodę wypełniającą przestwory międzykomórkowe, pory interfibrylarne i intermicelarne ściany komórkowej, wolną wodę wakuoli i cytoplazmy. Pozostała część wody związanej fizycznie w tkance roślinnej stanowi integralną część koloidów wewnątrzkomórkowych oraz błon cytoplazmatycznych) [21]. Tak otrzymany materiał korzeniowy o powietrznie suchej masie rozdzielono na dwie części. Jedną część wykorzystano w metodzie adsorpcji-desorpcji pary wodnej, drugą w metodzie adsorpcji-desorpcji azotu.

Pomiar izoterm adsorpcji-desorpcji pary wodnej przeprowadzono w temperaturze $293 \pm 0,1$ K. Z uwagi na to, że badany materiał korzeniowy o powietrznie suchej masie mógł zawierać jeszcze część wody związanej fizycznie, umieszczono go w naczynkach wagowych, w komorze próżniowej nad stężonym kwasem siarkowym i ważono co 24 godziny, aż do momentu uzyskania stałej wagi (masa próbek nie zmieniała się co najmniej przez kolejne trzy dni). Różnica pomiędzy masą próbek wstępnie suszonych w 30°C a masą próbek przetrzymywanych nad stężonym kwasem siarkowym wynosiła 2-3%. Następnie postępowano zgodnie z procedurą zalecaną przez Polską Normę PN-Z-19010-1. Próbki materiału korzeniowego umieszczono w próżni nad roztworami kwasu siarkowego o kolejno malejącej gęstości (adsorpcja), a następnie o kolejno wzrastającej gęstości (desorpcja). Po 48 godzinach pobytu w komorze określano masę próbek poprzez ważenie oraz równowagową względną prężność pary wodnej w komorze p/p_0 , poprzez pomiary gęstości kwasu siarkowego. Ilość zaadsorbowanej pary wodnej przy danym p/p_0 obliczano z różnicy masy próbki ważonej przy danym p/p_0 i suchej masy danej próbki, określanej po zakończeniu pomiarów izoterm, po 24 godzinach suszenia próbek w temperaturze 378 K [8,15]. Pomiar izoterm adsorpcji-desorpcji pary wodnej przeprowadzono w trzech powtórzeniach (Różnice nie przekraczały 5%, czyli dopuszczalnego błędu pomiarowego metody).

¹Świeży materiał korzeniowy poddano procesowi suszenia w temperaturze 30 i 105°C (w trzech powtórzeniach, po trzy próbki w każdym). Wyjściowa masa próbki (śr. $0,301 \pm 0,0002$ g) suszona w temperaturze 30°C zmieniała się następująco: po 24 h – 0,281g, po 48 h – 0,276 g, po 72 h – 0,275 g, po 96h – 0,275g i analogicznie wyjściowa masa próbki: (śr. $0,3016 \pm 0,0002$ g) suszona w temperaturze 105°C zmieniała się: po 24 h – 0,276g, po 48 h – 0,276 g, po 72 h – 0,276g, po 96 h – 0,276 g. Różnice pomiędzy powietrznie suchą masą a suchą masą materiału korzeniowego, po 24 godzinach suszenia wynosiła około 2%. Po 48 godzinach masa próbek suszonych w 30°C była zbliżona do masy próbek suszonych w 105°C po 24 godzinach. Próbki wykorzystane w dalszych badaniach suszono w temperaturze 30°C przez 48 godzin.

Izotermy adsorpcji-desorpcji azotu wyznaczano w temperaturze wrzenia ciekłego azotu przy wykorzystaniu firmowego aparatu Sorptomatic 1990 firmy CE FISOONS i programu Milestone 200 [17]. Materiał korzeniowy, o tzw. powietrznie suchej masie przeniesiono do biurety pomiarowej i poddano procesowi odgazowywania do momentu osiągnięcia próżni. Biuretę pomiarową z próbką umieszczono w łaźni z ciekłym azotem i przeprowadzono analizę adsorpcji a następnie desorpcji azotu [16]. Do opisu danych doświadczalnych zastosowano model adsorpcji Aranowicza [2], który w formie liniowej wyraża się równaniem:

$$x/[a(1-x)^{1/2}] = 1/(a_m C) + x/a_m \quad (1)$$

gdzie a ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) jest ilością zaadsorbowanego adsorbentu (pary wodnej lub azotu) przy $p/p_0 = x$, a_m ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) to statystyczna pojemność monowarstwy, C – stała, gdzie $C = \exp\{(E_a - E_c)/RT\}$, E_a ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) – energia adsorpcji, E_c ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) – energia kondensacji adsorbentu, R ($\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) – stała gazowa w T (K) temperaturze. Równanie Aranowicza wyprowadzone jest w oparciu o model adsorpcji zlokalizowanej na powierzchni homogenicznej. W odróżnieniu od najczęściej stosowanego równania BET, równanie Aranowicza uwzględnia możliwość tworzenia się wakansów w warstwie adsorpcyjnej. Zarówno równanie Aranowicza jak i BET wyprowadzone było dla adsorbentów, na których wyraźnie można oznaczyć granicę pomiędzy procesem adsorpcji a absorpcji. Dla adsorbentów organicznych granica ta jest trudna od oznaczenia [15]. Dlatego też Chiou i współautorzy zaproponowali w przypadku adsorbentów organicznych stosowanie zamiast terminu *surface area* (powierzchnia właściwa rzeczywista, biorąca udział w adsorpcji powierzchni adsorbentu, przypadająca na jednostkę masy) terminu *apparent surface area* dla powierzchni oznaczanych polarnym adsorbentem i terminu *free surface area* dla powierzchni oznaczanych azotem [3,11].

Powierzchnię właściwą (zarówno pozorną jak i swobodną) obliczono z równania:

$$S = L \cdot \omega \cdot a_m / M \quad (2)$$

ω = jest powierzchnią zajmowaną przez jedną molekułę adsorbentu (wody lub azotu) czyli powierzchnia siadania, L (mol^{-1}) to liczba Avogadro, M ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) masa cząsteczkowa adsorbentu, a_m jest to pojemność monowarstwy ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), wyrażona poprzez ilość zaadsorbowanego adsorbentu przy określonej prężności danego adsorbentu (pary wodnej lub azotu), w danej temperaturze, przy określonej energii adsorpcji i energii kondensacji oraz stałej gazowej RT . Pojemność monowarstwy wyznaczono na podstawie danych doświadczalnych adsorpcji z przedziału względnych ciśnień p/p_0 od 0,05 do 0,65.

Niejednorodność energetyczną badanych adsorbentów wyznaczono z danych eksperymentalnych adsorpcji na podstawie teorii adsorpcji na powierzchniach heterogenicznych [7,8,13]. Niejednorodność energetyczną charakteryzuje funkcja rozkładu energii adsorpcji, pokazująca względny udział (frakcji) poszczególnych i -centrów adsorpcyjnych na całkowitej powierzchni adsorbenta. Niejednorodność energetyczna charakteryzowana poprzez funkcję rozkładu energii, dotyczy układu adsorbent-adsorbat i dostarcza nam informacji o miejscach adsorpcyjnych (tych miejscach, które „odnajdują” cząsteczki adsorbentu podczas procesu adsorpcji). Funkcje rozkładu energii adsorpcji obliczono za pomocą następującej formuły

$$f(E_i) = [(1 - x_{i+1})^{1/2} \Theta_1(E_{i+1}) + (1 - x_i)^{1/2} \Theta_1(E_i)] / (E_{i+1} - E_i) \quad (3)$$

gdzie: x_i – dane p/p_0 , x_{i+1} – kolejna wartość p/p_0 , izoterma lokalna $\Theta_1 = a/a_m$, a_m ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) – statystyczna pojemność monowarstwy, E_i – energia adsorpcji i -centrów adsorpcyjnych oraz E_{i+1} – kolejnych frakcji. Energia adsorpcji związana jest z ciśnieniem adsorbentu w następujący sposób:

$$\exp(E_i/RT) = (p/p_{0i})^{-1} \quad (4)$$

Funkcja $f(E_i)$ musi spełniać warunek normalizacji:

$$\sum_{i=1}^n f(E_i) = 1. \quad (5)$$

W oparciu o wartości funkcji rozkładu energii obliczono średnią energię adsorpcji E_{av} :

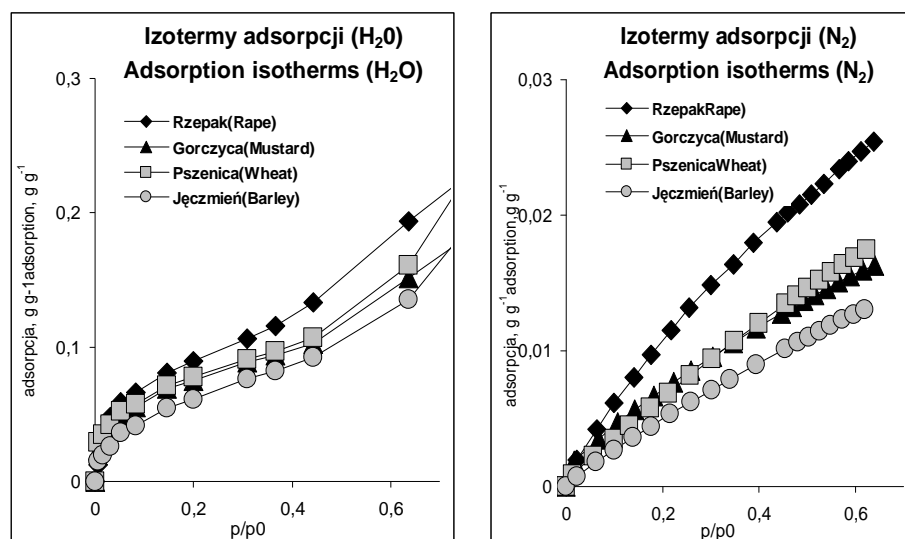
$$E_{av} = \sum E_i \cdot f(E_i). \quad (6)$$

Średnia energia adsorpcji jest średnią statystyczną dla danej powierzchni adsorbenta. Funkcja rozkładu energii adsorpcji oparta na danych doświadczalnych wielkości adsorpcji i charakteryzująca układ adsorbent-adsorbat daje informacje o względnej niejednorodności energetycznej powierzchni.

WYNIKI I DYSKUSJA

Izotermy adsorpcji pary wodnej i azotu na badanym materiale korzeniowym prezentowane są na rysunku 1. Ilość zaadsorbowanej pary wodnej przez badane korzenie jest znacznie wyższa (max. $0,3 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) od ilości zaadsorbowanych molekuł azotu (max. $0,03 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$). Ilościowe różnice w adsorpcji pomiędzy badanymi korzeniami są dobrze scharakteryzowane poprzez wielkości ich powierzchni, określanej na podstawie danych adsorpcyjnych. Adsorpcja azotu jest wyraźnie

bardziej zróżnicowana. Wielkości powierzchni właściwej dla pary wodnej, są znacznie wyższe od powierzchni tych samych sorbentów oznaczanych azotem.²



Rys. 1. Izotermy adsorpcji pary wodnej i azotu na korzeniach roślin jednoliściennych (pszenica Lanca i jęczmień Ars) i dwuliściennych (rzepak Star i gorczyca biała Nakielska)

Fig.1. Isotherms of water vapour and nitrogen adsorption on roots of monocotyledonous (wheat cv. Lanca and barley cv. Ars) and dicotyledonous (rape cv. Star and white mustard cv. Nakielska) plants

Obliczone na podstawie izoterm adsorpcji pary wodnej wielkości pozornej powierzchni właściwej korzeni mają wyraźny związek z ich powierzchnią rzeczywistością. Całkowita powierzchnia korzeni (wraz z włosnikami) jest bardzo duża i sięga, według obliczeń Dittmera cytowanych w „Biologii” Vilego [19], 765 metrów kwadratowych na pojedynczą roślinę żyta, w czym 480 m² przypada na same włosniki. Cytowana wielkość szacowana jest dla roślin rosnących przez cztery tygodnie w warunkach wazonowych. Rośliny takie wykształcają więcej włosników niż rośliny rosnące w pożywkach hydroponicznych. Otrzymane w przeprowadzonym doświadczeniu hydroponicznym wielkości powierzchni rzędu 300 metrów kwadratowych na gram korzeni wydają się więc całkiem realne. Różnice

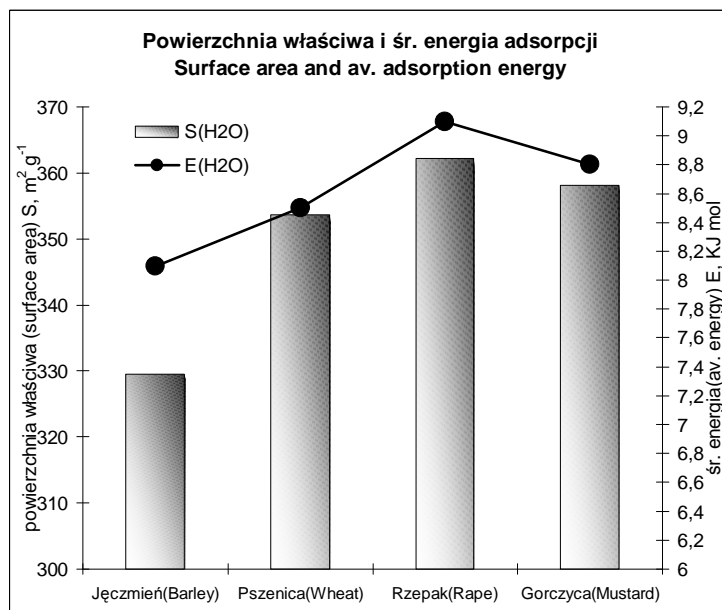
²Uwzględniając różnice pomiędzy powietrznie suchą masą a suchą masą (ok. 2% pomiędzy suszeniem w temperaturze 30 a 105°C i różnicę podczas dosuszania próbek nad kwasem max. 3%) powierzchnia właściwa badanych korzeni przy wykorzystaniu molekuł pary wodnej będzie wynosić ok. 300 ± 10-16m² różnicy na gram s.m. materiału korzeniowego. Sucha masa badanych korzeni 6-tygodniowej rośliny wynosiła śr. 0,03 g.

pomiędzy wielkością pozornej powierzchni właściwej a tzw. swobodną powierzchnią właściwą oznaczaną azotem mogą wynikać między innymi z różnych centrów adsorpcyjnych; dla wody są to centra polarne dla azotu niepolarne. W korzeniach roślin zdecydowanie dominują polarne centra adsorpcyjne, głównie grupy karboksylowe, hydroksylowe (fosforanów, peptydów, łańcuchów alifatycznych i aromatycznych, z których zbudowane są tkanki roślinne). Zarówno budowa biochemiczna jak i anatomiczna różnorodnych komponentów komórek korzenia (min. ściany komórkowej i membran cytoplazmatycznych) tworzących tkanki decyduje o ich geometrii i o heterogeniczności powierzchni właściwej korzeni. Dla sorbentów naturalnych często wielkość powierzchni zależy od stopnia jej zróżnicowania, co z kolei wpływa na jej charakter energetyczny. W niniejszych badaniach zauważono również, że energia adsorpcji (energia układu adsorbent-adsorbat) koreluje z wielkością powierzchni właściwej badanego materiału korzeniowego, zarówno w przypadku zastosowania pary wodnej jak i azotu. Współczynnik korelacji³ pomiędzy powierzchnią właściwą a średnią energią adsorpcji pary wodnej wynosił $r = 0,91$, a pomiędzy powierzchnią a energią adsorpcji azotu $r = 0,94$. Na rysunku 2 i na rysunku 3 można zaobserwować, że mniejszym wartościom powierzchni właściwej odpowiadają i niższe wartości średniej energii adsorpcji. Wśród badanych korzeni roślin najmniejszą powierzchnią właściwą i najniższą średnią energią adsorpcji posiadał jęczmień jary a największe wartości powierzchni właściwej i średniej energii adsorpcji zaobserwowano u rzepaku.

Powierzchnię właściwą (zarówno pozorną jak i swobodną) należy traktować jako względną wielkość powierzchni adsorbentu i rozumieć jako powierzchnię adsorbentu z jej nieregularnościami o wymiarach większych lub porównywalnych z wielkościami cząstek adsorbentu [11]. Stąd też, wielkość wyznaczanej powierzchni właściwej może zależeć od pola powierzchni cząsteczki adsorbentu; pole powierzchni cząsteczki wody wynosi $10,8 \text{ \AA}^2$ natomiast pole powierzchni cząsteczki azotu wynosi; $16,2 \text{ \AA}^2$. Wielkość powierzchni właściwej jest determinowana przez porowatą strukturę adsorbentu. Im mniejsze rozmiary porów tym większe cząsteczki w mniejszym stopniu pokrywają nieregularności powierzchni właściwej. Dlatego też często powierzchnię właściwą oznaczaną azotem nazywa się tzw. powierzchnią właściwą zewnętrzną adsorbentu. Powierzchnię właściwą oznaczaną molekułami pary wodnej określa się mianem tzw. powierzchni właściwej całkowitej [4]. Rodzaj stosowanego adsorbentu ma też wpływ na kinetykę procesu adsorpcji. Według niektórych autorów, jeżeli zwiększymy zarówno czas jej przebiegu jak też obszar, w którym ona zachodzi (zwiększymy czas ustalania

³Współczynnik korelacji liniowej Pearsona, odzwierciedlający stopień liniowej zależności pomiędzy dwoma zbiorami danych [S – (329,5; 353,6; 362,2; 358,8), E-(8,08; 8,5; 9,3; 8,8)] dla (H₂O) $r = 0,916$ i { S (29,1; 45,2; 85; 56,9), E (7,05; 7,08; 7,21; 7,08) } dla (N₂) $r = 0,949$

się równowagi adsorpcyjnej), rodzaj adsorbentu będzie znacznie mniej wpływał na kinetykę procesu adsorpcji, zwłaszcza w wypadku adsorbentów naturalnych [5,6,13].

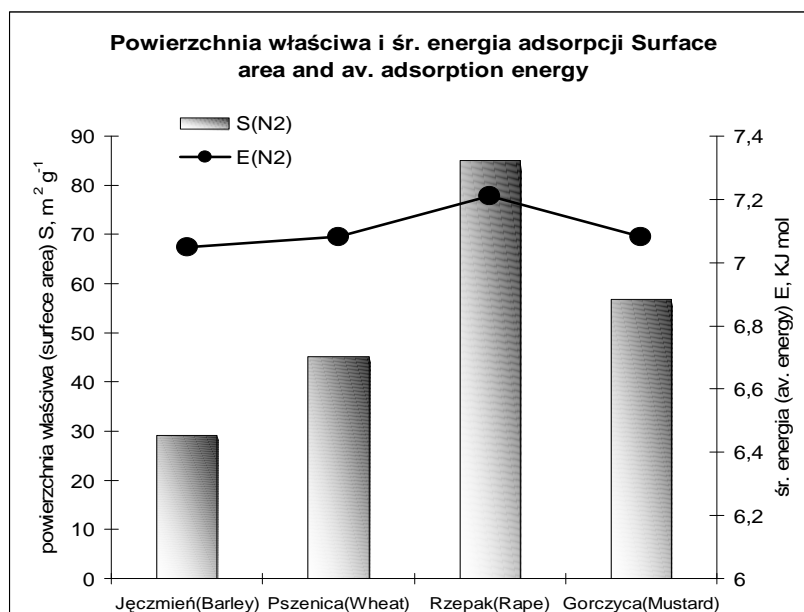


Rys. 2. Pozorna powierzchnia właściwa i śr. energia adsorpcji korzeni roślin jednoliściennych i dwuliściennych (śr. z 3 powtórzeń, oznaczana H₂O)

Fig.2. Apparent surface area and average adsorption energy of roots of monocotyledonous and dicotyledonous plants (av. of 3 replicated experiments, determined by H₂O)

Niemniej jednak, bez względu na rodzaj adsorbentu, powierzchnie właściwe wyznaczone przy pomocy adsorpcji polarnych adsorbatów są najczęściej większe od wielkości powierzchni właściwej wyznaczonej przy pomocy substancji niepolarnych [8,10,14].

Porównując wyniki wielkości powierzchni pomiędzy roślinami obu grup, nie odnotowano istotnych różnic w wypadku zastosowania molekuł pary wodnej. Przy zastosowaniu azotu jako adsorbentu powierzchnie korzeni roślin dwuliściennych były większe od powierzchni korzeni badanych roślin jednoliściennych. Średnie energie adsorpcji przy zastosowaniu obu adsorbatów w wypadku azotu są niższe od średnich energii adsorpcji molekuł pary wodnej. Nie odnotowano wyraźnych różnic w charakterze energetycznym powierzchni obu grup badanych korzeni, w metodzie adsorpcji molekuł pary wodnej (rys. 4.)

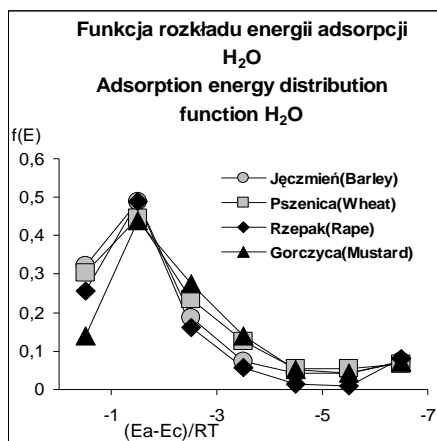


Rys. 3. Swobodna powierzchnia właściwa i średnia energia adsorpcji korzeni roślin jednoliściennych i dwuliściennych (śr. z 3 powtórzeń, oznaczana N₂)

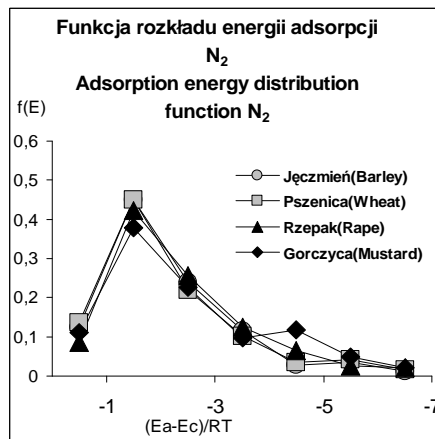
Fig. 3. Free surface area and average adsorption energy of roots of monocotyledonous and dicotyledonous plants (av. of 3 replicated experiments, determined by N₂)

Przy wykorzystaniu azotu jako adsorbentu, rozkłady funkcji energii adsorpcji były również podobne zarówno dla korzeni roślin jednoliściennych, jak i dwuliściennych. Funkcje rozkładu energii adsorpcji azotu dla badanych korzeni prezentowane są na rysunku 5.

Przedstawione wyniki dotyczą wstępnych badań przeprowadzonych na korzeniach wybranych roślin jednoliściennych i dwuliściennych. Potwierdzenie powyższych spostrzeżeń wymaga jednak większej ilości badań, jak też włączenie w te badania pomiarów CEC i ładunku powierzchniowego. Nasuwa się również przypuszczenie, że w przypadku adsorbentów organicznych bardziej korzystnym będzie wstępne suszenie próbek metodą freeze-drying (suszenie w stanie zamrożonym). W przypadku korzeni uzyskamy w ten sposób suchą masę bez maceracji tkanki korzeniowej i pewność, że tzw. woda wolna i pozostała część wody związanej fizycznie w tkance korzeniowej zostanie całkowicie usunięta przed procesem adsorpcji.



Rys. 4. Funkcja rozkładu energii adsorpcji pary wodnej
Fig. 4. Distribution of adsorption energy function for water vapour



Rys. 5. Funkcja rozkładu energii adsorpcji azotu
Fig. 5. Distribution of adsorption energy function for nitrogen

WNIOSKI

1. Wartości powierzchni właściwej (swobodnej – free surface area) badanych korzeni oznaczane azotem są niższe od powierzchni tych samych adsorbentów oznaczanych parą wodną (pozornych powierzchni właściwych – apparent surface area).
2. Powierzchnie właściwe wyznaczone azotem wykazały większe różnice w obrębie obu grup badanych korzeni jedno i dwuliściennych (większe w korzeniach roślin dwuliściennych).
3. Funkcje rozkładu energii adsorpcji przebiegały podobnie w korzeniach roślin jedno i dwuliściennych i ich przebieg był niezależny od rodzaju adsorbentu.
4. Średnie energie adsorpcji w przypadku zastosowania molekuł pary wodnej były wyższe od średnich energii adsorpcji azotu.

PIŚMIENNICTWO

1. **Ansari S.A., Kumar P., Gupta B.N.:** Root surface area measurements based on adsorption and desorption of nitrite. *Plant Soil*, 175, 133-137, 1995
2. **Aranovich G.L.:** The theory of polymolecular adsorption. *Langmuir*, 3, 736-739, 1992.
3. **Chiou C.T., Lee J.F., Boyd S.A.:** The surface area of organic matter. *Environ. Sci. Technol.*, 24, 1164-1166, 1990.
4. **Dechnik I., Stawiński J.:** Powierzchnia właściwa w badaniach fizykochemicznych i fizycznych właściwości gleb. *Problemy Agrofizyki*, 6, 1974.

5. **De Jonge H., Mittelmeier-Hazeleger M.C.:** Adsorption of CO₂ and N₂ on soil organic matter: nature of porosity, surface area and diffusion mechanism. *Environ. Sci. Technol.*, 30, 408-413, 1996.
6. **Gregg S.J., Sing K.S.W.:** Adsorption, Surface Area and Porosity. Academic Press London and New York, 35-223, 1967
7. **Jaroniec M., Rudziński W., Sokołowski S., Smarzewski R.:** Determination of energy distribution function from observed adsorption isotherms. *J. Colloid and Polymer Science*, 253, 164-166, 1975.
8. **Józefaciuk G., Szatanik-Kloc A.:** Changes in specific area and energy of root surface of cereal plants in Al-solution cultures. *Water vapor adsorption studies. Plant and Soil*, 250, 129-140, 2003.
9. **Knight A.H., Crooce W.M., Inkson R.H.E.:** Cation-exchange capacities of tissues of higher and lower plants and their related uronic acid contents. *Nature*, 192, 142-143, 1961.
10. **Matyka-Sarzyńska D., Sokołowska Z.:** Właściwości fizykochemiczne utworów murszowych o różnym stopniu wtórnego przeobrażenia. *Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie*, 6, 2005.
11. **Ościł J.:** Adsorpcja. PWN Warszawa, 1983
12. **Rinkis G.J., Nollendorf W.F.:** Sbalansierownoje pitanie rastienij makro- i mikroelienientami. Wyd. Zinatne, Ryga, 1982.
13. **Sokołowska Z., Hajnos M., Borówko M., Sokołowski S.:** Adsorption of Nitrogen on Thermally Treated Peat Soils: The Role of Energetic and Geometric Heterogeneity *Journal of Colloid and Interface Science*, 219, 1-10, 1999.
14. **Sokołowska Z., Matyka-Sarzyńska D., Bowanko G.:** Specific surface area of Lublin Polesie mucks determined from water vapor and nitrogen adsorption data. *Int. Agrophysics*, 18(4), 363-369, 2004.
15. **Szatanik-Kloc A.:** Wpływ pH i stresu glinowego na właściwości fizykochemiczne powierzchni korzeni roślin zbożowych. Praca doktorska, IA PAN w Lublinie, 2000.
16. **Szatanik-Kloc A., Bowanko G.:** Wpływ stresu glinowego na geometryczny i energetyczny charakter korzeni roślin badany metodą adsorpcji azotu. *Acta Agrophysica*, 6(2), 561-568, 2005.
17. **Petersen L.W., Moldrup P., Jacobsen O.H., Rolston D.E.:** Relation between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil.Sci.*, 161, 9-21, 1996
18. **Wagatsuma T.:** Characterisation of absorption sites for aluminium in the roots. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33, 161-175, 1983
19. **Vilec C.A.** Biologia. PWRiL, Warszawa, 1978.
20. **Woodward R.A., Harper K.T., Tiedemann A.R.:** An ecological consideration of the significance of cation-exchange capacity of roots of some Utah range plants. *Plant and Soil*, 78, 169-180, 1984.
21. **Zurzycki J., Michniewicz M.:** Fizjologia roślin. PWRiL, Warszawa, 1990.

SURFACE PROPERTIES OF ROOTS OF SELECTED MONO
AND DICOTYLEDONOUS PLANTS, DETERMINED WITH WATER
VAPOUR AND NITROGEN ADSORPTION-DESORPTION METHODS

Alicja Szatanik-Kloc

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: akloc@demeter.ipan.lublin.pl

Abstract. Two monocotyledonous plants (wheat cv. Lanca and barley cv. Ars) and two dicotyledonous plants (rape cv. Star and white mustard) were studied. The plants were grown in a nutrient solution prepared according to Marshner and Romheld (1983), at pH = 7 and at $23 \pm 10\text{C}$ at 16 h/8 h day/night regime induced whit sodium lamps. The surface area and adsorption energy of the plant roots were determined from water vapour and nitrogen adsorption data. From experimental adsorption isotherms, the surface areas and energetic character of the root samples were calculated using the Aranowicz adsorption theory. Surface areas and average adsorption energy determined for nitrogen were smaller than those estimated by the use of water vapour. The nitrogen as adsorbate better differentiated the surface areas of mono and dicotyledonous plants (larger values for dicotyledonous plants).

Key words: roots mono and dicotyledonous plants, specific surface area, adsorption energy water vapour and nitrogen