

KATARZYNA KĘDZIERSKA, ZBIGNIEW PAŁACHA

WPLYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI SORPCYJNE LIOFILIZOWANEJ MARCHWI

Streszczenie

W pracy wyznaczono izotermy adsorpcji wody suszu marchwi w czterech różnych wartościach temperatury 5, 15, 25 i 35 °C, w zakresie aktywności wody od 0,006 do 0,910. Stwierdzono, że izotermy adsorpcji wody badanego suszu miały kształt sigmoidalny i zgodnie z klasyfikacją Brunauera odpowiadały II typowi izoterm. Modele GAB i BET najlepiej opisywały otrzymane izotermy. Najwyższą wartość czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody, wynoszącą 18,1 kJ/mol stwierdzono przy równowagowej zawartości wody 10 g wody/100 g s.s.

Słowa kluczowe: marchew, izotermy adsorpcji, czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody

Wprowadzenie

Jedną z metod przerobu marchwi jest jej odwadnianie metodą suszenia. W celu poprawienia jakości suszu coraz częściej stosuje się liofilizację, czyli suszenie sublimacyjne. Susze liofilizowane charakteryzują się bardzo dobrą jakością, praktycznie nienaruszoną strukturą, a zawartość w nich wody wynosi od 1,5 do 4 % przy aktywności wody na poziomie 0,20 - 0,35.

Stan wody w materiale jest ważnym zagadnieniem decydującym o właściwościach fizycznych, chemicznych czy biologicznych żywności. Do oceny stanu wody w żywności wykorzystywane są izotermy sorpcji wody [18]. Określają one równowagową zależność między ilością wody zaadsorbowanej przez jednostkę masy produktu żywnościowego i aktywności wody w stałej temperaturze i przy stałym ciśnieniu całkowitym. Dysponując izotermami sorpcji wyznaczonymi w kilku wartościach temperatury można określić m.in. izosteryczne ciepło sorpcji materiału, dostarczające informacji o przemianach energetycznych zachodzących w nim podczas procesu sorpcji [14, 21]. Z przebiegu izotermy można również określić końcowy punkt suszenia materiału,

Mgr inż. K. Kędzierska, dr hab. Zbigniew Pałacha, prof. nadzw., Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydz. Nauk o Żywności, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159 C, 02-776 Warszawa

odpowiadający pożądanej aktywności wody materiału. Znajomość tego punktu, przy znanej wilgotności krytycznej produktu w danej temperaturze, umożliwia określenie maksymalnej wilgotności powietrza suszącego w suszarkach konwekcyjnych lub maksymalnego ciśnienia w suszarkach pracujących pod obniżonym ciśnieniem i sublimacyjnych [22, 26].

Celem pracy było określenie wpływu temperatury na przebieg izoterm adsorpcji wody liofilizowanego suszu marchwi oraz określenie stanu wody w badanym materiale.

Material i metody badań

Do badań użyto marchwi odmiany Amsterdamska NOE pochodzącej z Pól Doświadczalnych Katedry Sadownictwa SGGW (rok zbioru 2011). Marchew ta jest odmianą wczesną, bardzo plenną i smaczną. Charakteryzuje się ciemnopomarańczowymi korzeniami, które dorastają do 15 cm długości. Są one kruche i soczyste. Nadają się doskonale do bezpośredniego spożycia, szczególnie młode. Starsze z powodzeniem można przechowywać [9, 25].

Surowiec pokrojony w kostkę o boku 10 mm suszono sublimacyjnie w suszarce Christ Alpha 1- 4. Materiał został początkowo zamrożony w zamrażarce Profi Master PMU 03 do temp. $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a następnie był przetrzymywany w tej temperaturze przez 24 h. Proces suszenia sublimacyjnego prowadzono w temp. $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ przy stałych parametrach ciśnienia 63 Pa oraz ciśnienia bezpieczeństwa 103 Pa przez 24 h. Kontrola temperatury surowca w czasie suszenia odbywała się przy użyciu termopary.

Wysuszony materiał przetrzymywano przez 2 tygodnie nad P_2O_5 w celu dosuszenia. Izoterm adsorpcji wody wyznaczano metodą statyczno-eksykatorową [24], stosując nasycony roztwór NaOH i nasycone roztwory soli jako czynniki higrostatyczne: LiCl, CH_3COOK , MgCl_2 , K_2CO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_2 , NaCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ i BaCl_2 [4, 18]. W ekzykatorach z roztworami o wyższej aktywności wody (NaCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ oraz BaCl_2) umieszczano naczynka z tymolem w celu ochrony przed rozwojem mikroflory w materiale. Badania wykonano w 3 powtórzeniach w zakresie aktywności wody $0,006 \div 0,910$ w temp.: 5, 15, 25 i $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Czas przetrzymywania próbek wyniósł 12 tygodni.

Równowagową zawartość wody niezbędną do wyznaczenia izoterm adsorpcji wody w suszu marchwi obliczano na podstawie równania [11]:

$$u = \left[\frac{d}{\frac{b}{c} - 1} - 1 \right] \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie: u – równowagowa zawartość wody [$\text{g wody} \cdot (100 \text{ g s.s.})^{-1}$], a – początkowa masa próbki z eksykatora z P_2O_5 [g], b – końcowa masa próbki po 12-tygodniowym przechowywaniu w eksykatorze z P_2O_5 (po suszeniu w temp. $70 \text{ }^\circ\text{C}$, pod zredukowanym ciśnieniem, przez 24 h) [g], c – początkowa masa próbki z eksykatora z określonym roztworem [g], d – końcowa masa próbki po 12-tygodniowym przetrzymywaniu, z eksykatora z określonym roztworem [g].

Do opisu izoterm adsorpcji wody suszu zastosowano:

- dwa modele dwuparametrowe:

Model BET [2]:

$$u = \frac{u_m C a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]} \quad (2)$$

Model Oswina [16]:

$$u = h \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^z \quad (3)$$

- dwa modele trójparametrowe:

Model GAB [1]:

$$u = \frac{u_m C k a_w}{[(1 - k a_w)[1 + (C - 1)k a_w]} \quad (4)$$

Model Lewickiego [13]:

$$u = F \left[\frac{1}{(1 - a_w)^G} - \frac{1}{1 + a_w^H} \right] \quad (5)$$

- model czteroparametrowy:

Model Pelega [20]:

$$u = A a_w^D + B a_w^E \quad (6)$$

gdzie: a_w – aktywność wody, u – równowagowa zawartość wody, [$\text{g wody} \cdot (100 \text{ g s.s.})^{-1}$], u_m – zawartość wody w monowarstwie, [$\text{g wody} \cdot (100 \text{ g s.s.})^{-1}$], $h, k, z, A, B, C, D, E, F, G, H$ – stałe.

Aproksymację izoterm przeprowadzono na bazie wszystkich punktów pomiarowych (3 powtórzenia).

Parametry modeli adsorpcji wody zostały wyznaczone przy zastosowaniu programów Microsoft Office Excel 2007 oraz Table Curve 2D v5.01.

W celu określenia przydatności modeli do opisu uzyskanych izoterm adsorpcji przeprowadzono analizę względnego średniego błędu kwadratowego (RMS) wyrażonego w [%], który obliczono na podstawie równania [13]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{u_e - u_p}{u_e} \right)^2}{N}} \cdot 100 \quad (7)$$

gdzie: u_e – doświadczalna równowagowa zawartość wody, [g wody·(100 g s.s.)⁻¹], u_p – prognozowana równowagowa zawartość wody, [g wody·(100 g s.s.)⁻¹], N – liczba punktów pomiarowych.

Do wyznaczenia czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody zastosowano różniczkową postać równania Clausiusa-Clapeyrona [5, 17]:

$$\left(\frac{\partial \ln a_w}{\partial T} \right)_u = \frac{q_{st,n}}{RT^2} \quad (8)$$

Całkując równanie (8) oraz zakładając, że czyste izosteryczne ciepło adsorpcji jest niezależne od temperatury, otrzymano wyrażenie:

$$\ln a_w = -\frac{q_{st,n}}{R} \cdot \frac{1}{T} + const \quad (9)$$

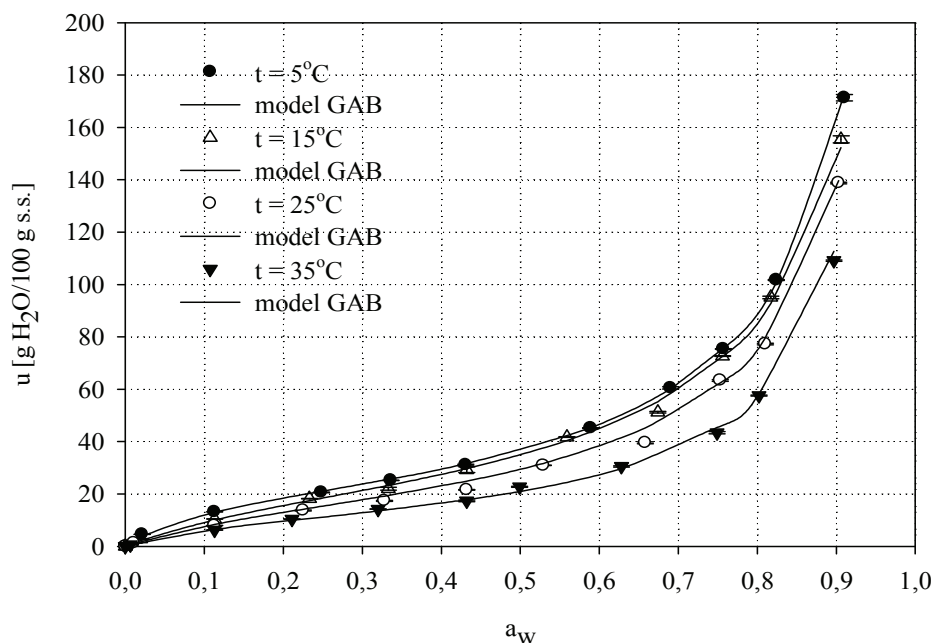
gdzie: $q_{st,n}$ – czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody [kJ·mol⁻¹], R – stała gazowa; $R = 8,3144 \cdot 10^{-3}$ [kJ · mol⁻¹·K⁻¹], T – temperatura bezwzględna [K].

Dysponując izotermami adsorpcji wody wyznaczonymi w czterech wartościach temperatury, sporządzono wykres zmian $\ln a_w$ w funkcji odwrotności temperatury bezwzględnej $1/T$, dla ustalonych wartości równowagowych zawartości wody. Wykreślone w taki sposób izostery są liniami prostymi, a wyznaczony z równania regresji współczynnik kierunkowy pozwala obliczyć czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody [18].

Wyniki i dyskusja

Na podstawie danych eksperymentalnych średniej równowagowej zawartości wody [g wody · (100 g s.s.)⁻¹] w analizowanym suszu marchwi zostały wykreślone izotermy adsorpcji wody (rys. 1). Uzyskane izotermy miały typowy kształt sigmoidalny, charakterystyczny dla izoterm typu II, według klasyfikacji Brunauera i wsp. [3]. Generalnie wzrost temperatury spowodował zmniejszenie równowagowej zawartości wody w badanym zakresie aktywności wody. Podobną tendencję przebiegu izoterm adsorpcji wody stwierdzono w przypadku wielu składników żywności i produktów spożywczych oraz matrycy jabłka [7, 8, 18]. Taki przebieg procesu adsorpcji pary wodnej wynika z faktu, że oddziaływania międzycząsteczkowe są funkcją temperatury, a tym samym

ilość pary wodnej zaadsorbowana przez materiał zależy od temperatury i jest tym większa, im temperatura jest niższa [10, 15].



Rys. 1. Przebieg izoterm adsorpcji wody przez susz marchwi przy różnych wartościach temperatury.
Fig. 1. Course of water adsorption isotherms for dried carrot at different temperature values.

W tab. 1. przedstawiono obliczone parametry odnoszące się do suszu marchwi, w zastosowanych modelach izoterm sorpcji oraz podano zgodność dopasowania tych modeli, wyrażoną przez współczynnik determinacji (R^2) oraz względny średni błąd kwadratowy (RMS).

Stwierdzono, że model GAB poprawnie opisywał dane sorpcyjne suszu marchwi w całym badanym zakresie temperatury i aktywności wody. Model BET również poprawnie opisywał dane sorpcyjne suszu w badanym zakresie temperatury, ale w ograniczonym zakresie aktywności wody ($a_w = 0,006 - 0,432$).

W przypadku izoterm adsorpcji wyznaczonych w niższych wartościach temperatury (5, 15 i 25 °C) poprawnie zostały dopasowane również modele Lewickiego oraz Pelega. Wartości względnego średniego błędu kwadratowego modelu Lewickiego wynosiły odpowiednio: 5,43; 7,95 oraz 8,60 %. Biorąc pod uwagę interpretację fizyczną parametrów modeli oraz porównywalne wartości względnego średniego błędu kwadratowego, w dalszych rozważaniach skorzystano z modelu GAB. Graficzne dopasowanie danych uzyskanych z modelu GAB do izoterm adsorpcji wody badanego suszu marchwi w czterech wartościach temperatury przedstawiono na rys. 1.

T a b e l a 1

Oszacowane parametry modeli izoterm sorpcji.

Parameters calculated parameters for sorption isotherms models.

Model (parametry) Model (parameters)	Temperatura [°C] / Temperature [°C]			
	5	15	25	35
BET*				
u_m	19,100	15,840	15,690	11,000
C	6,758	8,323	6,106	7,600
R^2	0,9907	0,9965	0,9988	0,9987
RMS [%]	6,79	4,63	3,82	16,07
GAB				
u_m	21,300	22,000	20,000	10,930
C	6,562	4,890	4,300	8,000
k	0,949	0,910	0,920	0,990
R^2	0,9988	0,9867	0,9977	0,9987
RMS [%]	5,98	9,56	7,62	11,85
Lewicki				
F	37,910	36,000	38,000	15,000
G	0,630	0,560	0,520	0,900
H	0,685	0,740	0,901	0,450
R^2	0,9988	0,9751	0,9903	0,9789
RMS [%]	5,43	7,95	8,60	24,66
Peleg				
A	192,000	161,200	138,100	177,100
B	7,846	5,944	6,460	9,740
D	64,700	41,910	48,800	38,950
E	0,923	0,701	0,880	0,890
R^2	0,9983	0,9978	0,9994	0,9989
RMS [%]	12,64	8,51	5,62	15,77
Oswin				
h	35,070	31,370	29,350	21,000
z	0,637	0,635	0,620	0,630
R^2	0,9991	0,9922	0,9979	0,9729
RMS [%]	5,36	9,84	21,64	6,27
BET				
u_m	17,000	15,000	14,500	10,000
C	10,000	10,000	9,000	9,500
R^2	0,9374	0,9381	0,9202	0,9952
RMS [%]	9,85	10,66	12,68	11,73

Objaśnienia / Explanatory notes:

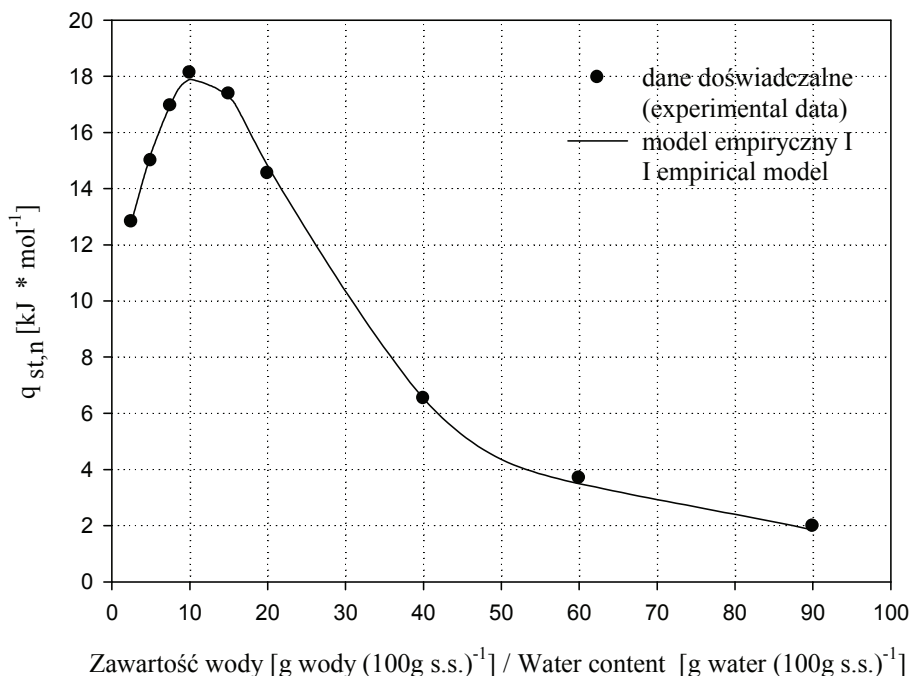
* zakres a_w 0,006 - 0,432 / range of a_w : 0.006 – 0.432

Wartości parametrów (tab. 1) oszacowanych z modelu GAB, tj. zawartość wody w monowarstwie (u_m) oraz C i k związane z energią oddziaływań między pierwszą a dalszymi adsorbowanymi cząsteczkami wody przez indywidualne centra adsorpcji matrycy, poprawnie opisywały sigmoidalny kształt izotermy. Według Lewickiego [12] wartość parametru k powinna się mieścić w zakresie $0,24 < k \leq 1$, a utrzymanie błędu obliczenia zawartości wody w monowarstwie na poziomie $\pm 15,5\%$ wymaga wartości stałej C większej niż 5,5. Wraz ze wzrostem temperatury w zakresie od 15 do 35 °C, wartość u_m wyznaczona z modelu GAB obniżała się z wartości 21,8 do 10,93 g wody·(100 g s.s.)⁻¹. Podobną tendencję malejącą stwierdzili m.in. Pałacha [18] w przypadku matrycy jabłka, Kędzierska i Pałacha [8] odnośnie suszu pieczarek oraz Wang i Brennam [28] w odniesieniu do suszu ziemniaczanego.

Korzystając z opisu izoterm adsorpcji wody modelem GAB oraz stosując równanie Clausiusa-Clapeyrona, obliczono czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody suszu marchwi.

Na rys. 2. przedstawiono wartości czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody jako funkcję zawartości wody w suszu marchwi.

W przebiegu zmian czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji równowagowej zawartości wody stwierdzono dwie charakterystyczne tendencje, wzrostu i obniżenia jego wartości (rys. 2). W zakresie równowagowej zawartości wody od 2,5 do 10 g wody·(100 g s.s.)⁻¹ czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody wzrosło z 12,8 do 18,1 kJ·(mol)⁻¹, a następnie wartość tego ciepła zaczęła wyraźnie maleć, osiągając przy równowagowej zawartości wody 90 g wody·(100 g s.s.)⁻¹ wartość 2,0 kJ·(mol)⁻¹. Podobną tendencję, zmiany czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody, bardzo rzadko cytowaną w literaturze, stwierdzono w przypadku liofilizowanego gotowanego mięsa kurcząt [6]. Rozważając stan wody w suszu marchwi na podstawie zmieniającego się czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody, należy stwierdzić, że większe wartości $q_{st,n}$ przy małych zawartościach wody (na poziomie tworzenia warstwy molekularnej) świadczą o wysokim potencjale energetycznym centrów aktywnych matrycy marchwi, a tym samym wskazują na znaczne siły wzajemnego oddziaływania międzycząsteczkowego między matrycą i wodą. Wzrost czystego izosterycznego ciepła adsorpcji przy niskiej zawartości wody, prawdopodobnie może wynikać ze zwiększającego się upakowania cząsteczek wody w matrycy suszu marchwi i występowania nie tylko oddziaływania cząsteczki wody – matryca, ale także oddziaływania woda – woda – matryca (na poziomie monowarstwy). Z chwilą wypełnienia centrów aktywnych monowarstwy adsorpcji, tworzone są następne warstwy cząsteczek wody na powierzchni matrycy (adsorpcja wielowarstwowa), a wartości $q_{st,n}$ stopniowo maleją, zbliżając się, przy dużych zawartościach wody do wartości utajonego ciepła parowania czystej wody [5, 23, 27, 28].



Rys. 2. Czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody $q_{st,n}$ marchwi w funkcji zawartości wody.

Fig. 2. Net isosteric heat of $q_{st,n}$ water adsorption in the function of water content in dried carrots.

Podjęto próbę dopasowania trzech modeli: półempirycznego dwuparametrowego modelu Tsami i wsp. [27] oraz dwóch empirycznych: trójparametrowego oraz czteroparametrowego [18] do danych doświadczalnych czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody. W tab. 2. zestawiono otrzymane parametry modeli oraz podano zgodność dopasowania modeli do danych doświadczalnych na podstawie wartości współczynnika determinacji (R^2), błędu standardowego estymacji oraz względnego średniego błędu kwadratowego (RMS). Model empiryczny I (trójparametrowy) najlepiej opisywał dane doświadczalne suszu marchwi (tab. 2, rys. 2).

Na podstawie modelu empirycznego I obliczono wartość czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody suszu marchwi przy zawartości wody odpowiadającej monowarstwie wyznaczonej z modelu GAB w temperaturze 25 °C. Otrzymana wartość $q_{st,n}$ wyniosła $15,08 \text{ kJ} \cdot (\text{mol})^{-1}$ przy zawartości wody $20,0 \text{ g wody} \cdot (100 \text{ g s.s.})^{-1}$.

W literaturze przedstawione są dane informujące o stałym zmniejszaniu się wartości $q_{st,n}$ wraz ze wzrostem równowagowej zawartości wody w materiale. Tendencję taką stwierdzono w przypadku matrycy jabłka [18], suszu ziemniaczanego [28], suszu pieczarek [8] oraz nasion i mąki amarantusa [19].

T a b e l a 2

Dopasowanie modeli do danych doświadczalnych czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody w suszu marchwi.

Matching models to experimental data of net isosteric heat of water adsorption in the function of water content in dried carrots.

Nazwa modelu i jego postać Model's name and its formula	Współczynnik determinacji R ² R ² -Coefficient of determination	Błąd standardowy estymacji Standard estimation error	RMS Root mean square [%]
Model Tsami i inni Tsami et al. model $q_{st,n} = 18,44 \exp(-u/2,5)$	0,799	2,96	28,52
Model empiryczny I (trójparametrowy) Empirical model I (three parameters) $(q_{st,n})^{-1} = 0,1066 - 0,0154 \cdot u + 0,0045 \cdot u \cdot \ln u$	0,999	0,20	2,98
Model empiryczny II (czteroparametrowy) Empirical model II (four parameters) $q_{st,n} = 2,33 + \frac{13,67}{1 + \left(\frac{u}{34,21}\right)^{4,95}}$	0,934	2,00	10,61

Wnioski

1. Izotermy adsorpcji wody liofilizowanego suszu marchwi należały do II typu izoterm zgodnie z klasyfikacją Brunauera.
2. Temperatura procesu adsorpcji wpłynęła na przebieg izoterm adsorpcji. Im temperatura była wyższa, tym dana izoterma, w całym badanym zakresie aktywności wody, przebiegała niżej. Tym samym higroskopijność suszu malała ze wzrostem temperatury.
3. Najlepszymi modelami do opisu izoterm adsorpcji wody suszu marchwi były modele: GAB i BET w zakresie aktywności wody $0,006 \div 0,432$.
4. Najwyższą wartość czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w suszu marchwi, wynoszącą $18,1 \text{ kJ} \cdot (\text{mol})^{-1}$, stwierdzono w przypadku zawartości wody wynoszącej $10 \text{ g wody} \cdot (100 \text{ g s.s.})^{-1}$. W miarę zwiększania się ilości zaadsorbowanej wody czyste izosteryczne ciepło adsorpcji uległo znacznemu obniżeniu i zbliżyło się do utajonego ciepła parowania czystej wody.
5. Model empiryczny trójparametrowy najlepiej opisywał dane doświadczalne czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody.

Literatura

- [1] Bizot H.: Using the GAB model to construct sorption isotherms. In: Physical properties of foods. Eds. R. Jowitt, F. Escher, G. Vos. Applied Science Publishers, London 1983, pp. 43-54.
- [2] Brunauer S., Emmett P., Teller E.: Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.*, 1938, **60**, 309-319.
- [3] Brunauer S., Deming L.S., Deming W.E., Teller E.: On a theory of van der Waals adsorption of gases. *J. Am. Chem. Soc.*, 1940, **62**, 1723-1732.
- [4] Greenspan L.: Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J. Res. Nat. Bur. Stand. – A. Physics and Chemistry*, 1977, **81 A**, 89-96.
- [5] Iglesias H.A., Chirife J.: Isothermic heats of water vapour sorption in dehydrated foods. Part I. Analysis of the differential heat curves. *Lebensmittel -Wissenschaft und -Technologie*, 1976, **9 (2)**, 116-122.
- [6] Iglesias H.A., Chirife J.: Isothermic heats of water vapour sorption in dehydrated foods. I. Analysis of the differential heat curves. *Lebensmittel -Wissenschaft und Technologie*, 1976, **13 (1)**, 13-17.
- [7] Iglesias H.A., Chirife J.: Handbook of Food Isotherms. Academic Press, New York 1982.
- [8] Kędzierska K., Pałacha Z.: Wpływ temperatury na właściwości sorpcyjne suszu pieczarek. *Acta Agrophysica*, 2011, **17 (1)**, 77-88.
- [9] Knaflowski M., Krzesiński W.: Biologia i odmianoznawstwo roślin warzywnych. Wyd. IV, AR, Poznań 1999, ss. 42-46.
- [10] Lewicki P.P.: Przemiany fazowe. W: Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego. T. 2. Procesy przenoszenia ciepła i masy. Red. P.P. Lewicki. WNT, Warszawa 1990, ss. 11-45.
- [11] Lewicki P.P.: Water sorption isotherms and their estimation in food model mechanical mixtures. *J. Food Eng.*, 1997, **32**, 47-68.
- [12] Lewicki P.P.: The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 1997, **32 (6)**, 553-557.
- [13] Lewicki P.P.: A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *J. Food Proc. Eng.*, 1998, **21**, 127-144.
- [14] Marzec A., Lewicki P.P.: Właściwości sorpcyjne pieczywa chrupkiego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2004, **4 (41)**, 44-56.
- [15] McLaughlin C.P., Magee T.R.A.: The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *J. Food Eng.*, 1998, **35 (3)**, 267-280.
- [16] Oswin C.R.: The kinetics of package life. III. The isotherm. *J. Chem. Ind., London* 1946, **65**, 419-423.
- [17] Ościk J.: Adsorpcja. PWN, Warszawa 1983.
- [18] Pałacha Z.: Badanie stanu wody w matrycy modelowej i uzyskanej z jabłek z wykorzystaniem metody opartej na izotermach sorpcji oraz kalorymetrycznej. Wyd. SGGW, Warszawa 2007, ss. 1-84.
- [19] Pałacha Z., Meus K.: Wpływ temperatury na właściwości sorpcyjne nasion i mąki amaranthus. *Post. Techniki Przetw. Spoż.*, 2009, **19/35 (2)**, 41-48.
- [20] Peleg M.: Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *J. Food Proc. Eng.*, 1993, **16**, 21-37.
- [21] Rizvi S.S.H.: Thermodynamic properties of food in dehydration. In: Engineering Properties of Foods. Eds.: M.A. Rao, S.S.H. Rizvi. Marcel Dekker, Inc., New York 1995, pp. 223-309.
- [22] Roman G.N., Urbician M.W., Rotstein E.: Moisture equilibrium in apples at several temperatures: Experimental data and theoretical considerations. *J. Food Sci.*, 1982, **47 (5)**, 1484-1488, 1507.
- [23] Sánchez E.S., San Juan N., Simal S., Rosselló C.: Calorimetric techniques applied to the determination of isosteric heat of desorption for potato. *J. Food Sci. Agric.* 1997, **74 (1)**, 57-63.
- [24] Spiess W.E.L., Wolf W.R.: The results of the COST 90 project on water activity. In: Physical Properties of Foods. Eds. R. Jowitt, F. Escher, B. Hällström, H.F.T. Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos. Elsevier Applied Science Publishers, London, 1983, pp. 65-87.
- [25] Świetlikowska K.: Surowce spożywcze pochodzenia roślinnego. Wyd. SGGW, Warszawa 2006, ss. 241-331.

- [26] Tamborski Z.: Wpływ temperatury na przebieg izoterm sorpcji wody przez cukier. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2009, **5 (66)**, 72-82.
- [27] Tsami E.: Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *J. Food Proc. Eng.*, 1991, **14 (4)**, 327-335.
- [28] Wang N., Brennam J.G.: Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *J. Food Eng.*, 1991, **14 (3)**, 269-287.

EFFECT OF TEMPERATURE ON WATER SORPTION PROPERTIES OF FREEZE-DRIED CARROTS

S u m m a r y

In the paper, the water adsorption isotherms were determined for dried carrots at 5, 15, 25, and 35 °C over a range of water activity from 0.006 to 0.910. It was found that the shape of water adsorption isotherms was sigmoidal and their course corresponded to the type II isotherms according to the Brunauer's classification. The GAB and BET were the best to describe the isotherms obtained. The highest value of net isosteric heat of water adsorption equalling 18.1 kJ/mol was reported at an equilibrium water content of 10 g water (100 g d.m.)⁻¹.

Key words: carrots, adsorption isotherms, net isosteric heat of water adsorption 