

## WPLYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI SORPCYJNE SUSZU JABŁEK

*Katarzyna Kędzierska, Zbigniew Pałacha*

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Nauk o Żywności, SGGW  
ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa  
email: katarzyna.kedzierska@gmail.com

**Streszczenie.** W pracy wyznaczono izotermy adsorpcji wody suszu jabłek w czterech temperaturach 5, 15, 25 i 35°C, w zakresie aktywności wody od 0,006 do 0,910. Stwierdzono, że izotermy adsorpcji wody badanego suszu posiadały kształt sigmoidalny i zgodnie z klasyfikacją Brunauera i in. odpowiadały II typowi izoterm. Do opisu izoterm adsorpcji suszu zastosowano następujące modele: BET, GAB, Oswina, Lewickiego i Pelega. Modele GAB i BET (w zakresie aktywności wody 0,006-0,432), które najlepiej opisywały otrzymane izotermy. Temperatura procesu adsorpcji wpływała na przebieg izoterm adsorpcji. Higroskopijność suszu wzrastała wraz z obniżeniem temperatury. Podjęto próbę dopasowania trzech modeli; półempirycznego dwuparametrowego modelu Tsami i in. oraz dwóch empirycznych: trój- i czteroparametrowego do danych doświadczalnych czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody. Największy spadek czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w suszu jabłek wystąpił w zakresie równowagowej zawartości wody od około 10 g do 40 g wody (100 g s.s.)<sup>-1</sup>. W miarę zwiększania się ilości zaabsorbowanej wody powyżej 40 g wody (100 g s.s.)<sup>-1</sup>, czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody ulegało nieznacznemu zmniejszeniu i zbliżało się do utajonego ciepła parowania czystej wody.

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

### WSTĘP

Jabłka to najważniejsze pod względem produkcji owoce w naszym kraju. Spośród wszystkich owoców ich produkcja w Polsce jest największa i najbardziej rozpowszechniona (Świetlikowska 2006). Jabłka odgrywają też ważną rolę w polskim eksporcie, gdyż wpływy z ich sprzedaży stanowiły w ostatnich latach 17-18% całkowitych wpływów z eksportu owoców świeżych i przetworzonych.

Największy udział w powierzchni uprawy jabłoni w Polsce ma odmiana *Idared* (16,1%) (ISSN 1507 – 9678, 2010). Jabłka odmiany *Idared* zaliczają się pod względem cech użytkowych do grupy jabłek przerobowych, uznawanych za naj-

lepsze na przetwory. Główną zaletą tej odmiany jest to, że dobrze się przechowuje. Owoce te są szczególnie cenne ze względu na zawartość błonnika pokarmowego oraz pektyn. Wśród cukrów zawartych w jabłkach dominuje fruktoza, choć zawierają także sacharozę i glukozę. Ze względu na całoroczne spożywanie oraz dostępność, uważane są za źródło witaminy C. Jabłka zawierają również kwasy organiczne (głównie jabłkowy i cytrynowy) oraz łatwo przyswajalne składniki mineralne, m.in. potas, fosfor i wapń (Świetlikowska 2006).

Jedną z metod przerobu jabłek jest suszenie. W celu poprawienia jakości suszu coraz częściej stosuje się liofilizację, czyli suszenie sublimacyjne, pomimo jego wysokich kosztów. Susze liofilizowane charakteryzują się bardzo dobrą jakością, praktycznie nienaruszoną strukturą, a zawartość w nich wody zawiera się w przedziale 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 izotermie sorpcji wody (Pałacha 2007). 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 dla kilku wartości temperatury można określić m.in. izosteryczne ciepło sorpcji materiału, dostarczające informacji o przemianach energetycznych zachodzących w nim podczas procesu sorpcji i pośrednio informujące o stanie związania wody w materiale (Rizvi 1995). Z przebiegu izotermi można również określić końcowy punkt suszenia materiału, 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 (Roman i in. 1982).

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

#### MATERIAŁ I METODY

Do badań użyto jabłek odmiany *Idared*. Surowiec wysuszono sublimacyjnie w suszarce Christ Alpha 1-4. Materiał był początkowo zamrożony w zamrażarce Profi Master PMU 03 do temperatury  $-70^{\circ}\text{C}$ , w której był przetrzymywany przez 24 godziny. Proces suszenia sublimacyjnego prowadzono w temperaturze  $30^{\circ}\text{C}$  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.

Susz jabłkowy był przetrzymywany przez 2 tygodnie nad  $P_2O_5$  w celu dosuszenia. Izotermy adsorpcji wody wyznaczano metodą statycznie – ekcykatorową (Spiess i Wolf 1983) stosując nasycony roztwór NaOH i nasycone roztwory soli jako czynniki higrostatyczne: LiCl,  $CH_3COOK$ ,  $MgCl_2$ ,  $K_2CO_3$ ,  $Mg(NO_3)_2$ ,  $NaNO_2$ , NaCl,  $(NH_4)_2SO_4$  i  $BaCl_2$  (Greenspan 1977, Pałacha 2007). W ekcykatorach z roztworami o wyższej aktywności wody (NaCl,  $(NH_4)_2SO_4$  oraz  $BaCl_2$ ) umieszczono naczynka z tymolem, w celu ochrony przed rozwojem mikroflory w materiale. Badania wykonano w 3 powtórzeniach w zakresie aktywności wody 0,006-0,910 w temperaturze 5, 15, 25 i  $35^\circ C \pm 0,5^\circ C$ . Czas przetrzymywania próbek wyniósł 3 miesiące.

Równowagową zawartość wody niezbędną do wyznaczenia izoterm adsorpcji wody w suszu jabłek obliczano na podstawie równania (Lewicki 1997a):

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

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

Do opisu izoterm adsorpcji wody w suszu zastosowano następujące modele: BET, GAB, Oswina, Lewickiego i Pelega.

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

Model BET (Brunauer i in. 1938):

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

Model GAB (Bizot 1983):

$$u = \frac{u_m C_w k a}{[1 + k_w a][1 + (C - 1)k_w a]} \quad (3)$$

Model Lewickiego (1998):

$$u = F \left[ \frac{1}{(1 - a_w)^G} - \frac{1}{1 + a_w^H} \right] \quad (4)$$

Model Pelega (1993):

$$u = A \frac{D}{\psi} + B \frac{E}{\psi} \quad (5)$$

Model Oswina (1946):

$$u = h \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^z \quad (6)$$

gdzie:  $a_w$  – aktywność wody,  $u$  – równowagowa zawartość wody, (g wody·(100 g s.s.)<sup>-1</sup>),  $u_m$  – zawartość wody w monowarstwie, (g wody·(100 g s.s.)<sup>-1</sup>),  $h, k, z, A, B, C, D, E, F, G, H$  – stałe.

Parametry modeli adsorpcji wody zostały wyznaczone przy zastosowaniu programów Microsoft Office Excel 2007 oraz Table Curve 2D v11.01.

W celu określenia przydatności modeli do opisu uzyskanych izoterm adsorpcji przeprowadzono analizę średniego błędu kwadratowego (RMS) wyrażonego w %, który obliczono na podstawie równania (Lewicki, 1998):

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

gdzie:  $u_e$  – doświadczalna równowagowa zawartość wody, (g wody·(100 g s.s.)<sup>-1</sup>),  $u_p$  – prognozowana równowagowa zawartość wody, (g wody·(100 g s.s.)<sup>-1</sup>),  $N$  – liczba punktów pomiarowych.

Do wyznaczenia czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody wykorzystano różniczkową postać równania Clausiusa-Clapeyrona (Iglesias i Chirife 1976, Ościk 1983):

$$\left( \frac{\partial \ln a_w}{\partial T} \right)_u = \frac{q_s \cdot m}{R \cdot T^2} \quad (8)$$

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

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

gdzie:  $q_{st,n}$  – czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $R$  – stała gazowa;  $R = 8,314 \cdot 10^{-3}$  ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $T$  – temperatura bezwzględna (K).

Dysponując izotermami adsorpcji wody wyznaczonymi dla czterech wartości temperatury, sporządzono wykres  $\ln a_w$  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 (Pałacha 2007).

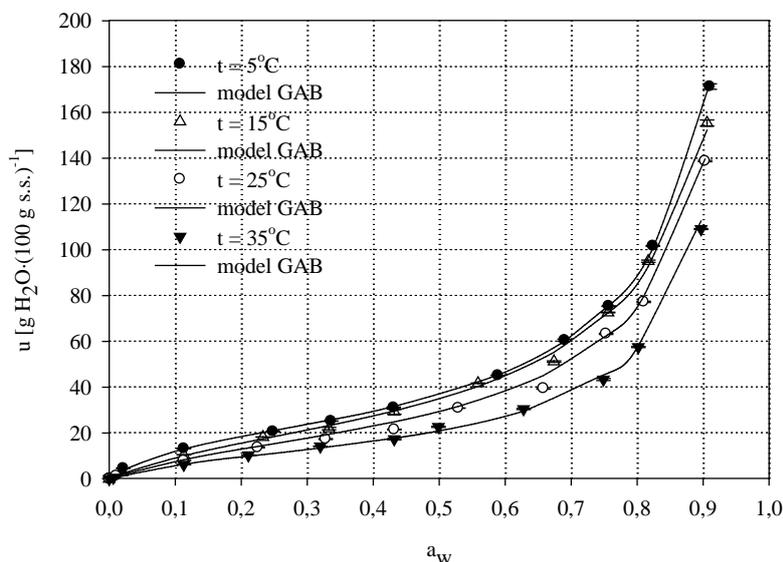
#### WYNIKI I DYSKUSJA

Na podstawie danych eksperymentalnych średniej równowagowej zawartości wody ( $\text{g wody}\cdot(100 \text{ g s.s.})^{-1}$ ) w analizowanym suszu jabłek zostały wykreślone izotermy adsorpcji wody (rys. 1). Uzyskane izotermy miały typowy kształt sigmoidalny, charakterystyczny dla izoterm typu II, według klasyfikacji Brunauera i in. (1940). Generalnie wzrost temperatury spowodował zmniejszenie równowagowej zawartości wody w badanym zakresie jej aktywności. Podobną tendencję przebiegu izoterm adsorpcji wody stwierdzono w przypadku wielu składników żywności i produktów spożywczych oraz matrycy jabłka (Iglesias i Chirife 1982, Pałacha 2007). 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 (Lewicki 1990, McLaughlin i Magee 1998).

Do opisu izoterm adsorpcji wody suszu jabłek wykorzystano pięć modeli: dwa modele dwuparametrowe (BET, Oswin), dwa modele trójparametrowe (GAB oraz Lewicki) oraz model czteroparametrowy (Peleg).

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

Stwierdzono, że model GAB poprawnie opisywał dane sorpcyjne suszu jabłek w całym badanym zakresie temperatury i aktywności wody. Model BET również poprawnie opisywał dane sorpcyjne suszu dla badanego zakresu temperatury, ale w ograniczonym zakresie aktywności wody (0,006-0,432).



**Rys. 1.** Przebieg izoterm adsorpcji wody suszu jabłek przy różnych wartościach temperatury  
**Fig. 1.** Course of water adsorption isotherms for dried apples at different values of temperature

W przypadku izoterm adsorpcji wyznaczonych w niższych wartościach temperatury (5, 15 i 25°C) poprawnie zostały dopasowane również modele Lewickiego oraz Pelega. Dla modelu Lewickiego wartości średniego błędu kwadratowego wynosiły odpowiednio: 4,62; 4,90 oraz 6,02 %. Biorąc pod uwagę znaczenie fizyczne stałych modeli oraz porównywalne wartości średniego błędu kwadratowego, w dalszych rozważaniach skorzystano z modelu GAB. Graficzne dopasowanie danych uzyskanych z modelu GAB do izoterm adsorpcji wody badanego suszu jabłek w czterech wartościach temperatury przedstawiono na rysunku 1.

Wartości stałych (tab.1) uzyskane 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 opisują sigmoidalny kształt izotermy. Według Lewickiego (1997b), wartość stałej  $k$  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 12,0 g wody (100 g s.s.)<sup>-1</sup>. Podobną tendencję malejącą stwierdzili m.in. Pałacha (2007) dla matrycy jabłka, Kędzierska i Pałacha (2011) dla suszu pieczarek oraz Wang i Brennam (1991) dla suszu ziemniaczanego.

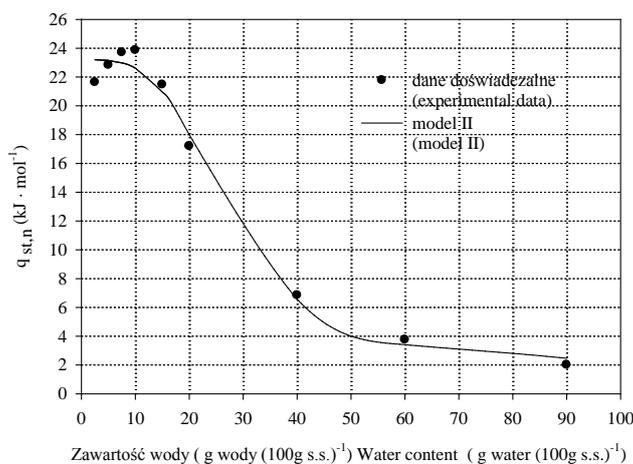
**Tabela 1.** Obliczone parametry modeli izoterm sorpcji  
**Table 1.** Calculated parameters for the models of sorption isotherms

Model (parametry) Model (parameters)	Temperatura – Temperature (°C)			
	5	15	25	35
<b>BET*</b>				
$u_m$	19,55	19,50	14,52	12,12
C	11,89	7,90	7,892	7,101
$R^2$	0,999	0,995	0,998	0,997
RMS (%)	4,13	4,09	4,77	4,87
<b>GAB</b>				
$u_m$	20,97	21,80	18,02	12,00
C	10,00	5,80	5,70	7,00
k	0,967	0,950	0,968	0,998
$R^2$	0,999	0,998	0,997	0,998
RMS (%)	5,71	7,59	9,50	5,18
<b>Lewicki</b>				
F	35,00	36,72	26,60	21,00
G	0,700	0,660	0,750	0,700
H	0,502	0,695	0,690	0,600
$R^2$	0,997	0,998	0,998	0,971
RMS (%)	4,62	4,90	6,02	25,7
<b>Peleg</b>				
A	244,4	217,0	210,0	199,0
B	8,106	8,400	7,890	9,000
D	61,15	63,00	49,00	39,00
E	0,757	0,822	0,842	0,900
$R^2$	0,999	0,998	0,998	0,999
RMS (%)	9,37	7,06	7,59	10,42
<b>Oswin</b>				
h	38,30	35,00	27,83	23,00
z	0,570	0,620	0,719	0,650
$R^2$	0,966	0,989	0,998	0,976
RMS (%)	7,09	6,30	10,28	16,12
<b>BET</b>				
$u_m$	19,00	17,30	14,00	11,40
C	13,00	9,50	8,40	7,20
$R^2$	0,943	0,965	0,992	0,998
RMS (%)	7,27	7,81	7,10	7,03

\* zakres  $a_w$  0,006-0,432 – range  $a_w$  0.006-0.432.

Opierając się na opisie izoterm adsorpcji wody modelem GAB oraz wykorzystując równanie Clausiusa-Clapeyrona, obliczono czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody suszu jabłek.

Na rysunku 2 przedstawiono wartości czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody jako funkcję zawartości wody suszu jabłek.



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

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

Ogólnie, czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody obniżało się wraz ze wzrostem równowagowej zawartości wody (rys. 2). W przebiegu zmian czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody można wyodrębnić strefę wyraźnego spadku  $q_{st,n}$  w suszu jabłek w zakresie równowagowej zawartości wody od około 10 g do 40 g wody (100 g s.s.)<sup>-1</sup> oraz strefę nieznacznego zmniejszenia się wartości  $q_{st,n}$ , po przekroczeniu wartości 40 g wody (100 g s.s.)<sup>-1</sup>. Podobny kierunek zmian czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody stwierdzono dla matrycy jabłka (Pałacha 2007), suszu ziemniaczanego (Wang i Brennam 1991, Pałacha i in. 1998), suszu pieczarek (Kędzińska i Pałacha 2011), nasion i mąki amarantusa (Pałacha i Meus 2009). Rozważając stan wody w suszu jabłek 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 monomolekularnej) świadczą o wysokim potencjale energetycznym centrów aktywnych matrycy jabłek, a tym samym wskazują na znaczne siły wzajemnego oddziaływania międzycząsteczkowego między matrycą i wodą. Z chwilą wypełnienia centrów aktywnych monowar-

stwy 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 (Iglesias i Chirife 1976, Tsami 1991, Wang i Brennam 1991, Sánchez i in. 1997).

Podjęto próbę dopasowania trzech modeli; półempirycznego dwuparametrowego modelu Tsami i in. (1991) oraz dwóch empirycznych: trój- i czteroparametrowego (Pałacha 2007) do danych doświadczalnych czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody. W tabeli 2 zestawiono otrzymane parametry modeli oraz pokazano zgodność dopasowania modeli do danych doświadczalnych na podstawie wartości współczynnika determinacji ( $R^2$ ) oraz średnim błędzie kwadratowym (RMS).

**Tabela 2.** Dopasowanie modeli do danych doświadczalnych czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody suszu jabłek

**Table 2.** Fitting the models to experimental data of net isosteric heat of water adsorption in the function of water content in dried apples

Nazwa modelu i jego postać Model and its formula	Współczynnik determinacji $R^2$ Coefficient of determination $R^2$	Błąd standardowy estymacji Standard error of estimation	RMS Root mean square (%)
Model Tsami i in. Tsami <i>et al.</i> model $q_{s, n} = 2,47e0 \cdot x - u / \beta, 47$	0,927	2,62	22,37
Model empiryczny I (trójparametrowy) Empirical model I (three parameters) $q_{s, n} = 5, +4 \cdot \beta, \theta u / 5 \epsilon$	0,936	2,64	30,84
Model empiryczny II (czteroparametrowy) Empirical model II (four parameters) $q_{s, n} = 2,1 \cdot \left[ \frac{2,0 \cdot 5}{1 + \left( \frac{u}{2,7 \cdot 4} \right)^{3,5}} \right]$	0,991	1,09	8,57

Model empiryczny II (czteroparametrowy) najlepiej opisywał dane doświadczalne badanego suszu jabłek (tab. 2, rys. 2). Podobnie model empiryczny czteroparametrowy najlepiej opisywał dane doświadczalne uzyskane dla matrycy jabłka (Pałacha 2007), nasion i mąki amarantusa (Pałacha i Meus 2009) oraz suszu pieczarek (Kędzierska i Pałacha 2011).

Na podstawie modelu empirycznego II obliczono czyste izosteryczne ciepło adsorpcji wody suszu jabłek przy zawartości wody odpowiadającej monowarstwie wyznaczonej z modelu GAB w temperaturze 25°C. Otrzymana wartość  $q_{st,n}$  wyniosła 19,66 kJ·mol<sup>-1</sup> i była o 6,69 kJ·mol<sup>-1</sup> wyższą od wartości  $q_{st,n}$  dla nierozpuszczalnej w wodzie matrycy jabłka otrzymanej przez Pałachę (2007). Usunięcie z matrycy jabłka substancji rozpuszczalnych w wodzie spowodowało znaczne ograniczenie liczby aktywnych centrów matrycy i skutkowało niższą wartością  $q_{st,n}$  na poziomie monowarstwy.

#### WNIOSKI

1. Izotermy adsorpcji wody liofilizowanego suszu jabłek należały do II typu izoterm według klasyfikacji Brunauera i innych.

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 jabłek były modele: GAB i BET w zakresie aktywności wody 0,006-0,432.

4. Największy spadek czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w suszu jabłek wystąpił w zakresie równowagowej zawartości wody od około 10,0 g do 40,0 g wody·(100 g s.s.)<sup>-1</sup>. W miarę zwiększania się ilości zaabsorbowanej wody powyżej 40 g wody·(100 g s.s.)<sup>-1</sup>, czyste izosteryczne ciepło adsorpcji ulegało nieznacznemu zmniejszeniu i zbliżało się do utajonego ciepła parowania czystej wody.

5. Model empiryczny czteroparametrowy najlepiej opisywał dane doświadczalne czystego izosterycznego ciepła adsorpcji wody w funkcji zawartości wody.

#### PIŚMIENNICTWO

- Bizot H., 1983. Using the GAB model to construct sorption isotherms. In: Physical properties of foods (eds. R. Jowitt, F. Escher, G. Vos). Applied Science Publishers, London, 43-54.
- Brunauer S., Deming L.S., Deming W.E., Teller E., 1940. On a theory of van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62, 1723-1732.
- Brunauer S., Emmett P., Teller E., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of American Chemical Society*, 60, 309-319.

- Gal S., 1983. The need for, and practical applications of sorption data. In: *Physical Properties of Food*. (ed. R. Jowitt), Applied Science Publishers, London and New York, 13-25.
- Greenspan L., 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry*, 81 A, 89-96.
- Iglesias H.A., Chirife J., 1976. Isotheric heat of water vapour sorption in dehydrated foods. *Lebensmittel -Wissenschaft und -Technologie*, 9(2), 107-112.
- Iglesias H.A., Chirife J., 1982. *Handbook of Food Isotherms*. Academic Press, New York.
- Kędzierska K., Pałacha Z., 2011. Wpływ temperatury na właściwości sorpcyjne suszu pieczarek. *Acta Agrophysica*, 17(1), 77-88.
- Lewicki P.P., 1990. Przemiany fazowe. W: *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*. T. 2. Procesy przenoszenia ciepła i masy (red.) P.P. Lewicki. WNT, Warszawa, 11-45.
- Lewicki P.P., 1997a. Water sorption isotherms and their estimation in food model mechanical mixtures. *Journal of Food Engineering*, 32, 47-68.
- Lewicki P.P., 1997b. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science and Technology*, 32(6), 553-557.
- Lewicki P.P., 1998. A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 21, 127-144.
- McLaughlin C.P., Magee T.R.A., 1998. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering*, 35(3), 267-280.
- Ościk J., 1983. *Adsorpcja*, PWN, Warszawa.
- Oswin C.R., 1946. The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of Chemical Industry (London)*, 65, 419-423.
- Pałacha Z., 2007. Badanie stanu wody w matrycy modelowej i uzyskanej z jabłek z wykorzystaniem metody opartej na izotermach sorpcji oraz kalorymetrycznej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 1-84.
- Pałacha Z., Meus K., 2009. Wpływ temperatury na właściwości sorpcyjne nasion i mąki amarantusa. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 19/35(2), 41-48.
- Pałacha Z., Witrowa-Rajchert D., Lewicki P.P., 1998. Sorption properties of potato and carrot dried by convection. *Properties of Water in Foods* (ed.) P.P. Lewicki. Proceedings of the IX Seminar, Warsaw Agricultural University Press, Warsaw, 172-182.
- Peleg M., 1993. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 16, 21-37.
- Rizvi S.S.H., 1995. Thermodynamic properties of food in dehydration. In: *Engineering Properties of Foods*. (eds.) M.A. Rao, S.S.H. Rizvi. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 223-309.
- Roman G.N., Urbician M.W., Rotstein E., 1982. Moisture equilibrium in apples at several temperatures: Experimental data and theoretical considerations. *Journal of Food Science*, 47(5), 1484-1488, 1507.
- Sánchez E.S., San Juan N., Simal S., Rosselló C., 1997. Calorimetric techniques applied to the determination of isosteric heat of desorption for potato. *Journal of Food Science and Agriculture* 74(1), 57-63.
- Spiess W.E.L., Wolf W.R., 1983. 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, 65-87.
- Świetlikowska K., 2006. *Surowce spożywcze pochodzenia roślinnego*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 241-331.

- Tsami E., 1991. Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Process Engineering*, 14 (4), 327-335.
- Tsami E., Maroulis Z.B., Marinos-Kouris D., Saravacos G.D., 1990. Heat of sorption of water in dried fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 25 (3), 350-359.
- Wang N., Brennam J.G., 1991. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, 14 (3), 269-287.

## EFFECT OF TEMPERATURE ON WATER SORPTION PROPERTIES OF DRIED APPLES

*Katarzyna Kędzierska, Zbigniew Pałacha*

Faculty of Food Sciences, Department of Food Engineering and Process Management,  
SGGW-WULS

ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa  
email: katarzyna.kedzierska@gmail.com

**Abstract.** In the study presented in the paper water adsorption isotherms were determined for dried apples at 5, 15, 25 and 35°C over a range of water activity from 0.006 to 0.910. The water adsorption isotherms had a compatible course with II type of isotherms according to Brunauer's classification. To describe dried apples water adsorption isotherms the following models were used: BET, GAB, Oswin, Lewicki and Peleg. The GAB and BET models (in the range of water activity 0,006-0,432) gave the best fit to the experimental sorption data for the material tested. The process temperature affected the course of adsorption isotherms. Hygroscopicity of the dried material increased with lowering of the temperature. An attempt was made to fit three models – the semi-empirical two-parameter Tsami *et al.* model and two empirical models: three- and four-parameter, to the experimental data of net isosteric heat of water adsorption in the function of water content. The biggest decline of net isosteric heat of water adsorption in dried apples was in the range of moisture content from 10 to 40 g water (100 g d.m.)<sup>-1</sup>. With increase in the amount of absorbed water over 40 g water (100 g d.m.)<sup>-1</sup>, the net isosteric heat of water adsorption decreased slightly and approached the latent heat of vaporisation for pure water.

**Keywords:** apples, adsorption isotherms, net isosteric heat of water adsorption