

BADANIE STANU WODY W NASIONACH WYBRANYCH ROŚLIN STRĄCZKOWYCH METODĄ WYKORZYSTUJĄCĄ IZOTERMY SORPCJI

Zbigniew Pałacha  , Wojciech Karwowski
SGGW w Warszawie, Wydział Nauk o Żywności

Streszczenie. Celem niniejszej pracy było określenie wpływu temperatury na przebieg izoterm sorpcji wody wybranych nasion roślin strączkowych oraz określenie stanu wody w badanych materiałach na podstawie wyznaczonego czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody ($q_{st,n}$). W badaniach wykorzystano nasiona soi, bobu, soczewicy, grochu i fasoli. Izotermy sorpcji wody wyznaczono metodą statyczno-eksykatorową w temperaturze 5, 25 i 40°C w zakresie aktywności wody 0,112–0,945. Do opisu izoterm sorpcji wody zastosowano model GAB. Dysponując izotermami sorpcji wyznaczonymi w trzech temperaturach oraz korzystając z równania Clausiusa-Clapeyrona, obliczono wielkości czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody. Wykazano istotny wpływ temperatury na przebieg izoterm sorpcji wody. Obliczone wartości liczbowe czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody na poziomie monowarstwy dla nasion soi, bobu, soczewicy, grochu i fasoli wyniosły odpowiednio: 6,25, 6,76, 7,07, 5,10 i 4,48 kJ·mol⁻¹.

Słowa kluczowe: nasiona roślin strączkowych, izotermy sorpcji, czyste izosteryczne ciepło sorpcji wody

WSTĘP

Rośliny strączkowe należą do grupy roślin bardzo cennych z punktu widzenia żywnościowego. Nasiona tych roślin są źródłem wielu ważnych składników odżywczych, takich jak: białka, składniki mineralne, błonnik, substancje biologicznie czynne oraz witaminy. Ponadto suche nasiona roślin strączkowych wykazują wiele korzystnych właściwości takich jak utrzymywanie wody, wiązanie tłuszczu, spienianie oraz żelowanie, co

Zbigniew Pałacha  <https://orcid.org/0000-0002-8596-8621>

 zbigniew_palacha@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW

w dużym stopniu rozwija ich potencjalne zastosowanie w projektowaniu nowych produktów spożywczych. Niewątpliwie zaletą nasion roślin strączkowych jest to, że w stanie nieprzetworzonym możliwe jest ich przechowywanie nawet przez kilka lat w suchym i chłodnym pomieszczeniu magazynowym przy odpowiednio dobranych warunkach środowiskowych [Podleśny 2005, Iqbal i in. 2006, Kapusta 2010].

Podczas przechowywania suchych nasion może dojść do chłonięcia przez nie wody z otoczenia. Woda zaadsorbowana przez materiał przyczynia się do przyśpieszenia przemian fizycznych, chemicznych i biologicznych, co w konsekwencji ma wpływ na jego jakość oraz na długość okresu przydatności do spożycia. A zatem, aby określić optymalne warunki przechowywania nasion, niezbędne jest wyznaczenie izoterm sorpcji wody, które są graficznym przedstawieniem mechanizmu wiązania wody przez materiał biologiczny [Pałacha 2010]. Izotermy sorpcji wody pozwalają ustalić optymalną zawartość wody w materiale, a więc na takim poziomie, przy którym szybkość przebiegu reakcji zachodzących w materiale będzie najmniejsza. Poznanie tych parametrów pomaga w przedłużeniu okresu trwałości żywności, a także pozwala odpowiednio zaprojektować procesy suszenia, mieszania składników, magazynowania czy doboru opakowania [Pałacha 2007, 2010].

Wyznaczenie izoterm sorpcji wody danego materiału w różnej temperaturze pozwala określić różniczkową entalpię sorpcji, która jest traktowana jako wskaźnik stanu wody adsorbowanej przez matrycę ciała stałego [Rizvi 1995]. Do obliczenia tej funkcji najczęściej wykorzystuje się równanie Clausiusa-Clapeyrona w postaci różniczkowej, przy czym wymagana jest znajomość izoterm sorpcji w co najmniej trzech wartościach temperatury. Określone na tej podstawie wielkości czystego izosterycznego ciepła sorpcji pozwolą zoptymalizować warunki prowadzenia procesów suszenia i mieszania materiałów, a także przyczynią się do zaoszczędzenia energii, zapobiegania stratom produktów podczas ich przechowywania, a tym samym zminimalizowania kosztów produkcji.

Celem pracy było określenie wpływu temperatury na przebieg izoterm sorpcji wody wybranych nasion roślin strączkowych oraz określenie stanu wody w badanych materiałach na podstawie wyznaczonego czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody.

MATERIAŁ I METODY

Do badań użyto pięć rodzajów nasion roślin strączkowych: soi warzywnej odmiany Aldona, bobu odmiany Karmazyn, soczewicy jadalnej odmiany Anita, grochu zwyczajnego odmiany Batuta i fasoli zwyczajnej odmiany Aura. Nasiona, po wyjęciu z opakowania, zostały wysuszone w suszarce próżniowej Memmert VO 500 (Niemcy) w temperaturze 70°C, przy ciśnieniu 1,5 kPa, w czasie 48 h [AOAC 1996], a następnie przechowywano je w ekzykatorze nad bezwodnym CaCl₂.

Izotermy sorpcji wody wyznaczono metodą statycznie-ekzykatorową [Spiess i Wolf 1983], stosując nasycone roztwory soli jako czynniki higrostatyczne: LiCl, CH₃COOK, MgCl₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, NaNO₂, NaCl, (NH₄)₂SO₄ i (NH₄)H₂PO₄ [Greenspan 1977]. W ekzykatorach z roztworami o większej aktywności wody, NaCl, (NH₄)₂SO₄ i (NH₄)H₂PO₄, umieszczono naczynka z tymolem w celu ochrony przed rozwojem mikroflory w materiale. Badania wykonano w zakresie aktywności wody od 0,112 do 0,945

w temperaturze 5, 25 i 40 ±0,5°C w trzech powtórzeniach. Czas przetrzymywania próbek wyniósł trzy miesiące.

Równowagową zawartość wody w nasionach roślin strączkowych, niezbędną do wyznaczenia izoterm sorpcji wody, obliczono ze wzoru [Lewicki 1997a]:

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

gdzie:

u – równowagowa zawartość wody [g·100 g⁻¹ s.s.],

a – początkowa masa próbki z eksykatora z CaCl₂ [g],

b – końcowa masa próbki, po trzymiesięcznym przetrzymywaniu, w eksykatorze z CaCl₂ (po suszeniu w temperaturze 70°C, pod zredukowanym ciśnieniem, przez 48 h [g],

c – początkowa masa próbki z eksykatora z określonym roztworem [g],

d – końcowa masa próbki, po trzymiesięcznym przechowywaniu, z eksykatora z określonym roztworem [g].

Do opisu izoterm sorpcji wody w nasionach zastosowano model GAB [Boquet i in. 1979]:

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

gdzie:

a_w – aktywność wody,

u – równowagowa zawartość wody [g·100 g⁻¹ s.s.],

u_m – zawartość wody w monowarstwie [g·100 g⁻¹ s.s.],

C, k – stałe.

Do wyznaczenia czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody wykorzystano różniczkową postać równania Clausiusa-Clapeyrona [Iglesias i Chirife 1976]:

$$\left(\frac{\partial \ln a_w}{\partial T} \right)_u = \frac{q_{st,n}}{RT^2} \quad (3)$$

Całkując równanie (3) oraz zakładając, że czyste izosteryczne ciepło adsorpcji jest niezależne od temperatury, otrzymano wyrażenie:

$$\ln a_w = -\frac{q_{st,n}}{R} \cdot \frac{1}{T} + const \quad (4)$$

gdzie:

$q_{st,n}$ – czyste izosteryczne ciepło sorpcji wody [kJ·mol⁻¹],

R – stała gazowa, $R = 8,3144 \cdot 10^{-3}$ [kJ·mol⁻¹·K⁻¹],

T – temperatura bezwzględna [K].

Dysponując izotermami sorpcji wody wyznaczonymi w trzech wartościach temperatury, sporządzono wykres $\ln a_w$ w funkcji odwrotności temperatury bezwzględnej $1/T$ dla ustalonych wielkości równowagowych zawartości wody. Wyznaczone w taki sposób izostery są liniami prostymi, a wyznaczony z równania regresji współczynnik kierunkowy pozwala obliczyć czyste izosteryczne ciepło sorpcji wody [Pałacha 2007].

Do opisu zmian czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody w funkcji zawartości wody zastosowano czteroparametrowy model empiryczny zaproponowany przez Pałachę [2007]:

$$q_{st,n} = A + \frac{B}{\left[1 + \left(\frac{u}{D}\right)^E\right]} \quad (5)$$

gdzie: A , B , D i E – stałe.

Do dopasowania testowanych modeli do danych doświadczalnych użyto programu Table Curve 2D (Jandel Scientific).

Przydatność modelu GAB i czteroparametrowego modelu empirycznego oceniono na podstawie średniego błędu kwadratowego (RMS) [Lewicki 1998] i współczynnika zmienności resztowej (V_e) [Nowacka i in. 2012] wyrażonych w %:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{u_e - u_p}{u_e}\right)^2}{N}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$V_e = \frac{\sqrt{\chi^2}}{\bar{u}} \cdot 100 \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (u_e - u_p)^2}{N - n} \quad (8)$$

gdzie:

u_e – doświadczalna równowagowa zawartość wody [$\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ s.s.}$],

u_p – prognozowana równowagowa zawartość wody [$\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ s.s.}$],

\bar{u} – średnia doświadczalna równowagowa zawartość wody [$\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ s.s.}$],

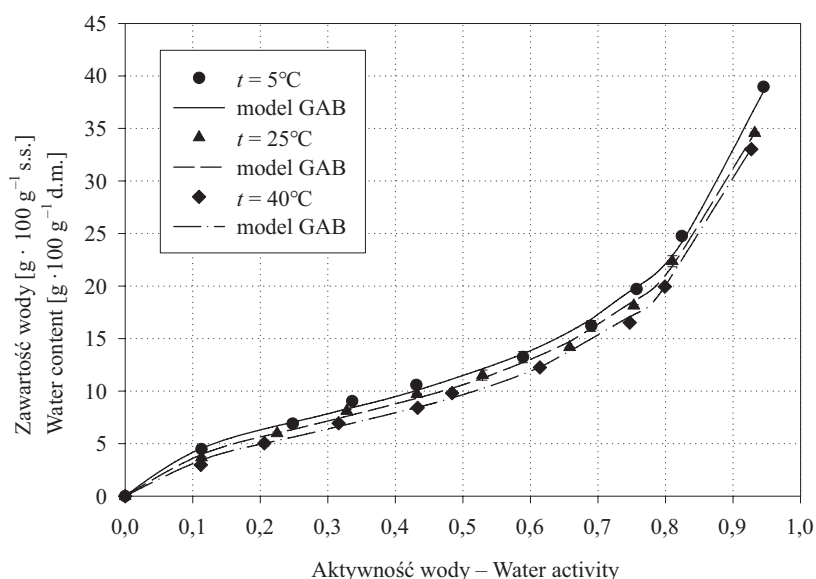
N – liczba danych,

n – liczba parametrów w modelu.

WYNIKI I DYSKUSJA

Na rysunku 1 pokazano przykładowy przebieg izoterm sorpcji wody dla nasion soczewicy w temperaturze 5, 25 i 40°C. Dla pozostałych nasion (soja, bób, groch, fasola) przebieg izoterm był analogiczny. Uzyskane izotermie bez względu na rodzaj nasion miały

typowy kształt sigmoidalny, charakterystyczny dla izoterm II typu, zgodnie z klasyfikacją Brunauera i innych [1940]. Podobną tendencję przebiegu izoterm sorpcji wody stwierdzono dla nasion soczewicy [Menkov 2000a], ciecierzycy pospolitej [Menkov 2000b], grochu zwyczajnego [Chen 2003] oraz amarantusa [Pałacha i Meus 2009]. Taki przebieg procesu sorpcji wody odzwierciedlał oddziaływanie międzycząsteczkowe będące funkcją temperatury, a tym samym ilość wody zaadsorbowana przez nasiona zależała od temperatury i była tym większa, im temperatura była niższa [McLaughlin i Magee 1998].



Rys. 1. Wpływ temperatury na przebieg izoterm sorpcji wody nasion soczewicy

Fig. 1. Effect of temperature on course of water sorption isotherms of lentil seeds

W tabeli 1 przedstawiono obliczone parametry modelu GAB odnoszące się do nasion oraz pokazano zgodność dopasowania tego modelu, wyrażoną przez współczynnik determinacji (R^2), średni błąd kwadratowy (RMS) i współczynnik zmienności resztowej (V_e).

Analiza danych wskazuje, że współczynnik determinacji nie jest wystarczającą miarą dla zgodności dopasowania modelu sorpcji, a znacznie lepszym kryterium zgodności dopasowania są średni błąd kwadratowy i współczynnik zmienności resztowej. Przyjmując wartości RMS i V_e na poziomie niższym od 10% (jako dobrą zgodność dopasowania modelu do danych sorpcyjnych), należy stwierdzić, że założenie to spełnił model GAB. Obliczony RMS kształtował się na poziomie od 2,89 do 4,33% dla nasion soi, od 4,03 do 5,85% dla nasion bobu, od 3,69 do 5,41% dla nasion soczewicy, od 4,19 do 4,98% dla nasion grochu i od 4,13 do 5,71% dla nasion fasoli. Podobnie kształtowała się wielkość V_e dla badanych nasion. Graficzne dopasowanie danych uzyskanych z modelu GAB do izoterm sorpcji wody badanych nasion w trzech wartościach temperatury przedstawiono na rysunku 1.

Tabela 1. Obliczone parametry dla modelu GAB izoterm sorpcji wody nasion roślin strączkowych
 Table 1. Calculated parameters for the GAB model of water sorption isotherms of legume seeds

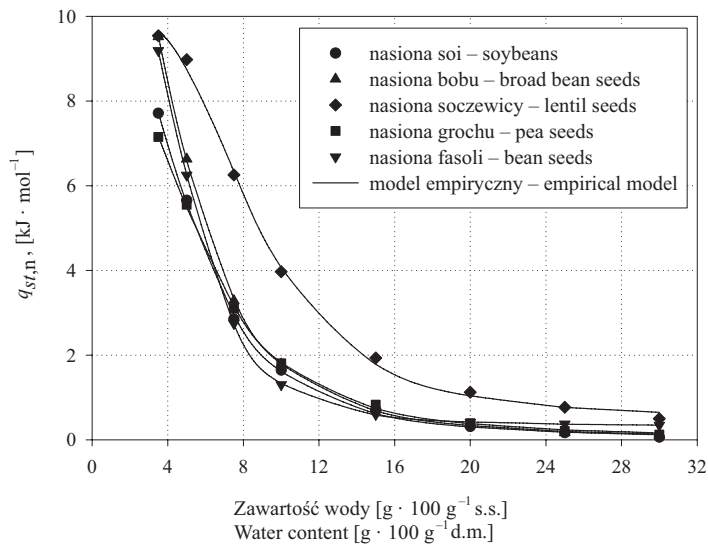
Nasiona roślin strączkowych Legume seeds	t [°C]	Model (parametry) – Model (parameters)					
		u_m	C	k	R^2	RMS [%]	V_g [%]
Soja Soybean	5	4,843	10,73	0,916	0,999	2,89	3,48
	25	4,523	9,83	0,924	0,998	4,33	4,84
	40	4,262	7,45	0,936	0,999	3,46	3,01
Bób Broad bean	5	5,219	11,85	0,906	0,997	5,85	5,12
	25	4,908	10,01	0,920	0,999	4,03	2,93
	40	4,689	7,32	0,924	0,999	4,26	2,88
Soczewica Lentil	5	7,158	12,37	0,865	0,998	3,69	3,53
	25	6,782	10,20	0,867	0,998	3,96	3,34
	40	6,141	9,09	0,883	0,999	5,41	2,93
Groch Pea	5	5,645	9,74	0,898	0,998	4,19	4,64
	25	5,357	8,19	0,903	0,999	4,98	3,47
	40	5,074	7,20	0,915	0,998	4,51	4,80
Fasola Bean	5	6,024	11,75	0,912	0,998	5,71	5,88
	25	6,023	7,44	0,899	0,999	4,33	3,45
	40	5,898	6,26	0,896	0,998	4,13	4,19

Wartości liczbowe stałych (tab. 1), uzyskane z modelu GAB dla badanych nasion, 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 [Lewicki 1997b].

Wpływ temperatury na wartości liczbowe stałych wyznaczonych z modelu GAB dla wszystkich nasion był praktycznie jednoznaczny (tab. 1). Wraz ze wzrostem temperatury w zakresie od 5 do 40°C wartości liczbowe u_m i C malały, a wartość liczbową k wzrastała, z wyjątkiem nasion fasoli (efekt odwrotny). Podobną tendencję malejącą stałych u_m i C wraz ze wzrostem temperatury stwierdzili m.in. Sopade i Ajisehiri [1994] dla nasion kukurydzy i sorgo oraz Pałacha i Meus [2009] dla nasion amarantusa.

Na rysunku 2 przedstawiono wielkości czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody ($q_{st,n}$) jako funkcję zawartości wody dla badanych nasion. W przebiegu zmian $q_{st,n}$ można wyodrębnić dwie charakterystyczne strefy dla badanych nasion: I strefę – wyraźnego spadku $q_{st,n}$ w zakresie równowagowej zawartości wody od 3,5 do 15 g na 100 g s.s., oraz II strefę – bardzo nieznacznego zmniejszania się wartości liczbowych $q_{st,n}$ po przekroczeniu zawartości 15 g na 100 g s.s. Ogólnie największą wartość liczbową $q_{st,n}$ w całym badanym zakresie równowagowej zawartości wody stwierdzono dla nasion soczewicy. Dla pozostałych nasion wartości $q_{st,n}$ były mniejsze i zbliżone do siebie, szczególnie w II strefie zmian. Podobny kierunek zmian czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody stwierdzono dla nasion grochu [Chen 2006] oraz nasion amarantusa [Pałacha i Meus 2009].

Rozważając stan wody w badanych nasionach na podstawie zmieniającego się czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody, stwierdza się, że większe wartości liczbowe $q_{st,n}$ przy małych zawartościach wody (na poziomie monowarstwy) świadczą o dużym potencjale energetycznym centrów aktywnych matrycy badanych nasion, a tym samym wskazują na



Rys. 2. Czyste izosteryczne ciepło sorpcji w nasionach roślin strączkowych w funkcji zawartości wody

Fig. 2. Net isosteric at of water sorption in the function of water content in legume seeds

znaczne siły wzajemnego oddziaływania międzycząsteczkowego między matrycą i wodą. Z chwilą wypełnienia centrów aktywnych monowarstwy adsorpcja pojawia się na mniej aktywnych centrach polarnych mających mniejszy potencjał energetyczny i tworzona jest następna warstwa cząsteczek wody na powierzchni matrycy (adsorpcja wielowarstwowa), a wartości liczbowe $q_{st,n}$ stopniowo maleją przy dużych zawartościach wody do wielkości utajonego ciepła parowania czystej wody [Iglesias i Chirife 1976]. Różnice między czystym izosterycznym ciepłem sorpcji wody badanych nasion, bardziej wyraźne przy małej zawartości wody, mogą wynikać przede wszystkim ze składu chemicznego, natury składników oraz zmian struktury molekularnej badanych nasion podczas procesu sorpcji.

Tabela 2. Obliczone parametry modelu empirycznego dla nasion wybranych roślin strączkowych, opisującego zmiany czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody w funkcji zawartości wody

Table 2. Calculated parameters of the empirical model for selected legume seeds, describing changes of the net isosteric heat of water sorption in the function of water content

Model	Soja Soybean	Bób Broad bean	Soczewica Lentil	Groch Pea	Fasola Bean
<i>A</i>	0,024	0,025	0,503	0,045	0,324
<i>B</i>	10,104	13,243	9,640	8,846	11,023
<i>D</i>	5,387	4,973	8,523	5,966	5,223
<i>E</i>	2,712	2,679	3,323	2,669	3,531
<i>R</i> ²	0,999	0,999	0,998	0,999	0,999
<i>RMS</i> [%]	7,39	4,16	2,36	6,17	1,66
<i>V_e</i> [%]	3,52	1,86	4,53	2,82	0,84

W tabeli 2 zestawiono obliczone parametry modelu empirycznego czteroparametrowego opisującego zmiany czystego izosterycznego ciepła sorpcji w funkcji zawartości wody dla badanych nasion oraz pokazano zgodność dopasowania modelu do danych doświadczalnych. Model empiryczny dobrze opisywał zmiany $q_{st,n}$ w funkcji zawartości wody dla wszystkich badanych nasion (RMS od 1,66 do 7,39%; V_e od 0,84 do 4,53%).

Korzystając z modelu empirycznego, obliczono wartości liczbowe $q_{st,n}$ przy zawartości wody odpowiadającej monowarstwie wyznaczonej z modelu GAB w temperaturze 25°C. Największą wartość liczbową $q_{st,n}$ na poziomie monowarstwy miały nasiona soczewicy (7,07 kJ·mol⁻¹), nieco mniejszą nasiona bobu (6,76 kJ·mol⁻¹) i soi (6,25 kJ·mol⁻¹), a najmniejszą nasiona grochu (5,10 kJ·mol⁻¹) i fasoli (4,48 kJ·mol⁻¹).

WNIOSKI

1. Izotermy sorpcji wody badanych nasion roślin strączkowych należały do II typu izoterm zgodnie z klasyfikacją zespołu Brunauera [1940].

2. Temperatura procesu sorpcji wpłynęła na przebieg izoterm sorpcji wody. Im temperatura była niższa, tym dane izotermy w całym badanym zakresie aktywności wody przebiegały na coraz wyższym poziomie. Tym samym higroskopijność nasion wzrastała z obniżeniem się temperatury.

3. Model GAB dobrze opisywał dane sorpcyjne badanych nasion. Obliczone wartości średniego błędu kwadratowego i współczynnika zmienności resztowej nie przekroczyły 6%.

4. Największe wartości liczbowe czystego izosterycznego ciepła sorpcji wody w całym badanym zakresie równowagowej zawartości wody stwierdzono dla nasion soczewicy.

5. Model empiryczny czteroparametrowy dobrze opisywał zmiany $q_{st,n}$ w funkcji zawartości wody w badanych nasionach. Obliczony RMS nie przekroczył wartości 8%, a V_e był mniejszy od 5%.

6. Przedstawiona analiza stanu wody w wybranych nasionach roślin strączkowych przyczyni się do bardziej racjonalnego podejmowania decyzji przy wyborze najkorzystniejszych warunków przechowywania tych nasion.

LITERATURA

- Association of Official Analytical Chemists, 1996. Official Methods of Analysis. Arlington VA.
- Boquet R., Chirife J., Iglesias H.A., 1979. Equations for fitting water sorption isotherms of foods. Part III. Evaluation of various three-parameter models. *J. Food Technol.* 14(5), 527–534.
- Brunauer S., Deming L.S., Deming W.E., Tellur E., 1940. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *J. Am. Chem. Soc.* 62, 1723–1732.
- Chen C., 2003. Moisture sorption isotherms of pea seeds. *J. Food Eng.* 58, 45–51.
- Chen C., 2006. Obtaining the isosteric sorption heat directly by sorption equations. *J. Food Eng.* 74, 178–185.
- Greenspan L., 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J. Res. NBS – A. Phys. Chem.* 81 A, 89–96.

- Iglesias H.A., Chirife J., 1976. Isothermic heats of water vapour sorption on dehydrated foods. Part I. Analysis of the differential heat curves. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.* 9(2), 116–122.
- Iqbal A., Khalil I.A., Ateeq N., Khan M.S., 2006. Nutritional quality of imported food legumes. *Food Chem.* 97, 331–335.
- Kapusta F., 2012. Rośliny strączkowe źródłem białka dla ludzi i zwierząt. *Nauki Inż. Techno.* 4(1), 16–32.
- Lewicki P.P., 1997a. Water sorption isotherms and their estimation in food model mechanical mixtures. *J. Food Eng.* 32(1), 47–68.
- Lewicki P.P., 1997b. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *Int. J. Food Sci. Technol.* 32(6), 553–557.
- Lewicki P.P., 1998. A tree parameter equation for food moisture sorption isotherms. *J. Food Proc. Eng.* 21(2), 127–144.
- McLaughlin C.P., Magee T.R.A., 1998. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *J. Food Eng.* 35(3), 267–280.
- Menkov N.D., 2000a. Moisture sorption isotherms of lentil seeds at several temperatures. *J. Food Eng.* 44, 205–211.
- Menkov N.D., 2000b. Moisture sorption isotherms of chickpea seeds at several temperatures. *J. Food Eng.* 45, 189–194.
- Nowacka M., Janiak G., Kidoń M., Czapski J., Witrowa-Rajchert D., 2012. Zastosowanie modeli matematycznych do opisu izoterm adsorpcji pary wodnej suszonej marchwi purpurowej i pomarańczowej. *ŻNTJ* 5(84), 60–72.
- 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.
- Pałacha Z., 2010. Właściwości sorpcyjne. W: Z. Pałacha, I. Sitkiewicz (red.). Właściwości fizyczne żywności. WNT, Warszawa, 143–169.
- Pałacha Z., Meus K., 2009. Wpływ temperatury na właściwości sorpcyjne nasion i mąki amarantusa. *Post. Tech. Przetw. Spoż.* 19/35(2), 41–48.
- Podleśny J., 2005. Rośliny strączkowe w Polsce – perspektywy uprawy i wykorzystanie nasion. *Acta Agroph.* 6(1), 213–224.
- Rizvi S.S.H., 1995. Thermodynamic properties of foods in dehydration. W: M.A. Rao, S.S.H. Rizvi (red.). *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, New York – Basel – Hong Kong, 223–309.
- Sopade P.A., Ajisehiri E.S., 1994. Moisture sorption study on Nigerian foods: maize and sorghum. *J. Food Proc. Eng.* 17(1), 33–36.
- Spiess W.E.L., Wolf W.R., 1983. The results of the COST 90 project on water activity. W: R. Jowitt, F. Escher, B. Hällström, H.F.T. Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos (red.). *Physical Properties of Foods*. Elsevier Applied Science Publishers, London, 65–87.

A STUDY OF WATER STATE IN SELECTED LEGUME SEEDS USING THE METOD BASED ON SORPTION ISOTHERMS

Summary. Legume seeds are a source of important nutrients that have important pro-health properties. When storing dry seeds, they may absorb water from the environment, which in turn affects their quality and shelf life. The aim of the study was to determine influence of temperature on the course of water sorption isotherms of selected legume seeds and deter-

mine the water state in the tested materials on the basis of the determined net isosteric heat of water sorption. The studies involved the use of soybean seeds of the Aldona variety, the Karmazyn broad bean variety, the edible lentil variety Anita, the pea variety Batuta and the bean variety Aura. The water sorption isotherms were determined by the static gravimetric method using saturated salt solutions as hygrostatic agents. The tested legume seeds, before insertion in the desiccators, were dried in a Memmert VO 500 vacuum oven (Germany) at 70°C, pressure 1.5 kPa, for 48 h. The study were carried out in the water activity range of 0.112–0.945 at 5, 25 and 40 ±0.5°C in triplicate. The storage time of the samples was three months. The GAB model was used to describe the water sorption isotherms. With the water sorption isotherms set in three temperature and using the Clausius–Clapeyron equation, the net isosteric heat of water sorption was calculated. The all water sorption isotherms had a compatible course with second type of isotherms according to the Brunauer's classification. The GAB model gave good fit to the experimental sorption data. The calculated values of root mean square error (*RMS*) and residual coefficient of variation (V_e) did not exceed 6%. The process temperature affected the course of sorption isotherms. Hygroscopicity of the legume seeds increased with lowering of the temperature. The largest decline of net isosteric heat of water sorption ($q_{st,n}$) in legume seeds was in the range of water content from 3.5 to 15 g·100 g⁻¹ d.m. With increase in the amount of adsorbed water over 15 g·100 g⁻¹ d.m., the net isosteric heat of water sorption decreased slightly and approached the latent heat of vaporization for pure water. The highest value of the net isosteric heat of water sorption at the level of the monolayer had lentil seeds (7.07 kJ·mol⁻¹), slightly lower had broad bean seeds (6.76 kJ·mol⁻¹) and soybeans (6.25 kJ·mol⁻¹) and the lowest pea seeds (5.10 kJ·mol⁻¹) and beans (4.48 kJ·mol⁻¹). Four parameter empirical model correctly described $q_{st,n}$ changes in the function of water content in tested legume seeds. The calculated *RMS* value did not exceed 8% and V_e value was less than 5%.

Key words: legume seeds, sorption isotherms, net isosteric heat of water sorption