

Dr hab. inż. Zbigniew PAŁACHA, prof. SGGW
Mgr inż. Łukasz SZCZEŚNIAK
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW w Warszawie

IZOTERMY ADSORPCJI I DESORPCJI WODY WYBRANYCH MAKARONÓW®

A study of process of adsorption and desorption of water selected pasta®

W pracy prezentowanej w artykule wyznaczono izotermy adsorpcji i desorpcji wody wybranych makaronów (pszennego bezjajecznego, pszennego jajecznego, ryżowego, sojowego i żytniego) w temperaturze 25°C, w zakresie aktywności wody od 0,113 do 0,932 (adsorpcja) i od 0,113 do 0,810 (desorpcja). Stwierdzono, że izotermy dla badanych makaronów miały przebieg sigmoidalny i należały do II typu izoterm zgodnie z klasyfikacją Brunauera i współpracowników. Wszystkie izotermy wykazały pętlę histerezy, przy czym największą pętlę histerezy charakteryzował się makaron sojowy, a najmniejszą makaron żytni. Model Pelega najlepiej opisywał otrzymane izotermy adsorpcji i desorpcji wody. Największą powierzchnię właściwą posiadał makaron ryżowy.

In the paper water adsorption and desorption isotherms of selected pasta (wheat pasta without eggs, wheat pasta with eggs, rice pasta, soya pasta, rye pasta) were determined at 25°C over a range of water activity from 0,113 to 0,932 (adsorption) and from 0,113 to 0,810 (desorption). The water adsorption and desorption isotherms had a compatible course with II type isotherms according to BET classification. All isotherms exhibited hysteresis loop but the highest hysteresis loop had a soya pasta, and the least rye pasta. The Peleg model gave the best fit to the experimental adsorption and desorption data for all material tested. The highest specific surface area had a rice pasta.

WSTĘP

Makaron, to tradycyjny produkt otrzymywany na bazie zbóż, będący jednym z najczęściej spożywanych produktów żywnościowych na świecie ze względu na wygodę, smak i wartość odżywczą. Najbardziej odpowiednim ze zbóż do produkcji wysokiej jakości makaronów jest pszenica durum [12]. Obecnie na rynku dostępna jest coraz szersza oferta makaronów określanych przez producentów jako razowe bądź pełnoziarniste, między innymi pszenne, żytnie czy orkiszowe, a także makarony otrzymywane z mąki ryżowej czy sojowej. Makarony są głównym źródłem węglowodanów w diecie, a także stanowią cenne źródło białek, witamin, błonnika pokarmowego, składników mineralnych i biologicznie aktywnych [6].

Struktura makaronu jest ogólnie opisywana jako kompaktowa matryca z granulkami skrobi uwięzionymi w sieci białek [9]. Ostateczna struktura makaronu jest wynikiem kolejnych zmian zachodzących podczas całego procesu jego produkcji, wpływającego na skrobię i frakcje białek. Zmiana parametrów procesu może służyć do modyfikacji struktury makaronu oraz wpływać na jego wartości odżywcze [25]. Zarówno struktura, jak i skład chemiczny makaronu są odpowiedzialne za jego specyficzne właściwości wyróżniające go spośród innych produktów zbożowych.

Właściwości sorpcyjne makaronów odgrywają ważną rolę w procesie ich wytwarzania i przechowywania. Wyznaczone izotermy adsorpcji i desorpcji wody są najlepszym narzędziem do określania tych właściwości [22]. Z przebiegu izoterm można określić końcowy punkt suszenia materiału, odpowiadający pożądanej aktywności wody produktu. 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 [13, 22]. Ponadto izotermy adsorpcji i desorpcji wody mogą być wykorzystane do modelowania procesu suszenia, projektowania i optymalizacji suszarek, prognozowania okresu przechowywania oraz wyboru odpowiednich materiałów opakowaniowych [22].

Przebieg izoterm adsorpcji i desorpcji wody większości produktów żywnościowych, w tym makaronów, charakteryzuje się pętlą histerezy [1, 3, 21, 23, 26]. Wielkość pętli histerezy, jej kształt, punkt początkowy i końcowy pętli, mogą znacznie się różnić w zależności od rodzaju produktu, temperatury, szybkości i stopnia odwodnienia [11]. W dostępnej literaturze, praktycznie brak jest informacji na temat izoterm desorpcji i występowania zjawiska histerezy w makaronach. Poniższy materiał stanowi skromne uzupełnienie wiedzy na ten temat.

Celem artykułu jest zaprezentowanie wyznaczonych izoterm adsorpcji i desorpcji wody dla wybranych makaronów w temperaturze 25°C. Zakres pracy obejmował określenie wpływu rodzaju makaronów na przebieg izoterm adsorpcji i desorpcji wody oraz próbę ich matematycznego opisu. Określona została również powierzchnia właściwa badanych makaronów na podstawie obliczonej pojemności monowarstwy.

METODYKA BADAŃ

1. Materiał badawczy

Do badań użyto 5 różnych rodzajów makaronów:

- makaron pszenny bezjajeczny (mąka pszenna makaronowa durum typu semolina, woda),
- makaron pszenny 4-jajeczny (mąka makaronowa z pszenicy zwyczajnej, masa jajeczna, woda, kurkuma),
- makaron ryżowy (mąka ryżowa, woda),
- makaron sojowy (mąka sojowa, mąka z fasoli Mung, woda),
- makaron żytni (mąka żytnia, woda)

2. Metody analityczne

2.1. Oznaczenie zawartości wody

Zawartość wody w makaronach oznaczano metodą suszenia pod obniżonym ciśnieniem w suszarce Horyzont Spt-200. Próbkę materiału suszono w temperaturze $70 \pm 1^\circ\text{C}$, pod ciśnieniem 0,266 kPa, przez 24 godziny [2].

2.2. Oznaczenie aktywności wody

Aktywność wody makaronów zmierzono za pomocą miernika aktywności wody Rotronic Hygroskop DT w temperaturze $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Pomiar przeprowadzono w 3 równoległych powtórzeniach.

2.3. Wyznaczenie izoterm adsorpcji i desorpcji wody

Izotermi adsorpcji i desorpcji wody wyznaczono metodą statyczno-eksykatorową [28], stosując 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 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) [14, 16, 27], w zakresie aktywności wody od 0,113 do 0,932 (izotermi adsorpcji) i od 0,113 do 0,810 (izotermi desorpcji) w temperaturze 25°C . W przypadku procesu adsorpcji, próbki makaronów (ok. 1 g) dosuszone w temperaturze 70°C , pod ciśnieniem 0,266 kPa w ciągu 24 godzin, umieszczano w higrostatkach i przetrzymywano w nich przez 3 miesiące. W przypadku procesu desorpcji, makarony początkowo nawilżano przez 14 dni w temperaturze 25°C w ekzykatorze z wodą destylowaną ($a_w = 1,0$) do uzyskania aktywności wody materiału ok. 0,9. Następnie nawilżone próbki makaronów (ok. 1 g) umieszczano w higrostatkach i przetrzymywano w nich przez 3 miesiące. Na podstawie obliczonej równowagowej zawartości wody (g wody/100 g s.s.) wyznaczono izotermi adsorpcji i desorpcji wody badanych makaronów i przeprowadzono ich analizę.

3. Metody obliczeniowe

3.1. Opis izoterm adsorpcji i desorpcji wody

Do opisu izoterm adsorpcji i desorpcji wody badanych makaronów zastosowano następujące modele: BET [8], Oswina [19], GAB [5], Lewickiego [17] i Pelega [24]. Przydatność modeli do opisu uzyskanych izoterm została oceniona na podstawie współczynnika determinacji (R^2) i średniego błędu kwadratowego (RMS) wyrażonego w procentach [18].

3.2. Obliczenie powierzchni właściwej

Powierzchnię właściwą badanych skrobi obliczono z równania 1 [15]:

$$S = \frac{u_m \cdot N_o \cdot \sigma_o}{M} \quad (1)$$

gdzie: S – powierzchnia właściwa adsorbentu, $\text{m}^2/\text{g s.s.}$,

u_m – zawartość wody w monowarstwie, g wody/g s.s.,

N_o – liczba Avogadra ($6,023 \times 10^{23}$ cząsteczek/mol),

σ_o – powierzchnia siadania cząsteczki wody ($10,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{cząsteczka}$),

M – masa molowa wody (18 g/mol).

OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

1. Charakterystyka badanych makaronów

W tabeli 1 przedstawiono średnią początkową zawartość i aktywność wody w badanych makaronach. Stwierdzono, że najwyższą zawartością wody charakteryzował się makaron sojowy (10,50%), a najniższą zawartość wody posiadał makaron ryżowy (7,37%). Natomiast, najwyższą aktywność wody posiadał makaron pszenny bezjajeczny (0,616), a wartości aktywności wody makaronów ryżowego i sojowego były najniższe i wyniosły odpowiedni 0,323 i 0,324.

Tabela 1. Początkowa zawartość wody i aktywność wody w badanych makaronach

Table 1. Initial water content and water activity in tested pasta

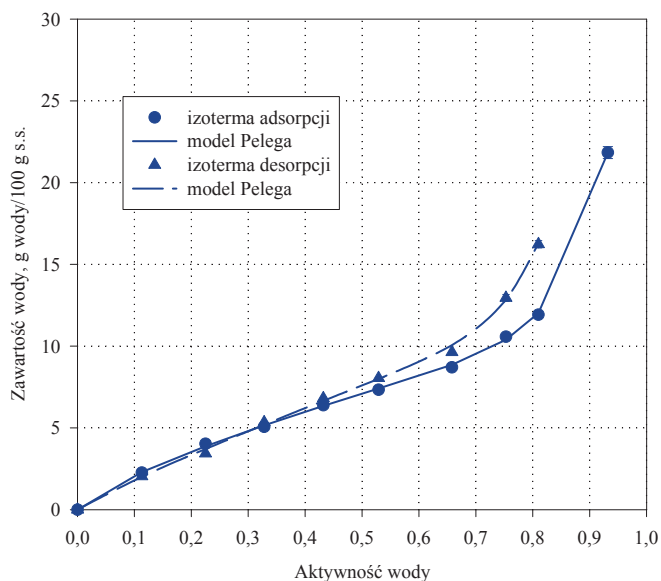
Rodzaj makaronu	Zawartość wody [%]	Aktywność wody
Makaron pszenny bezjajeczny	$8,85 \pm 0,01$	$0,616 \pm 0,003$
Makaron pszenny jajeczny	$8,13 \pm 0,02$	$0,416 \pm 0,014$
Makaron ryżowy	$7,37 \pm 0,01$	$0,323 \pm 0,004$
Makaron sojowy	$10,50 \pm 0,03$	$0,324 \pm 0,023$
Makaron żytni	$9,89 \pm 0,01$	$0,541 \pm 0,005$

Źródło: Badania własne

2. Izotermi adsorpcji i desorpcji wody

Na rysunkach 1-7 (na następnej stronie) przedstawiono przebieg izoterm adsorpcji i desorpcji wody badanych makaronów. Wszystkie izotermi adsorpcji i desorpcji wody posiadały kształt sigmoidalny, odpowiadający II typowi izoterm w klasyfikacji Brunauera i wsp. [7], charakterystyczny dla produktów zawierających skrobię i białka.

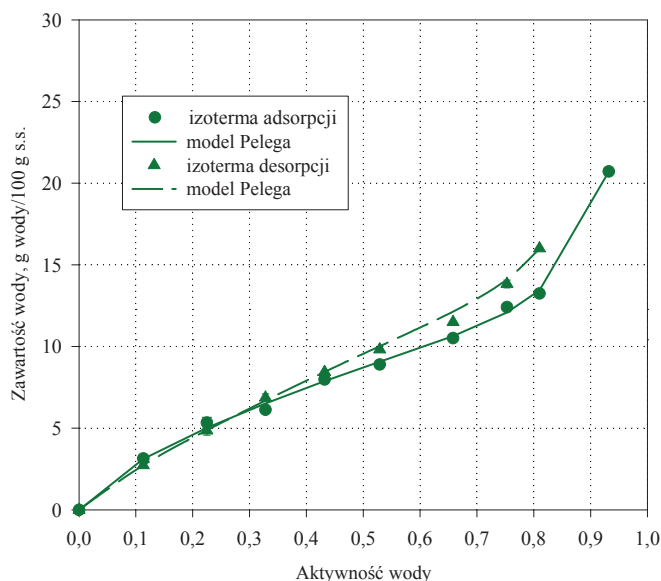
Przebieg izoterm adsorpcji i desorpcji wody wykazał histerezę, przy czym jej kształt był zróżnicowany i wynikał z rodzaju badanego makaronu. Największą pętlę histerezy stwierdzono dla makaronu sojowego (rys. 4). Znacznie mniejsze pętli histerezy, lecz o zbliżonej wielkości i kształcie, posiadały makarony pszenne, bezjajeczny (rys. 1) i jajeczny (rys. 2) oraz ryżowy (rys. 3). Natomiast, najmniejszą pętlą histerezy charakteryzował się makaron żytni (rys. 5). Początek pętli histerezy, z wyjątkiem makaronu żytniego, stwierdzono przy zawartości wody, nieznacznie przekraczającej zawartość wody w monowarstwie (u_m). Makarony pszenne bezjajeczny i jajeczny, ryżowy i sojowy wykazały otwarte pętli histerezy przy aktywności wody ok. 0,8. Natomiast, makaron żytni wykazał zamkniętą pętlę histerezy przy aktywności wody bliskiej 0,8. Al-Muhtaseb i wsp.



Rys. 1. Izotermy adsorpcji i desorpcji wody makaronu pszennego bezjajecznego.

Fig. 1. Water adsorption and desorption isotherms of wheat pasta without eggs.

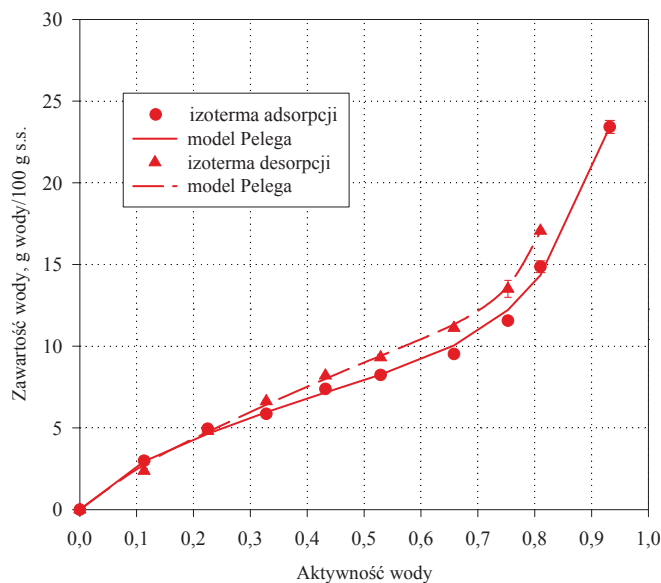
Źródło: Badania własne



Rys. 3. Izotermy adsorpcji i desorpcji wody makaronu ryżowego.

Fig. 3. Water adsorption and desorption isotherms of rice pasta.

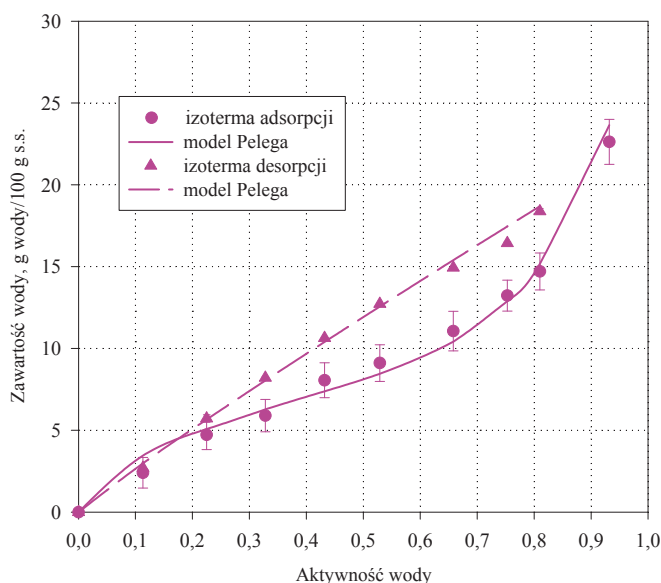
Źródło: Badania własne



Rys. 2. Izotermy adsorpcji i desorpcji wody makaronu pszennego jajecznego.

Fig. 2. Water adsorption and desorption isotherms of wheat pasta with eggs.

Źródło: Badania własne



Rys. 4. Izotermy adsorpcji i desorpcji wody makaronu sojowego.

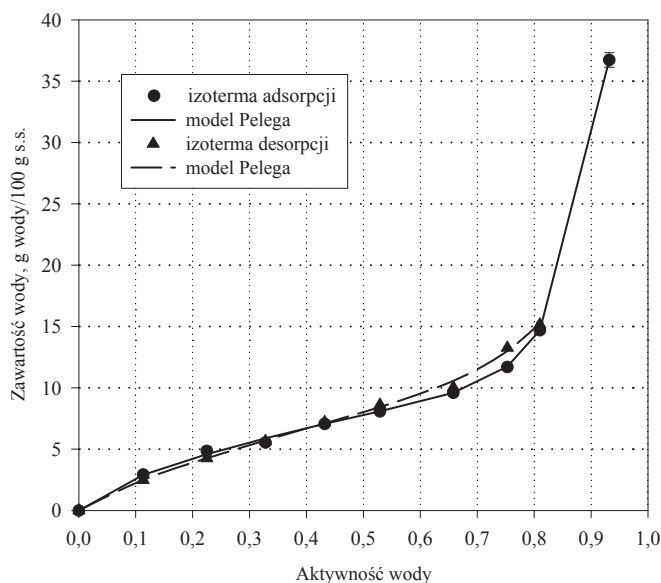
Fig. 4. Water adsorption and desorption isotherms of soya pasta.

Źródło: Badania własne

[1] otrzymali otwarte pętle histerezy, przy wysokich wartościach aktywności wody, dla proszków skrobi ziemniaczanej. Z kolei, Pałacha i Chrzanowski [21] otrzymali zamknięte pętle histerezy przy aktywności wody ok. 0,8 dla modyfikowanych skrobi, kukurydzianej, z kukurydzy woskowej i z tapioki. Na tak zróżnicowany kształt pętli histerezy prawdopodobnie miało wpływ wiele czynników, m. in. zróżnicowany skład chemiczny i struktura badanych makaronów, temperatura i czas przechowywania oraz sposób

przygotowania próbek do badania procesu adsorpcji i desorpcji wody [1, 4].

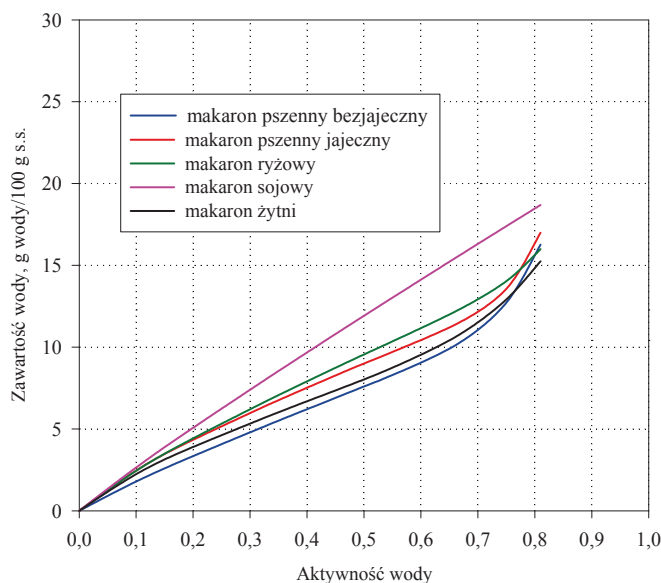
Na rysunku 6 zestawiono izotermy adsorpcji wody, a na rysunku 7 izotermy desorpcji wody, wszystkich badanych makaronów. Makarony pszenne jajeczne, ryżowe, sojowe i żytni wykazały podobną higroskopijność w przedziale aktywności wody od 0,0 do 0,8 (rys. 6). Natomiast, najmniej higroskopijnym okazał się makaron pszenne bezjajeczne. Po przekroczeniu aktywności wody 0,8, makaron żytni



Rys. 5. Izotermy adsorpcji i desorpcji wody makaronu żytniego.

Fig. 5. Water adsorption and desorption isotherms of rye pasta.

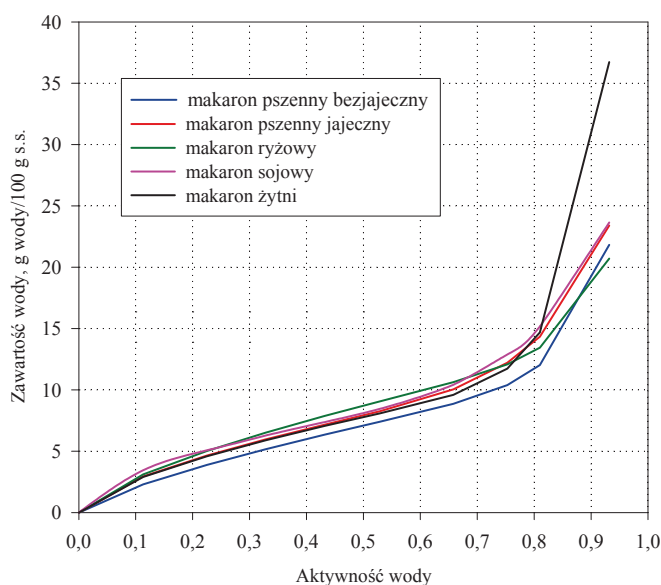
Źródło: Badania własne



Rys. 7. Izotermy desorpcji wody badanych makaronów opisane modelem Pelega.

Fig. 7. Water desorption isotherms of tested pasta described by Peleg model.

Źródło: Badania własne



Rys. 6. Izotermy adsorpcji wody badanych makaronów opisane modelem Pelega.

Fig. 6. Water adsorption isotherms of tested pasta described by Peleg model.

Źródło: Badania własne

wykazwał znaczący wzrost higroskopijności, na co prawdopodobnie miał wpływ rozpoczęty proces pęcznienia skrobi żytniej i rozpuszczanie pozostałych węglowodanów. W przypadku izoterm desorpcji wody (rys. 7), makaronem najlepiej oddającym wodę okazał się makaron pszenny bezjajeczny, a makaronem najtrudniej oddającym wodę był makaron sojowy. Białka zawarte w makaronie sojowym, silnie związały wodę i głównie przyczyniły się do najmniejszego ubytku wody z makaronu podczas procesu desorpcji.

3. Dopasowanie modeli izoterm do danych adsorpcji i desorpcji wody

Do opisu izoterm adsorpcji i desorpcji wody makaronów wykorzystano 5 modeli: 2 modele dwuparametrowe (BET i Oswina), 2 modele trójparametrowe (GAB i Lewickiego) oraz model czteroparametrowy (Pelega). W tabelach 2 i 3 zestawiono obliczone parametry dla 5 makaronów w zastosowanych modelach izoterm oraz pokazano zgodność dopasowania tych modeli, wyrażoną przez współczynnik determinacji (R^2) oraz średni błąd kwadratowy (RMS). Z wyjątkiem modelu Oswina, praktycznie wszystkie modele poprawnie opisywały przebieg izoterm adsorpcji i desorpcji wody makaronów (RMS mniejszy od 10%). Można zauważyć, że model Pelega najlepiej opisywał dane doświadczalne zarówno procesu adsorpcji jak i desorpcji wody. Wartości średniego błędu kwadratowego (RMS) dla modelu Pelega zawierały się w granicach od 1,96% dla makaronu żytniego (desorpcja) do 6,02% dla makaronu pszennej jajecznego (desorpcja). Graficzne dopasowanie danych uzyskanych z modelu Pelega do izoterm adsorpcji i desorpcji wody makaronów przedstawiono na rysunkach 1-7.

Arslan i Togrul [3] oraz Cunningham i wsp. [10] wykazały również, że model Pelega najlepiej opisywał izotermy adsorpcji i desorpcji wody makaronów. Z kolei, Al-Muhtaseb i wsp. [1], Pałacha i Chrzanowski [21] badając proces adsorpcji i desorpcji wody różnych skrobi oraz Pałacha i Malczewska [23] badając przyprawy, stwierdzili najlepszą przydatność modelu Pelega do opisu izoterm.

Modele BET i GAB pozwalają wyznaczyć zawartość wody w monowarstwie i są uznawane za najbardziej przydatne do przewidywania optymalnych warunków przechowywania oraz stabilności przechowalniczej żywności o małej i średniej zawartości wody [22]. Ogólnie, zarówno dla

procesu adsorpcji i desorpcji wody, wartości pojemności monowarstwy (u_m) uzyskane z modelu GAB były wyższe od wartości uzyskanych z modelu BET (tab. 2 i 3). Ponadto, dla wszystkich badanych makaronów, wyższe wartości u_m uzyskano w procesie desorpcji. Podobną tendencję stwierdzono dla proszków skrobi ziemniaczanej [1], modyfikowanych skrobi kukurydzianej, z kukurydzy woskowej i z tapioki [21], mąki kukurydzianej [20] oraz kardamonu i kurkumy [23].

Tabela 2. Obliczone parametry modeli izoterm adsorpcji wody badanych makaronów

Table 2. Calculated parameters of water adsorption isotherm models tested pasta

Model (parametry)	Makarony – proces adsorpcji				
	pszenny bezjajeczny	pszenny jajeczny	ryżowy	sojowy	żytni
BET*					
u_m	4,288	4,758	5,082	4,816	4,454
C	7,775	9,930	10,738	13,384	11,610
R ²	0,9957	0,9945	0,9926	0,9826	0,9933
RMS, %	4,79	4,27	4,64	7,18	4,48
Oswin					
h	6,628	7,755	8,228	8,121	7,922
z	0,449	0,421	0,353	0,429	0,460
R ²	0,9952	0,9951	0,9948	0,9920	0,8889
RMS, %	7,49	5,62	9,06	6,08	10,93
GAB					
u_m	5,790	5,631	6,466	5,329	5,054
C	6,340	9,856	9,923	11,502	9,879
k	0,741	0,804	0,716	0,835	0,876
R ²	0,9342	0,9790	0,9780	0,9938	0,8921
RMS, %	8,84	7,57	5,55	6,01	12,71
Lewicki					
F	11,641	12,910	14,300	12,328	10,189
G	0,308	0,312	0,247	0,330	0,463
H	0,760	0,640	0,635	0,525	0,540
R ²	0,9877	0,9916	0,9961	0,9967	0,9463
RMS, %	5,87	5,94	4,33	5,76	10,82
Peleg					
A	25,257	20,920	17,530	20,022	62,803
B	12,504	8,464	12,435	6,809	13,095
D	11,979	12,446	14,073	11,703	12,312
E	0,756	0,661	0,691	0,560	0,662
R ²	0,9994	0,9971	0,9983	0,9986	0,9995
RMS, %	2,68	3,77	3,29	4,70	3,06

* zakres aktywności wody 0,000 – 0,432

Źródło: Badania własne

Wartości stałych C (model BET) oraz C i k (model GAB) (tab. 2 i 3) potwierdziły poprawność sigmoidalnego kształtu (izoterma typu II) izoterm adsorpcji i desorpcji wody badanych makaronów ($C > 3$, $k = 0,598 \div 0,876$) [18].

4. Powierzchnia właściwa badanych skrobi

W tabeli 4 podano wartości powierzchni właściwej badanych makaronów obliczone na podstawie pojemności monowarstwy BET oraz GAB. W każdym przypadku stwierdzono, wyższe wartości powierzchni właściwej obliczone dla pojemności monowarstwy GAB (od 10,7 do 35,0%). Makaron ryżowy posiadał największą powierzchnię właściwą wynoszącą 180,3 m²/g s.s. (u_m z BET) oraz 229,3 m²/g s.s. (u_m z GAB). Natomiast najmniejszą powierzchnię właściwą

posiadały makarony pszenne bezjajeczny oraz żytni, wynoszącą odpowiednio 152,1 i 158,0 m²/g s.s. Nieco wyższe wartości powierzchni właściwej otrzymali Włodarczyk-Stasiak i Jamroz [29] dla ekstrudatów skrobiowo-białkowych (od 209 do 298 m²/g s.s.).

Tabela 3. Obliczone parametry modeli izoterm desorpcji wody badanych makaronów

Table 3. Calculated parameters of water desorption isotherm models tested pasta

Model (parametry)	Makarony – proces adsorpcji				
	pszenny bezjajeczny	pszenny jajeczny	ryżowy	sojowy	żytni
BET*					
u_m	5,184	6,034	6,018	8,337	4,930
C	4,055	5,045	5,715	3,680	6,658
R ²	0,9968	0,9939	0,9954	0,9968	0,9987
RMS, %	4,46	6,73	4,03	5,47	2,03
Oswin					
h	7,305	8,652	9,040	10,860	7,788
z	0,538	0,516	0,487	0,520	0,500
R ²	0,9943	0,9693	0,9544	0,8892	0,9911
RMS, %	8,04	11,74	10,62	17,74	5,68
GAB					
u_m	5,232	6,784	7,896	11,340	5,812
C	5,684	5,690	6,379	5,670	7,081
k	0,855	0,791	0,683	0,598	0,793
R ²	0,9941	0,9837	0,9968	0,9931	0,9976
RMS, %	5,56	7,61	4,55	11,61	3,18
Lewicki					
F	9,900	14,710	18,031	27,572	12,591
G	0,471	0,321	0,216	0,122	0,333
H	0,759	0,846	0,870	0,999	0,742
R ²	0,9932	0,9866	0,9972	0,9963	0,9979
RMS, %	5,33	6,70	3,34	7,25	2,81
Peleg					
A	57,323	99,908	26,050	20,170	18,925
B	11,958	15,526	13,060	0,926	7,774
D	14,062	15,615	17,100	2,578	13,629
E	0,893	0,797	0,841	0,987	0,779
R ²	0,9989	0,9980	0,9978	0,9955	0,9986
RMS, %	3,25	6,02	2,76	4,92	1,96

* zakres aktywności wody 0,000 – 0,432

Źródło: Badania własne

Tabela 4. Powierzchnia właściwa adsorbentu (matrycy) badanych makaronów

Table 4. Specific surface area of adsorbent (matrix) tested pasta

Rodzaj makaronu	Powierzchnia właściwa (S), m ² /g s.s.	
	monowarstwy BET	monowarstwy GAB
pszenny bezjajeczny	152,1	205,4
pszenny jajeczny	168,8	199,7
ryżowy	180,3	229,3
sojowy	170,8	189,0
żytni	158,0	179,3

Źródło: Badania własne

WNIOSKI

1. Izotermy adsorpcji i desorpcji wody wszystkich badanych skrobi wykazały II typ izoterm wg klasyfikacji Brunauera i wsp.
2. Zjawisko histerezy było widoczne dla każdego makaronu, przy czym największą pętlą histerezy charakteryzował się makaron sojowy, a najmniejszą pętlę histerezy wykazał makaron żytni.
3. Model Pelega najlepiej opisywał dane sorpcyjne wszystkich makaronów w całym badanym zakresie aktywności wody 0,113 – 0,932 (proces adsorpcji) i 0,113 – 0,810 (proces desorpcji).
4. Wartości pojemności monowarstwy, zarówno dla procesu adsorpcji i desorpcji wody, wyznaczone z modelu GAB były wyższe od wartości wyznaczonych z modelu BET dla wszystkich makaronów. Ponadto, wyższe wartości pojemności monowarstwy uzyskano w procesie desorpcji.
5. Największą powierzchnię właściwą, największą pojemność monowarstwy, stwierdzono dla makaronu ryżowego, a najmniejszą powierzchnię właściwą posiadały makarony, pszenne bezjajeczny oraz żytni.

LITERATURA

- [1] **AL-MUHTASEB A.H., MCMINN W.A.M., MAGEE T.R.A. 2004.** *Water sorption isotherms of starch powders. Part 1. Mathematical description of experimental data.* Journal of Food Engineering, 61, 297-307.
- [2] **AOAC 1996.** *Official methods of analysis.* Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA.
- [3] **ARSLAN N., TOGRUL H. 2005.** *Modelling of water sorption isotherms of macaroni stored in a chamber under controlled humidity and thermodynamic approach.* Journal of Food Engineering, 69, 133-145.
- [4] **BENADO A.L., RIZVI S.S.H. 1985.** *Thermodynamic properties of water on rice as calculated from the reversible and irreversible isotherms.* Journal of Food Science, 50 (2), 101-105.
- [5] **BIZOT H. 1983.** *Using the "GAB" model to construct sorption isotherms.* In: Physical Properties of Foods (eds. R. Jowitt, F. Escher, B. Hallstrom, H.F.T. Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos), Applied Science Publishers, New York, 43-54.
- [6] **BRENNAN CH.S. 2005.** *Dietary fibre, glycaemic response, and diabetes.* Molecular Nutrition and Food Research, 49, 560-570.
- [7] **BRUNAUER S., DEMING L.S., DEMING W.E., TELLER E. 1940.** *On the theory of the van der Waals adsorption of gases.* Journal of the American Chemical Society, 62, 1723-1732.
- [8] **BRUNAUER S., EMMETT P.H., TELLER E. 1938.** *Adsorption of gases in multilayers.* Journal of the American Chemical Society, 60, 309-319.
- [9] **CUNIN C., HANDSCHIN S., WALTER P., ESCHER F. 1995.** *Structural changes of starch during cooking of durum wheat pasta.* Lebensmittel-Wissenschaft und – Technologie, 28(3), 323-328.
- [10] **CUNNINGHAM S.E., MCMINN W.A.M., MAGEE T.R.A., RICHARDSON P.S. 2007.** *Modelling water absorption of pasta during soaking.* Journal of Food Engineering, 82, 600-607.
- [11] **CYBULSKA E.B. 2002.** *Woda jako składnik żywności.* W: Chemia żywności. Skład, przemiany i właściwości żywności (red. Z. Sikorski), WNT, Warszawa, 55-87.
- [12] **FEILLET P., DEXTER J.E. 1996.** *Quality requirements of durum wheat for semolina milling and pasta production.* In: Pasta and Moodle Technology (eds J. E. Kruger, R.R. Matsuo, J.W. Dick), AACC, Saint Paul, MN, 95-111.
- [13] **GAL S. 1983.** *The need for, and practical applications of sorption data.* In: Physical Properties of Foods (eds R. Jowitt, F. Escher, B. Hallstrom, H.F.T. Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos). Applied Science Published, New York, 13-25.
- [14] **GREENSPAN L. 1977.** *Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions.* Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry, 81A, 89-96.
- [15] **LABUZA T.P. 1968.** *Sorption phenomena in food.* Food Technology, 22, 263-272.
- [16] **LABUZA T.P., KANANE A., CHEN J.Y. 1985.** *Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods.* Journal of Food Science, 50(2), 385-391.
- [17] **LEWICKI P.P. 1998.** *A three parameter equation for food moisture sorption isotherms.* Journal of Food Process Engineering, 21, 127-144.
- [18] **LEWICKI P.P. 1997.** *The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms.* International Journal of Food Science and Technology, 32(6), 553-557.
- [19] **OSWIN C.R. 1946.** *The kinetics of package life. III. The isotherm.* Journal of Chemical Industry (London), 65, 419-423.
- [20] **OYELADE O.J., TUNDE-AKINTUNDE T.Y., IGBEKA J.C., OKE M.O., RAJI O.Y. 2008.** *Modelling moisture sorption isotherms for maize flour.* Journal of Stored Products Research, 44, 179-185.
- [21] **PAŁACHA Z., CHRZANOWSKI P. 2013.** *Badanie procesu adsorpcji i desorpcji wody wybranych skrobi.* Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 23/42(1), 58-63.
- [22] **PAŁACHA Z. 2010.** *Właściwości sorpcyjne.* W: Właściwości fizyczne żywności (red. Z. Pałacha, I. Sitkiewicz), WNT, Warszawa, 143-169.
- [23] **PAŁACHA Z., MALCZEWSKA A. 2010.** *Izotermy adsorpcji i desorpcji wody wybranych przypraw.* Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 20/36(1), 12-18.

- [24] **PELEG M. 1993.** *Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms.* Journal of Food Process Engineering, 16(1), 21-37.
- [25] **PETITOT M., ABECASSIS J., MICARD V. 2009.** *Structuring of pasta components during processing: impact on starch and protein digestibility and allergenicity.* Trends in Food Science and Technology, 20, 521-532.
- [26] **PENG G., CHEN X., WU W., JIANG X. 2007.** *Modeling of water sorption isotherm for corn starch.* Journal of Food Engineering, 80, 562-567.
- [27] **ROCKLAND L.B. 1960.** *Saturated salt solution for static control of relative humidity between 5 and 40°C.* Analytical Chemistry, 32, 1375-1376.
- [28] **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. Hallstrom, H.F.T. Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos), Elsevier Applied Science Publishers, London, 65-87.
- [29] **WŁODARCZYK-STASIAK M., JAMROZ J. 2008.** *Analysis of sorption properties of starch-protein extrudates with the use of water vapour.* Journal of Food Engineering, 85, 580-589.