

AGATA MARZEC, PIOTR P. LEWICKI

WŁAŚCIWOŚCI SORPCYJNE PIECZYWA CHRUPKIEGO

Streszczenie

Celem pracy było określenie właściwości sorpcyjnych ekstrudowanego pieczywa chrupkiego pszennego i żytniego. Właściwości sorpcyjne obu rodzajów produktów badano metodą statyczną i dynamiczną. Zakres pracy obejmował analizę izoterm oraz kinetyk sorpcji wyznaczonych w środowisku o aktywności wody 0; 0,329; 0,648; 0,903 i 1. Zmierzona zawartość i aktywność wody w pieczywie pochodzącym bezpośrednio z produkcji nie odpowiadała wartościom wyznaczonym na podstawie izoterm sorpcji pary wodnej. Podobnie pomiary właściwości sorpcyjnych w warunkach dynamicznych nie korelowały z wyznaczonymi na podstawie pomiarów w warunkach statycznych. Z równania GAB wyznaczono pojemność monowarstwy pieczywa chrupkiego pszennego, która wyniosła 5,13 g/100 g s.s., co odpowiada aktywności wody 0,110. W przypadku pieczywa żytniego wartość ta wyniosła 4,68 g/100 g s.s., przy aktywności wody 0,109. Badane rodzaje pieczywa różniły się wyjściową aktywnością wody i jej zawartością, stąd w zależności od aktywności wody środowiska sorpcja przebiegała z różną intensywnością. Desorpcja wody jest bardzo wolna i prowadzi do uzyskania stanu pseudorównowagi. Adsorpcja zależy od różnicy pomiędzy aktywnością wody pieczywa i aktywnością wody środowiska. Im różnica ta jest większa, tym ilość adsorbowanej wody jest większa, a czas osiągnięcia stanu równowagi dłuższy. Wartości równowagowej zawartości wody obliczone na podstawie kinetyki adsorpcji były bliskie wartościom uzyskanym metodą statyczną. Jednak metodą dynamiczną uzyskiwano z reguły wartości wyższe o ponad 4% w stosunku do wartości mierzonych statycznie. Wydaje się, że obserwowane zmiany ilości adsorbowanej wody przez pieczywo chrupkie, w zależności od aktywności wody środowiska, wynikały z przemian strukturalnych określonych składników pieczywa.

Słowa kluczowe: pieczywo chrupkie, izoterm sorpcji, kinetyka sorpcji.

Wstęp

W technologii żywności duże znaczenie ma zjawisko sorpcji pary wodnej przez produkty żywnościowe i dotyczy ono procesów, podczas których następuje przenoszenie jednego lub więcej składników między fazami. Zdolność sorpcji pary

*Dr inż. A. Marzec, prof. dr hab P.P. Lewicki, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Technologii Żywności, SGGW, ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa,
e-mail: danak@alpha.sggw.waw.pl*

wodnej jest cechą charakterystyczną danego produktu i zależy wyłącznie od jego budowy i składu chemicznego. Graficzne lub analityczne przedstawienie zależności między ilością zaadsorbowanej wody przez produkt a wilgotnością względną otaczającego powietrza nosi nazwę izotermy sorpcji. Znajomość przebiegu izoterm sorpcji pary wodnej produktu dostarcza wielu cennych informacji na temat struktury produktów spożywczych. Pozwala na teoretyczną interpretację zjawisk fizycznych zachodzących na powierzchni kontaktu żywność – substancja lotna, jest podstawą do projektowania procesu suszenia, przewidywania charakteru zepsucia produktu, jak również określenia optymalnej zawartości wody w produkcie [11]. Każdy produkt ma tzw. krytyczną zawartość wody, której przekroczenie w wyniku np. sorpcji pary wodnej powoduje niekorzystne zmiany cech jakościowych. Zmiany te mogą mieć charakter fizyczny, fizykochemiczny, mikrobiologiczny i enzymatyczny [4, 5].

Izotermy adsorpcji wyznaczane są metodą statyczną, która jest czasochłonna i nie daje możliwości poznania niektórych mechanizmów odpowiedzialnych za proces sorpcji pary wodnej w produktach spożywczych. Wpływ struktury adsorbentu, rodzaju adsorbentu, warunków prowadzenia procesu i innych czynników na pojemność adsorbentu analizowany jest na podstawie pomiarów statycznych.

Kinetyka adsorpcji jest nauką o szybkości procesu adsorpcji. Zależność przyrostu zawartości wody w funkcji czasu nosi nazwę krzywej kinetycznej i jest podstawą do interpretacji procesu sorpcji pary wodnej przez produkt. Zastosowanie pomiarów dynamicznych sorpcji pary wodnej przez produkty spożywcze ma wiele zalet w porównaniu z metodą statyczną. Pozwala na skrócenie czasu oznaczania oraz daje możliwość analizy wpływu wielu czynników na szybkość procesu [6].

Celem pracy było określenie właściwości sorpcyjnych pieczywa chrupkiego pszenne i żytnie wyznaczonych metodą statyczną i dynamiczną. Zakres pracy obejmował analizę izoterm oraz kinetykę sorpcji pary wodnej.

Materiał i metody badań

Materiał do badań stanowiło pieczywo chrupkie ekstrudowane, pszenne i żytnie, naturalne bez cukru, pochodzące bezpośrednio z linii produkcyjnej.

W próbkach zerowych (pochodzących bezpośrednio z linii produkcyjnej) oraz przechowywanych wykonano oznaczenie aktywności wody za pomocą higrometru Hygroskop DT 2 firmy Rotronic o dokładności $\pm 0,001$, w temp. 25°C oraz wilgotności zgodnie z polską normą PN-84/A-86361 [14].

Właściwości sorpcyjne pieczywa badano metodą statyczną i dynamiczną. Badania właściwości sorpcyjnych próbek pieczywa chrupkiego o masie około 1 g, odważanych na wadze Metler AG, wykonywano z dokładnością $\pm 0,00001\text{g}$.

Metodą statyczną wyznaczano izotermy adsorpcji pary wodnej pieczywa pochodzącego bezpośrednio z linii produkcyjnej. Próbki przechowywano 3 miesiące w

higrostatach zawierających roztwory kwasu siarkowego i nasycone roztwory soli, które zapewniały wilgotność względną powietrza od 0 do 90%, w temp. 25°C.

Metodą dynamiczną badano kinetykę sorpcji pary wodnej w próbkach pochodzących bezpośrednio z linii produkcyjnej przy poziomie aktywności wody środowiska 0; 0,329; 0,648; 0,903 i 1, w temp. 25°C, w ciągu 24 h, na stanowisku zapewniającym ciągły pomiar masy próbek. Zmianę masy podczas sorpcji rejestrowano, co 1-5 min, wykorzystując program komputerowy „Pomiar dla DOS”.

Obliczenia

Zmiany zawartości wody przedstawiono w układzie współrzędnych czas – zawartość wody, uzyskując krzywe kinetyczne, które opisano równaniami:

$$u = a + \frac{b}{c + t} \quad (1)$$

$t \rightarrow \infty$, równowagowa zawartość wody równa jest (a)

$$u = a + b \left(1 - \frac{1}{1 - bct} \right) \quad (2)$$

$t \rightarrow \infty$, równowagowa zawartość wody równa jest (a + b)

$$u = a + b(1 - \exp(-ct)) + d(1 - \exp(-ct)) \quad (3)$$

$t \rightarrow \infty$, równowagowa zawartość wody równa jest (a + b + d)

Oznaczenia:

a, b, c, d – stałe,

t – czas [h],

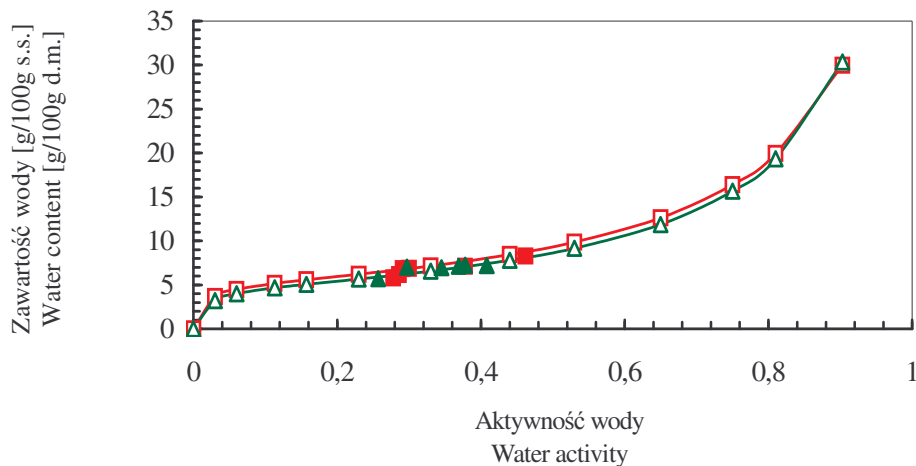
u – zawartość wody [g/100g s.s.],

a_w – aktywność wody.

Wyniki

Izotermy sorpcji pary wodnej pieczywa chrupkiego pszennego i żytniego

Uzyskane izotermy adsorpcji pary wodnej pieczywa chrupkiego pszennego i żytniego charakteryzują się typowym sigmoidalnym kształtem wykazując podobieństwo do izoterm typu II według klasyfikacji Brunauera i wsp. [1] (rys. 1). Ten typ izoterm sorpcji pary wodnej jest powszechny w przypadku produktów zawierających duże ilości skrobi. Kształt związany jest z występowaniem zakresu adsorpcji monomolekularnej w atmosferze o niskiej aktywności wody (a_w poniżej 0,30), zakresu adsorpcji wielowarstwowej (a_w pomiędzy 0,30 a 0,65) oraz zakresu kondensacji kapilarnej (a_w powyżej 0,65).



- – pszenne / wheat bread
- – bezpośrednio z produkcji pszenne / wheat bread taken direct from the production line
- △ – żytnie / rye bread
- ▲ – bezpośrednio z produkcji żytnie / rye bread taken direct from the production line

Rys. 1. Izotermi adsorpcji pary wodnej pieczywa chrupkiego.

Fig. 1. Sorption isotherms of crispbread.

Izoterma adsorpcji pieczywa chrupkiego pszennego przebiega nad izotermą pieczywa chrupkiego żytniego. W zakresie niskich aktywności wody od 0 do około 0,157 i wysokich powyżej 0,753 nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy równowagową zawartością wody w badanych produktach. Największe różnice między produktami wystąpiły w przedziale średnich aktywności wody, przy $a_w = 0,438$ równowagowa zawartość wody w pieczywie pszenным była o około 8% wyższa niż w pieczywie żytnim (rys. 1).

Zmierzona zawartość i aktywność wody w pieczywie pochodzącym bezpośrednio z produkcji nie odpowiadała wartościom wyznaczonym na podstawie izoterm sorpcji pary wodnej. Podobnie pomiary właściwości sorpcyjnych w warunkach dynamicznych nie korelowały z wyznaczonymi na podstawie pomiarów statycznych. Sytuacja taka spowodowana była prawdopodobnie zmianami składników pieczywa w trakcie długiego czasu przechowywania. Większość produktów zbożowych w temperaturze pokojowej, to produkty amorficzne i przy niskiej zawartości wody ich składniki (skrobia i gluten) są w stanie szklistym [2, 7, 18]. Woda powoduje przejście stanu amorficznego w stan lepkosprężysty, w którym ruchliwość molekuł jest znacznie większa niż w stanie amorficznym i obserwuje się w żywności zmiany chemiczne, m.in. przyspieszenie krystalizacji składników [3, 13, 15, 16].

Przebieg izoterm opisano równaniem GAB. W przypadku pieczywa chrupkiego pszennego pojemność monowarstwy była równa 5,13 g/100 g s.s., co odpowiadało aktywności wody 0,110, zaś w odniesieniu do żytniego wartość ta wynosiła 4,68 g/100 g s.s., przy aktywności wody 0,109 (tab. 1). Na ilość zaadsorbowanej wody w tego typu produktach wpływ ma ruchliwość łańcuchów biopolimerów. Wzrost zawartości wody powoduje rozluźnienie struktury i odsłonięcie nowych centrów adsorpcji, na skutek czego zdolność do adsorpcji wzrasta.

Tabela 1

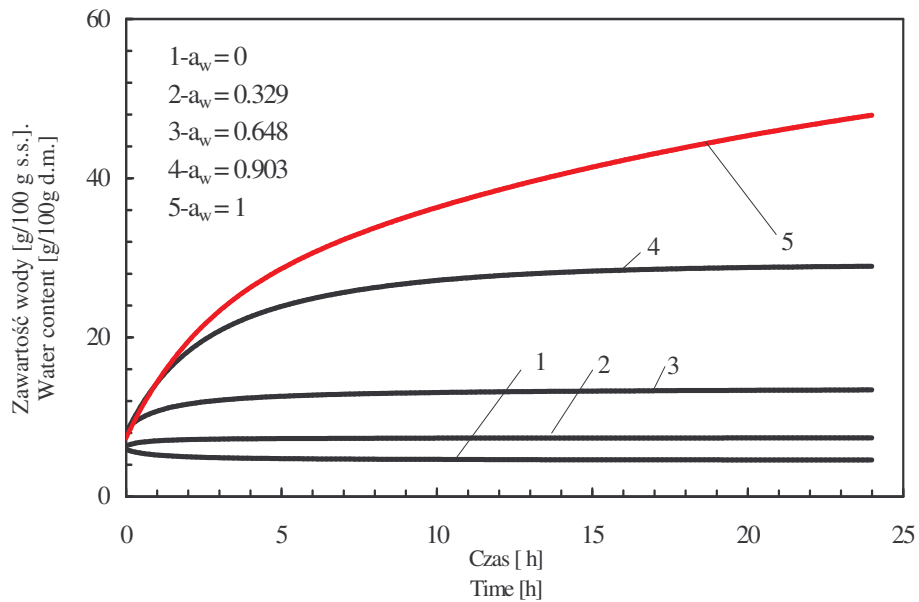
Współczynniki równania GAB użytego do opisu izoterm sorpcji pary wodnej przez pieczywo chrupkie.
Parameters in the GAB equation used to describe isotherms of water vapour sorption by crispbread.

Rodzaj pieczywa chrupkiego Kind of crispy bread	Pszenne Wheat crispbread	Żytnie Rye crispbread
Parametry równania GAB Parameters in the GAB equation	$u_m = 5,1295$	$u_m = 4,6819$
	$c = 80,4526$	$c = 69,4979$
	$k = 0,9184$	$k = 0,9370$
	$r^2 = 0,9980$	$r^2 = 0,9985$

Kinetyki sorpcji pary wodnej pieczywa chrupkiego pszennego i żytniego

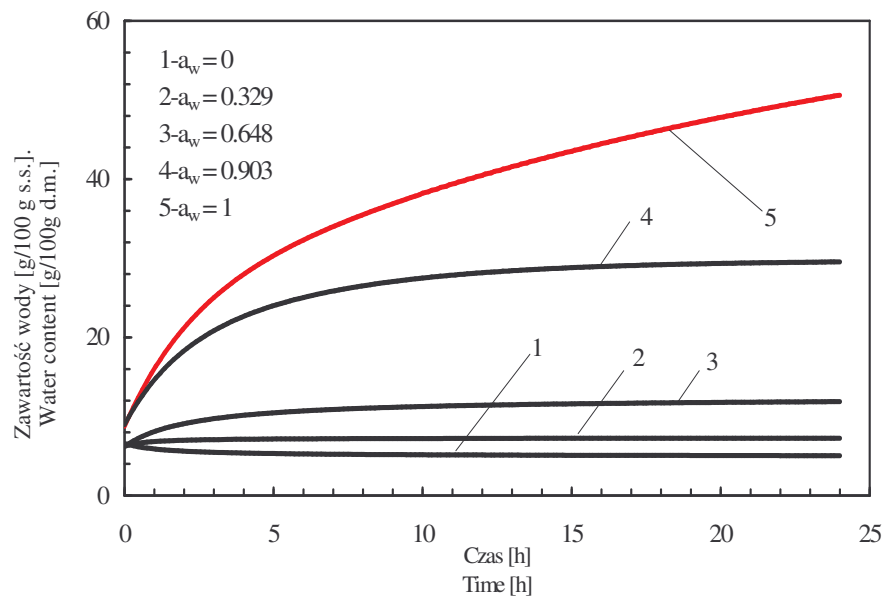
Na mechanizm sorpcji pary wodnej w pieczywie chrupkim pszennym i żytnim znacznie wpływa aktywność wody środowiska (rys. 2 i 3). W środowisku o aktywności wody 0 pieczywo chrupkie oddawało wodę. Największe zmiany jej zawartości wystąpiły do 5 h procesu desorpcji; w pieczywie pszennym zawartość wody zmniejszyła się o około 21% w stosunku do wartości początkowej (rys. 2), zaś w pieczywie żytnim zmniejszenie to wynosiło około 15%.

Dalszy czas desorpcji do 24 h spowodował zmniejszenie zawartości wody o około 24% w pieczywie chrupkim pszennym i o około 19% w pieczywie chrupkim żytnim. Porównując ilość oddanej wody przez pieczywo po czasie desorpcji 5 i 24 h należy stwierdzić, że oba rodzaje badanych produktów desorbują wodę bardzo wolno i w zasadzie osiągają stan pseudorównowagi. Jednak obliczona teoretyczna równowagowa zawartość wody na podstawie równania (2) w przypadku pieczywa chrupkiego pszennego była na poziomie 4,54 g/100 g s.s. (tab. 2), a żytniego 4,97



Rys. 2. Wpływ aktywności wody środowiska na kinetykę sorpcji pary wodnej pieczywa chrupkiego pszennego.

Fig. 2. The water activity effect on the kinetics of water vapour sorption by wheat crispbread.



Rys. 3. Wpływ aktywności wody środowiska na kinetykę sorpcji pary wodnej pieczywa chrupkiego żytniego.

Fig. 3. The water activity effect on the kinetics of water vapour sorption by rye crispbread.

Tabela 2

Współczynniki równań (1), (2) i (3) adsorpcji i desorpcji wody pieczywa chrupkiego pszennego pochodzącego bezpośrednio z produkcji.

Parameters in equations (1), (2), and (3) for the kinetics of water adsorption and desorption by wheat crispbread.

Pieczywo chrupkie pszenne / Wheat crispbread					
Początkowa aktywność wody i zawartość wody w pieczywie Initial water activity and water content in crispbread					
aw	0,278	0,286	0,462	0,300	0,378
Zawartość wody [g/100 g s.s.] Water content [g/100 g d.m.]	5,80	6,17	8,17	6,89	7,12
Współczynniki Parameters	Aktywność wody środowiska Water activity				
	0,00	0,329	0,648	0,903	1,00
A	4,5403	6,3608	8,4319	7,9805	7,3546
B	1,3639	1,0374	5,5231	8,6174	15,6530
C	1,0032	0,6035	1,2728	0,6701	0,4246
D	-	-	-	12,4721	38,6137
E	-	-	-	0,1880	0,0432
r ²	0,991	0,983	0,998	0,999	0,999
Obliczona równowagowa zawartość wody [g/100 g s.s.] The calculated Equilibrium Water Content [g/100 g d.m.]					
ur	4,54	7,39	13,95	29,07	61,62
Zawartość wody po 24 h procesu [g/100 g s.s] Water content after the 24h sorption process [g/100 g d.m.]					
u	4,60	7,37	13,90	29,00	47,37
Równowagowa zawartość wody wyznaczona z izotermy sorpcji [g/100 g s.s] The Equilibrium Water Content calculated from the sorption isotherms [g/100 g d.m.]					
ur	0	7,15	12,63	29,87	-

g/100 g s.s. (tab. 3), a więc kinetyka desorpcji nie prowadzi do właściwych wilgotności równowagowych. Teoretycznie w środowisku o $a_w = 0$ materiał powinien oddać całą wodę i jego równowagowa wilgotność powinna wynosić zero.

Osiągnięta przez pieczywo chrupkie pszenne oraz żytnie zawartość wody w środowisku o $a_w = 0$ była bliska jej ilości zaadsorbowanej w monowarstwie i w tym zakresie była ona najsilniej związana z materiałem. Ilość związanej wody zależy od

zawartości hydrofilowych polimerów, takich jak białka i polisacharydy. Wielu badaczy wykazało, że znaczna część wody jest silnie powiązana z pozostałymi składnikami żywności, nie wymarza podczas zamrażania, a także jest niedostępna do przebiegu reakcji chemicznych [4, 10, 11].

Tabela 3

Współczynniki równań (1), (2) i (3) adsorpcji i desorpcji wody pieczywa chrupkiego żytniego pochodzącego bezpośrednio z produkcji.

Parameters in equations (1), (2), and (3) for the kinetics of water adsorption and desorption by rye crispbread.

Pieczywo chrupkie żytnie / Rye crispbread					
Początkowa aktywność wody i zawartość wody w pieczywie Initial water activity and water content in crispbread					
aw	0,297	0,345	0,257	0,378	0,408
Zawartość wody [g/100 g s.s.] Water content [g/100 g d.m.]	6,04	6,95	5,71	7,24	7,35
Współczynniki Parameters	Aktywność wody środowiska Water activity				
	0,00	0,329	0,648	0,903	1,00
A	4,9654	6,2271	6,2071	8,9803	8,7581
B	1,6245	1,0685	6,2153	7,9353	15,3261
C	1,3502	0,7830	2,2983	0,6212	0,4524
D	-	-	-	12,8119	42,3949
E	-	-	-	0,1755	0,0409
r2	0,995	0,988	0,999	0,999	0,999
Obliczona równowagowa zawartość wody [g/100 g s.s.] The calculated water content [g/100 g d.m.]					
ur	4,97	7,29	12,42	29,73	66,48
Zawartość wody po 24 h procesu [g/100 g s.s.] Water content after the 24h sorption process [g/100 g d.m.]					
u	5,08	7,24	12,41	29,72	50,64
Równowagowa zawartość wody wyznaczona z izotermy sorpcji [g/100 g s.s.] The equilibrium water content calculated from the sorption isotherms [g/100 g d.m.]					
ur	0	6,56	11,86	30,34	-

W materiale żywnościowym woda jest utrzymywana przez różne mechanizmy fizyczne i chemiczne. Stopień związania wpływa na ruchliwość jej cząsteczek. Im są one silniejsze, tym mniejsza szybkość z jaką cząsteczki zamieniają się miejscami.

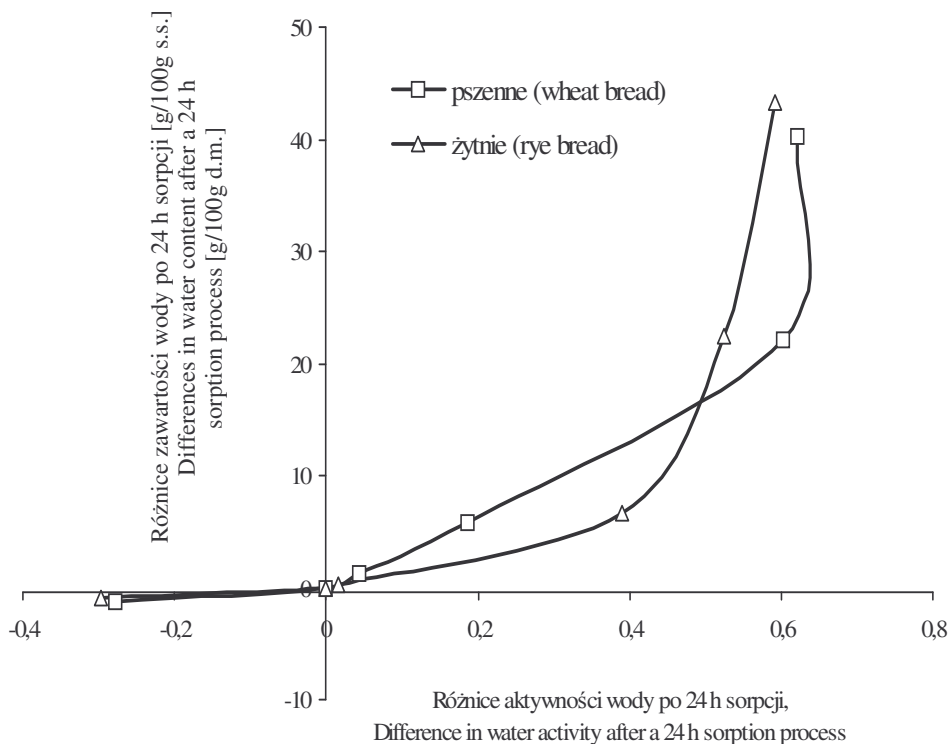
Cząsteczki wody związanej nigdy nie są nieruchome. Sposób związania może się zmieniać wraz z zawartością wody. W sensie praktycznym wiązanie oznacza zdolność żywności do trwałego utrzymywania wody w czasie obróbki i przechowywania [5, 15].

Kinetykę adsorpcji pary wodnej przez badane produkty określono w środowisku o aktywności wody: 0,329; 0,648; 0,903; 1,00. Krzywe kinetyczne pieczywa chrupkiego pszennego i żytniego przedstawiono na rys. 2. i 3. W przypadku procesu adsorpcji pary wodnej w środowisku o aktywności wody 0,329 po 5 h procesu, zawartość wody w pieczywie chrupkim pszennym wzrosła o około 15,5% i wynosiła 7,28 g/100 g s.s.. Dalszy wzrost zawartości wody był nieznaczny, po 24 h procesu adsorpcji zawartość wody wzrosła już tylko nieznacznie i była równa 7,37 g/100 g s.s. (rys. 2). Podobną tendencję tych zmian zaobserwowano w pieczywie chrupkim żytnim (rys. 3). Ilość zaadsorbowanej wody po 5 h procesu adsorpcji była o około 13% wyższa w stosunku do wartości początkowej i wynosiła 7,18 g/100 g s.s.. Dalsza adsorpcja w czasie 24 h spowodowała już tylko nieznaczny wzrost zawartości wody do 7,24 g/100 g s.s. (rys. 3). Jednocześnie stwierdzono, że już po 5 h procesu adsorpcji pary wodnej zarówno pieczywo pszenne, jak i żytnie osiągało stan zbliżony do równowagi. Natomiast dwudziestoczterogodzinna adsorpcja pary wodnej w środowisku o aktywności wody 0,329 umożliwiła osiągnięcie przez pieczywo stanu równowagi. Świadczy o tym obliczona równowagowa zawartość wody, która w przypadku pieczywa pszennego wynosiła 7,39 g/100 g s.s. (tab. 2), a żytniego 7,29 g/100 g s.s. (tab. 3).

Krzywe kinetyki adsorpcji pary wodnej przez badane pieczywa w środowisku o aktywności wody 0,648 charakteryzowały się ciągłym wzrostem zawartości wody do 10 h procesu adsorpcji (rys. 2 i 3). Ilość zaadsorbowanej wody przez pieczywo pszenne po 10 h procesu adsorpcji była o około 39% wyższa niż początkowa zawartość wody i wynosiła 13,07 g/100 g s.s.. Dalszy proces adsorpcji do 24 h spowodował nieznaczny, bo około 1% wzrost zawartości wody w tym pieczywie (rys. 2). Natomiast w pieczywie żytnim ilość zaadsorbowanej wody po 10 h procesu była o około 50% większa od początkowej zawartości. Kontynuowanie adsorpcji do 24 h spowodowało już tylko niewielki wzrost zawartości tego składnika wynoszący około 1,5% (rys. 3). Zaobserwowano, że w środowisku o aktywności wody 0,648 oba badane produkty osiągały stan zbliżony do równowagi już po 10 h procesu adsorpcji pary wodnej. Z obliczeń równowagowej zawartości wody wynika, że po 24 h procesu w środowisku o aktywności wody 0,648 adsorpcja została zakończona (tab. 2 i 3).

Krzywe kinetyczne pieczywa chrupkiego pszennego i żytniego w środowisku o aktywności wody 0,903 miały podobny kształt. Obserwowano ciągły wzrost zawartości wody do 15 h trwania procesu (rys. 2 i 3). Pieczywo pszenne osiągało około 3,9-krotnie większą zawartość wody, tj. 28,27 g/100 g s.s. (rys. 2), zaś żytnie około 3,4-krotnie tj. 28,78 g/100 g s.s. (rys. 3), w stosunku do początkowej jej zawartości. Badane produkty w

środowisku o aktywności wody 0,903 osiągały stan równowagi po 24 h procesu adsorpcji (tab. 2 i 3).



Rys. 4. Zmiany zawartości wody w funkcji różnicy aktywności wody w pieczywie chrupkim.

Fig. 4. Changes in the water content as a function of water activity difference in crispbreads.

Najwyższą zawartością wody charakteryzowały się produkty podczas adsorpcji pary wodnej w środowisku o aktywności wody 1. Zarówno w pieczywie chrupkim pszennym, jak i żytnim obserwowano duże zmiany zawartości wody w całym przedziale czasowym procesu (rys. 2 i 3). Badane pieczywa nie uzyskały stanu równowagi po 24 godzinach procesu adsorpcji w środowisku o $a_w = 1$. Po 15 h procesu adsorpcji pieczywo chrupkie pszenne osiągało około 6-krotnie większą zawartość wody, a pieczywo żytnie około 5,3-krotnie wyższą w stosunku do wartości wyjściowej (rys. 2 i 3). Obliczona równowagowa zawartość wody obu rodzajów badanego pieczywa, w środowisku o aktywności wody 1 jest o około 23% wyższa niż zawartość wody otrzymana po 24 h procesu adsorpcji (tab. 2 i 3).

Stwierdzono, że równowagowa zawartość wody obliczona na podstawie kinetyki adsorpcji pary wodnej po 24 h procesu była nieznacznie wyższa niż równowagowa

zawartość wody wyznaczona z izoterm sorpcji (tab. 2 i 3). Różnice te były statystycznie nieistotne. Potwierdziły to wyniki pomiarów aktywności wody próbek po adsorpcji pary wodnej w badaniach kinetycznych i statycznych.

Badane rodzaje pieczywa różniły się między sobą początkową aktywnością wody i jej zawartością. Stąd w zależności od aktywności wody środowiska sorpcja przebiegała z różną intensywnością. Na rys. 4. przedstawiono różnice między ilością zaadsorbowanej wody po 24 h a początkową zawartością wody, (przyrost lub ubytek zawartości wody) w funkcji różnicy aktywności wody środowiska i produktu. Stwierdzono, że niezależnie od rodzaju produktu, zmiany zawartości wody przypadające na jednostkową zmianę jej aktywności są większe po stronie adsorpcji niż po stronie desorpcji. Oznacza to, że proces adsorpcji przebiega szybciej niż proces desorpcji, czyli produkt łatwiej chłonie wodę niż ją oddaje.

Wydaje się, że obserwowane zmiany w ilości adsorbowanej wody przez pieczywo chrupkie, w zależności od aktywności wody środowiska, wynikają z przemian strukturalnych określonych składników pieczywa. Może to być związane ze zwiększeniem ruchliwości łańcuchów skrobi i białek. Rozluźnienie struktury prowadzi do odsłonięcia nowych centrów adsorpcji i szybkość sorpcji bardzo wzrasta [6, 12]. Ponadto, po procesie ekstruzji składniki pieczywa tworzą stan amorficzny [8, 9, 18], który po wchłonięciu pewnej ilości wody przechodzi w lepkosprężysty. Umożliwia on ruchy translacyjne i rotacyjne polimerów. W rezultacie obserwuje się intensyfikację procesu sorpcji.

Wnioski

1. Pieczywo chrupkie pszenne i żytnie silnie adsorbują parę wodną z otoczenia i charakteryzują się izotermą sorpcji typu II, zgodnie z klasyfikacją Brunauera i wsp. W zakresie średnich aktywności wody pieczywo pszenne adsorbuje więcej pary wodnej niż pieczywo żytnie.
2. Kinetyka adsorpcji zależy od różnicy pomiędzy aktywnością wody pieczywa i aktywnością wody środowiska. Im różnica ta jest większa tym ilość adsorbowanej wody jest większa, a czas osiągnięcia stanu równowagi dłuższy
3. Desorpcja wody z pieczywa jest bardzo wolna i w czasie 24 h uzyskuje się stan pseudorównowagi.
4. Równowagowe zawartości wody obliczone na podstawie kinetyki adsorpcji są bliskie wartościom uzyskanym metodą statyczną. Jednak metodą dynamiczną uzyskuje się z reguły wartości wyższe o ponad 4% w stosunku do wartości statycznych.

Literatura

- [1] Attenburrow G.E., Davies A.P., Goodband R.M., Ingman S.J., Nicholls R.J.: The fracture behavior of starch and gluten in the glassy state, *J. Cereal Sci.*, 1992, **16** (1).
- [2] Brunauer S., Deming L.S., Deming W. E., Teller E.: On the theory of van der Waals adsorption of gases. *J. Am. Chem. Soc.*, 1940, **62**, 1723-1732.
- [3] Chang Y.P., Cheah P.B., Seow C.C.: Plasticizing-antiplasticizing effects of water on physical properties of tapioca starch films in the glassy state. *J. Food Sci.*, 2000, **65** (3), 445-451.
- [4] Czapski J.: Zmiany jakości żywności w czasie przechowywania. W: *Opakowania żywności – pod red. Czarniawskiego B. i Michniewicz J.* Agro Food Technology sp. z o. o., Czeladź 1998, s. 235-246.
- [5] Cybulska E. B.: Woda jako składnik żywności. W: *Chemia żywności. Skład, przemiany i właściwości żywności – pod red. Sikorskiego Z.E.* Wyd. 3 zmienione. WNT, Warszawa 2000, s. 59-94.
- [6] Domian E.: Adsorpcja pary wodnej przez żywność w proszku. Praca doktorska. Katedra Inżynierii i Maszynoznawstwa Przemysłu Spożywczego. SGGW, Warszawa 1997.
- [7] Hoseney R.C., Zeleznak K.J., Lai C.S.: Wheat gluten: a glassy polymer. *Cereal Chem.*, 1986, **63**, 285-286.
- [8] Keetels C.J.A.A., van Vliet T., Walstra P.: Relationship between the sponge structure of starch bread and its mechanical properties. *J. Cereal Sci.*, 1996, **24** (1), 27-31.
- [9] Le Meste M., Roudaut G., Davidou S.: Thermomechanical properties of glassy cereal foods. *J. Thermal. Anal.*, 1996, **47**, 1361-1376.
- [10] Lewicki P.P.: A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *J. Food Process Eng.*, 1998, **21**, 127-144.
- [11] Lewicki P.P.: Właściwości wody w produktach spożywczych, *Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej. Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 1999, **24**, 29-46.
- [12] Lewicki P.P.: Raoult's law based food water sorption isotherm. *J. Food Eng.*, 2000, **43**, 31-40.
- [13] Peleg M.: On modeling changes in food and biosolids and around their glass transition temperature range. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 1996, **36**, 46-67.
- [14] PN-84/A-8636. Wyroby specjalne. Oznaczanie zawartości suchej masy.
- [15] Ross Y.H.: Glass transition – related physicochemical changes in foods. *Food Technol.*, 1995, **10**, 97-102.
- [16] Slade L., Levine H.: Beyond water activity: Recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 1991, **30**, 115-360.
- [17] Van Hecke E., Allaf K., Bouvier J. M.: Texture and structure of crispy – puffed food products. II. Mechanical properties in puncture. *J. Texture Stud.*, 1998, **29** (6), 617-632.
- [18] Zeleznak K.J., Hoseney R.C.: The glass transition in starch. *Cereal Chem.*, 1987, **64** (2), 121-124.

WATER SORPTION PROPERTIES OF THE CRISPBREAD

S u m m a r y

The main objective of the paper was to determine sorption properties of extruded wheat and rye crispbreads. Those sorption properties were tested using static and dynamic methods. The scope of this study included the analysis of isotherms and kinetics of sorption, which were measured in an environment showing the following water activities: 0; 0.329; 0.648; 0.903; and 1. The tested wheat and rye crispbreads were taken directly from the production line. The water content and water activity in them did not correspond to values as

determined on the basis of water vapour sorption isotherms. Similarly, the sorption properties measured under the dynamic conditions did not correlate with the values determined on the basis of measurements taken under the static conditions. From the GAB equation, the volume of a wheat crispbread monolayer was measured. It was 5.13 g/100 g d.m., and this figure corresponded to the water activity being 0.110. As for the rye crispbread, this parameter equalled 4.68 g/100 g d.m. with the water activity being 0.109. The two types of the crispbread tested differed on the initial water activity and water contents. Thus, the intensity of the sorption process varied depending on the water activity in a given environment. The water desorption was stated to be very slow and led to a state of pseudo-equilibrium. The adsorption depended on the difference between the water activity in the crispbreads and in the environment. The greater this difference was, the higher the adsorbed water amount was, and the more time was necessary to reach the state of equilibrium. The values of equilibrium water content, calculated on the basis of the adsorption kinetics, were close to the values obtained by using the static method. However, while using the dynamic method, the values obtained were usually higher by more than 4% if compared with the statically measured ones. It seems that the changes observed in the quantities of water adsorbed by the crispbreads, depending on the water activity in a given environment, result from structural transformations of some particular components of the crispbread.

Key words: crispbread, sorption isotherms, sorption kinetics ☒