

AGATA MARZEC, MAŁGORZATA BOROWIEC, PIOTR P. LEWICKI

## BADANIE TEKSTURY PIECZYWA CHRUPKIEGO METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

### Streszczenie

Celem pracy było określenie zmian tekstury pieczywa chrupkiego, żytniego „Wasa” i „trzy zboża”, wywołanych zmianą aktywności wody, za pomocą analizy generowanego sygnału akustycznego. Próbki pieczywa poddawano procesowi łamania w maszynie wytrzymałościowej Zwick 1445 z jednoczesną rejestracją emisji akustycznej. Wyznaczono pracę łamania oraz deskryptory emisji akustycznej, takie jak widma akustyczne, liczba zdarzeń emisji akustycznej i współczynnik chrupkości pieczywa o aktywności wody od 0,038 do 0,650. Charakterystyki widmowe przedstawiono w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 15 kHz za pomocą programu WIDMOŚREDNI. Szczegółowej analizie poddano charakterystyki spektralne badanych produktów i stwierdzono, że niezależnie od aw emitują one dźwięki w zakresie częstotliwości 2–8 kHz i 13–14 kHz. Zmiana tekstury wyraża się również stopniowym zanikiem emisji akustycznej. Obliczono współczynnik chrupkości jako iloraz liczby zdarzeń EA i pracy łamania. W zakresie aktywności wody od 0,2 do 0,4 oba rodzaje pieczywa pozostały chrupkie, o czym świadczy współczynnik chrupkości. Liczba zdarzeń emisji akustycznej i współczynnik chrupkości malały w sposób wykładniczy ze wzrostem aktywności wody w pieczywie.

**Słowa kluczowe:** emisja akustyczna, pieczywo chrupkie, aktywność wody, właściwości mechaniczne

### Wprowadzenie

Tekstura jest jednym z podstawowych parametrów jakości suchych produktów zbożowych i obejmuje takie elementy składowe jakości, jak: kruchość, chrupkość, twardość oraz charakter fragmentacji. Jest to wielkość wieloparametryczna odbierana przez człowieka zmysłami dotyku, wzroku i słuchu, dlatego naturalne jest jej analizowanie metodami sensorycznymi. Stosowanie tych metod napotyka jednak na wiele niedogodności, które nie występują w metodach instrumentalnych.

---

*Dr inż. A. Marzec, prof. dr hab. P. Lewicki, mgr inż. M. Borowiec, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydz. Technologii Żywności, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159C, 02-776 Warszawa, e-mail: danak@alpha.sggw.waw.pl*

Wykorzystanie metod mechanicznych polega na deformowaniu materiału z określoną siłą i szybkością oraz pomiarze zmian zachodzących w materiale pod wpływem tych czynników. Interpretacja uzyskanych zależności siła-odkształcenie jest bardzo trudna, ze względu na ich skomplikowaną morfologię. Ponadto, różne określenia mogą być użyte do opisu tego samego produktu spożywczego. Określenie „chrupki” jest używane do produktów definiowanych jako „kruche” przez inny panel [6, 20].

Kruchość i chrupkość można kontrolować metodami akustycznymi przez pomiar sygnału akustycznego generowanego w procesie kruszenia produktów spożywczych. Najczęściej badania te są wykonywane przy użyciu teksturometrów wyposażonych w mikrofon, wzmacniacz sygnałów akustycznych oraz komputer do sterowania pomiarem i do rejestracji wyników. Rejestracja dźwięków generowanych w trakcie kruszenia produktów spożywczych jest złożonym problemem, ponieważ dźwięki te mają niską energię w porównaniu z energią tła akustycznego, w sposób nieunikniony rejestrowanego przez mikrofon [17]. Kontaktowa metoda pomiaru emisji akustycznej polega na rejestracji fal sprężystych transmitowanych od powierzchni produktu niszczonego do kontaktowego sensora drgań (akcelerometru) (fot. 1). Mierzone sygnały są wzmacniane w liniowym wzmacniaczu niskoszumowym, a następnie zapisywane w pamięci komputera PC przy zastosowaniu dźwiękowej karty przetwarzania analogowo-cyfrowego z częstotliwością zbierania danych 44,1 kHz [18]. Zastosowanie takiej metody pomiaru emisji akustycznej pozwala wyeliminować zakłócenia jakie mogą pochodzić z otoczenia (tło akustyczne).

Emisja akustyczna (EA) generowana podczas niszczenia produktów zbożowych jest ważnym składnikiem cech określanych jako chrupkość czy kruchość. Konsumenci są zdolni do opisu różnic między dźwiękiem kruchym i chrupkim. Kruchy dźwięk jest krótki (chodzenie po śniegu lub lodzie), chrupki dźwięk jest dłuższy (chodzenie po żwirze lub suchych liściach) [9]. Ostatnio badane są relacje pomiędzy wytworzonym dźwiękiem i odczuciem kruchości/chrupkości. Brak jest jednoznacznych definicji obu parametrów. Kruchość wg Pelega [15] jest to tendencja materiału do nagłego pęknięcia przy małych odkształceniach i siłach. Według innej definicji, kruche produkty to takie, w którym niszczenie jest słyszalne podczas pierwszego złamania [4]. Chrupkość zaś, związana jest ze złożonym mechanizmem pęknięcia, wymaga zastosowania wyższej siły do licznych zniszczeń struktury. Żywność taka generuje niskie dźwięki z charakterystycznymi pikami w zakresie częstotliwości 1,25–2 kHz [1]. Lewicki i wsp. [8] wykazali, że produkty chrupkie, takie jak ekstrudowane pieczywo chrupkie, herbatniki i płatki kukurydziane oraz kruche, jak krakersy emitują dźwięki w zakresie częstotliwości od 1 do 15 kHz. Na jakość emitowanego dźwięku w większym stopniu wpływa technologia wytwarzania pieczywa chrupkiego niż jego skład chemiczny. Wyraża się to głównie odmiennym profilem częstotliwości [14]. Głównym powodem utraty

chrupkości jest wzrost zawartości wody w produktach zbożowych, jako rezultat sorpcji wody z otoczenia lub jej transportu wewnątrz produktu [13].

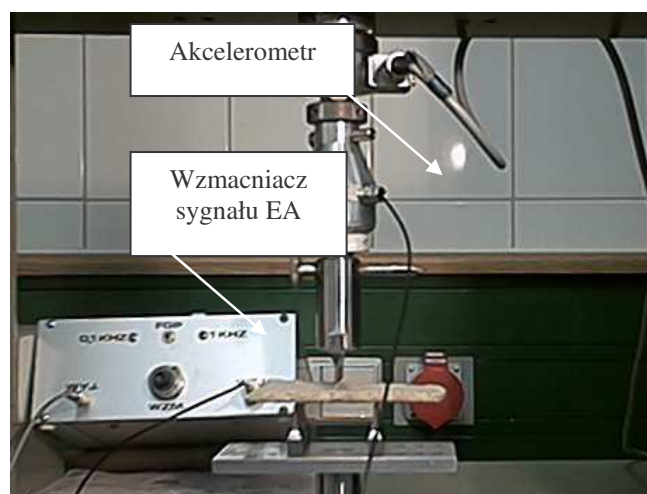
Celem pracy było określenie zmian tekstury pieczywa chrupkiego „Wasa” żytniego i „trzy zboża” wywołanych zmianą aktywności wody, za pomocą analizy generowanego sygnału akustycznego.

### Materiał i metody badań

Kromki pieczywa chrupkiego, żytniego „Wasa” i „trzy zboża”, przechowywano w ekssykatorach o wilgotności względnej powietrza od 0 do 75%. We wszystkich badanych próbkach oznaczano aktywność wody ( $a_w$ ) za pomocą higrometru Hygroskop DT 2 firmy Rotronic.

Próbki pieczywa po osiągnięciu stanu równowagi z otoczeniem były poddawane procesowi łamania za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick 1445 z prędkością 20 mm/min. Podczas łamania pieczywa rejestrowano siłę niszczenia i emisję akustyczną (fot. 1).

Pomiar emisji akustycznej (EA) wykonano akcelerometrem piezoelektrycznym typu 4381V firmy Brüel&Kjær, w paśmie częstotliwości od 1 do 15 kHz.



Fot. 1. Stanowisko do przeprowadzania testów łamania i rejestracji emisji akustycznej pieczywa chrupkiego.

Fot. 1. Experimental stand to perform breaking tests and to register acoustic emission.

Wyznaczono pracę łamania oraz deskryptory emisji akustycznej, takie jak widma akustyczne, liczbę zdarzeń emisji akustycznej pieczywa o aktywności wody od 0,038 do 0,650.

Pracę łamania obliczano z zależności:

$$W = v \int_0^t F(t) dt$$

w której:

$F(t)$  – kolejna siła w funkcji czasu [N],

$v = 20$  mm/min,

$t$  – czas niszczenia [s].

Energię zarejestrowanego sygnału akustycznego obliczano w jednostkach umownych [V] [10].

Charakterystyki widmowe wyznaczano za pomocą programu WIDMOŚRENI w przedziale częstotliwości od 1 do 15 kHz.

Na podstawie wykresów amplitudowo-czasowych wyznaczono liczbę impulsów odpowiadających pękaniu próbek pieczywa. Impulsy w nomenklaturze akustycznej są nazwane zdarzeniami emisji akustycznej (acoustic emission events). Liczbę zdarzeń EA obliczano za pomocą programu komputerowego „Policz” Windows XP [17].

Współczynnik chrupkości wyznaczano jako iloraz liczby zdarzeń emisji akustycznej do pracy łamania pieczywa chrupkiego.

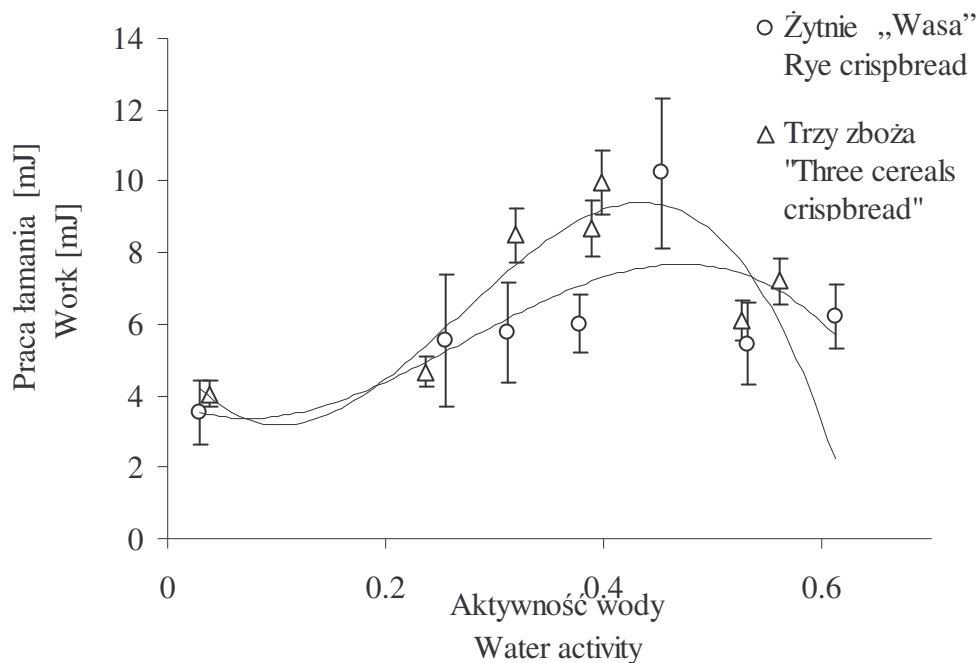
Badania wykonano w 15 powtórzeniach, z czego 10 wybrano do dalszej analizy. Deskrytory EA wyznaczono dla 10 sekundowych zapisów dźwięku. W celu określenia czy uzyskane wartości parametrów reprezentują badaną próbę, czy różnią się istotnie, przeprowadzono analizę statystyczną wyników w programie Excel dla Windows XP.

## Wyniki i dyskusja

Badane produkty pozostają chrupkie w bardzo wąskim zakresie aktywności wody, właściwym dla danego materiału. Wytrzymałość pieczywa chrupkiego określono na podstawie pracy łamania (rys. 1). Zaobserwowano, że ulega ona zmianie ze wzrostem  $a_w$  pieczywa. Do  $a_w$  około 0,45 praca łamania rośnie, a po jej przekroczeniu występuje plastyfikacja materiału.

W badanych produktach stwierdzono znaczne odchylenie standardowe od średnich wartości pracy łamania. Wielkość odchylenia standardowego jednoznaczna z rozrzutem wyników wokół średniej wartości wynosiła około 20% zarówno w pieczywie o niskiej, jak i wysokiej  $a_w$ . Świadczy to o znacznej heterogeniczności produktu. Na podstawie mechanicznych parametrów tekstury trudno stwierdzić, w jakim zakresie,  $a_w$  badany produkt pozostaje chrupki. Podobną tendencję zmian w miarę sorpcji wody odnotowało wielu badaczy. Marzec [11], badając pieczywo chrupkie ekstrudowane stwierdziła, że do  $a_w \sim 0,5$  następuje twardnienie materiału, zaś powyżej tej wartości

jego plastyfikacja. Gondek [4] obserwowała plastyfikujący wpływ wody w płatkach kukurydzianych przy  $a_w$  wyższej niż 0,7 i płatkach z otrąb pszennych przy  $a_w$  powyżej 0,6.



Rys. 1. Wpływ aktywności wody na pracę łamania pieczywa chrupkiego.

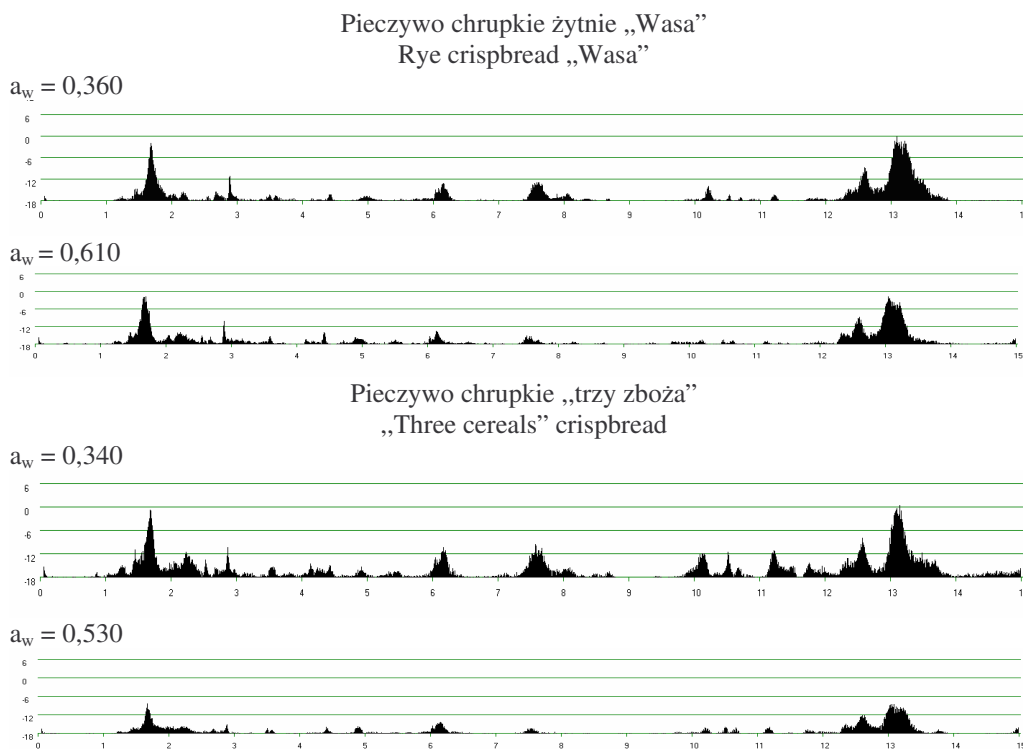
Fig. 1. The effect of water activity on the work involved in breaking the crispbreads.

Dźwięk emitowany przez pieczywo chrupkie jest bardzo czułym wskaźnikiem jakości tekstury, a niekorzystny wpływ wody w pierwszym rzędzie objawia się małą intensywnością dźwięku. Wygodną i czytelną formą przedstawienia ilości i jakości wyników pomiarów emisji akustycznej jest akustogram czyli graficzne przedstawienie zmian częstotliwości i natężenia dźwięku w funkcji czasu. Barwy obrazują natężenie sygnału akustycznego (wysokość prążków) badanego produktu.

Akustogramy obu produktów różniących się aktywnością wody przedstawiono na rys. 2. Widoczne są na nich charakterystyczne pasma częstotliwości i natężenie sygnału akustycznego w tych pasmach (barwa prążków) oraz efekt wyraźnego obniżenia natężenia dźwięku wywołanego sorpcją wody. Dodatek wody do materiału wywołuje w nim zmiany, które sprzyjają generacji i propagacji dźwięków o wysokich częstotliwościach. Energia sygnału emisji akustycznej w obrębie podanych wyżej przedziałów częstotliwości zmienia się w funkcji aktywności wody badanych próbek. Marzec i wsp. [14] wykazali, że charakter propagacji fal sprężystych w paśmie 1 kHz i powyżej 10

kHz jest odmienny, ponieważ długość propagowanych fal różni się o rząd wielkości. Efekt ten sprawia, że tłumienie fal o różnej długości jest również odmienne. W próbkach suchych lepiej propagują fale o niższej częstotliwości, natomiast w próbkach uplastycznionych o wysokiej aktywności wody, fale o wyższych częstotliwościach.

Istotne informacje dotyczące jakości emitowanego dźwięku przedstawiają widma spektralne. Różnice w sygnale analizowano porównując uśrednioną charakterystykę widmową zarejestrowanych sygnałów (rys. 3). W przypadku badanych materiałów można wyróżnić dwa charakterystyczne maksima w przedziale częstotliwości 2–8 kHz oraz 13–14 kHz. Nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic pomiędzy pieczywem żytnim „Wasa” i „trzy zboża”. Zwiększenie  $a_w$  do 0,610 w pieczywie żytnim i 0,530 w pieczywie „trzy zboża” spowodowało słabszą emisję akustyczną jednak dźwięk był emitowany zarówno w niskich, jak i w wysokich częstotliwościach.



Rys. 3. Widma akustyczne pieczywa chrupkiego (oś pozioma – częstotliwość dźwięku [kHz]; oś pionowa – natężenie dźwięku [dB]).

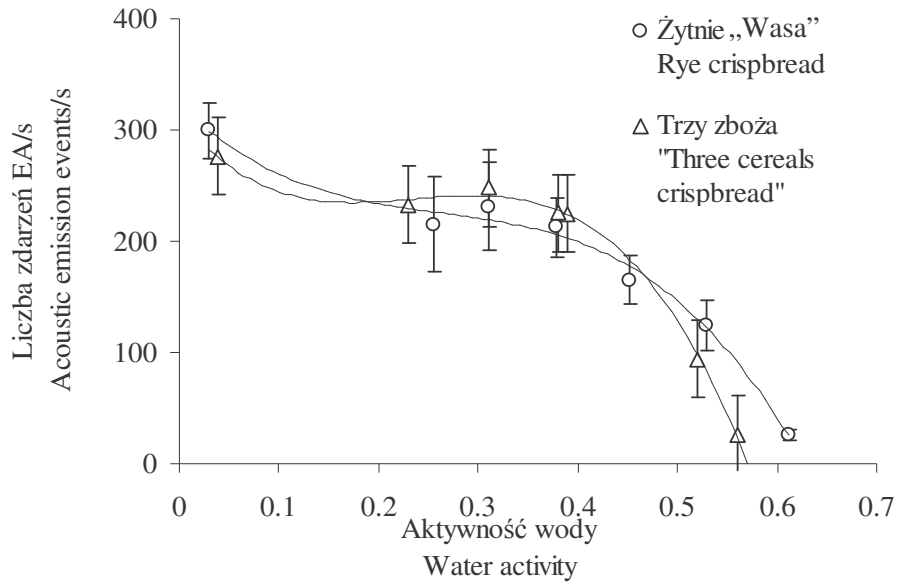
Fig. 3. Acoustic spectra of crispbreads (horizontal axis – sound frequency; vertical axis – sound intensity [dB]).

Spadek intensywności emisji akustycznej wynika ze zróżnicowanego rozkładu naprężeń w produktach suchych i wilgotnych [7]. Wzrost zawartości wody i konsekwencja tego procesu, powoduje rozproszenie energii sprężystej, co zmniejsza możliwość występowania kruchych pęknięć [16].

Szczegółowa analiza zapisu impulsów emisji akustycznej pozwoliła na określenie liczby zdarzeń generowanych dźwięków. W analizowanych produktach liczba zdarzeń i intensywność dźwięku maleje ze wzrostem aktywności wody produktu, jednak do  $a_w$  około 0,4 nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w liczbie zdarzeń emisji akustycznej (rys. 4).

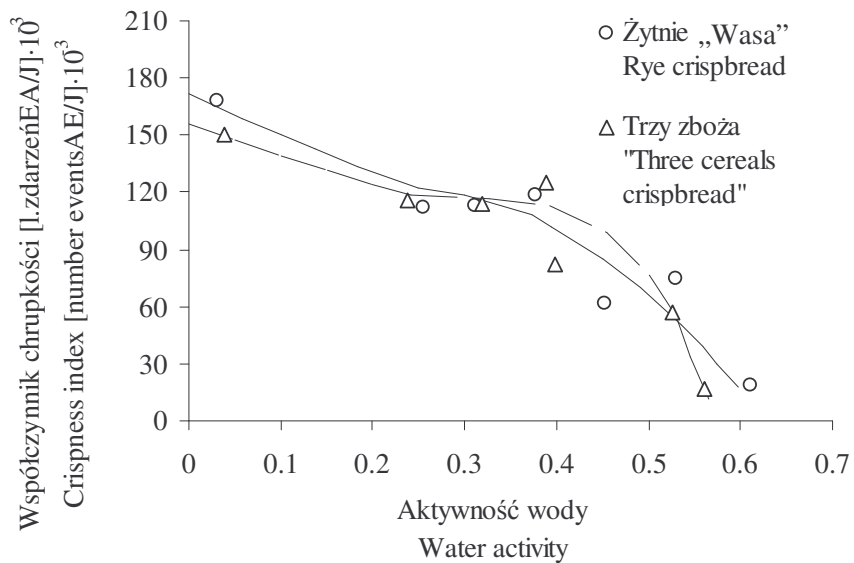
W publikacjach naukowych anglojęzycznych zaproponowano teorię, że chrupkość to głównie wrażenie akustyczne [3, 21]. Mohamed i wsp. [10] stwierdzili, że można ją wiązać ze złamaniem oraz nadmiarem energii uwalnianej jako dźwięk w miarę propagacji pęknięcia, a dźwięk jest generowany przez szybką destrukcję struktury materiału. Dlatego też do opisu chrupkości badanych produktów podjęto próbę wyznaczenia współczynnika chrupkości, w którym uwzględniono zarówno właściwości akustyczne (liczba zdarzeń EA), jak i mechaniczne (praca łamania) badanych produktów.

Na rys. 5. przedstawiono wpływ aktywności wody na współczynnik chrupkości pieczywa „Wasa”. Współczynnik ten malał w sposób wykładniczy ze wzrostem aktywności wody w pieczywie. Stwierdzono, że tylko w przedziale  $a_w$  od ~0,2 do ~0,4 chrupkość badanego pieczywa nie zmieniała się statystycznie istotnie. Wydaje się, że zaproponowany współczynnik chrupkości można zastosować do opisu tekstury tego typu produktów. Z badań sensorycznych wynika, że właśnie w powyższym zakresie  $a_w$  produkt jest oceniany przez konsumentów jako chrupki i jest akceptowany [5].



Rys. 4. Wpływ aktywności wody na liczbę zdarzeń emisji akustycznej w pieczywie chrupkim.

Fig. 4. The effect of water activity on the number of acoustic emission events occurring in crispbreads.



Rys. 5. Wpływ aktywności wody na współczynnik chrupkości pieczywa chrupkiego.

Fig. 5. The effect of water activity on the crispness index of crispbreads.



## Wnioski

1. Wzrastająca aktywność wody istotnie wpływa na zmiany tekstury pieczywa chrupkiego. Do aktywności wody około 0,4 występuje jego twardnienie zaś powyżej tej  $a_w$  plastyfikacja.
2. Zmiany tekstury wyrażają się również stopniowym zanikiem emisji akustycznej.
3. Liczba zdarzeń emisji akustycznej i współczynnik chrupkości maleją w sposób wykładniczy ze wzrostem aktywności wody w pieczywie. W zakresie aktywności wody od 0,2 do 0,4 oba rodzaje pieczywa pozostają chrupkie, o czym świadczą wartości współczynnika chrupkości.

*Praca naukowa finansowana ze środków KBN w latach 2003-2006 (3 P06T 040 25).*

## Literatura

- [1] Bourne M.C.: Food Texture and viscosity: concept and measurement. Second Ed. Food Sci. Technol., Inter. Series, Academic Press, New York 2002.
- [2] Brennan J. G.: Texture perception and measurement. In: Sensory Analysis of Foods (I. R. Piggot ed.) Appl. Sci. Publishers Barking, Essex, UK, 1984, pp. 59-91.
- [3] Drake. B. K.: Food crunching sounds: comparison of objective and subjective data. J. Food Sci., 1965, **30**, 556-559.
- [4] Gondek E.: Wymiana masy w produktach typu muesli i jej wpływ na właściwości mechaniczne i akustyczne płatków zbożowych. Praca doktorska. Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW. Warszawa 2003.
- [5] Gondek E., Marzec A.: Wpływ aktywności wody na właściwości sensoryczne wybranych produktów zbożowych. Praca niepublikowana: dostępna w Katedrze Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW, Warszawa 2005.
- [6] Guraya H.S., Toledo R.T.: Micro-structural characteristics and compression resistance as indices of sensory texture in a crunchy snack product. J. Texture Studies, 1996, **27**, 687-701
- [7] Lewicki P., Marzec A., Ranachowski Z., Dębowski T.: Spectral characteristic of acoustic signals emitted by flat rye bread samples. XLIX Seminarium Akustyki 2002. Wyd. Sowa. Warszawa 2002, pp. 453-458.
- [8] Lewicki P.P., Marzec A. Ranachowski Z.: Acoustic properties of crunchy products. 3<sup>rd</sup> International Workshop on Water in Food. 29th – 30th March 2004. Lausanne, Switzerland, CD, 2004.
- [9] Luyten H. Plijter J.J., Van Vliet T.: Crispy/crunchy crusts of cellular solid foods: a literature review with discussion. J. Texture Studies, 2004, **35**, 445–492.
- [10] Mohamed A.A.A., Jowitt R., Brennan J.G.: Instrumental and sensory evaluation of crispness: I - in friable foods. J. Food Eng., 1982, **1**, 55-75.
- [11] Marzec A.: Wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne i akustyczne pieczywa chrupkiego. Praca doktorska. SGGW. Warszawa 2002.
- [12] Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z., Dębowski T.: The influence of moisture content on spectral characteristic of acoustic signals emitted by flat bread samples. Proceedings of the AMAS Course on Nondestructive Testing of Materials and Structures. (eds. J. Deputat, Z. Ranachowski) Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures. Warszawa 2002, pp. 127-135.
- [13] Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z., Dębowski T.: Cereal food texture evaluation with appli-

- cation of mechanical and acoustical methods. Proceedings of the AMAS Course on Non-destructive Testing of Materials and Structures II. (eds. J. Deputat, Z. Ranachowski) Centre of Excellence for Advanced Materials and Structure. Warszawa 2003, pp. 111-131.
- [14] Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z.: Analiza wybranych deskryptorów emisji akustycznej pieczywa chrupkiego. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej. Wrocław-Polanica Zdrój. Wyd. MarMar, 2005, t. 2, s. 66-69.
- [15] Peleg M.: A mathematical model of crunchiness, crispness in breakfast cereals. *J. Texture Studies*, 1994, **25**, 403-410.
- [16] Poliszko S., Klimek D., Moliński W.: Acoustic emission activity of re-hydrated corn extrudates. *Properties of Water in Foods*. (ed. Lewicki P.P.). Warsaw Agricultural University Press, Warszawa 1995, s. 25-30.
- [17] Ranachowski Z.: Instrumentation designed to investigate texture parameters of cereal food. Structures - waves - Human health. *Acoustical Engineering*. (ed. Pamuszka R.), Polish Acoustical Society, Division Kraków 2005, **XIV (1)**, 137-140.
- [18] Ranachowski Z., Gondek E., Lewicki P.P., Marzec A.: Investigation of acoustic properties of compressed wheat bran flakes. *Archives of Acoustics*, 2005, **30 (2)**, 255-265.
- [19] Roudaut G., Dacremont C., Valles Pamies B., Colas B., Le Meste M.: Crispness: a critical review on sensory and material science approaches, *Trends Food Sci. Technol.*, 2002, **13**, 217-227.
- [20] Segnini S., Dejmek P., Öste R.: Reproducible texture analysis of potato chips. *J. Food Sci.*, 1999, **64 (2)**, 309-312.
- [21] Vickers Z. M., Bourne M.C.: Crispness in foods – a review. *J. Food Sci.*, 1976, **41**, 1153-1157.

## INVESTIGATING THE CRISPBREAD TEXTURE USING AN ACOUSTIC EMISSION METHOD

### S u m m a r y

The objective of the paper was to determine changes in the texture of “Wasa” rye crispbread and „Three cereals” crispbread generated by changes in water activity. The investigations were performed using a method of analyzing the acoustic signals generated. Crispbread samples were broken in a strength testing machine “Zwick 1445”. While breaking the bread samples, an acoustic emission was recorded. The work involved in the breaking process and descriptors of acoustic emission were determined; the latter ones were: acoustic spectra, number of events during the acoustic emission, and crispness index of crispbread showing water activity from 0.038 to 0.650. The spectrum characteristics were presented in the range of frequencies from 0.1 kHz to 15 kHz using a WIDMOŚREDNI software. Spectrum characteristics of products investigated were analyzed very thoroughly, and it was stated that, irrespective of an aw value, the products emitted acoustic signals (sounds) in the range of frequencies from 2 to 8 kHz, and from 13 to 14 kHz. Moreover, a gradually fading acoustic emission proved that changes were occurring within the texture of crispbreads. The crispness index of crispbread was calculated as a quotient of the number of acoustic emission (AE) events by the value of work involved in breaking. Within the range of water activity from 0.2 to 0.4, the two kinds of crispbread remained crispy, and this fact was evidenced by the crispness index. The number of acoustic emission events and the crispness index decreased exponentially with the increase in activity of water contained in crispbreads.

**Key words:** acoustic emission, crispbread, water activity, mechanical properties 