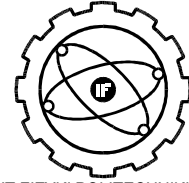




POLSKIE TOWARZYSTWO AKUSTYCZNE



KOMITET AKUSTYKI PAN



INSTYTUT FIZYKI POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

## 57. Otwarte Seminarium z Akustyki

# EMISJA AKUSTYCZNA W BADANIACH ŻYWNOSCI

Zbigniew Ranachowski  
IPPT PAN,  
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa,  
e-mail : zranach@ippt.gov.pl

---

### Streszczenie

*W pracy przedstawiono historię badań żywności metodami akustycznymi. Następnie porównano stosowaną metodę kontaktową i bezkontaktową z opisem stosowanej aparatury. Omówiono deskryptory stosowane w analizie wyników badań. Przedstawiono również przykłady badania pieczywa i ciastek.*

---

### 1. WPROWADZENIE

Emisja akustyczna w suchych produktach żywnościowych pojawia się w wyniku nagłego wyzwolenia zakumulowanej w nim energii sprężystej, zwłaszcza kiedy zachodzi powstawanie i wzrost pęknięć oraz proces zniszczenia w wyniku przyłożenia zewnętrznych sił mechanicznych np. podczas gryzienia. Mechanizm tego zjawiska nie jest do końca rozpoznany. Poznanie mechanizmu odpowiedzialnego za powstawanie emisji akustycznej jest utrudnione przez zmiany, jakim podlega sygnał EA na drodze od źródła do akcelerometru. Suche produkty spożywcze najczęściej mają budowę komórkową i na dźwięk emitowany przez nie istotny wpływ ma ich struktura. Komórki suchych produktów wypełnione są powietrzem a dźwięk jest emitowany przez trzaskające ściany komórkowe (Duizier; 2001). W miarę jak krucha struktura powietrznych komórek jest niszczone powstają serie dźwięków, a każdy dźwięk jest generowany przez rozerwanie ścian pojedynczej komórki. Jednoczesne niszczenie wielu komórek podczas gryzienia emituje charakterystyczny dźwięk. Amplituda chrupkiego dźwięku w dowolnym momencie jest funkcją głośności dźwięku wytwarzanego przez pojedynczą komórkę, oraz głośności złamań ścian komórek (Daceremont, 1995).

Stan naprężenia występuje nie tylko w produktach suchych. Występuje on również w produktach wilgotnych, pod warunkiem, że ciecz jest zamknięta w obiektach takich jak komórki i wywiera ciśnienie na otaczającą ścianę. W tkance będącej w stanie turgoru ściany komórkowe są w stanie naprężenia, co przez konsumenta odbierane jest jako jędrność. Rzeczywista tkanka roślinna (np. owoce i warzywa) posiada bardzo złożoną budowę strukturalną. Jej podstawowym elementem konstrukcyjnym są ściany

komórkowe, które odpowiadają za wytrzymałość tkanki roślinnej. W takiej strukturze ściany komórkowe mają różną wytrzymałość i występuje pewien wstępny niejednorodny rozkład naprężeń i energii wewnętrznej. Jednym z jej składników jest energia zmagazynowana między innymi w naprężonych błonach komórkowych (w ścianie komórkowej i plasmalemmie) oraz w międzykomórkowych warstwach pektynowych lamelli. Zastosowanie metody emisji akustycznej do badania tkanek roślinnych wymaga określenia możliwych źródeł sygnału EA. Źródłem sygnału emisji akustycznej w tkance roślinnej są zmiany jej struktury wywołane działaniem sił zewnętrznych lub też własne naprężenia wilgotnościowe [Kowalski, 2000].

Dźwięk emitowany przez świeże owoce i warzywa jest wynikiem szybkiego spadku ciśnienia komórkowego (Vickers i Bourne, 1976). Konstankiewicz i Zdunek (1999) przedstawili obraz procesów mogących stać się źródłem sygnału emisji akustycznej. Działanie siły zewnętrznej zmienia wewnętrzny stan naprężenia oraz rozkład energii wewnętrznej. Jeżeli siła zewnętrzna będzie miała wystarczająco dużą wartość wówczas nastąpi pęknięcie ściany komórkowej i spowoduje powstawanie nowego rozkładu naprężeń, a proces pęknięcia takiej struktury będzie się rozwijał w zależności od parametrów strukturalnych badanego materiału, turgoru tkanki oraz od charakteru oddziaływań zewnętrznych (np. od prędkości odkształcenia), (Konstankiewicz i Zdunek; 1997; Konstankiewicz i Zdunek; 1999). Procesy powstawania

pęknięcia i jego propagacji w tkance roślinnej stają się źródłem sygnału emisji akustycznej.

Metoda emisji akustycznej pozwala na prowadzenie badań nad wpływem różnych czynników na procesy pęknięcia tkanek roślinnych. Analiza zależności deskryptorów emisji akustycznej od parametrów mechanicznych np. naprężenia pozwalają określić warunki mechaniczne powodujące rozpoczęcie procesu pęknięcia badanego materiału roślinnego. Umożliwiają również ocenę skali procesów pęknięcia. [Zdunek i Konstankiewicz; 2001].

Wykazano wysoką przydatność metody emisji akustycznej do wykrywania i badania procesów pęknięcia tkanek roślinnych (Zdunek i Konstankiewicz 1997; 2001). Stwierdzono, że istnieje możliwość rejestracji sygnału emisji akustycznej w ścisłanej tkance bulwy ziemniaka oraz, że sygnał emisji akustycznej posiada pewne charakterystyczne częstotliwości: 60 kHz, 75 kHz, 115 kHz i 135 kHz. Wykazano również, że początek obserwacji sygnału emisji akustycznej pojawia się przy odkształceniu równym około 65% odkształcenia niszczonego. Ostatnie doniesienia wskazują na możliwość stosowania metody emisji akustycznej do badania czerstwienia pieczywa (Ranachowski i wsp.; 2004).

## **2.METODY POMIARU I DESKRYPTORY EA STOSOWANE W BADANIACH ŻYWNOSCI**

Dźwięki emitowane przez produkty spożywcze były początkowo rejestrowane za pomocą mikrofonów pracujących w paśmie akustycznym (16 – 16000 Hz). Po wymaganym wzmocnieniu sygnału materiał badawczy rejestrowany był na magnetofonie (Vickers i Bourn, 1976) a począwszy od lat osiemdziesiątych przy zastosowaniu komputera z układem wejścia i wyjścia akustycznego. Ważnym zagadnieniem związanym z procesem rejestracji sygnału akustycznego jest zastosowana procedura kruszenia produktów. Liczni badacze (Drake (1963), Vickers i Bourn (1976)) prowadzili eksperymenty stosując metody: zucia w jamie ustnej, ręcznego kruszenia za pomocą szczypiec. Od początku lat siedemdziesiątych stopniowo przechodzono na bardziej powtarzalną i obiektywną metodę, stosując specjalnie zaprojektowane maszyny wytrzymałościowe (instrony, teksturometry), w których narzędzie robocze kruszyło próbkę przesuując się z jednostajną prędkością i umożliwiając rejestrację siły przyłożonej do próbki (Le Meste i Roudaut (1995); Tesch, Peleg (1996)). Badania Drake (1965) wykazały, że dźwięki wytwarzane podczas kruszenia produktów różnią się między sobą pod względem amplitudy, częstotliwości dominujących w charakterystyce widmowej tych dźwięków a także pod względem przebiegu zmian natężenia mierzonego sygnału.

W 1976 r. Vickers i Bourne stwierdzili, że produkty chrupkie generują w trakcie gryzienia dźwięki o swoistej, impulsowo-szumowej charakterystyce widmowej. Analiza częstotliwości generowanych przez te produkty wykazała, że sygnał zawiera składowe z przedziału 0–10 kHz. Wymienieni badacze wysunęli hipotezę, że odczuwany stopień chrupkości produktu jest skorelowany z amplitudą mierzonego sygnału.

W 1979 Vickers i Wasserman próbowali zbadać, czy dźwięk kruszonych produktów spożywczych zawiera

informację charakterystyczną dla struktury badanego produktu. W tym celu wyznaczono prawdopodobieństwa poprawnej identyfikacji produktu poprzez odsłuch nagranej wcześniej próbki sygnału z populacji 18 produktów. Odsetek prawidłowych rezultatów tylko dla dwóch produktów przekroczył 50 %, a dla pozostałych zawierał się w przedziale od 0 do 44 %.

Technolodzy żywności przypisują duże znaczenie zawartości wody i jej migracji w badaniach zmian tekstury produktów spożywczych. Interesujące wyniki eksperymentalne uzyskali Tesch i wsp. (1996), którzy poddali badaniom dwa produkty (chrupki serowe i kostki grzankowe), przechowywane w higrostatach w celu uzyskania różnej aktywności wody. Otrzymano w produkcie następujące poziomy  $a_w$ : 0.11, 0.23, 0.33, 0.43, 0.52, 0.57, 0.65, 0.75. Na każdym z tych poziomów mierzono cechy charakterystyczne widma akustycznego próbek produktów – dynamikę gęstości widmowej, dewiację standardową zbioru próbek sygnału, amplitudę maksymalną oraz wartość średnią zbioru próbek sygnału. W ten sposób wyznaczono precyzyjne ilościowe deskryptory badanego sygnału, który charakteryzował się złożoną postacią. Uzyskane rezultaty pozwoliły jednoznacznie i precyzyjnie ustalić, że wszystkie wyżej wymienione deskryptory sygnału wskazywały na istnienie maksimum chrupkości dla aktywności wody na poziomie 0.23 oraz na uplastycznienie produktu i monotoniczny spadek chrupkości dla poziomów aktywności wody wyższych.

Badania innych autorów (Le Meste i Roudaut, 1995; Roudaut, 2003; Dacerefont, 1995), wykonywane przy zastosowaniu mechanicznych teksturometrów do kruszenia produktów o różnej wilgotności potwierdzają zasadniczo wyniki uzyskane przez Tescha i wsp. (1995). Wprawdzie w niektórych produktach brak wyraźnego maksimum deskryptora odwzorowującego intensywność mierzonego sygnału akustycznego, natomiast we wszystkich produktach chłonących wodę w przedziale aktywności wody 0.4 – 0.6 jest rejestrowana wyraźna zmiana własności akustycznych. Charakterystyczny parametr chrupkość dla badanych produktów był równolegle oceniany metodą organoleptyczną.

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) (Luyten i wsp., 2004). Ostatnio badane są relacje pomiędzy wytworzonym dźwiękiem i odczuciem kruchości/chrupkości. Lewicki i wsp. (2004) wykazali, że produkty chrupkie takie jak ekstrudowane pieczywo chrupkie, krakersy, herbatniki i płatki kukurydziane 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 (Marzec i wsp., 2005). Głównym powodem utraty chrupkości jest wzrost zawartości wody w produktach zbożowych jako rezultat sorpcji wody z otoczenia lub jej transportu wewnątrz

produktu. Dźwięk emitowany przez pieczywo chrupkie jest bardzo czułym wskaźnikiem jakości tekstury, a niekorzystny wpływ wody w pierwszym rzędzie objawia się małą intensywnością dźwięku (Marzec, 2002). Analizowano różne deskryptory emisji akustycznej, lecz nie jest do końca jasne, który z deskryptorów dźwięku daje lepszy opis odczuć sensorycznych.

Powyższa konkluzja pozwala na postawienie tezy, że badanie sygnału akustycznego generowanego w produktach żywnościowych, w których objętościowo lub lokalnie dochodzi do zmiany aktywności wody umożliwia na dogodne i szybkie pomiary zmian teksturalnych tych produktów. Jest również możliwe, że prezentowane dalej metody analizy sygnału akustycznego pozwolą na śledzenie wpływu zmian ilościowych innych składników produktów żywnościowych (tłuszcze, sole mineralne) na teksturę badanych produktów.

Większość opisanych deskryptorów EA stosowanych do oceny produktów spożywczych to poziom lub głośność dźwięku, energia dźwięku i numer pik. Mniej uwagi poświęcono analizie frekwencji widma emitowanego dźwięku (Luyten i wsp. 2005).

## 2.1. REJESTRACJA DŹWIĘKU Z UŻYCIEM MIKROFONU

W wielu laboratoriach technologii żywności prowadzone są pomiary sygnału akustycznego generowanego w procesie kruszenia produktów żywnościowych. Badania te są wykonywane przy użyciu teksturometrów wyposażonych w mikrofon, wzmacniacz sygnałów akustycznych oraz komputer do sterowania pomiarem i rejestracji wyników (Chaunier i wsp., 2005; Chen i wsp., 2005).

Rejestracja dźwięków generowanych w trakcie kruszenia produktów spożywczych jest złożonym problemem, ponieważ dźwięki te mają niską energię w porównaniu do energii tła akustycznego w sposób nieunikniony rejestrowanego przez mikrofon. Poziom dźwięku generowanego z próbki jest zbliżony do tła akustycznego występującego w typowym pomieszczeniu. Przeprowadzenie badań wymaga zachowania ciszy w laboratorium badawczym. Prawidłowe przeprowadzenie pomiarów wymaga starannego doboru elementów toru pomiarowego, a zwłaszcza mikrofonu i układu rejestracji (Bogusz, 2003).

W literaturze występuje wiele opisów rejestracji EA w produktach spożywczych, jednak większość dotyczy pomiarów wykonanych za pomocą mikrofonów (Mohamed i wsp. 1982; Daceremont, 1995; Tesch i wsp., 1996; Roudaut i wsp. 2001; Chaunier i wsp., 2005; Chen i wsp., 2005).

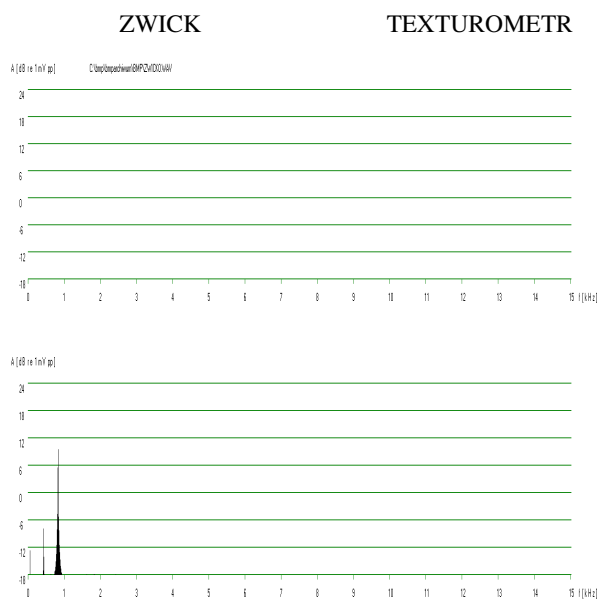
## 2.2. KONTAKTOWA METODA REJESTRACJI DŹWIĘKU

Niektórzy badacze stosują kontaktową metodę zapisu rozważanego sygnału dźwiękowego. W tym rozwiązaniu pomiędzy ruchomym trzpieniem maszyny wytrzymałościowej, a końcówką obciążającą mechanicznie próbkę (narzędzie robocze) umieszczono adapter drgań. Wewnątrz adaptera znajduje się kontaktowy sensor drgań o czułości wystarczającej do badań procesów kruszenia produktów spożywczych, tj.  $10 \text{ pC/ms}^{-2}$  (przy pojemności

własnej  $1 \text{ nF}$ ) oraz o odpowiednim częstotliwościowym paśmie przenoszenia od 1 do 15000 Hz. Grubościenna obudowa adaptera drgań jest przystosowana do przenoszenia wymaganych obciążeń mechanicznych. Fale sprężyste powstające w trakcie kruszenia produktów spożywczych są transmitowane od powierzchni tego produktu do kontaktowego sensora drgań (akcelerometru) poprzez narzędzie robocze.

Marzec i wsp. (2002; 2003) rejestrowali sygnał EA podczas łamania pieczywa chrupkiego i stosowali wzmocnienie 20 dB. W badaniu produktów spożywczych o słabszej emisji akustycznej stosowano wzmocnienie od 40 dB do 80 dB.

Pomiary EA prowadzone przy zastosowaniu opisanego wyżej adaptera oraz precyzyjnej maszyny wytrzymałościowej o niskim poziomie generowanych wibracji w trakcie pracy wykazały, że zastosowany układ pomiarowy posiada wymaganą czułość przy rejestracji sygnałów dźwiękowych pochodzących z badanej próbki i jednocześnie nie rejestruje tła akustycznego z otoczenia. Na rysunku 1 przedstawiono widma akustyczne dźwięku emitowanego przez standardowe maszyny wytrzymałościowe testowane w SGGW (Warszawa). Testy przeprowadzono w pracowni analitycznej (nie wyciszonej) dla maszyny wytrzymałościowej ZWICK 1145 i analizatora tekstury TA-XT2i firmy Stable Micro Systems. Pomiary emisji akustycznej wykonano akcelerometrem typu 4381V firmy Brüel&Kjær, przy prędkości głowicy maszyn wytrzymałościowych 20mm/min. Zauważono, że maszyna ZWICK nie rejestruje tła akustycznego. Natomiast teksturometr emituje dźwięki o niskich częstotliwościach, poniżej 1 kHz. W przypadku stosowania teksturometru do badań emisji akustycznej, nie analizowano zakresu częstotliwości od 0,1 do 1 kHz.



**Rys. 1.** Porównanie widm mocy pracujących maszyn wytrzymałościowych Zwick i Stable TA XT2, pomiar akcelerometrem roboczym. [ dB odn. do 1 V RMS]

Alchakra i wsp. (1997) stosowali akcelerometr o zakresie częstotliwości od 200 Hz do 20 kHz oraz mikrofon o czułości 0-40 kHz do badania pękania betonu, grafitu i polistyrenu. Stwierdzili, że akcelerometr nie rejestruje tła akustycznego a mierzony sygnał pochodzi od pękającego materiału i charakteryzuje się pasmem częstotliwości powyżej 4 kHz.

Na rysunku 2. pokazano maszynę wytrzymałościową Zwick 1445 wyposażoną w opisany wyżej kontaktowy adapter do rejestracji fal sprężystych, będący na eksploatacji w Katedrze Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji SGGW w Warszawie.

Mierzone sygnały emisji akustycznej są, podobnie jak te opisane w pracy Tescha i wsp. (1996) wzmacniane w liniowym wzmacniaczu niskoszumowym a następnie zapisywane w pamięci komputera PC przy zastosowaniu dźwiękowej karty przetwarzania analogowo-cyfrowego z prędkością próbkowania 44.1 kHz. Zapis sygnału w formacie standardowego pliku dźwiękowego umożliwia dalszą obróbkę wyników przy zastosowaniu wielu istniejących na rynku edytorów dźwięku.

W badaniach wykorzystuje się specjalistyczną kartę przetwarzania analogowo-cyfrowego firmy Adlink Technology Inc. typu 9112, umożliwiającą zapis siły obciążającej badaną próbkę łącznie z zapisem emisji akustycznej.

Badania wykonano dla suchych produktów zbożowych (krakersy, płatki kukurydziane, herbatniki) dostępnych na polskim rynku oraz dla pieczywa chrupkiego żytniego ekstrudowanego o aktywności wody od 0.04 do 0.75.

Analizowano następujące zagadnienia związane z pomiarem i obróbką sygnału emisji akustycznej generowanej w procesach badania żywności:

- wyznaczanie energii sygnału emisji akustycznej,
- metodę rejestracji zdarzeń emisji akustycznej i wyznaczania parametrów tych zdarzeń,
- wyznaczanie charakterystyki częstotliwościowej sygnału emisji akustycznej oraz określanie współczynnika nachylenia tej charakterystyki dla pieczywa,
- przedstawianie zmian dynamiki generowanego sygnału emisji akustycznej z zastosowaniem akustogramów,
- wyznaczenie współczynnika chrupkości produktów.

Charakterystyka amplitudowo-czasowa sygnału kruchego produktu zbożowego zostanie niżej przedstawiona na przykładzie badania pieczywa chrupkiego żytniego ekstrudowanego, poddanego łamaniu (Rys. 3). Do badań użyto pieczywo chrupkie o różnej aktywności wody. W tym celu kromki pieczywa przechowywano w ekssykatorach o wilgotności względnej powietrza od 0 do 75% i w temperaturze 25 °C. Próbkę pieczywa po osiągnięciu stanu równowagi z otoczeniem były poddane procesowi łamania za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick 1445. Prędkość głowicy maszyny wytrzymałościowej wynosiła 20 mm/min. Podczas łamania pieczywa rejestrowano siłę niszczenia i emisję akustyczną (Fot. 1). Pomiar emisji akustycznej wykonano akcelerometrem piezoelektrycznym

typu 4381V firmy Brüel&Kjær. Sensor pomiarowy umożliwiał rejestrację sygnału emisji akustycznej w paśmie częstotliwości od 1 do 15 000 Hz. Analizę dźwięku wykonano dla 5 sekundowych zapisów EA.



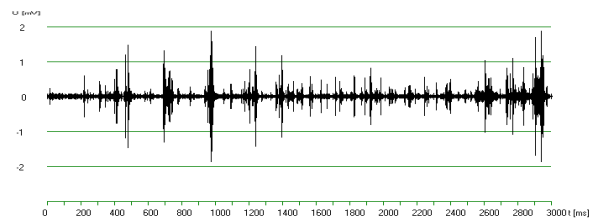
Rys. 2. Maszyna wytrzymałościowa ZWICK wyposażona w kontaktowy adapter do rejestracji fal sprężystych

### 2.3 ENERGIA SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

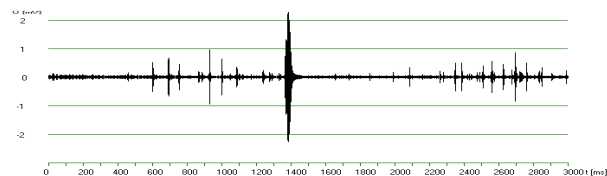
Wykresy amplitudowo-czasowe zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej pieczywa chrupkiego przedstawiono na rysunku 3, po jednym przykładzie dla określonej aktywności wody. Dla uzyskania wysokiej rozdzielczości czasowej (jeden pixel na rysunku równa się 5 ms) pokazano pierwsze trzy sekundy zapisów. Zależność zarejestrowanego w trakcie badania próbki natężenia sygnału emisji akustycznej od czasu faktycznie jest rejestrowana jako wartość skuteczna (RMS) sygnału i oznaczona jako  $v(t)$  [V].

W pamięci komputera jest reprezentowana jako ciąg cyfrowych próbek (digital samples) sygnału zmierzonych w chwilach czasu oddalonych od siebie o  $T_1$ , wynoszący 22.7 mikrosekund. Rozdzielczość w dziedzinie napięcia wynosi 2,54 mV a sygnał maksymalny = 5 V. Zarejestrowany ciąg próbek sygnału, który poddawany zostanie dalszej obróbce przedstawić można symbolicznie jako:  $v(mT_1)$ , gdzie  $m$  równe 0, 1, 2... jest indeksem próbki sygnału. Najprostszym deskryptorem (parametrem) dla zbioru próbek sygnału emisji akustycznej z pomiaru pojedynczego produktu jest suma wartości skutecznych sygnału zmierzona w czasie np. 10 sekund pomiaru. Deskryptor ten potocznie bywa nazywany „energią zarejestrowanego sygnału” i można go zapisać za pomocą następującego wzoru (Marzec i wsp. 2002):

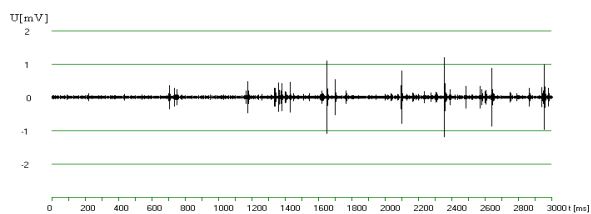
$$E = \sum_{m=1}^N v(mT_1) \quad (1)$$



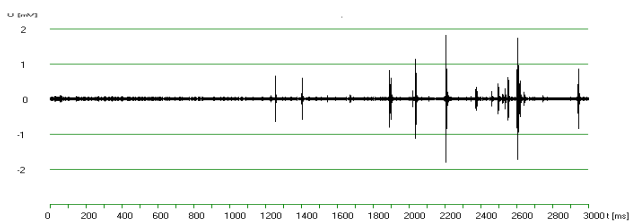
$a_w = 0.037$



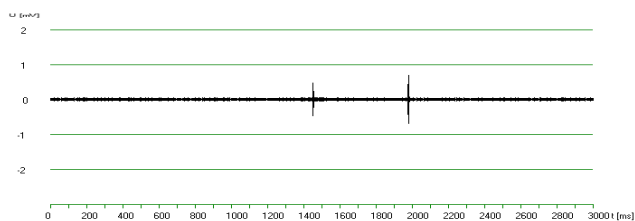
$a_w = 0.330$



$a_w = 0.440$



$a_w = 0.530$



$a_w = 0.750$

**Rys. 3.** Wykresy amplitudowo-czasowe wzmocnionych sygnałów emisji akustycznej generowanych podczas trójpunktowego łamania próbek ekstrudowanego pieczywa żytniego o różnej aktywności wody

Na podstawie wykresów amplitudowo-czasowych, zaprezentowanych na Rysunku 3. można stwierdzić, że zapisy uzyskane dla trzech środkowych poziomów aktywności wody 0.330; 0.440, 0.530 różnią się nieznacznie pod względem wartości skutecznej sygnału EA jak i pod względem ilości impulsów (bursts) odpowiadających pękaniu fragmentów matrycy. Przy zastosowaniu odpowiedniego powiększenia fragmentów sygnału okazuje się, że we wszystkich zapisach można wyróżnić dominujące pod względem ilościowym krótkie impulsy o czasie trwania około 88 mikrosekund i zbliżonej amplitudzie, które następują szybko po sobie formując charakterystyczny „chrupki” dźwięk. Impulsy te są nazywane zdarzeniami EA. Bardziej szczegółowa analiza zapisu zdarzeń EA pozwala na określenie liczby zdarzeń w obrębie każdego zapisu i rozkład maksymalnych energii sygnału w obrębie tych zdarzeń (Ranachowski, 2005). Oprogramowanie stosowane w analizie sygnału wykrywa początek zdarzenia przyjmując za kryterium zadaną wielkość chwilowej energii sygnału, opisanej wzorem (1), a następnie koniec zdarzenia EA. Jako umowny koniec zdarzenia przyjęto indeks próbki sygnału, kiedy chwilowa wartość energii sygnału zmaleje o połowę w porównaniu do przyjętego wcześniej progu detekcji. Po wykryciu zdarzenia poszukiwanie następnego zdarzenia emisji akustycznej jest kontynuowane po pominięciu dwóch kolejnych próbek sygnału aby utrudnić ponowne wykrycie tego samego zdarzenia. Maksymalna suma wartości skutecznych sygnału jednego zdarzenia (próg powyżej, którego liczone są zdarzenia EA) wynosiła około 2000 jednostek dla płatków kukurydzianych, 3000 jednostek dla pieczywa chrupkiego. Oprogramowanie bada 3 kolejne impulsy i jeżeli ich suma wartości skutecznych przekracza wartość progową, rejestrowane jest zdarzenie EA. Liczbę zdarzeń, ich energię i amplitudę można wyznaczyć przy różnych wartościach progowych np. 2V, 3V, 4V.

Obliczono liczbę zdarzeń emisji akustycznej w pieczywie ekstrudowanym i wypiekanym tradycyjnie. W analizowanych produktach liczba zdarzeń i intensywność dźwięku maleje ze wzrostem aktywności wody produktu. Spadek intensywności emisji akustycznej wynika ze zróżnicowanego rozkładu naprężeń w produktach suchych i wilgotnych [Lewicki i wsp., 2002]. Wzrost zawartości wody i konsekwencja tego procesu, powoduje rozproszenie energii sprężystej, co zmniejsza możliwość występowania kruchych pęknięć [Poliszko i wsp. 1995].

Liczbę zdarzeń EA biszkoptów wyznaczali również Chen i wsp. (2005), w celu określenia ich kruchości. Autorzy rejestrowali dźwięk mikrofonem. Po wzmocnieniu sygnał EA był przesyłany do detektora (Acoustic Detector AED), który na podstawie natężenia dźwięku zliczał zdarzenia EA trwające 250 ms. Ten system rejestracji pozwala regulować czas trwania zdarzeń, co umożliwia badanie produktów kruchych (np. chipsy) i o małej kruchości. Wykazano, że metoda pomiaru liczby zdarzeń jest czułą na zmiany kruchości biszkoptów.

### 3. CHARAKTERYSTYKA WIDMOWA SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

Różnice w sygnale emisji akustycznej generowanym przez próbki o różnych poziomach aktywności wody można analizować porównując uśrednioną charakterystykę widmową zarejestrowanych sygnałów. Charakterystyka widmowa zależy w niewielkim stopniu od objętości badanej próbki, natomiast związana jest ze stopniem uplastycznienia badanej próbki produktu. W celu wyjaśnienia metody konstruowania deskryptora badanego sygnału, który odzwierciedla zmiany charakterystyki widmowej zostanie poniżej podany wzór (3) na wyznaczenie funkcji gęstości widmowej (power spectrum function) sygnału EA. Rozważając ciągły sygnał emisji akustycznej  $v(t)$  w wybranym przedziale czasu, możemy go przekształcić na zależność od jego częstotliwościowych składników. Zależność ta jest przedstawiana jako  $A(\omega)$ , gdzie  $\omega$  jest analogiem częstotliwości  $f$ , określonym jako  $\omega=2\pi f$ . Przy założeniu bezwzględnej całkowalności funkcji  $v(t)$ , może zostać ona liniowo przekształcona na funkcję gęstości widmowej  $A(\omega)$  według poniższego wzoru (przekształcenie Fouriera):

$$v(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)] d\omega \quad (2)$$

gdzie  $\varphi$  jest parametrem reprezentującym fazę przekształcanego sygnału.

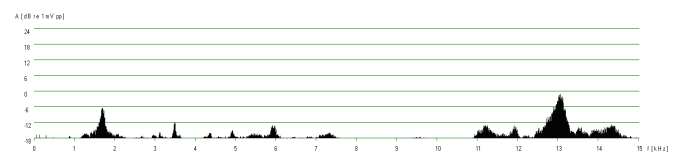
Ranachowski (2005) opracował komputerową procedurę wyznaczania funkcji gęstości widmowej  $A(\omega)$ , umożliwiającą porównywanie natężenia zmierzonego sygnału w wybranych przedziałach częstotliwościowych. Zarejestrowany sygnał dzielony jest na sekcje o długości ¼ sekundy. Potem następuje sprawdzenie czy w sekcji jest zawarte zdarzenie emisji akustycznej w sposób analogiczny do opisanego w poprzednim paragrafie. Następnie wyznaczana jest cyfrowa (discrete) postać funkcji gęstości widmowej przy wykorzystaniu 4000 próbek sygnału sąsiadujących z centralną próbką wykrytego zdarzenia emisji akustycznej.

W wyniku zastosowania procedury opisanej powyżej uzyskuje się eliminację zakłóceń pochodzących od napędu maszyny wytrzymałościowej a ponadto jest wykonywane przekształcenie fragmentów sygnału z zachowaniem tej samej fazy  $\varphi$ , co minimalizuje zniekształcenia wyznaczonej charakterystyki widmowej. Charakterystyki widmowe wszystkich wykrytych zdarzeń emisji akustycznej są rejestrowane w pamięci komputera, a w fazie końcowej wyznaczana jest uśredniona charakterystyka widmowa z całego przebiegu badania próbki żywności. Wynikiem działania programu jest zbiór 1360 współczynników odwzorowujących charakterystykę widmową procesu. Odtwarzany jest zakres częstotliwości od 11 Hz do 15000 Hz przy czym kolejne współczynniki odwzorowują wartość funkcji gęstości widmowej w kolejnych przedziałach: 11 – 22 Hz, 22 – 33 Hz itd. Algorytm przekształcający zbiór próbek sygnału na zbiór współczynników gęstości widmowej  $c_n \ v(mT_1) \Rightarrow c_n(\omega)$  jest realizowany według poniższego wzoru przybliżonego :

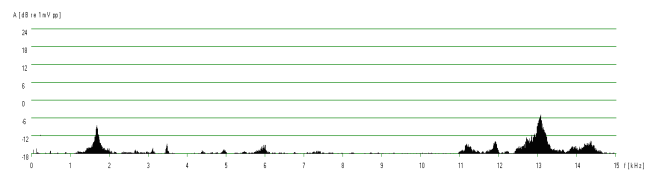
$$c_n \approx \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} v(mT_1) \cdot \text{mod} (e^{-jn2\pi m/N}) \quad (3)$$

gdzie:  $j = \sqrt{-1}$ ;  $n$  – pozycja prążka w widmie,  $m = 400$  – liczba próbek sygnału (impulsów); mod - moduł wyrażenia zespolonego.

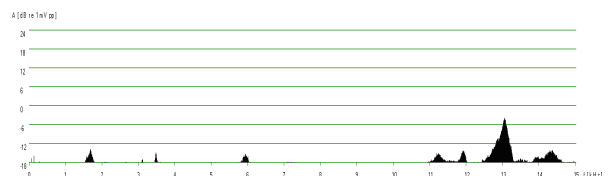
Na rysunku 4. przedstawiono charakterystyki widmowe sygnału emisji akustycznej generowanego w trakcie łamania pieczywa chrupkiego żytniego o różnych  $a_w$ . Charakterystyki widmowe, posiadają układ charakterystycznych dla danego produktu, występują maksima generowanego sygnału emisji akustycznej. Dla pieczywa można wyróżnić dwa charakterystyczne maksima: w przedziale częstotliwości 1-3 kHz oraz 12- 15 kHz.



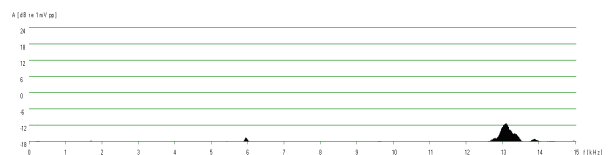
$a_w = 0.037$



$a_w = 0.330$



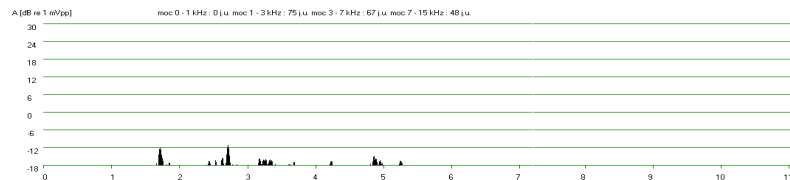
$a_w = 0.530$



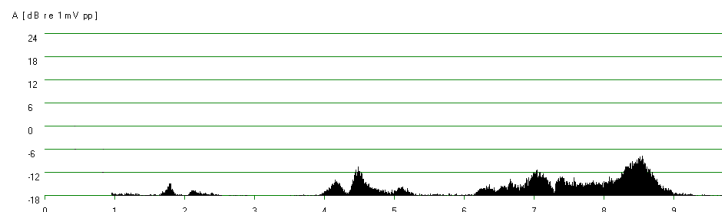
$a_w = 0.750$

Rysunek 4. Charakterystyki widmowe sygnału emisji akustycznej generowanego w trakcie zginania trójpunktowego próbek pieczywa żytniego o różnej aktywności wody

Widma sygnału EA przedstawiają istotne informacje dotyczące jakości emitowanego dźwięku. Różnice w sygnale emitowanym przez produkty takie jak herbatniki, krakersy czy płatki zbożowe analizowano porównując uśrednioną charakterystykę widmową zarejestrowanych sygnałów (rysunki 4,5). Na podstawie charakterystyk spektralnych stwierdzono, że każdy produkt posiada własne, charakterystyczne widmo. Produkty te emitują dźwięki o niskich i wysokich częstotliwościach. Na jakość emitowanego dźwięku w większym stopniu wpływa technologia wytwarzania pieczywa chrupkiego niż jego skład chemiczny. Wyraża się to głównie odmiennym profilem częstotliwości. Dla badanych materiałów można wyróżnić charakterystyczne pasma częstotliwości o maksymalnej energii sygnału. Dla pieczywa chrupkiego żytniego wypiekanego tradycyjnie są to pasma częstotliwości 2-8 kHz oraz 13-14 kHz. Dla krakersów dolne pasmo przypadało na 2-3 kHz, a górne na 14 kHz. W herbatnikach nisko kalorycznych dolne pasmo to 2-6 kHz, zaś górne 12-14 kHz, a w herbatnikach wysokokalorycznych odpowiednio 2-4 kHz i 13 kHz (Lewicki i wsp. 2004).

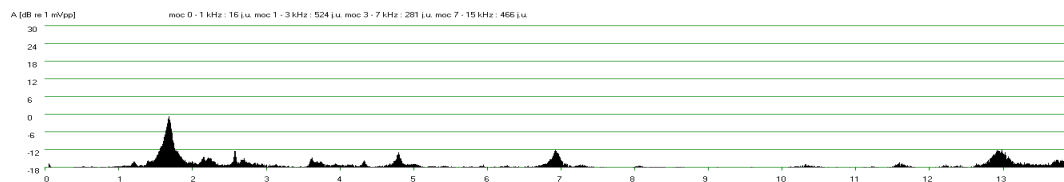


Herbatniki o 11% zaw. tłuszczu

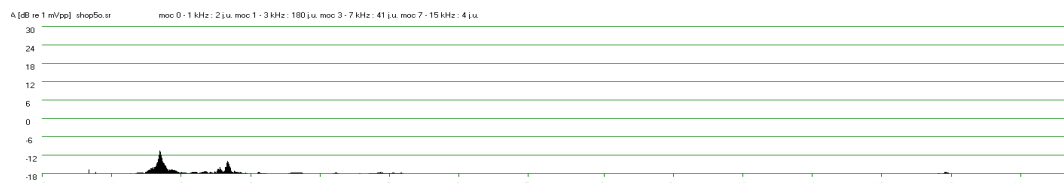


Płatki kukurydziane

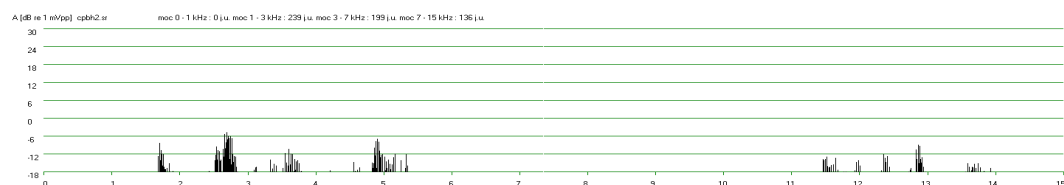
Rysunek 5. Charakterystyki widmowe sygnału emisji akustycznej generowanego w trakcie zginania trójpunktowych próbek ciastek i płatków zbożowych (Lewicki i wsp. 2004)



Pieczywo chrupkie tradycyjne



Krakersy



Herbatniki o 8% zaw. tłuszczu

Na charakterystykę emitowanego dźwięku wpływa technologia wytwarzania produktu oraz gatunek (w przypadku owoców). Wyraża się to głównie odmiennym profilem częstotliwości.

W ostatnich latach rozpoczęto próby zastosowania badań metodą EA do oceny jakości produktów spożywczych.

#### LITERATURA

1. Dacremont C., Spectral composition of EAting sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods. *Journal of Texture Studies*, 1995, 26, 27-43.
2. Drake. B. K.: Food crunching sounds: comparison of objective and subjective data. *J. Food Sci.*, 1965, **30**, 556-559.
3. Drake B.K., Food crunching sounds. An introductory study. *J. of Food Science*, 1936, 28, pp. 233 – 241.
4. Gray J. A., Bemiller J. N. , BrEAd Staling: Molecular Basis and Control, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2003 **2**, pp.1 – 8,
5. **KATZ E.E., LABUZA T.P.J., EFFECT OF WATER ON THE SENSORY CRISPNESS AND MECHANICAL DEFORMATION OF SNACK FOOD PRODUCTS, JOURNAL OF FOOD SCIENCES, 1981, 46, 403-409.**
6. Lewicki P., Marzec A., Ranachowski Z., Dębowski T.: Spectral characteristic of acoustic signals emitted by flat rye bread samples. *XLIX Otwarte Seminarium Akustyki 2002*, Druk: „Sowa”, Warszawa, 2002, s.453-458.
7. Lewicki P.P., Marzec A. Ranachowski Z.: Acoustic properties of crunchy products. 3<sup>rd</sup> International Workshop on Water in Food. 29<sup>th</sup> – 30<sup>th</sup> March 2004. Lausanne, Switzerland, płyta CD, 2004.
8. 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**, s.445–492
9. 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.
10. Marzec A.: Wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne i akustyczne pieczywa chrupkiego. Praca doktorska. SGGW, Warszawa, 2002.
11. 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, s. 127-135
12. Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z., Dębowski T.: Cereal food texture evaluation with application of mechanical and acoustical methods. *Proceedings of the AMAS Course on Nondestructive Testing of Materials and Structures II*. (eds. J. Deputat, Z. Ranachowski) Centre of Excellence for Advanced Materials and Structure. Warszawa, 2003, s. 111-131.
13. 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.
14. Malecki I., Opilski A., (1994): Część I – Pojęcia podstawowe. *Charakterystyka i klasyfikacja sygnałów EA*. W: *Emisja akustyczna Źródła, Metody, Zastosowania*. (red. Malecki I., Ranachowski J.), Wyd. Biuro PASCAL, Warszawa, 18-33
15. Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z., Dębowski T., *Cereal Food texture evaluation with application of mechanical and acoustical method, Nondestructive testing of Materials and Structures*, wyd. IPPT PAN, ISSN 1730-1521, 2002, pp.111 – 133
16. Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z., Wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne i akustyczne pieczywa chrupkiego pszennego, *Inżynieria Rolnicza*, 2002, 5, (38), pp. 101 – 108.
17. Marzec A., Lewicki P., Ranachowski Z., , Wavelet decomposition of acoustic emission signal generated in process of thin layers breaking , *Materiały z XL Otwartego Seminarium z Akustyki, Gliwice*, 2003, ISBN 83-911855-8-3, pp. 261 – 264.
18. Rajewska K. (2000): Doświadczalna analiza destrukcji materiału suszonego. W: *Problemy deformacji i destrukcji materiałów suszonych*. (Praca zb. pod red. S.J. Kowalskiego), Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 129-150.
19. Ranachowski Z., Gondek E., Lewicki P.P., Marzec A.: Investigation of acoustic properties of compressed wheat bran flakes. *Archives of acoustic*, 2005, **30 (2)**, s. 255-265.
20. Ranachowski Z. , *Medody pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej*, Prace IPPT PAN , 7/1997, Prace IPPT PAN ,Warszawa, 1997.
21. Roudaut G., Dacremont C., Le Meste M., Influence of water on the crispness of cerEAl – based foods: acoustic, mechanical, and sensory studies. *Journal of Texture Studies*, 1998, **29**, 199 – 213.
22. Scanlon M.G., Zghal M.C, Bread properties and crumb structure, *Food ResEArch International*, 2001, **34**, pp, 841 – 864 .
23. Tesch R., Normand M., Peleg M., Comparison of the acoustic and mechanical signatures of two cellular crunchy cerEAl foods at various water activity levels, *Journal of Food and Agricultural Sciences*, 1996, **70**, 347 – 354.
24. Vickers Z., M., : Sensory, acoustical and force-deformation mEAsurements of potato chip



- crispness. *Journal of Food Sciences* , 1987, 52, pp. 138-140.
25. Zdunek A. , Konstankiewicz K., Acoustic emission as a method for the detection of fractures in the plant tissue caused by the external forces, *Int Agrophysics*, 1997, 11, pp. 223 – 227.

#### LITERATURA

1. K. Nazwisko, *Tytuł książki*, Pergamon Press. Oxford 1971.
2. C. Nazwisko, *Phys. Rev.* **B33**, 55234 (2001).
3. W. Low, J. Bronstein, *Light scattering spectra of solids- Proceedings of the International Conference on Light Scattering Spectra of Solids*, G. B. Wright, Ed., September 1968, New York, Springer-Verlag 1969, 631.