ACTA AGROPHYSICA

Artur Zdunek

INSTRUMENTALNA METODA OCENY WYBRANYCH CECH TEKSTURY JABŁEK NA PODSTAWIE EMISJI AKUSTYCZNEJ

155

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

Rozprawy i Monografie
2008 (1)

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny – Józef Horabik

Zastępca Redaktora Naczelnego – Grzegorz Józefaciuk

Sekretarz Redakcji – Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna

Tomasz Brandyk, czł. koresp. PAN – przewodniczący

Ryszard Dębicki
Bohdan Dobrzański
Danuta Drozd
Franciszek Dubert
Tadeusz Filipek
Józef Fornal
Jan Gliński, czł. rzecz. PAN
Eugeniusz Kamiński
Andrzej Kędziora
Tadeusz Kęsik
Krystyna Konstankiewicz
Janusz Laskowski
Jerzy Lipiec
Piotr P. Lewicki
Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN
Edward Niedźwiecki
Viliam Novák, Słowacja
Josef Pecen, Czechy
Tadeusz Przybysz
Jan Sielewiesiuk
Witold Stępniewski
Zbigniew Ślipek
Bogusław Szot

Opiniowali do druku:

dr hab. Czesław Puchalski, prof. UR
doc. dr hab. Zbigniew Ranachowski

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Wydawnictwo
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. (0-81) 744-50-61, http://www.ipan.lublin.pl
e-mail: w.wozniak@ipan.lublin.pl

Czasopismo jest umieszczone w następujących bazach:

Thomson Scientific Master Journal List
Polish Scientific Journals Contents – Life Sci.
Biblioteka Główna i Centrum Informacji Naukowej Akademii Rolniczej w Poznaniu
Instytut Bibliotekoznawstwa i Informacji Naukowej Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
Lonicera – serwis botaniczny

©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2008

ISSN 1234-4125

Acta Agrophysica są do nabycia w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie. Prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie oraz w oddziałach firmy Kolporter S.A. na terenie całego kraju. Informacje pod numerem infolinii 0801-205-555 lub na stronie internetowej http://www.kolporter-spolka-akcyjna.com.pl/prenumerata.asp

Wydanie I. Nakład 200 egz., Ark. 8,2
Skład komputerowy: Wanda Woźniak
Druk: Drukarnia *ALF-GRAF*, ul. Kościuszki 4, 20-006 Lublin

Podziękowania

Badania naukowe finansowane ze środków budżetowych na naukę
w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 2 P06T 089 28

Wydanie (prace edytorskie i wydawnicze) niniejszego opracowania naukowego jest współfinansowane ze środków Unii Europejskiej, Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Sąsiedztwa Polska-Białoruś-Ukraina INTERREG IIIA/TACIS CBC 2004-2006
przeznaczonych na realizację projektu
„*Interregionalne Centrum Badawczo-Edukacyjne w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie*",
NEB/PL/LUB/2.1/05/222.

ERRATA: *Acta Agrophysica 155/2008(1)*

Strony:	Jest:	Powinno być:
33, 67, 68, 76	AN-42	AN-44
33, 68, 69, 76, 77	AN-84	AN-88
33, 68, 69	AN-84+S2-10	AM-88+S2-10
33, 68, 69, 76, 77	AK-112	AK-115
33, 76, 77	AN+S2-94	AN+S2-98
33	19 II	21 I
33, 67, 69, 76	42	44
33, 69	84	88
33, 69, 77	112	115
22	FP	F_P
28	wzorem (5)	wzorem (4)

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ
Skróty 7
Symbole 7
1. WSTĘP 9
1.1. Tekstura żywności – definicja 9
1.2. Metody instrumentalne w ocenie tekstury owoców i warzyw 11
1.3. Czynniki wpływające na procesy pękania tkanek roślinnych 13
1.4. Dotychczasowe zastosowania emisji akustycznej do badania materiałów spożywczych 14
2. CEL PRACY 16
3. METODYKA 18
3.1. Metoda instrumentalna 18
3.1.1. Kontaktowa emisja akustyczna (EA) 19
3.1.2. Test przebicia 22
3.1.3. Profilowa analiza tekstury (TPA) 23
3.1.4. Trójpunktowe zginanie próbki z karbem jednostronnym (SENB) 25
3.2. Analiza sensoryczna 28
3.3. Metodyka zmiany parametrów materiału badawczego 30
3.3.1. Osmotyczna zmiana turgoru 30
3.3.2. Procedura ustalania temperatury 31
3.4. Materiał i program badań 31
4. WYNIKI 34
4.1. Porównanie emisji akustycznej w pasmach częstotliwości 1-16 kHz i 20-75 kHz 34
4.1.1. Częstotliwości charakterystyczne sygnału emisji akustycznej 34
4.2. Rejestracja pęknięć tkanki jabłka w testach mechanicznych 38
4.2.1. Wpływ turgoru na propagację pęknięć 38
4.2.2. Wpływ temperatury na propagację pęknięć 48
4.3. Zastosowanie emisji akustycznej do monitorowania zmian właściwości jabłek podczas przechowywania 53
4.3.1. Wpływ czasu przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego na właściwości mechaniczne i sygnał emisji akustycznej 53
4.3.2. Wpływ czasu przechowywania w niskiej temperaturze i kontrolowanej atmosferze na właściwości mechaniczne i sygnał emisji akustycznej 67
4.3.3. Interpretacja uzyskanych wyników 69

4.4. Zastosowanie emisji akustycznej do oceny tekstury jabłek 73
4.4.1. Analiza sensoryczna 73
4.4.2. Korelacja wyników analizy sensorycznej z pomiarami instrumentalnymi 77
5. PODSUMOWANIE 84
5.1. Źródła emisji akustycznej i analiza procesu pękania jabłek 84
5.2. Emisja akustyczna w ocenie tekstury jabłek 86
6. WNIOSKI 88
7. PIŚMIENNICTWO 89
8. STRESZCZENIE 94
9. SUMMARY 96

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Skróty

EA Emisja akustyczna (ang. acoustic emission AE).
s.w.o.h. Symulowane warunki obrotu handlowego (ang. shelf-life).
TPA Profilowa analiza tekstury (ang. texture profile analysis-TPA).
SENB Trójpunktowe zginanie próbki z karbem jednostronnym (ang. single edge notched bend-SENB).
AN Atmosfera normalna.
AK Atmosfera kontrolowana.

Symbole

F_P Jędrność, zdefiniowaną jako maksymalna siła w teście przebicia, (N).
W_f Praca w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym jako pole powierzchni pod krzywą siła-ugięcie do momentu złamania próbki, (J).
t Przedział czasu, w którym wyznaczano deskryptory sygnału emisji akustycznej, (s).
N_t Tempo zdarzeń jako liczba zdarzeń emisji akustycznej zarejestrowanych w czasie t.
A_t Maksymalna amplituda sygnału emisji akustycznej zarejestrowana w czasie t, (j.um).
N Liczba (suma) zdarzeń emisji akustycznej w teście mechanicznym. Dla poszczególnych testów:
- N_P Liczba zdarzeń emisji akustycznej w teście przebicia.
- N_{TPA} Liczba zdarzeń emisji akustycznej w teście TPA.
- N_{SENB} Liczba zdarzeń emisji akustycznej w teście SENB.

A Średnia amplituda sygnału emisji akustycznej w teście mechanicznym uzyskana jako średnia wartość A_t w danym teście. Dla poszczególnych testów, w tym:
- A_P Średnia amplituda emisji akustycznej w teście przebicia, (j. um.).
- A_{TPA} Średnia amplituda emisji akustycznej w teście TPA, (j. um.).
- A_{SENB} Średnia amplituda emisji akustycznej w teście SENB, (j.um.).

H1 Twardość1 jako maksymalna siła w pierwszym cyklu testu TPA, (N).
H2 Twardość2 jako maksymalna siła w drugim cyklu testu TPA, (N).
C_O Spójność (ang. cohesiveness) wyznaczona jako stosunek powierzchni pod krzywą siła-czas w cyklu drugim do cyklu pierwszego testu TPA.
S_P Elastyczność (ang. springiness) jako stosunek *L2/L1*, gdzie *L2* jest przemieszczeniem (lub czasem przy stałej prędkości odkształcania) od punktu

rozpoczęcia procesu odkształcania w cyklu drugim do odkształcenia przy *H2*, *L1* jest odległością (lub czasem przy stałej prędkości odkształcania) od punktu rozpoczęcia procesu odkształcania w cyklu pierwszym do odkształcenia przy *H1* w teście TPA.

S Odległość podpór w teście SENB, (mm).

W Wysokość próbki w teście SENB, (mm).

B Szerokość próbki w teście SENB, (mm).

a Głębokość karbu (nacięcia) w teście SENB, (mm).

K_c, lub K_{Ic} Odporność na kruche pękanie wyznaczana zgodnie z normą ASTM E-399, ($kPa \cdot m^{0,5}$).

K_2 Odporność na kruche pękanie wyznaczana przy $S/W = 2$, ($kPa \cdot m^{0,5}$).

O_S Osmotyczność, ($Osmol \cdot kg^{-1}$).

1. WSTĘP

Jabłka odgrywają ogromną rolę w produkcji rolniczej w Polsce. Według danych GUS w Polsce w ostatnich latach zbiory jabłek są stale wyższe od 2 mln ton, co stanowi około 70% zbiorów wszystkich owoców. Z tego około 1,2 mln ton jest przeznaczanych do przetwórstwa, około 0,7 mln ton na rynek wewnętrzny, a około 0,3-0,4 mln ton na eksport. Tak wysoka produkcja jabłek w Polsce, pomijając lata podobne do roku 2007 gdzie w wyniku przymrozków produkcja spadła o około połowę, plasuje nas w czołówce producentów tego owocu na świecie, po Chinach i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. W roku 2004 Polska wyprodukowała aż 20% jabłek spośród krajów UE-25, co uplasowało nas obok Włoch, Francji, Niemiec i Hiszpanii. Polska jest poza tym trzecim w Europie (po Francji i Włoszech) eksporterem jabłek deserowych. Głównym ich odbiorcą jest Rosja i kraje byłego ZSRR, a także Czechy, Słowacja, Rumunia, Serbia, Chorwacja oraz państwa "starej" UE.

Spośród wielu czynników wpływających na opłacalność ekonomiczną produkcji jabłek jednym z ważniejszych jest poprawa jakości owoców. Zagadnienie to jest podkreślane zarówno przez przedsiębiorców jak i naukowców. Jakość produkowanej żywności, w tym owoców i warzyw, a szczególnie jabłek jest więc kluczowym problemem współczesnego rolnictwa, przetwórstwa i handlu. Również w Polsce w obliczu wstąpienia do Unii Europejskiej, zwiększonej konkurencji oraz dążenia do podniesienia jakości życia zagadnienie to staje się priorytetowe. Szeroko rozumiana jakość jest ważna zarówno dla producentów, handlowców, jak i konsumentów warzyw i owoców, ponieważ nowoczesne i dokładne metody badawcze pozwalają klasyfikować i kontrolować jakość na każdym etapie od wyprodukowania do konsumpcji.

1.1. Tekstura żywności - definicja

Bourne (2002) określa cztery najważniejsze czynniki jakości żywności: wygląd, zapach, teksturę i wartości odżywcze. Pierwsze trzy z nich nazywane są „sensorycznymi czynnikami akceptowalności" (ang. sensory acceptability factors), ponieważ są one odbierane głównie przy pomocy naszych zmysłów, w odróżnieniu do wartości odżywczych. Sensoryczna akceptowalność produktów żywnościowych jest niezwykle ważna, ponieważ człowiek odczuwa zadowolenie z jedzenia produktów, które lubi (Bourne 2002, Szczesniak 2002). Tekstura jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o jakości produktów spożywczych, szczególnie z punktu widzenia konsumenta (Szczesniak 1963, 1971, 1972, Szczesniak i in. 1963, 1975, Szczesniak i Khan 1971, Szczesniak i Kleyn 1963). Dla niektórych produktów, jak mięso, chipsy ziemniaczane i płatki kukurydziane, tekstura jest kluczowa dla konsumenta, dla innych, jak owoce i warzywa, sery

i cukierki, jest jednym z ważniejszych czynników lub decydującym o dokonanym wyborze (Bourne 2002). Istnieje ogólnie przyjęta definicja tekstury będąca wynikiem wieloletnich badań naukowców reprezentujących różne gałęzie nauki, która mówi, że „jest ona sensoryczną i funkcjonalną pochodną struktury, mechanicznych i powierzchniowych właściwości żywności określanych poprzez zmysł wzroku, słuchu, dotyku i kinestezji (odczucia związanego z ruchem dotykanego przedmiotu)" (Szczesniak 2002). W związku z tą definicją można określić podstawowe cechy tekstury:

- jest cechą sensoryczną, tzn. tylko człowiek potrafi ją odczuć i opisać, dlatego metody instrumentalne mogą kwantyfikować tylko niektóre cechy tekstury,
- jest cechą wieloczynnikową,
- jest wynikiem struktury żywności (molekularnej, mikro- i makroskopowej),
- jest określana przez kilka zmysłów jednocześnie, z których najważniejszym jest dotyk.

Z powyższego widać, że ze względu na przyjętą definicję, jest to zespół cech związanych z subiektywnymi odczuciami konsumenta. Ma to odzwierciedlenie w liczbie określeń używanych do opisu tekstury i ich regionalnym i kulturowym zróżnicowaniu. W USA istnieje 78 różnych określeń (Szczesniak i Kleyn 1963), w Austrii 105 (Rohm 1990), a w Japonii aż 406 (Yoshikawa i in. 1970). Ponadto gradacja ważności cech spożywanych produktów jest różna w różnych społeczeństwach. Innym ważnym problemem jest odmienne rozumienie lub problemy z tłumaczeniem niektórych określeń (Dacremont 1995). Jednak niezależnie od regionu i przynależności kulturowej, do najczęściej wymienianych należą: kruchość, chrupkość (chrupliwość), twardość, soczystość, mączystość. Określenia te są zestawieniem właściwości mechanicznych i akustycznych podczas spożywania produktu.

Kruchość i chrupkość będąc pożądanymi cechami żywności (Szczesniak i Khan 1984, Vickers 1983) są szczególnie ważne dla owoców i warzyw, gdyż kojarzone są z ich świeżością i zdrowotnością (Fillion i Kilcast 2000, 2002, Harker i in. 1997a, Szczesniak 1988). Większość badań dotyczy jednak kruchości i chrupkości suchych materiałów spożywczych i na ich podstawie można czerpać wiedzę, które parametry dźwięku są najistotniejsze dla konsumentów. Wykazano, że kruchość spożywanego produktu oceniana jest na podstawie amplitudy i częstotliwości sygnału dźwiękowego podczas pierwszego nagryzania. Wyższa amplituda i wyższa częstotliwość towarzyszy spożywaniu bardziej kruchej żywności (Christensen i Vickers 1981, Dacremont 1995, Drake 1963). Niższe częstotliwości i niższe amplitudy dźwięku powtarzające się podczas przeżuwania towarzyszą spożywaniu produktów chrupkich. Zauważono również, że zarówno liczba akustycznych zdarzeń n oraz ich średnia amplituda A (Drake 1965) lub iloczyn tych wielkości nA (Vickers

1983, 1984, 1985) korelują pozytywnie z oceną organoleptyczną żywności. Istotnym rozróżnieniem pomiędzy określeniami kruchy i chrupki może być charakter odbieranych drgań podczas gryzienia. W kilku eksperymentach wykazano, że kruchość jest związana w większym stopniu z propagacją fal dźwiękowych przez powietrze, natomiast na uczucie chrupkości może wpływać głownie propagacja drgań poprzez zęby i kości szczeki (Christensen i Vickers 1981, Drake 1963, 1965, Vickers i Bourne 1976, Vickers 1980). Rejestracja dźwięku w wymienionych powyżej pracach odbywała się przy pomocy mikrofonów umieszczanych w bezpośrednim sąsiedztwie ust osoby spożywającej badany produkt podczas analizy sensorycznej, a ich celem było określenie, które parametry dźwięku są istotne dla konsumentów (Duizer 2001).

Soczystość i mączystość są cechami produktu związanymi bezpośrednio ze sposobem rozwoju pęknieć w odkształcanej tkance, a w ten sposób pośrednio z sygnałem akustycznym generowanym podczas ich rozwoju. Wielkości te są dwiema przeciwstawnymi cechami jabłek. Pierwsza z nich jest związana z ilością uwolnionego soku komórkowego, a więc jest zależna od liczby zniszczonych komórek. Mączystość natomiast pojawia się, gdy uprzywilejowanym procesem podczas nagryzania i żucia jest pękanie międzykomórkowe (Gross i in. 2002).

Badania sensoryczne nastręczają szeregu trudności, przede wszystkim z powodu konieczności zapewnienia wysoko wykwalifikowanego personelu oceniającego. Wykorzystanie mniej wykwalifikowanego personelu skutkuje dużym rozrzutem wyników, np. pojawia się problem preferencji poszczególnych osób do ulubionych częstotliwości sygnały (De Belie i in. 2002, 2003). Istotnym problemem w ocenie sensorycznej jest zdefiniowanie poszczególnych cech. Przykładowo, Luyten i in. (2004) odnaleźli w popularnej literaturze z tego zakresu 4 różne definicje kruchości oraz 5 różnych definicji chrupkości. Na wynik analizy sensorycznej ma również wpływ sama budowa jamy ustnej, od której zależy propagacja fal akustycznych (Dumas i in. 2005, Lucas i in. 2002). Należy jednak podkreślić, że fizyczne wyjaśnienie preferencji konsumenta związanych z cechami akustycznymi produktu oraz opracowanie metod instrumentalnych do oceny tych cech nadal niesie ze sobą konieczność użycia panelu sensorycznego jako metody referencyjnej.

1.2. Metody instrumentalne w ocenie tekstury owoców i warzyw

Obecnie opracowuje się szereg metod instrumentalnych do oceny tekstury, w tym opartych głównie na pomiarze zależności siła-odkształcenie-czas i wielkości fizycznych z nich wynikających (Bourne 2002, Harker i in. 2002). Takie obiektywne metody mogą być tańsze i szybsze, szczególnie w zastosowaniach przemysłowych. Metody instrumentalne można podzielić na niedestrukcyjne i de-

strukcyjne. Do pierwszych zalicza się np. metody wykorzystujące fale akustyczne, zjawisko rezonansu własnego czy metody laserowe (Abbott i in. 1992, 1997, Chen i Sun 1991, Cooke i Rand 1973, Muramatsu i in. 2000, Prussia i in. 1994, Shmulevich i in. 1995) lub sensory tarcia czy niedestrukcyjnych uderzeń (Puchalski i Brusewitz 1996, Puchalski i in. 2002, 2003). W drugiej grupie metod znajdują się metody wytrzymałościowe. Ponieważ proces jedzenia jest procesem destrukcyjnym, najwłaściwszym wydaje się stosowanie dużych deformacji i testów zniszczeniowych do jego symulacji (Roudat i in. 2002). Najpopularniejszymi testami mechanicznymi w badaniach żywności są: zginanie (Rybczyński i Dobrzański jr., 2002, Vincent, 2004), rozciąganie (De Smedt i in. 1998, Harker i in. 1997b, Rybczyński i Dobrzański jr. 2002) i ściskanie (Alvarez i in. 2002, Mohsenin 1986). Ściskanie jest testem najczęściej stosowanym, ponieważ jest najbliższe symulacji procesu gryzienia i żucia. Spośród wielu konfiguracji próbników używanych w testach ściskania najczęściej spotykanymi są ściskanie pomiędzy równoległymi płytami (np. test profilowej analizy tekstury lub jednokrotne jednoosiowe ściskanie) i test przebicia (Abbott 1999, ASAE 2000, Duprat i in. 1995, Konopacka i Płocharski 2004, Magness i Taylor 1925, Mohsenin 1986). Spośród innych testów wytrzymałościowych na uwagę zasługuje test trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym, który w ostatnich latach jest wprowadzany jako nowa metoda instrumentalna w ocenie tekstury owoców i warzyw (Alvarez i in. 2000b, Harker i in. 2006, Vincent 2004). W testach mechanicznych analizie poddawane są parametry krzywej naprężenie-odkształcenie-czas, takie jak moduł sprężystości, granica płynności biologicznej, granica wytrzymałości biologicznej, odporność na kruche pękanie oraz inne parametry związane z siłą i odkształceniem, które próbuje się korelować z cechami sensorycznymi badanych materiałów. Mimo wielu sukcesów tych prac należy stwierdzić, że procesy pękania, tak istotne dla konsumenta, są zawarte (a raczej „ukryte") w parametrach mechanicznych. O amplitudzie sygnału dźwiękowego podczas niszczenia tkanki czy o liczbie zniszczonych komórek można się tylko domyślać z analizy krzywej siła-przemieszczenie. Nie ma więc bezpośredniej możliwości oceny kruchości lub chrupkości, czy prześledzenia procesu pękania podczas testu. Harker i in. (2002) testując różne dostępne wówczas metody instrumentalne do oceny tekstury jabłek, mimo pewnych satysfakcjonujących wyników stwierdzili, że analiza sensoryczna jest w tej chwili jedyna i krytyczna w ocenie tekstury owoców.

W ostatnich latach jedna z firm produkujących teksturometry wprowadziła na rynek pierwszy zaprojektowany na potrzeby badania żywności system do rejestracji dźwięku podczas testu mechanicznego (www.stablemicrosystems.com). Użyto w nim mikrofonu umieszczonego w pewnej odległości od niszczonej próbki. System ten rejestruje sygnał przenoszony przez powietrze, dlatego jest czuły na dźwięki z otoczenia. Z sukcesem zastosowano to urządzenie do badania su-

chych produktów spożywczych, które emitują wystarczająco głośny dźwięk podczas spożywania (Chen i in. 2005).

1.3. Czynniki wpływające na procesy pękania tkanek roślinnych

Rozpatrując procesy zachodzące w tkance podczas przechowywania stwierdzono, że zmiany tekstury jabłek są spowodowane między innymi stopniem degradacji pektyn (Ilker i Szczesniak 1990, Lapsley i in. 1992, Van Buren 1979) oraz zmianą turgoru (De Belie i in. 1999, Lin i Pitt 1986, Zdunek i Ranachowski 2006). Zmiany chemiczne pektyn w postaci enzymatycznej degradacji są odpowiedzialne za utratę jędrności tkanki (Lapsley i in. 1992, Van Buren 1979). Szybkość tych reakcji zależy między innymi od temperatury i dostępu tlenu. Dlatego przechowywanie w obniżonej temperaturze podtrzymuje jakość owoców spowalniając procesy enzymatyczne, a jeszcze lepsze efekty daje obniżenie zawartości tlenu w atmosferze (przechowywanie w atmosferze kontrolowanej). Podczas przechowywania, np. podobnego do symulowanych warunków obrotu handlowego (np. 20°C, > 90 RH), tekstura jabłek nabiera charakteru mączystego. Objawia się to rozpadaniem próbki w ustach, brakiem soczystości i uczuciem kaszowatości. Przyczyną tego jest zmiana charakteru pękania podczas deformacji tkanki. W jabłku i innych miękkich tkankach proces pękania może przebiegać poprzez rozrywanie ścian komórkowych lub pomiędzy komórkami. O tym, który sposób pękania przeważa decyduje względna wytrzymałość tych dwóch elementów (Niklas 1992). Ben-Arie i Kislev (1979) oraz De Smedt i in. (1998) wykazali, że mączystość jest wynikiem słabszych powiązań międzykomórkowych będących wynikiem rozpuszczania pektynowych lamelli. Harker i Hallett (1992) oraz De Smedt i in. (1998) stwierdzili, że podczas przechowywania jabłek (nawet w obniżonej temperaturze) komórki na przekroju obrazu mikroskopowego stają się bardziej okrągłe. Oznacza to, że wraz ze wzrostem mączystości zwiększa się objętość przestworów międzykomórkowych. Osłabia się w ten sposób spójność międzykomórkowa. Hartfield i Knee (1988) dodatkowo zaobserwowali, że na powierzchni pęknięć mączystej tkanki jabłka występują niezniszczone komórki. Dane te dowodzą, że podczas dojrzewania zmiany tekstury są spowodowane między innymi zmianami w sposobie rozwoju pęknięć. Oprócz istotnych zmian zachodzących w obszarze między komórkami, również degradacja pektyn w ścianach komórkowych ma wpływ na właściwości mechaniczne samej ściany pierwotnej. Należy jednak zaznaczyć, że zakres tych zmian zależy od danego materiału i może być nieznaczny. W jabłku nie są one tak istotne jak na przykład w mango, pomidorze, czy kiwi (Kunzek i in. 1999).

Innym procesem zachodzącym podczas przechowywania jabłek jest spadek masy związany z parowaniem wody i procesami życiowymi zachodzącymi w tkance (Zdu-

nek i Ranachowski 2006). Tym samym następuje naturalne zmniejszenie się turgoru, czyli naprężenia ścian komórkowych, co skutkuje zmniejszeniem jędrności tkanki i modułu sprężystości (Dobrzański jr. i in. 2000). Odwodnienie powoduje, że odkształcenie komórki, przy którym zajdzie pęknięcie ściany komórkowej powinno być wyższe (Bajema i in. 1998, Konstankiewicz i Zdunek 2000, Lin i Pitt 1986, Pitt i Chen 1983, Zdunek i Konstankiewicz 2004). Innymi słowy tkanka o wysokim turgorze staje się bardziej „krucha", a energia zewnętrzna potrzebna do rozwoju pęknięć będzie wówczas mniejsza (Niklas 1992). W ekstremalnej sytuacji, gdy turgor jest bliski zeru, może dojść do prawie całkowitego zgniecenia komórki bez rozerwania jej ścian. Wysoki turgor powoduje „napompowanie" komórek i w ten sposób wzrost siły ich wzajemnego przylegania (Niklas 1992).

Kolejnym procesem fizycznym zmieniającym teksturę i ważnym z punktu widzenia konsumenta jest obróbka termiczna, np. podczas gotowania i zamrażania. Wysoka temperatura powoduje zmiękczenie matrycy pektynowej w ścianach komórkowych powodując osłabienie ścian komórkowych oraz maceracją połączeń międzykomórkowych i stopniową utratę spójności (Ng i Waldron 1997, Waldron i in. 1997, 2003). Temperatura jest również czynnikiem determinującym szybkość odwadniania, które stosuje się do wstępnego utrwalania żywności o budowie komórkowej (Kowalska i Lenart 2003). Niska temperatura oprócz utrwalania materiału powoduje wzrost sztywności i kruchości materiału, może również powodować pękanie ścian komórkowych w wyniku zamarzania soków wewnątrzkomórkowych (Sun i Li 2002).

1.4. Dotychczasowe zastosowania emisji akustycznej do badania materiałów spożywczych

Pękanie materiałów może być badane przy pomocy kontaktowej emisji akustycznej. W nagłych procesach niszczenia emitowana jest fala akustyczna, która propaguje w materiale i może być rejestrowana na powierzchni przez sensor będący w kontakcie z próbką (Ranachowski 1997). Emisja akustyczna jest powszechnie stosowana do badania i monitorowania szerokiej gamy materiałów: metale, beton, drewno, skały, itp. (Malecki i Opilski, 1994). Została również z powodzeniem zastosowana do badania suchych materiałów spożywczych: płatków śniadaniowych i chleba chrupkiego (Gondek i in. 2006, Lewicki i in. 2003, Marzec i in. 2003). Zaletą tej metody jest jej niska czułość na szumy z otoczenia.

W dotychczasowych pracach nad zastosowaniem metody kontaktowej emisji akustycznej do tkanek roślinnych koncentrowano się głównie na jej testowaniu, opracowywaniu rozwiązań technicznych i wykrywaniu wczesnych procesów pękania. W pracach tych używano tkanki ziemniaka jako materiału modelowego. Autor niniejszej pracy w 1997 roku jako pierwszy zastosował kontaktową emisję akustyczną do badania procesów niszczenia tkanki bulwy ziemniaka pod wpły-

wem sił zewnętrznych (Zdunek i Konstankiewicz 1997). W kolejnych pracach, wśród nich w pracy doktorskiej (Zdunek 2000), wyznaczono pewne użyteczne parametry, jak naprężenie i odkształcenie krytyczne, w którym rozpoczyna się proces pękania tkanki ziemniaka, oraz sumaryczną liczbę zliczeń emisji akustycznej. Parametry te zależą od turgoru tkanki i prędkości jej odkształcania. Dokonana interpretacja wyników zasugerowała, że źródłem sygnału akustycznego w tkance ziemniaka są pękające ściany komórkowe. Nie wykluczono przy tym pewnego sygnału akustycznego pochodzącego od procesów międzykomórkowych. Stwierdzono, że użyteczną cechą emisji akustycznej jest to, iż jest ona rejestrowana jednocześnie z krzywą naprężenie-odkształcenie jako sygnał towarzyszący. Wykazano, że dla tkanki ziemniaka sygnał emisji akustycznej pojawia się wyraźnie wcześniej niż granice płynności i wytrzymałości biologicznej. Nie zauważono przy tym wyraźnych zmian nachylenia krzywej naprężenie-odkształcenie, co pozwoliło sądzić, że rejestrowany sygnał pochodzi od pęknięć w skali mikro.

Szczegóły powyższych badań zostały opublikowane w pracach Konstankiewicz i Zdunka (2000, 2001) oraz Zdunka i Konstankiewicz (2001, 2004). Należy podkreślić, że w wymienionych wyżej pracach testowano i udoskonalano systemy do pomiaru emisji akustycznej w tkankach roślinnych. Miały one jedną cechę wspólną – rejestrację sygnału w zakresie ultradźwiękowym (>25 kHz), ze względu na dostępne wówczas rozwiązania techniczne.

Kontynuacją tych badań była pierwsza próba zastosowania kontaktowej emisji akustycznej do badań tkanki jabłka. Opublikowano w tym zakresie dwie prace – Zdunek i Bednarczyk (2006) oraz Zdunek i Ranachowski (2006).

Badania w pierwszej z nich przeprowadzono z użyciem opracowanych wcześniej systemów pracujących w zakresach ultradźwiękowych (Zdunek i Bednarczyk 2006). Modyfikacją w użytym systemie była zmiana umieszczenia szerokopasmowego sensora EA, który przymocowany został do górnej ruchomej szczęki maszyny wytrzymałościowej. W pracy tej pokazano zmiany naprężenia krytycznego i sumy zliczeń sygnału akustycznego uzyskane w teście profilowej analizy tekstury TPA dla próbek jabłek odmiany Idared o turgorze zmienianym osmotycznie. Stwierdzono istotne zmiany deskryptorów EA podczas zmiany turgoru. Pewną niedogodnością proponowanej wówczas metody był pomiar sygnału w zakresie ultradźwiękowym, mało użytecznym z punktu widzenia konsumenta, dla którego, jak podaje się w literaturze, istotne są częstotliwości poniżej 14 kHz. Jednak z drugiej strony metodę tę można było stosować do badania pewnych podstawowych procesów pękania zachodzących podczas niszczenia tkanki jabłek.

W drugiej publikacji użyto nowego prototypowego systemu, który bardziej szczegółowo zostanie opisany w niniejszej pracy. W systemie tym po raz pierwszy użyto nowej głowicy pomiarowej z sensorami rejestrującymi sygnał w zakre-

sie 1-16 kHz oraz 25-75 kHz (Zdunek i Ranachowski 2006). W pracy tej przeprowadzono analizę liczby zdarzeń i energii sygnału akustycznego w teście przebicia próbnikiem o średnicy 7,94 mm jabłek odmian Champion, Idared i Jonagold przechowywanych w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Eksperyment, mimo że miał charakter badań wstępnych, wykazał istotne zmiany tych deskryptorów podczas przechowywania, a uzyskane współczynniki korelacji z czasem przechowywania były wyższe niż dla jędrności jabłek. W eksperymencie tym nie wykonywano analizy sensorycznej, jednak zasugerowano, że energia sygnału będąca parametrem jego głośności oraz liczba zdarzeń akustycznych podczas przebicia może być w przyszłości użyta do oceny kruchości jabłek.

Dotychczasowe prace z zastosowaniem emisji akustycznej, opisane powyżej, pokazały główne jej zalety, tj. niewrażliwość na szumy otoczenia, wysoką czułość w wykrywaniu mikropęknięć oraz możliwość śledzenia zmian procesów pękania przy zmiennym turgorze próbek ziemniaka w teście jednoosiowego ściskania lub TPA oraz jabłek w teście TPA lub przebicia.

2. CEL PRACY

Podsumowując przedstawiony we wstępie bieżący stan wiedzy na temat tekstury produktów spożywczych i metod jej oceny, procesów zachodzących podczas przechowywania i możliwości, jakie oferuje kontaktowa metoda emisji akustycznej, stwierdzono następujące fakty leżące u podstaw podjęcia tematyki badań w pracy:

1. Dźwięk generowany podczas spożywania produktów spożywczych, w tym jabłek, odgrywa bardzo ważną rolę w ocenie ich jakości. Procesy pękania są związane z takimi cechami tekstury jak kruchość, chrupkość (chrupliwość), twardość, soczystość i mączystość.
2. Jedyną obecnie zaakceptowaną metodą oceny tekstury jest analiza sensoryczna, która cechuje się subiektywizmem i relatywnie wysokim kosztem przeprowadzenia.
3. Próby opracowania metod instrumentalnych nie przyniosły dotychczas satysfakcjonujących wyników, ponieważ oparte są głównie na pomiarach wielkości mechanicznych i nie uwzględniają w bezpośredni sposób parametrów sygnału akustycznego niszczonej próbki. Interpretacja takich wyników w odniesieniu do rzeczywistego sygnału akustycznego generowanego podczas testu jest bardzo trudna.
4. Proces spożywania jest procesem destrukcyjnym, dlatego do instrumentalnej oceny tekstury zasadne jest stosowanie metod destrukcyjnych. W związku z tym:

a) destrukcyjne testy mechaniczne wraz pomiarem sygnału akustycznego mogą być użyte do instrumentalnej oceny tekstury, a w szczególności cech związanych z procesami pękania,
b) istnieje konieczność opisu procesów pękania w niszczonej tkance roślinnej, ponieważ jest to niezbędne do interpretacji zmian tekstury wraz ze zmianami parametrów produktów spożywczych, w tym jabłek.

5. Kontaktowa emisja akustyczna umożliwia monitorowanie procesów pękania tkanek roślinnych i możliwe jest śledzenie wpływu różnych parametrów materiałowych na te procesy. Jednak jej zastosowanie praktyczne wymaga przeprowadzenia kompleksowych badań dla danego materiału, uwzględniających różne aspekty, które mają wpływ na jego jakość. W przypadku jabłek są to między innymi: sposób i czas przechowywania, odmiana, turgor i temperatura. Niezbędne jest również porównanie uzyskanych wyników przy pomocy metody emisji akustycznej z oceną sensoryczną i określenie korelacji pomiędzy wyróżnikami obu metod.
6. Ze względu na to, że dotychczas jako destrukcyjne metody instrumentalne stosowano różne testy mechaniczne, zasadne jest sprawdzenie przydatności metody emisji akustycznej w szerszej gamie tych testów i stwierdzenie, który z nich wraz z emisją akustyczną nadaje się najlepiej do instrumentalnej oceny tekstury jabłek.

W związku z powyższym określono ogólny cel pracy:

Opracowanie instrumentalnej metody oceny wybranych cech tekstury jabłek związanych z emisją dźwięku generowanego podczas procesów niszczenia.

Cel ten został zrealizowany poprzez cele szczegółowe:

1. Przetestowanie systemu pomiarowego do rejestracji sygnału emisji akustycznej w zakresie częstotliwości słyszalnych i ultradźwiękowych oraz określenie pasma użytecznego podczas różnych niszczących testów mechanicznych, w tym:
   a) testu przebicia,
   b) testu profilowej analizy tekstury – TPA,
   c) testu trójpunktowego łamania z karbem jednostronnym – SENB.
2. Opis propagacji pęknięć (rozwoju zniszczeń) podczas wyżej wymienionych testów w próbkach jabłka o zmiennych parametrach, tj. o różnym turgorze, temperaturze oraz w różnych okresach i sposobach przechowywania.
3. Określenie korelacji między metodą instrumentalną opartą na emisji akustycznej a analizą sensoryczną jabłek.

3. METODYKA

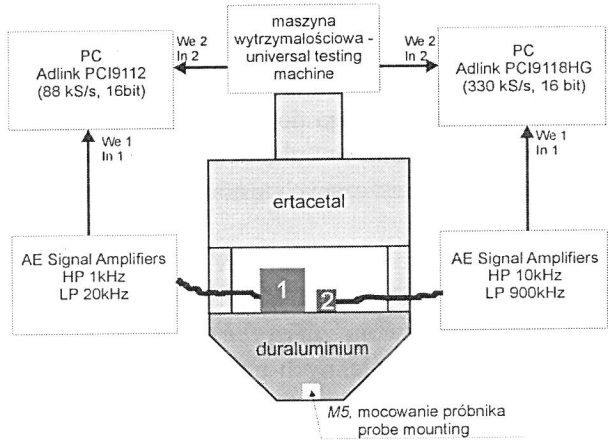
W celu poznania możliwości praktycznego zastosowania emisji akustycznej w ocenie tekstury jabłek przeprowadzono porównanie metody instrumentalnej, opartej na pomiarze sygnału emisji akustycznej podczas testów mechanicznych, z analizą sensoryczną, która może być traktowana jako metoda referencyjna.

W pracy zastosowano następujące metody badawcze:

1. Metoda instrumentalna:
   - kontaktowa emisja akustyczna (EA) w:
     - teście przebicia (ang. puncture),
     - teście profilowej analizy tekstury, TPA (ang. texture profile analysis),
     - teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym, SENB (ang. single edge notched bend).
2. Analiza sensoryczna.

3.1. Metoda instrumentalna

Metodę instrumentalną do oceny tekstury jabłek oparto na systemie składającym się z dwóch zasadniczych elementów: maszyny wytrzymałościowej Lloyd LRX oraz specjalnie zaprojektowanego i wykonanego systemu do rejestracji i analizy sygnału emisji akustycznej, który częściowo został opisany wcześniej przez Zdunka i Ranachowskiego (2006). Schemat systemu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat system pomiarowego użytego w badaniach. 1 – sensor 4381V, który pracuje w zakresie częstotliwości 1-16 kHz, 2 – sensor S9223, który pracuje w zakresie częstotliwości 25-100 kHz. HP – filtr górnoprzepustowy, LP – filtr dolnoprzepustowy

Fig. 1. Scheme of the system used in the experiment. 1 – sensor 4381V working in frequency range 1-16 kHz, 2 – sensor S9223 working in frequency range 25-100 kHz. HP – high pass filter, LP – low pass filter

Maszyna wytrzymałościowa Lloyd LRX (Lloyd Instruments Ltd, Hampshire, Wielka Brytania) wyposażona była w głowicę pomiarową 500 N. Wszystkie testy wykonano z prędkością 20 $mm \cdot min^{-1}$. Programowanie testu, rejestracja wyników oraz wyznaczanie parametrów mechanicznych odbywały się przy pomocy programu Nexygen (Lloyd Instruments Ltd, Hampshire, Wielka Brytania). Z maszyny wytrzymałościowej odprowadzono analogowy sygnał siły do systemu emisji akustycznej w celu jednoczesnego wyzwolenia pomiarów w obu elementach systemu.

3.1.1. Kontaktowa emisja akustyczna (EA)

Do maszyny wytrzymałościowej przymocowana została specjalnie zaprojektowana głowica z sensorami emisji akustycznej, do której z kolei przykręcano próbniki do testów mechanicznych (element centralny na rysunku 1). W omawianym rozwiązaniu fala sprężysta, powstająca w źródle w wyniku procesów niszczenia, propaguje w materiale przechodząc do próbnika, a następnie poprzez poszczególne elementy konstrukcyjne, jest rejestrowana przez komercyjne sensory emisji akustycznej. Propagacja fali w takim układzie podlega prawom falowym, między innymi tłumieniu, odbiciu, dyfrakcji i interferencji. Z tego względu materiał i kształt oraz sposoby połączeń poszczególnych elementów toru pomiarowego, z uwzględnieniem kształtu próbek, wpływają na zarejestrowany wynik. Dokładny opis propagacji fali w takim układzie jeszcze jest niemożliwy. Problem ten dotyczy generalnie zastosowań praktycznych emisji akustycznej również dla innych materiałów (Malecki i Opilski 1994). Dlatego uzyskane w tych badaniach wyniki są charakterystyczne dla danego systemu pomiarowego, a ich analiza ma w chwili obecnej charakter porównawczy (względem próbek odniesienia).

W przypadku stosowanych testów mechanicznych jednym z problemów było opracowanie technicznego rozwiązania umieszczenia jednego lub więcej sensorów emisji akustycznej, które byłyby w kontakcie z materiałem. Bazując na wcześniejszych własnych osiągnięciach problem ten rozwiązano konstruując specjalną głowicę mocowaną do maszyny wytrzymałościowej przedstawionej na rysunku 1.

Głowica pomiarowa składa się z trzech podstawowych elementów:

1. komercyjnych sensorów emisji akustycznej: sensor 4381V (Bruel&Kjear, Narum, Dania), który pracuje w zakresie częstotliwości 1-16 kHz oraz sensor S9223 (Physical Acoustic Limited, Cambridge, Wielka Brytania), który pracuje w zakresie częstotliwości 25-100 kHz,
2. podstawy wykonanej z duraluminium, do której przy pomocy kleju cyjanoakrylowego przyklejone są oba sensory symetrycznie względem osi głowicy. W dolnej części głowicy w jej centralnym punkcie znajduje się otwór M5, służący do przykręcania dowolnych próbników,

3. komory wykonanej z ertacetalu, która ze względu na różnice w gęstości w porównaniu do duraluminium oraz metalowych części maszyny izoluje akustycznie od zakłóceń pochodzących z maszyny wytrzymałościowej. Komora jest bezpośrednio mocowana do głowicy pomiarowej maszyny wytrzymałościowej w sposób standardowy.

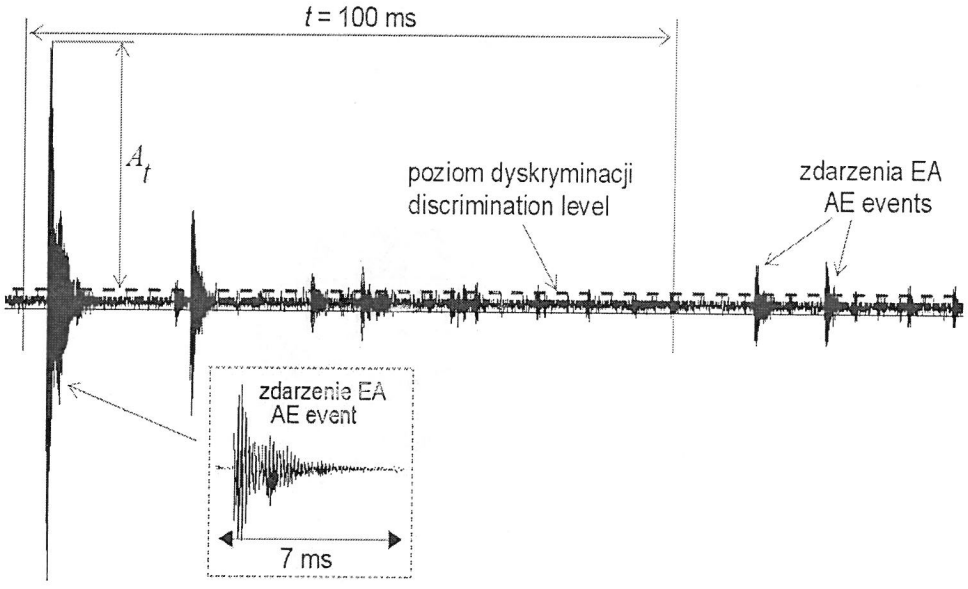
Sensory w głowicy pomiarowej są podłączone przy pomocy ekranowanych kabli o długości 2 m (dostarczonych przez producentów sensorów) do niezależnych kanałów pomiarowych rejestrujących sygnał w dwóch pasmach częstotliwości. Sygnały z sensorów były wzmacniane i filtrowane we wzmacniaczach AE Signal Amplifiers (EA System S.C., Warszawa, Polska). Te niskoszumowe wzmacniacze mają regulowane wzmocnienie oraz możliwość filtrowania sygnału w zakresach 1-20 kHz lub 10-900 kHz. W związku z tym sygnał z sensora 4381V filtrowany był w zakresie poniżej 1 kHz i powyżej 20 kHz, natomiast sygnał z sensora S9223 był filtrowany poniżej 10 kHz i powyżej 900 kHz. Następnie wzmocnione analogowe sygnały były przekształcane i rejestrowane przy pomocy dwóch kart A/D, odpowiednio Adlink PCI 9112 i Adlink PCI 9118HG (Adlink Technology Inc., Taipei, Taiwan) zainstalowanych w dwóch komputerach klasy PC. Częstotliwość próbkowania tych kart na kanał (w każdej karcie użyte były dwa kanały) wynosiła odpowiednio 44 000 próbek na sekundę oraz 160 000 próbek na sekundę. W związku z tym karta Adlink PCI 9112 rejestrowała sygnał w paśmie niższym, natomiast karta Adlink PCI9118HG w paśmie wyższym. W obu kartach konwersja odbywała się z rozdzielczością 16 bitów na ±1,25 V dla niższego zakresu częstotliwości i ±5 V dla wyższego zakresu częstotliwości. Dla powyższych ustawień znaleziono doświadczalnie (w serii wstępnych eksperymentów) optymalne wzmocnienia sygnału tak, by nie przekroczyć zakresu pomiarowego kart dla próbek jabłek, które emitowały sygnał o najwyższej amplitudzie (czyli, jak się spodziewano tkanki o najwyższej kruchości). Drugi kanał kart pomiarowych został użyty do rejestracji wartości siły z analogowego wyjścia maszyny wytrzymałościowej. Zapis wyników odbywał się przy pomocy programów dostarczonych przez firmę EA System S.C.

Wyniki rejestrowano w dwóch oddzielnych plikach dla każdego pasma częstotliwości. Następnie pliki poddawano analizie w celu wyznaczenia deskryptorów sygnału. W tym celu użyto specjalnie przygotowanych programów umożliwiających automatyczną analizę dowolnej liczby plików w jednym cyklu i zapis wyników do pliku w formacie „txt".

Na rysunku 2 przedstawiono przykład czasowego przebiegu sygnału emisji akustycznej w jednym z testów. Analiza takiego sygnału polegała na wyznaczeniu grupy deskryptorów w odcinkach czasu t = 100 ms. Dla każdego kanału wyznaczano 2 deskryptory: tempo zdarzeń N_t, oraz maksymalną amplitudę A_t, oba rejestrowane w przedziale czasowym t. Tempo zdarzeń N_t jest liczbą zdarzeń emisji

akustycznej zarejestrowanych w przedziale czasowym t = 100 ms. W celu wyznaczenia zdarzenia sygnału akustycznego przyjmuję się założenie, ze zdarzenie EA ma postać tłumionej sinusoidy (rys. 2). W praktyce jednak zdarzenia wyznacza się w inny sposób. Każdy pik sygnału o amplitudzie wyższej od poziomu dyskryminacji rejestruje się i nazywa zliczeniem. Natomiast grupę zliczeń, które występują w kolejnych następujących po sobie próbkach rejestruje się jako zdarzenie emisji akustycznej. Innymi słowy, zdarzenie trwa od chwili, gdy pojawi się zliczenie i trwa do momentu, gdy w kolejnych próbkach czasowych nie pojawi się zliczenie. Liczbę zdarzeń N w całym teście uzyskuje się poprzez zsumowanie temp zdarzeń N_t w teście. Dla poszczególnych przedziałów czasu t = 100 ms wyznaczana jest maksymalna amplituda sygnału A_t (rys. 2). Średnią wartość tych amplitud w danym teście oznaczono jako A. Dokładna metodyka wyznaczania powyższych parametrów jest opisana przez Ranachowskiego (1997).

Należy podkreślić, że system zastosowany w badaniach jest unikalnym rozwiązaniem, które zostało specjalnie opracowane lub zmodyfikowane w celu optymalizacji pomiarów pod kątem materiałów roślinnych.

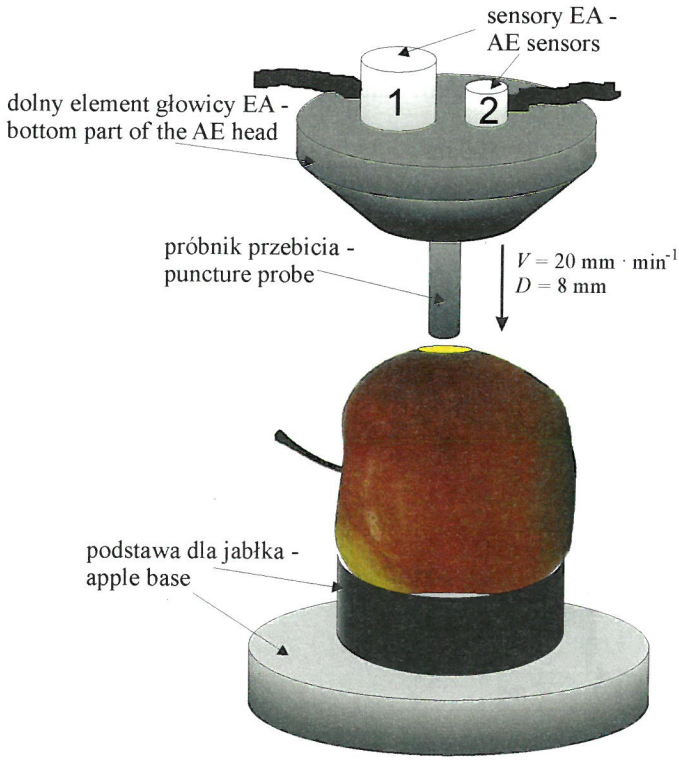


Rys. 2. Rzeczywisty sygnał emisji akustycznej (przykład z testu przebicia jabłka). t – czas, w którym wyznaczane jest tempo zdarzeń N_t i średnia amplituda A_t

Fig. 2. Real acoustic emission signal (an example for puncture test of apple). t – time range where AE events rate N_t and mean of AE amplitude A_t are calculated

3.1.2. Test przebicia

Testy przebicia wykonano dla jabłek zgodnie z opisanym w literaturze testem Magnessa-Taylora (Gross i in. 2002, Magness i Taylor 1925). Test przebicia (ang. puncture test) przeprowadzono używając próbnika o średnicy 11,1 mm o zakończeniu kulistym i promieniu krzywizny 8,73 mm. Długość próbnika wynosiła 50 mm. Próbnik wykonano z duraluminium. Przed testem odcinano warstwę skórki o grubości około 2 mm. Jabłko umieszczano w cylindrycznej podstawie o wygładzonych krawędziach. Rejestracja pomiaru rozpoczynała się, gdy siła przekroczyła 0,5 N. Próbnik wciskano w badany materiał na głębokość 8 mm z prędkością 20 mm·min^{-1}. Test przeprowadzano po stronie wybarwionej i niewybarwionej owocu. Konfiguracja testu pokazana jest na rysunku 3. W teście przebicia wyznaczano jędrność FP zdefiniowaną jako siła maksymalna w teście.



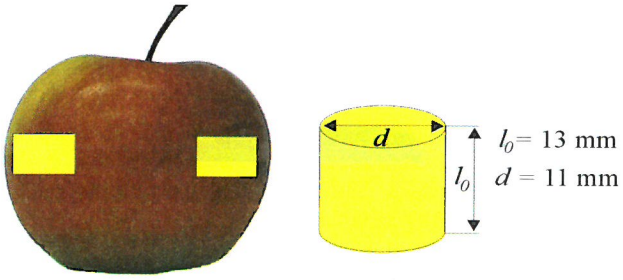
Rys. 3. Test przebicia jabłka. V – prędkość przebicia, D – głębokość maksymalna przebicia, 1 – sensor 4381V, 2 – sensor S9223

Fig. 3. Puncture test of apple. V – speed of puncturing, D – depth of puncturing, 1 – sensor 4381V, 2 – sensor S9223

3.1.3. Profilowa analiza tekstury (TPA)

Test profilowej analizy tekstury TPA (ang. texture profile analysis) wykonano dla cylindrycznych próbek o wymiarach 11 mm x 13 mm (średnica x wysokość). Próbki wycinano przy pomocy wycinaka (średnica 11 mm) zamontowanego do wiertarki. Umożliwiło to otrzymanie próbek o gładkich ścianach. Następnie próbkę cięto na długość 13 mm przy pomocy gilotyny o dwu równoległych ostrzach.

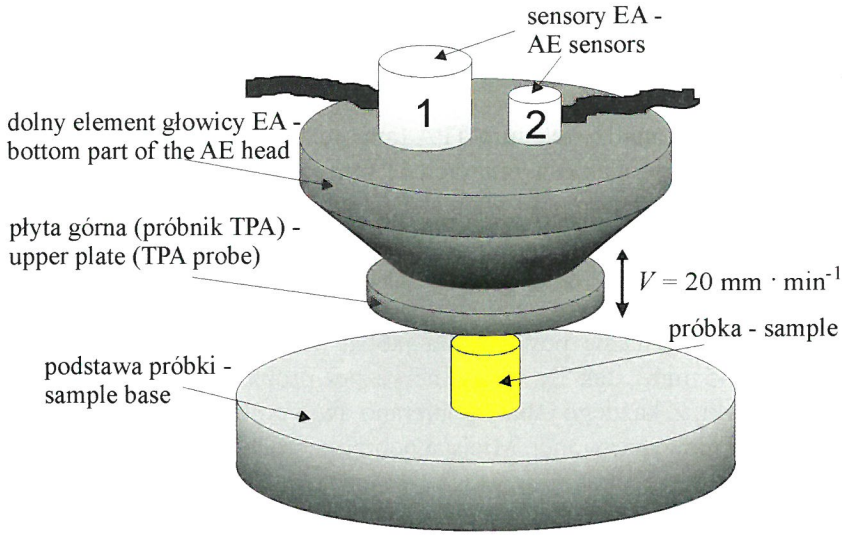
Próbki pobierano z tkanki pod skórką (w odległości 4 mm od skórki, jednak ze względu na krzywiznę powierzchni jabłka odległość ta mogła zawierać się w granicach 3-5 mm), tak by oś cylindrycznej próbki była prostopadła do powierzchni skórki. Z każdego jabłka pobierano dwie próbki z przeciwległych stron: wybarwionej i niewybarwionej. Miejsca pobrania próbek pokazano na rysunku 4.



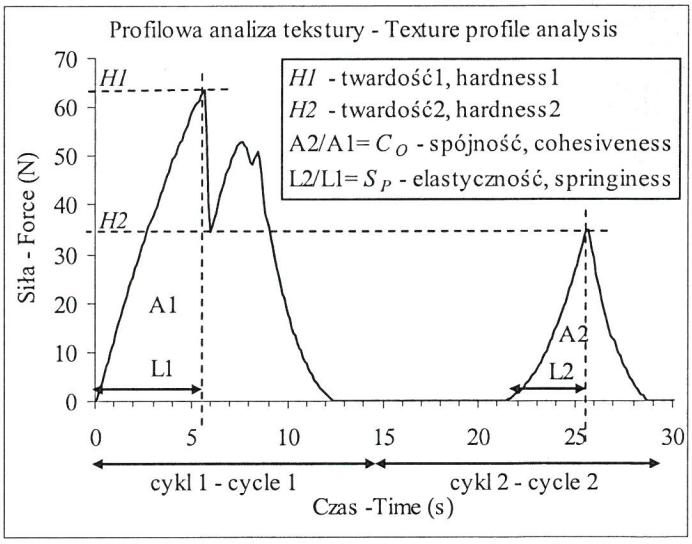
Rys. 4. Miejsca pobrania oraz wymiary próbek do testu profilowej analizy tekstury – TPA
Fig. 4. Sampling place and sample dimensions for texture profile analysis test – TPA

Jednoosiowe ściskanie próbek w teście TPA pomiędzy dwoma równoległymi płytami odbywało się w dwu cyklach, każdy z prędkością 20 mm·min^{-1}. Prędkość ta została dobrana doświadczalnie tak, by zapewnić wystarczającą częstość próbkowania systemu pomiarowego. Górna płyta miała wymiar 60 mm x 10 mm (średnica x wysokość), natomiast dolna (podstawa) 180 mm x 50 mm (średnica x wysokość) i obie wykonane były z duraluminium.

Na rysunku 5a przedstawiono schematycznie sposób przeprowadzenia testu TPA. Odkształcenie względne, do którego ściskano próbki wynosiło 20% jej wysokości, a rejestracja pomiaru rozpoczynała się, gdy siła przekroczyła 0,5 N. Poziom 20% dobrano na podstawie danych literaturowych oraz w wyniku testów wstępnych, które pokazały, że wybrany poziom odkształcenia powoduje pękanie materiału, a jednocześnie nie powoduje całkowitego zniszczenia próbki. Warunki te są konieczne by uzyskane wyniki miały związek z symulowanym procesem spożywania produktu (Alvarez i in. 2002, Stablemicrosystems 1996). Test TPA obywał się w ten sposób, że próbka w pierwszym cyklu była ściskana do poziomu odkształcenia 20%, następnie głowica wracała do punktu, w którym rozpoczynała się rejestracja i natychmiast rozpoczynał się drugi cykl ściskania do tego samego poziomu odkształcenia jak w cyklu pierwszym.



a)



b)

Rys. 5. a) Test profilowej analizy tekstury – TPA cylindrycznych próbek, b) sposób wyznaczania parametrów testu TPA. V – prędkość deformacji, 1 – sensor 4381V, 2 – sensor S9223, A1 i A2 – powierzchnie pod krzywa siła-czas odpowiednio w cyklu pierwszym i drugim testu TPA, L1 i L2 – odległości użyte do wyznaczenia elastyczności

Fig. 5. a) Texture profile analysis test – TPA of cylindrical samples, b) a way of calculation of TPA parameters. V – speed of deformation, 1 – sensor 4381V, 2 – sensor S9223, A1 and A2 – areas under the force-time curve in the first and in the second TPA cycle, L1 and L2 – distances used for springiness calculation

Parametry testu TPA były wyznaczane automatycznie przy użyciu programu Nexygen dostarczonego przez producenta maszyny wytrzymałościowej. Spośród wielu możliwych do analizy wielkości wybrano do dalszych porównań następujące (rys. 5b):

1. Twardość1, *H1* (ang. hardness1) jako maksymalna wartość siły w pierwszym cyklu.
2. Twardość2, *H2* (ang. hardness2) jako maksymalna wartość siły w drugim cyklu.
3. Spójność, C_O (ang. cohesiveness) wyznaczona jako stosunek powierzchni pod krzywą siła-czas w cyklu drugim *A2* do cyklu pierwszego *A1*.
4. Elastyczność, S_P (ang. springiness) jako stosunek *L2/L1*, gdzie *L2* jest przemieszczeniem od punktu rozpoczęcia procesu odkształcania w cyklu drugim do odkształcenia przy *H2*, *L1* jest odległością od punktu rozpoczęcia procesu odkształcania w cyklu pierwszym do odkształcenia przy *H1*.

3.1.4. Trójpunktowe zginanie próbki z karbem jednostronnym (SENB)

Test trójpunktowego zginania przeprowadzono na prostopadłościennych próbkach posiadających karb jednostronny w postaci nacięcia. W skrócie test ten będzie nazywany zgodnie z jego anglojęzyczną nazwą SENB (ang. single edge notched bend).

W badaniach materiałowych test SENB jest używany zgodnie z normą ASTM Specification E-399 i jej polskim odpowiednikiem PN-87/H-04335 do wyznaczania stałej materiałowej K_{Ic} nazywanej „odpornością materiału na pękanie". Test ten stosuje się przy założeniu warunków płaskiego stanu odkształceń (PSO) w sąsiedztwie szczeliny (German 2005). W liniowej mechanice pękania w myśl siłowego kryterium pękania współczynnik intensywności naprężeń K_I, charakteryzujący pole naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny, nie może przekraczać wartości krytycznej, którą jest K_{Ic}. Kruche pękanie następuje, gdy:

$$K_I = K_{Ic} \tag{1}$$

Ostatnio test SENB zastosowano do wyznaczania odporności na kruche pękanie materiałów roślinnych (Alvarez i in. 2000b, Harker i in. 2006, Vincent 2004, Vincent i in. 2002). Udowodniono, że współczynniki bezpośrednio związane z rozwojem pęknięć korelują z cechami jakościowymi warzyw i owoców. W tym celu wyznaczano krytyczny współczynnik intensywności pęknięć, oznaczony w tym wypadku jako K_c, zgodnie z równaniem:

$$K_c = \frac{P_c S}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right), \tag{2}$$

gdzie: P_c – siła w granicy wytrzymałości próbki. Na krzywej siła-ugięcie P_c jest maksymalną wartością siły, S – odległość podpór, B – szerokość próbki, W – wysokość próbki, a – głębokość karbu. Funkcja $f(a/W)$ jest następującym wyrażeniem:

$$f\left(\frac{a}{W}\right)=\frac{3(a/W)^{\frac{1}{2}}\left[1{,}99-a/W(1-a/W)(2{,}15-3{,}93a/W+2{,}7a^2/W^2)\right]}{2(1+2a/W)(1-a/W)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3)$$

Współczynnik K_c ma sens, gdy spełniony jest następujący warunek dla wielkości próbki:

$$B_c \geq 2{,}5\left(\frac{K_c}{\sigma_y}\right)^2, \quad (4)$$

gdzie B_c jest minimalną szerokością próbki, σ_y jest naprężeniem w granicy wytrzymałości w teście jednoosiowego ściskania cylindrycznej próbki.

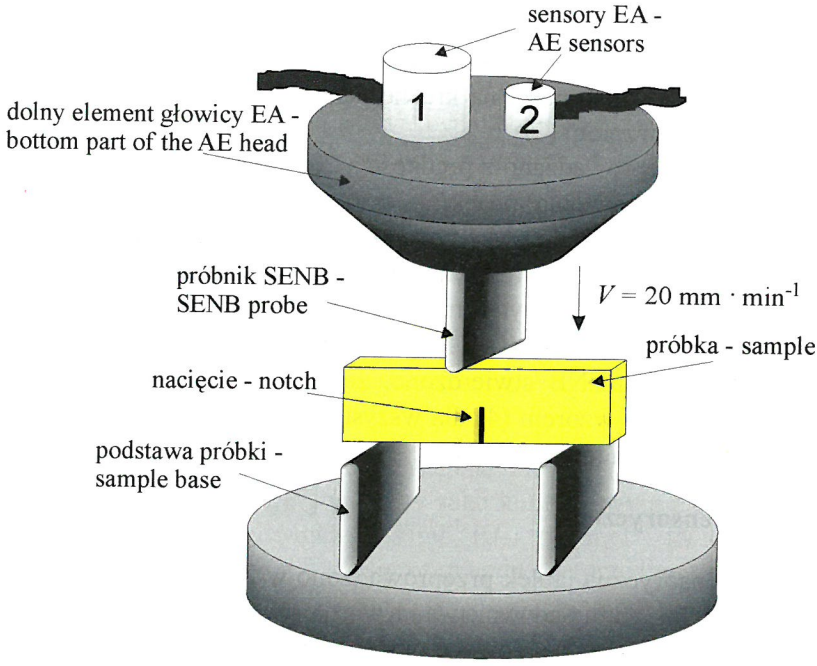
Energia pękania G_c w teście SENB wyrażona jest poprzez:

$$G_c=\frac{U}{BW\Phi}, \quad (5)$$

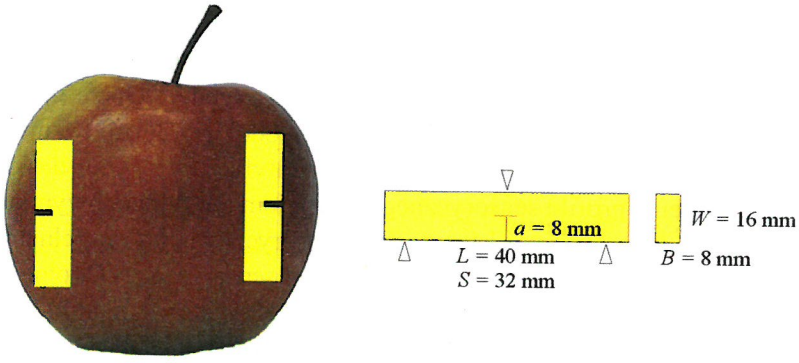
gdzie: U jest polem powierzchni pod krzywą siła-przemieszczenie między wartością 0 i P_c, Φ jest współczynnikiem kalibracji zależnym od a/W i S/W. Williams i Cawood (1990) podają dla $a/W = 0{,}5$ i $S/W = 4$ wartość $\Phi = 0{,}234$.

Na rysunku 6 przedstawiono schematycznie sposób przeprowadzenia tego testu w niniejszej pracy.

Próbka miała kształt prostopadłościenny o wymiarach L = 40 mm x W = 16 mm x B = 8 mm. Wycinana była przy pomocy zestawu wycinaków, każdy z dwoma równoległymi ostrzami. Miejsce pobrania próbek z jabłek pokazano na rysunku 7. W dolnej części próbki wykonywano nacięcie o głębokości a = 8 mm przy pomocy ostrego noża z ogranicznikiem. Stosunek a/W = 0,5, co jest zgodne z normą dla tego typu testu. Jednak istotnym odstępstwem od normy jest przyjęcie stosunku S/W = 2, podczas gdy zalecane jest S/W = 4 (Williams i Cawood, 1990). Powodem tego była konieczność pobrania próbki o stosunkowo dużej szerokości i wysokości, ponieważ jak wykazano w testach wstępnych, dla mniejszych próbek sygnał emisji akustycznej był bardzo słaby i tym samym trudny do rejestracji. Zachowanie stosunku S/W = 4 wymagałoby pobrania jednorodnej próbki o długości L minimum 64 mm, co dla większości jabłek było niemożliwe. Zdecydowano pozostać przy długościach L = 40 mm, S = 32 mm, jednak w tym przypadku niemożliwe jest obliczenie G_C zgodnie z normą według wzoru (5).



Rys. 6. Test trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB dla próbek jabłek. V – prędkość łamania, 1 – sensor 4381V, 2 – sensor S9223
Fig. 6. Single edge notched bend test – SENB for apple samples. V – bending speed, 1 – sensor 4381V, 2 – sensor S9223



Rys. 7. Miejsca pobierania i wymiary próbek do testu trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB. W – wysokość, B – szerokość, L – długość, a – głębokość karbu (nacięcia), S – odległość pomiędzy podporami
Fig. 7. Sampling place and sample dimensions for single edge notched bend test – SENB. W – height, B – width, L – length, a – notch depth, S – span

Ze względu na odstępstwo od normy, by odróżnić parametr materiałowy K_{Ic} lub, jak oznaczano to w innych pracach K_C, wyznaczany zgodnie z normą, w niniejszej pracy odpowiednik „odporności na kruche pękanie" oznaczono jako K_2 i wyznaczano go zgodnie z wzorem (2).

Test SENB przeprowadzano z prędkością 20 mm·min^{-1} do momentu całkowitego złamania (rozpołowienia) próbki.

Na tym samym materiale wykonywano również test TPA, który ma charakter jednoosiowego ściskania. Zastosowany poziom odkształcenia 20% jest wyższy niż odkształcenie w granicy wytrzymałości próbki. Dlatego twardość1 (*H1*) może być użyta jako σ_y do walidacji współczynnika K_2 zgodnie ze wzorem (5). Po przeprowadzeniu testów SENB stwierdzono, że przyjęta szerokość próbki spełnia warunek wyznaczony wzorem (4) dla wszystkich próbek w każdym stosowanym programie badawczym niniejszej pracy.

3.2. Analiza sensoryczna

Analizę sensoryczną jabłek przeprowadzono w Zakładzie Przechowalnictwa i Przetwórstwa Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa w Skierniewicach.

Przed analizą sensoryczną owoce przenoszono na 12-24 godziny do pomieszczenia, gdzie panowały następujące warunki: 18°C, 90% RH. W dniu analiz sensorycznych owoce przenoszono do pomieszczeń laboratorium sensorycznego. Owoce myto i osuszano. Z każdego jabłka pomiędzy stroną wybarwioną, a niewybarwioną wycinano 2 ćwiartki, które następnie obierano ze skórki. Ćwiartki z tego samego owocu zawsze podawano różnym degustatorom jako powtórzenie oceny dla danej kombinacji.

W ocenie sensorycznej uczestniczyło 10 szkolonych degustatorów. Ocenę przeprowadzono metodą skalowania – profilową według następujących norm:

- PN – ISO 11036-Analiza sensoryczna, Metodologia, Profilowanie tekstury,
- PN – ISO 1105-Analiza sensoryczna, Identyfikacja i wybór deskryptorów do ustalenia profilu sensorycznego z użyciem metod wielowymiarowych.

Degustacje odbywały się w laboratorium sensorycznym, które spełnia wymagania wymienione w normie ISO 8589:1998-Analiza sensoryczna – Ogólne wytyczne dotyczące projektowania pracowni analizy sensorycznej. Stanowiska do analizy sensorycznej wyposażone były w program do zbierania danych ANALSENS, v.4 (Caret Systemy Cyfrowe i Oprogramowanie SP z o.o., Gdańsk, Polska).

Przy ustalaniu zakresu analizy sensorycznej tekstury korzystano ze źródeł literaturowych (De Belie i in. 2000, Fillion i Kilcast 2002). Ostatecznie ocena tekstury składała się z 6 wymienionych niżej cech, z czego pierwszych 5 to cechy tekstury determinujące różne aspekty jej jakości, zaś ostatni dotyczył wrażenia ogólnego

związanego z wzajemnym zharmonizowaniem poszczególnych składników. W ocenie wykorzystywano niestrukturowaną skalę liniową w zakresie od 0 do 100 punktów (odcinek prostej o długości 100 mm z odpowiednimi określeniami brzegowymi badanych cech). Oceniający nanosili na skalę swoją oceną stosownie do odbieranego wrażenia.

Podczas jednej sesji oceniający dostawali jabłka 3 odmian (Elstar, Gloster i Jonagold) w 2 powtórzeniach, łącznie 6 próbek, tak, aby każdy degustator ocenił cząstki z innych jabłek. Próbki podawano w kolejności losowej.

Przed testem oceniający zapoznawali się z instrukcją oraz z listą definicji poszczególnych cech tekstury jabłek. Instrukcja ta zawierała następujące definicje:

1. Kruchość (ang. crispness) – intensywność dźwięku słyszanego w czasie pierwszego nagryzienia próbki przednimi zębami, 0 – bez odgłosu, 10 – bardzo hałaśliwe.
2. Twardość (ang. hardness) – siła potrzebna do rozgryzienia próbki zębami trzonowymi, 0 – bardzo miękkie, 10 – bardzo twarde.
3. Chrupliwość (ang. crunchiness) – hałaśliwy dźwięk powtarzający się w czasie żucia kęsa owocu zębami trzonowymi, 0 – dźwięk cichy, krótki, 10 – dźwięk głośny, długi.
4. Soczystość (ang. juiciness) – wrażenie wypływu wolnego soku podczas gryzienia jabłka, 0 – brak soczystości, suchy miąższ, 10 – bardzo soczyste.
5. Mączystość (ang. mealiness) – rozpadanie się próbki podczas gryzienia, bez wydzielania soku wraz z odczuciem mączystości (kaszowatości) w ustach i na języku, 0 – brak mączystości, 10 – wyraźnie wyczuwalna mączystość.
6. Ocena ogólna tekstury – ogólne wrażenie sensoryczne dobrego zharmonizowania wszystkich cech tekstury, 0 – zła, 10 – bardzo dobra (wysoce pożądana).

Instrukcja dla oceniających:

1. Ugryź próbkę jabłka siekaczami i oceń jej kruchość.
2. Kontynuując rozgryzanie miąższu (także zębami trzonowymi) oceń twardość próbki.
3. Przy przeżuwaniu próbki zębami trzonowymi oceń jej chrupliwość, czyli natężenie i długość trwania dźwięku towarzyszącemu kolejnym nagryzieniom.
4. Później oceń soczystość i mączystość próbki.
5. Zrób chwilę przerwy i oceń ogólną jakość tekstury prezentowanej próbki jabłka.

3.3. Metodyka zmiany parametrów materiału badawczego

3.3.1. Osmotyczna zmiana turgoru

W celu zmiany turgoru (uwodnienia) tkanek, zastosowano metodę umieszczenia próbek w roztworach mannitolu o różnym stężeniu (Alvarez i in. 2000a, Alvarez i Canet 2002, Lin i Pitt 1986, Zdunek i Konstankiewicz 2004). Umieszczenie tkanki w roztworze hipertonicznym, o osmotyczności wyższej od osmotyczności soków wewnątrzkomórkowych, powoduje oddanie wody przez tkankę i spadek turgoru. W przeciwnym przypadku, umieszczenie tkanki w roztworze hipotonicznym, o osmotyczności niższej niż osmotyczność tkanki, powoduje pobranie przez tkankę wody i wzrost turgoru.

Na wstępie wykonano pomiary osmotyczności serii kontrolnej jabłek przy pomocy Osmomatu 030-D (Gonotec, Germany) w celu oszacowania izotonicznego stężenia roztworu mannitolu. Stwierdzono, że osmotyczność mannitolu około 0,5 M odpowiada osmotyczności soków wewnątrzkomórkowych dla jabłka. W celu zmiany uwodnienia próbek przygotowano serię następujących roztworów mannitolu w buforze fosforanowym (0,02 M K_2HPO_4 i 0,02 M KH_2PO_4) o stężeniach niższych i wyższych od tych odpowiadających serii kontrolnej, tj.: 0,2 M, 0,4 M, 0,6 M oraz 0,8 M. Bufor fosforanowy stosowano w celu utrzymania obojętnego dla tych materiałów pH = 7,0.

Uwodnienie zmieniano dla cylindrycznych próbek do testu TPA oraz prostopadłościennych belek dla testu SENB. W przypadku próbek cylindrycznych do testu TPA ich długość wynosiła wstępnie około 20 mm. Dopiero po ustaleniu turgoru próbka była skracana do 13 mm. Oba rodzaje próbek były umieszczane w jednym zbiorniku z roztworem. Objętość każdego z roztworów wynosiła 2 litry. Stosunek objętości roztworu zewnętrznego do objętości próbek wynosił około 23. Próbki pozostawiano w roztworze w temperaturze pokojowej przez 24 h (Zdunek i Konstankiewicz 2004, Pitt i Chen 1983). Po wykonaniu testów mechanicznych z próbek pobrano sok wewnątrzkomórkowy, aby zmierzyć jego osmotyczność (tab. 1).

Tabela 1. Osmotyczność O_S soków wewnątrzkomórkowych próbek jabłek (średnie wartości dla próbek po teście mechanicznym) po ich umieszczeniu w roztworze mannitolu w buforze fosforanowym przez 24 h

Table 1. Osmolality O_S of intracellular liquid of apple samples (mean values obtained from samples after mechanical test) after soaking in mannitol with phosphate buffer for 24 h

Stężenie mannitolu Mannitol concentration (M)	O_S (Osmol·kg^{-1})		
	Elstar	Gloster	Jonagold
0,2	0,59	0,57	0,60
0,4	0,69	0,62	0,70
0,6	0,79	0,76	0,78
0,8	0,92	0,87	0,82
C – kontrola control	0,78	0,64	0,77

3.3.2. Procedura ustalania temperatury

Temperaturę próbek ustalano w różny sposób w dwóch podzakresach:

- Od 2°C do 20°C zastosowano konwekcyjne chłodzenie. Od momentu zbioru do czasu eksperymentu jabłka przechowywane były w temperaturze 2°C. W tej temperaturze wykonano pierwszą serię pomiarową wyjmując poszczególne owoce z chłodni bezpośrednio przed testem. Temperatury owoców 10°C i 20°C uzyskiwano poprzez przechowywanie przez 24 godziny owoców w mniejszej chłodni o ustalonej temperaturze. Następnie na bieżąco pobierano próbki i wykonywano testy TPA i SENB już w temperaturze pokojowej. Podobną procedurę zastosowano dla testu przebicia.
- Od 30°C do 70°C zastosowano immersyjne ogrzewanie. Z jabłek, wcześniej przeniesionych z chłodni do temperatury pokojowej na jeden dzień, wycinano próbki do testu TPA i SENB, które następnie umieszczano w następującym roztworze imitującym warunki jonowe w soku komórkowym parenchymy jabłka: 1,2 mM $CaCl_2$, 2,0 mM $MgCl_2$, 0,5 $g \cdot l^{-1}$ KCl, 60 $mg \cdot l^{-1}$ kwas askorbinowy, 4 $g \cdot l^{-1}$ kwas jabłkowy, 1 $g \cdot l^{-1}$ disiarczan sodu IV (przeciwutleniacz), uzupełnione do pH = 3,5 przez 5 M NaOH. Roztwór ten podgrzewano do określonej temperatury przy pomocy płyty grzejnej. Czas ogrzewania próbek ustalono doświadczalnie na 10 min w następujących temperaturach: 30°C, 42°C oraz 60°C. Testy TPA i SENB wykonywano natychmiast po wyjęciu danej próbki z cieczy.

3.4. Materiał i program badań

Jabłka pochodziły z Sadu Doświadczalnego Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa w Skierniewicach. Wybrano 3 odmiany: Elstar, Jonagold i Gloster zebrane w sezonie 2006 w stanie dojrzałości zbiorczej wyznaczanej dla poszczególnych kwater w sadzie jako termin zbioru handlowego określanej na podstawie testu etylenowego oraz pomiarów jędrności i indeksu skrobiowego dla prób owoców pobranych z sadu. Owoce zebrano ręcznie w następujących terminach:

- Elstar – 19.09.2006,
- Jonagold i Gloster – 06.10.2006.

Następnie owoce wszystkich odmian przechowywano w normalnej atmosferze w warunkach chłodniczych (26 dni przechowywania dla odmiany Elstar i 9 dni przechowywania dla odmian Gloster i Jonagold w 2°C, RH 80%) do 15.10.2006, w którym rozpoczęto eksperyment.

Eksperyment podzielono na dwa niezależne programy badań:

- uwzględniający wpływ turgoru i temperatury próbki na jej właściwości mechaniczne – program 1.
- uwzględniający różny sposób i czas przechowywania na teksturę owoców – program 2.

Program nr 1 przeprowadzono dla jabłek przechowywanych w normalnej atmosferze w warunkach chłodniczych przez 23-37 dni od dnia rozpoczęcia eksperymentu (przez okres minimum 49 dni dla odmiany Elastar oraz minimum 32 dni dla odmian Gloster i Jonagold od daty zbioru). Dla tego materiału przeprowadzono badania z użyciem testów profilowej analizy tekstury (TPA) oraz trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym (SENB). W tej części badań nie wykonywano testów przebicia, ponieważ niezmiernie trudne byłoby kontrolowanie tych wielkości dla całych jabłek. Wyjątkiem było przeprowadzenie testu przebicia dla jabłek o temperaturze w zakresie 2°C-20°C.

W celu zmiany turgoru próbek jabłka stosowano procedurę opisaną w podrozdziale 3.3.1. Do każdej serii pomiarowej w tej części badań wybierano po 24 jabłka. Z 12 jabłek pobierano po dwie cylindryczne próbki do testów TPA ze strony wybarwionej i niewybarwionej (rys. 4), z 12 pozostałych po dwie próbki do testów SENB ze strony wybarwionej i niewybarwionej (rys. 7). W sumie zarówno w teście TPA jak i SENB dysponowano 24 pomiarami w każdej serii.

W celu zmiany temperatury zastosowano procedurę opisaną w podrozdziale 3.3.2. Do każdej serii pomiarowej w tej części badań wybierano po 12 jabłek. Z 6 jabłek pobierano po dwie próbki do testu TPA po stronie wybarwionej i niewybrawionej oraz z 6 innych jabłek po dwie próbki do testu SENB, podobnie jak to pokazano na rysunkach 4 i 7. W sumie dysponowano więc 12 pomiarami w każdej serii. W programie nr 1 nie wykonywano testów sensorycznych.

Program nr 2 przeprowadzono dla jabłek przechowywanych według schematu przedstawionego w tabeli 2.

Bezpośrednio po zbiorze owoce zostały przesortowanie ręcznie. Do przechowywania wybrano owoce jabłek wyrównanego kształtu, wybarwienia wielkości, bez widocznych zewnętrznych uszkodzeń. Następnie owoce zostały umieszczone w chłodni (2°C, RH 80%, atmosfera normalna) na czas 26 dni dla odmiany Elstar i 9 dni dla odmian Gloster i Jonagold. Następnie 15.10.2006 rozpoczęto cykl doświadczenia uwzględniający sposób i czas przechowywania opisany w tabeli 2.

Część owoców była przechowywana w warunkach chłodniczych w atmosferze kontrolowanej (AK, 2°C, 2% O_2, 2% CO_2), pozostałe w warunkach chłodniczych w atmosferze normalnej (AN, 2°C, RH 80%).

Dla każdego terminu i sposobu przechowywania wymienionego w tabeli 2 przeprowadzono również analizy sensoryczne na 10 jabłkach każdej odmiany według procedury opisanej w podrozdziale 3.2.

Dla każdego terminu i sposobu przechowywania wybierano 36 jabłek z danej odmiany, które na 24 h przed testem przenoszono do pomieszczenia o temperaturze 20°C. Do każdego typu testu mechanicznego wykorzystywano po 12 jabłek pobierając z nich po 2 próbki po stronie wybarwionej i niewybarwionej. W sumie w każdej serii pomiarowej dla danej odmiany i rodzaju testu (przebicie, TPA oraz SENB) dysponowano 24 pomiarami do analizy statystycznej.

Tabela 2. Harmonogram doświadczenia i liczby użytych jabłek w programie 1 i programie 2 badań
Table 2. Experimental schedule and number of apples used in programme 1 and programme 2

Program Programme	Czas przechowywania od początku eksperymentu (15.10.2006) Storage time from the beginning of the experiment	s.w.o.h. Shelf-life (dni – days) (20°C, RH>90%)	Seria Series	Dzień-Day (2006/2007)	Liczba jabłek do testu Number apples for test	
					Badania instrument. For instrument. test	Analiza sensoryczna Sensory analysis
Program 1 Programme 1	23-37 dni days	1	—	7XI-21XI	Przebicie18, Puncture 18 TPA-108 SENB-108	—
Program 2 Programme 2	0 dni days	1	S1-1	16X	Przebicie12, Puncture12 TPA-12 SENB-12	10
		3	S1-3	18X		10
		5	S1-5	20X		10
		8	S1-8	23X		10
		10	S1-10	25X		10
		12	S1-12	27X		10
	42 dni days	1	AN-42	28 XI		10
	84 dni days	1	AN-84	11 I		10
		10	AN-84+S2-10	19 II		10
	112 dni days	1	AK-112	07 II		10

s.w.o.h. – symulowane warunki obrotu handlowego – shelf-life, 20°C, RH > 90%,
S1, S2 – przechowywanie w symulowanych warunkach obrotu handlowego – storage in shelf-life,
AN – atmosfera normalna – normal atmosphere, 2°C, RH 80%,
AK – atmosfera kontrolowana – control atmosphere, 2°C, 2% O_2, 2% CO_2,
TPA– test profilowej analizy tekstury – texture profile analysis test,
SENB – trójpunktowe zginanie próbki z karbem jednostronnym – single edge notched bend,
AN-84+S2-10 jest tożsame z AN+S2-94 – AN-84+S2-10 is identify with AN+S2-94.

4. WYNIKI

4.1. Porównanie emisji akustycznej w pasmach częstotliwości 1-16 kHz i 20-75 kHz

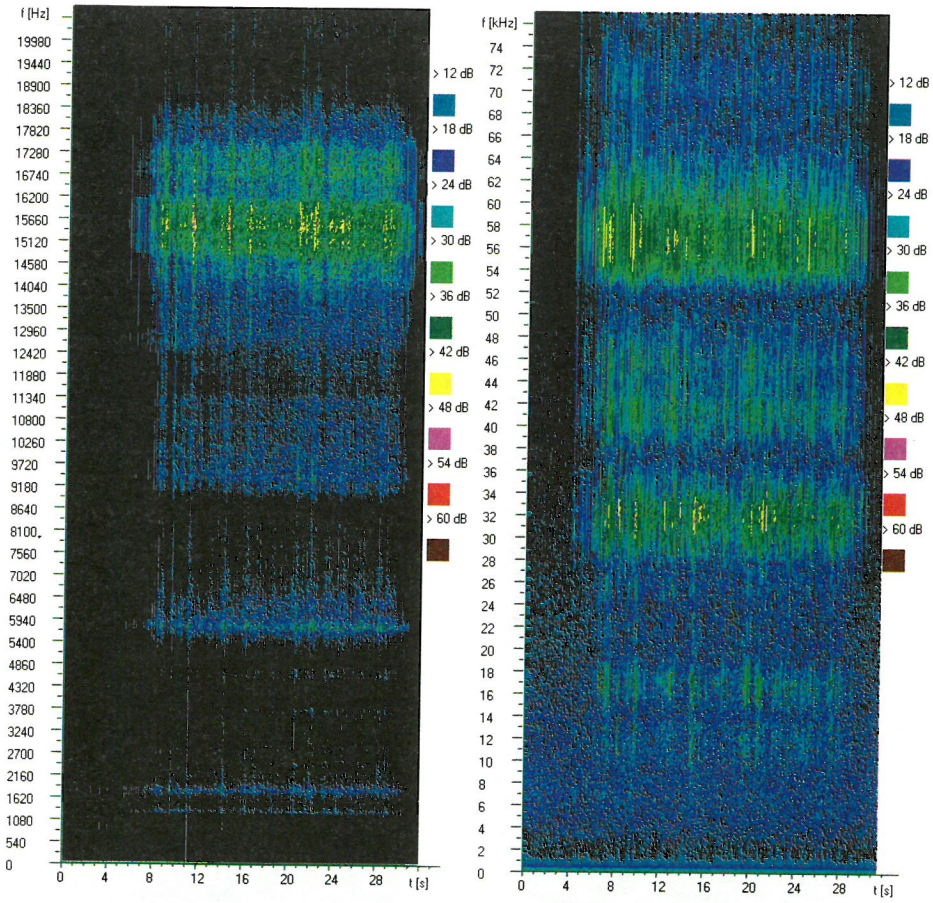
Jak podaje Ranachowski (1997) analityczny opis propagacji fal sprężystych w pobliżu źródła emisji akustycznej jest złożony. Natomiast uproszczona analiza punktowego źródła w znaczniej od niego odległości pozwala na wyciągnięcie między innymi wniosku, że generowana częstotliwość jest tym wyższa im wyższy jest moduł sprężystości ośrodka (Sanchez-Morcillo i in. 2007). Dlatego w pracy przeanalizowano charakterystyki widmowe emisji akustycznej podczas pękania tkanki jabłka w trzech użytych testach mechanicznych pod kątem różnic spowodowanych turgorem, temperaturą oraz różnym sposobem i okresem przechowywania.

4.1.1. Częstotliwości charakterystyczne sygnału emisji akustycznej

W celu analizy charakterystyk widmowych, dla wszystkich pomiarów wykonano akustogramy przedstawiające wartości amplitudy sygnału akustycznego dla danej częstotliwości i w danej chwili. Na rysunkach 8-10 przedstawiono przykładowe akustogramy uzyskane w teście TPA jabłka odmiany Elstar. Z akustogramów, podobnych do tych na rysunku 8, można wyznaczyć częstotliwości charakterystyczne dla tkanki jabłka w teście przebicia, TPA oraz SENB. Po analizie jakościowej wszystkich akustogramów można stwierdzić, że dla danego testu częstotliwości te są podobne dla wszystkich badanych odmian (podobnie jak na rysunkach 8-10 dla odmiany Elstar w teście TPA), a te które można wyraźnie wyróżnić to:

1. dla testu przebicia: 5,9 kHz, 9,7 kHz, 15,6 kHz, 17,2 kHz, 32 kHz, 42 kHz, 46 kHz, 58 kHz oraz 72 kHz (rys. 8),
2. dla testu TPA: 5,5 kHz, 9,7 kHz, 29 kHz, 44 kHz oraz 73 kHz (rys. 9),
3. dla testu SENB: 5,9 kHz, 14 kHz, 30 kHz, oraz 72 kHz (rys. 10).

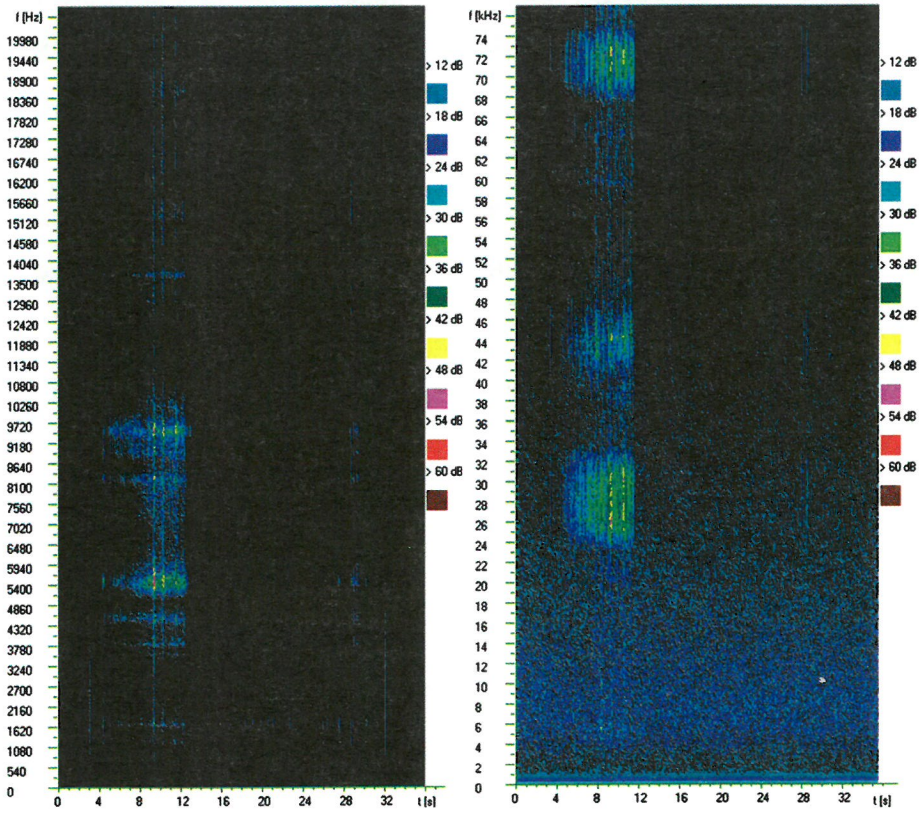
Porównanie akustogramów dla próbek o różnym uwodnieniu, temperaturze lub o różnych terminach przechowywania pokazało, że te charakterystyczne częstotliwości nie zmieniają się wraz z cechami materiału. W praktyce, na uzyskany wynik charakterystyk częstotliwościowych ma wpływ nie tylko charakter źródła oraz właściwości sprężyste materiału, ale również łączny układ pomiarowy, tj. obiekt badany - próbnik - głowica pomiarowa. Dlatego należy sądzić, iż charakterystyka widmowa, pokazana jako przykład na rysunkach 8-10, jest określona pasmem przenoszenia dla głowicy pomiarowej emisji akustycznej z określonym próbnikiem i dla określonego kształtu próbki. Układ taki może tłumić lub wyróżniać określone częstotliwości, co ma większy wpływ na charakterystykę wynikową niż zmiany samego badanego materiału i procesu w nim zachodzącego.



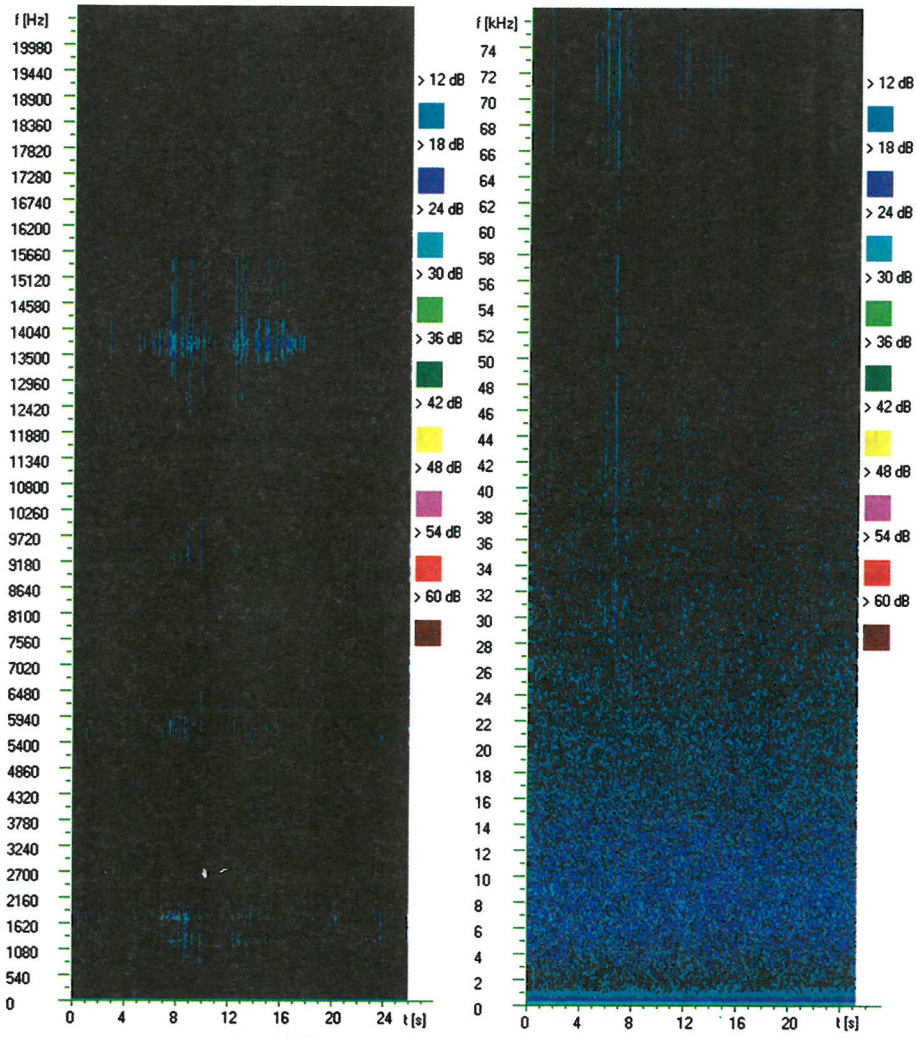
Rys. 8. Akustogramy dla tkanki jabłka odmiany Elstar w teście przebicia w pasmach 1-16 kHz (lewy) i 20-75 kHz (prawy), f – częstotliwość, t – czas
Fig. 8. Acustograms of apple's tissue of Elstar cultivar in puncture test within frequency range 1-16 kHz (left) and 20-75 kHz (right), f – frequency, t – time

W niniejszym eksperymencie zauważono natomiast, że zmiana cech próbki (np. turgor, temperatura, odmiana) powoduje zmianę energii sygnału w danych pasmach częstotliwości. Zaobserwowano też, że zmiana ta zachodzi w tym samym kierunku dla wszystkich częstotliwości, zarówno w paśmie 1-16 kHz jak i w paśmie 20-75 kHz. Świadczy o tym liniowa zależność całkowitej energii sygnału akustycznego w paśmie 1-16 kHz z energią w paśmie 20-75 kHz. Dla przykładu na rysunku 11 przedstawiono taką korelację w teście przebicia jabłka.

Z tego powodu, w celu badania zmian cech materiału związanych z emisją dźwięku w testach mechanicznych przy użyciu prezentowanej aparatury wystarczająca jest rejestracja sygnału w wybranym paśmie. Ponieważ analiza deskryptorów uzyskanych w paśmie ultradźwiękowym nie wnosi dodatkowych informacji dla danego układu pomiarowego, w dalszej części pracy analizowane były tylko deskryptory sygnału EA rejestrowane w paśmie 1-16 kHz.

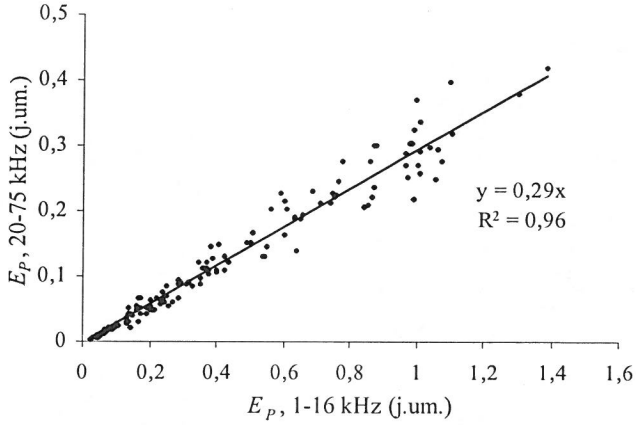


Rys. 9. Akustogramy dla próbki tkanki jabłka odmiany Elstar w teście profilowej analizy tekstury –TPA w pasmach 1-16 kHz (lewy) i 20-75 kHz (prawy), *f* – częstotliwość, *t* – czas
Fig. 9. Acustograms of apple's tissue of Elstar cultivar in texture profile analysis test – TPA within frequency range 1-16 kHz (left) and 20-75 kHz (right), *f* – frequency, *t* – time



Rys. 10. Akustogramy dla próbki tkanki jabłka odmiany Elstar w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB w pasmach 1-16 kHz (lewy) i 20-75 kHz (prawy), *f* – częstotliwość, *t* – czas

Fig. 10. Acustograms of apple's tissue of Elstar cultivar in single edge notched bend test – SENB within frequency range 1-16 kHz (left) and 20-75 kHz (right), *f* – frequency, *t* – time



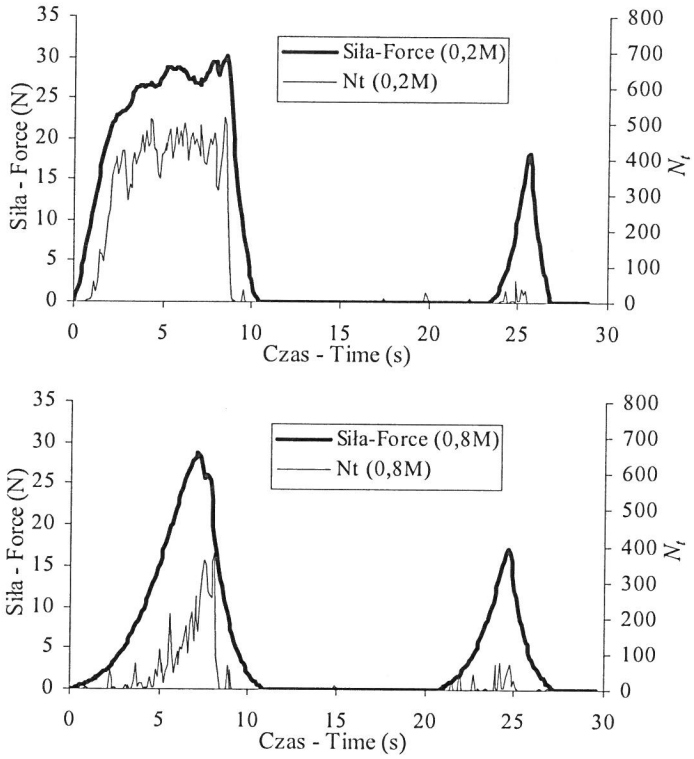
Rys. 11. Zależność pomiędzy całkowitą energią E_P sygnału akustycznego w teście przebicia zarejestrowaną w pasmach 1-16 kHz i 20-75 kHz
Fig. 11. Relationship between the total energy E_P of acoustic signal in puncture test recorded within frequency range 1-16 kHz and 20-75 kHz

4.2. Rejestracja pęknięć tkanki jabłka w testach mechanicznych

4.2.1. Wpływ turgoru na propagację pęknięć

Rysunek 12 przedstawia przykładowe krzywe siła-czas oraz tempo zdarzeń N_t – czas zarejestrowane w teście TPA dla skrajnych stężeń mannitolu (0,2 M i 0,8 M), w których umieszczone były próbki przez 24 h. Poniżej przeprowadzono analizę jakościową i ilościową tych krzywych z uwzględnieniem wyników uzyskanych dla stężeń pośrednich.

Umieszczenie próbek w różnych stężeniach mannitolu powoduje zmiany uwodnienia próbek, dając w efekcie różne wynikowe wartości osmotyczności soków wewnątrzkomórkowych. Niskie stężenia roztworu zewnętrznego powodują, iż próbka pobierając wodę staje się twardsza, wysokie stężenia powodują zaś, że próbka staje się bardziej miękka. Zjawisko to jest powszechnie opisywane w literaturze (Mohsenin 1986, Niklas 1992). Daje to różne przebiegi krzywych siła-czas. Uwodnione próbki charakteryzują się wyższym początkowym nachyleniem krzywej siła-czas. Nachylenie to spada wraz z odwadnianiem. Dla próbek ekstremalnie odwodnionych, dla których zaszła plazmoliza, widoczny jest efekt „zagęszczenia próbki", tzn. krzywa stopniowo zwiększa swe nachylenie przyjmując w końcu prostoliniowy przebieg, gdy wewnątrzkomórkowa błona zostaje rozciągnięta ponownie do granic ściany komórkowej (krzywa dla roztworu 0,8 M na rysunku 12). Ściskane uwodnione próbki jabłka wykazują liniowy wzrost siły aż do granicy wytrzymałości (krzywa dla roztworu 0,2 M na rysunku 12).



Rys. 12. Przykładowa zależność siła-czas oraz tempo zdarzeń emisji akustycznej N_t – czas w teście profilowej analizy tekstury – TPA dla próbek jabłka odmiany Elstar po umieszczeniu próbki w 0,2 M i 0,8 M roztworze mannitolu przez 24 h

Fig. 12. Exemplary relationship force-time and AE events rate N_t – time in texture profile analysis test – TPA for apple samples of Elstar cultivar after soaking in 0.2 M and 0.8 M mannitol solutions for 24 h

Dla uwodnionych próbek proces pękania rozpoczyna się prawie natychmiast po przyłożeniu siły zewnętrznej. Początek rejestracji sygnału emisji akustycznej został wcześniej zdefiniowany jako stan krytyczny tkanki (Zdunek 2001, Zdunek i Konstankiewicz 2001, 2004). Wartość odkształcenia próbki w stanie krytycznym rośnie wraz ze stopniem jej odwodnienia, tzn. proces pękania rozpoczyna się przy wyższych odkształceniach tkanki. Na rysunku 12 widoczne jest, że dla odwodnionych próbek jabłek na początku procesu odkształcania rejestrowane są mniejsze wartości tempa zdarzeń N_t (na granicy szumów) i w dalszym etapie powolne ich narastanie, co potwierdza wcześniejsze wyniki dla tkanki ziemniaka uzyskane przez autora niniejszej rozprawy (Zdunek i Konstankiewicz 2004, Zdunek i Bednarczyk 2006).

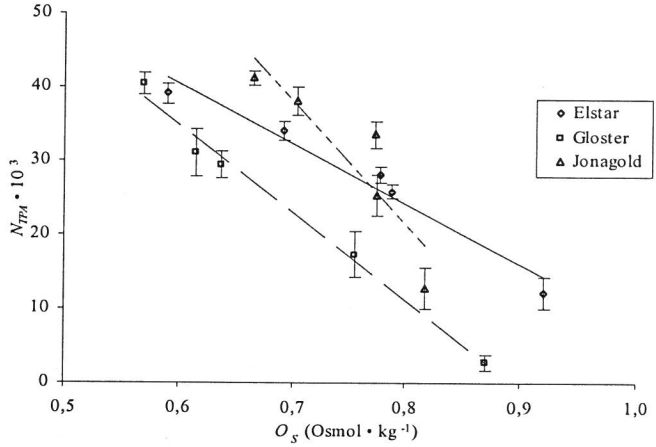
Zadany w teście TPA poziom odkształceń 20% dla próbek został tak doświadczalnie dobrany, by dla próbek kontrolnych (bez kontroli poziomu uwodnienia) po-

ziom ten powodował przekroczenie granicy wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Zostało stwierdzone, że granica ta zmienia się wraz z uwodnieniem tkanki (Gołacki 1983, Pitt i Chen 1983), im wyższe uwodnienie tkanki roślinnej tym niższe odkształcenie i naprężenie w granicy wytrzymałości. Potwierdzają to wyniki niniejszego eksperymentu (rys. 12). Podobnie jak to zaobserwowano w pracach Zdunek i Konstankiewicz (2004) oraz Zdunek i Bednarczyk (2006), osiągnięcie przez próbkę granicy wytrzymałości jest zawsze związane z wystąpieniem tuż przed nią, w jej punkcie oraz po sygnału akustycznego o wysokiej amplitudzie i wysokich wartościach deskryptorów EA. Jest to wynik makropękania struktury komórkowej. Zaletą metody emisji akustycznej jest jej wysoka czułość umożliwiająca zarejestrowanie sygnału pochodzącego od zdarzeń, które trudno jest zidentyfikować na krzywej siła-czas. Zostało to pokazane między innymi w pracach Zdunka i Konstankiewicz (2001, 2004) dla próbek ziemniaka. Również w procesie ściskania próbki jabłka widoczne jest podobne zjawisko. Sygnał EA jest rejestrowany znacznie przed granicą wytrzymałości. W pracach Zdunka i Konstankiewicz (2004) oraz Zdunka i Bednarczyk (2006) udowodniono, że sygnał ten również jest wynikiem niszczenia struktury komórkowej, jednak ze względu na skalę można go nazwać mikropękaniem struktury komórkowej w postaci rozrywania ścian komórkowych lub pękania międzykomórkowego.

W drugim cyklu testu TPA (rys. 5b) ściskana jest próbka już wcześniej zniszczona. Poziom odkształcenia (20%) jest taki sam jak w cyklu pierwszym licząc od początkowego punktu cyklu pierwszego. Relaksacja tkanki w czasie od momentu powrotu głowicy ściskającej do chwili rozpoczęcia drugiego cyklu ściskania zależy od skali zniszczeń w cyklu pierwszym. Jeżeli próbka, na przykład o wysokim turgorze, w cyklu pierwszym przekroczyła znacznie swą granicę wytrzymałości i rozwój szczelin pęknięć jest znaczny, wówczas jej relaksacja jest niewielka ze względu na znaczną uwolnioną wcześniej energię sprężystości. Tym samym siła maksymalna (twardość *H2*) w cyklu drugim będzie znacznie niższa niż odpowiadająca jej wartość *H1* uzyskana w cyklu pierwszym. Natomiast w przypadku próbki o niskim turgorze, w której granica wytrzymałości znajduje się tuż przed zadanym poziomem odkształcenia (mniej niż 20%) lub wogóle nie została przekroczona granica wytrzymałości, osiągane wartości *H2* w cyklu drugim będą wyższe ze względu na mniejszą skalę zniszczeń w wyniku pierwszego cyklu ściskania, a różnica między *H1* i *H2* zmniejszy się. W cyklu drugim również udaje się zarejestrować sygnał EA. Jest on wynikiem dalszej propagacji wcześniej powstałych pęknięć. Jednak uzyskiwane wartości deskryptorów EA w tym cyklu są zazwyczaj bardzo niskie w porównaniu do cyklu pierwszego (rys. 12).

Na rysunku 13 przedstawiono średnie wartości liczby zdarzeń N_{TPA}, będące sumą temp zdarzeń N_t w teście TPA w funkcji osmotyczności próbek osiągniętej po ich

umieszczeniu w roztworze mannitolu. W tabeli 3 przedstawiono wszystkie wyznaczone deskryptory sygnału EA oraz parametry tekstury w teście TPA przy określonych wartościach osmotyczności wraz z przedziałami ufności ($\alpha = 0,05$). W tabeli umieszczono również współczynniki korelacji R tych parametrów z osmotycznością uzyskane w 24 powtórzeniach wraz z poziomami istotności p regresji liniowej.



Rys. 13. Wpływ osmotyczności O_S próbek jabłek na liczbę zdarzeń emisji akustycznej N_{TPA} w teście profilowej analizy tekstury – TPA. Punkty są wartościami średnimi, przedziały ufności wyznaczono dla $\alpha = 0,05$

Fig. 13. An influence of apple's samples osmolality O_S on AE events N_{TPA} in texture profile analysis test – TPA. Points are mean values, confidence intervals are for $\alpha = 0.05$

Na rysunku 13, na którym pokazano wybrany deskryptor emisji akustycznej, widoczne jest, że liczba zdarzeń emisji akustycznej, zarejestrowana w całym teście TPA, zmniejsza się wraz ze wzrostem osmotyczności próbek jabłka. Przedstawione w tabeli 3 współczynniki korelacji regresji liniowej R, wyznaczone dla wszystkich pomiarów (24 powtórzenia w każdej serii), oraz poziomy istotności p dla tych regresji linowych, dowodzą, że zmiany zarówno liczby zdarzeń EA – N_{TPA} oraz średniej amplitudy EA A_{TPA} w funkcji osmotyczności mają charakter liniowy. Odwadnianie tkanki parenchymy (spadek turgoru) powoduje między innymi (Niklas 1992):

- zmniejszanie się naprężenia plazmolemmy (spadek turgoru) i tym samym ścian komórkowych,
- zmniejszanie się sił adhezji komórek w wyniku spadku ciśnienia wewnątrzkomórkowego.

W wyniku pierwszego efektu zmienia się stan początkowy procesu odkształcania. Wymagane odkształcenie ściany komórkowej do osiągnięcia jej granicy wytrzymałości będzie wyższe dla tkanek o mniejszym turgorze. Tym samym na jednostkę

odkształcenia próbki zostanie rozerwanych mniej ścian komórkowych, tzn. mniej będzie źródeł sygnału akustycznego. Drugi efekt może powodować zmianę preferencyjnego sposobu pękania z pękania w postaci rozrywania ścian komórkowych na pękanie międzykomórkowe. W pracach Zdunka i Konstankiewicz (2004) oraz Zdunka i Bednarczyk (2006) postawiono hipotezę, że pękanie międzykomórkowe może również powodować emisję akustyczną. Jednak pektyny łączące komórki ze sobą są materiałem plastycznym (Niklas 1992, Pitt i Chen 1983), dlatego nie należy się spodziewać znacznego sygnału akustycznego z tego źródła. Zmiana preferencyjnego sposobu pękania z rozrywania ścian komórkowych, które będąc materiałem sprężystym (Niklas 1992, Pitt i Chen 1983) mogą być źródłem silnego sygnału akustycznego, na pękanie nie generujące fal sprężystych może powodować, że podczas odkształcenia rejestrowana jest niższa liczba zdarzeń N_{TPA}. W tabeli 3 zaprezentowano również średnie amplitudy sygnału akustycznego A_{TPA} dla poszczególnych wartości osmotyczności. Amplituda sygnału akustycznego zależy między innymi od następujących czynników: stanu naprężenia w źródle w momencie pęknięcia oraz sprężystości materiału i tym samym współczynnika tłumienia, jak również odległości sensora od źródła, w którym propaguje fala (Malecki i Opilski 1994). Jeżeli przyjąć, że źródłem sygnału akustycznego są rozrywane ściany komórkowe, wówczas ich granica wytrzymałości, będąca stałą materiałową, nie powinna zależeć od wstępnego naprężenia. Dlatego spadek amplitudy sygnału akustycznego dla próbek odwodnionych może być spowodowany spadkiem sprężystości tkanki i wzrostem tłumienia fali sprężystej.

W tabeli 3 przedstawiono również średnie wartości podstawowych parametrów mechanicznych testu TPA. Spośród tych parametrów tekstury tylko spójność C_O, będąca stosunkiem pola powierzchni pod krzywą w cyklu drugim do pola powierzchni pod krzywą w cyklu pierwszym (A2/A1, rys. 5b), rośnie istotnie wraz ze wzrostem osmotyczności próbek dla wszystkich odmian ($p = 0{,}00$). Pozostałe mechaniczne parametry tekstury zmieniają się różnie w zależności od odmiany, co utrudnia interpretację wyników. Na przykład elastyczność S_P dla odmiany Elstar nie koreluje z osmotycznością ($R = -0{,}03$, $p = 0{,}7$), podczas gdy dla odmiany Gloster istotnie koreluje ujemnie z osmotycznością ($R = -0{,}25$, $p = 0{,}00$), a dla odmiany Jonagold koreluje dodatnio ($R = 0{,}38$, $p = 0{,}00$). Maksymalne siły w poszczególnych cyklach testu TPA (*H1* i *H2*) wykazują brak istotnej korelacji z osmotycznością dla odmian Elstar i Jonagold ($p > 0{,}05$), natomiast dla odmiany Gloster występuje istotna ujemna korelacja ($p < 0{,}05$). Istotność statystyczna obserwowanych korelacji może być wynikiem dość wysokiej liczby powtórzeń w seriach pomiarowych, które powodują, iż nawet niewielkie współczynniki korelacji stają się istotne. Potwierdza to jakościowa analiza trendu dla średnich wartości parametrów mechanicznych w tabeli 3, które, nawet w sytuacji, gdy współczynnik korelacji jest istotny, nie mają wyraźnych tendencji wzrostowych lub spadkowych.

Tabela 3. Deskryptory sygnału emisji akustycznej (N_{TPA} – liczba zdarzeń, A_{TPA} – średnia amplituda) oraz parametry profilowej analizy tekstury – TPA (*H1* – twardość1, *H2* – twardość2, C_O – spójność, S_P – elastyczność) dla próbek jabłek o różnej osmotyczności O_S. C – seria kontrolna. Współczynniki korelacji *R* dla zależności danego parametru od osmotyczności wyznaczone zostały dla 24 próbek w serii, *p* – poziom istotności korelacji

Table 3. Acoustic emission descriptors (N_{TPA} – AE events, A_{TPA} – mean of AE amplitude) and parameters of texture profile analysis test – TPA (*H1* – hardness1, *H2* – hardness2, C_O – cohesiveness, S_P – springiness) for apple's samples with different osmolality O_S. C – control samples. Correlation coefficients *R* for relationship between a certain parameter and osmolality were obtained for 24 samples in series, *p* – significance level of correlation

Elstar						
O_S (Osmol·kg^{-1})	$N_{TPA}\cdot10^3$	A_{TPA} (j.um.– arb.units)	*H1* (N)	*H2* (N)	C_O	S_P
0,59	39,1 ±1,41	49,1 ±3,42	38,1 ±2,52	22,0 ±1,27	0,037 ±0,002	0,660 ±0,075
0,69	34,1 ±1,26	44,0 ±2,18	34,1 ±2,33	17,6 ±1,54	0,036 ±0,003	0,762 ±0,070
C- 0,78	28,1 ±1,02	43,3 ±1,92	44,5 ±2,49	23,2 ±1,80	0,055 ±0,004	0,761 ±0,023
0,79	25,9 ±1,05	36,1 ±1,62	38,7 ±2,52	21,4 ±1,73	0,059 ±0,004	0,808 ±0,021
0,92	12,1 ±2,12	23,5 ±1,48	33,8 ±2,83	19,2 ±2,07	0,086 ±0,012	0,639 ±0,047
R	–0,92	–0,80	–0,07	–0,07	0,73	–0,03
p	0,00	0,00	0,42	0,44	0,00	0,75
Gloster						
0,57	40,4 ±1,52	62,9 ±2,86	57,3 ±3,72	38,8 ±2,73	0,075 ±0,007	0,726 ±0,088
0,62	31,1 ±3,17	52,3 ±3,94	61,5 ±2,84	46,1 ±2,61	0,118 ±0,017	0,712 ±0,071
C-0,64	29,4 ±1,82	52,7 ±2,80	61,9 ±3,61	45,5 ±2,62	0,111 ±0,008	0,729 ±0,043
0,76	17,3 ±3,12	37,4 ±3,66	67,3 ±4,38	50,2 ±4,05	0,182 ±0,019	0,741 ±0,030
0,87	2,8 ±1,12	17,4 ±1,68	43,2 ±5,85	32,5 ±5,05	0,256 ±0,02	0,604 ±0,025
R	–0,91	–0,90	–0,34	–0,22	0,84	–0,25
p	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00

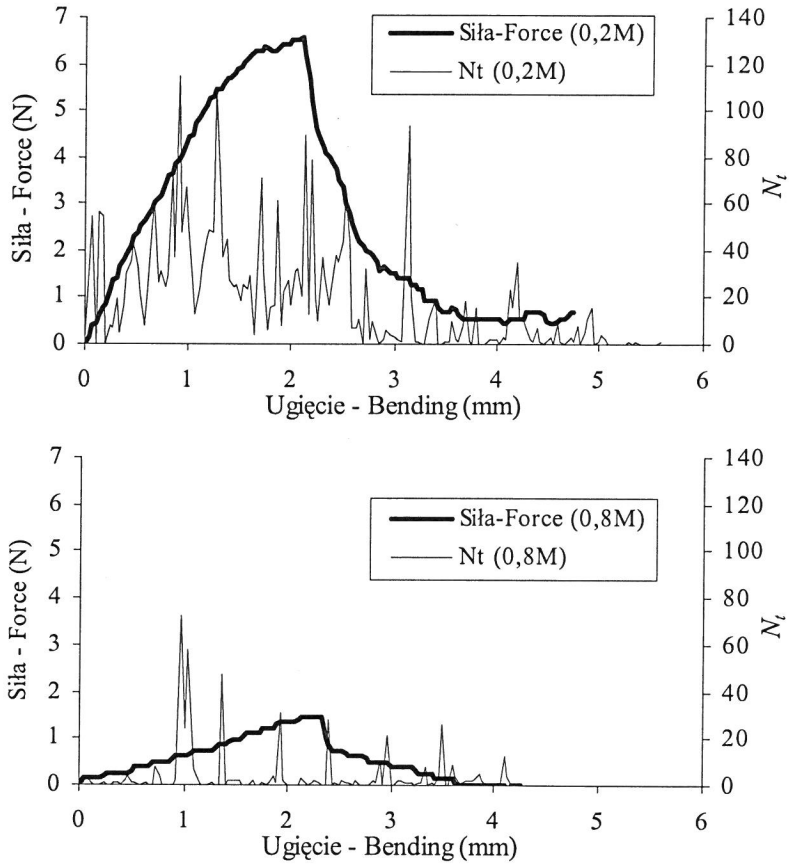
Jonagold						
0,67	41,2 ±0,87	51,7 ±3,53	37,4 ±2,32	23,9 ±2,03	0,050 ±0,004	0,500 ±0,065
0,70	38,1 ±1,98	50,6 ±4,24	35,5 ±2,27	23,2 ±2,17	0,048 ±0,004	0,554 ±0,058
C-0,77	33,5 ±1,84	40,4 ±3,20	37,5 ±2,54	23,2 ±2,24	0,045 ±0,005	0,551 ±0,060
0,78	25,2 ±2,79	40,1 ±5,21	41,7 ±3,59	26,1 ±3,65	0,067 ±0,008	0,763 ±0,057
0,82	12,8 ±2,71	24,9 ±2,39	33,9 ±2,76	19,1 ±2,41	0,069 ±0,009	0,654 ±0,032
R	–0,79	–0,67	-0,02	–0,14	0,34	0,38
p	0,00	0,00	0,82	0,12	0,00	0,00

W teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym (SENB) próbkę odkształcano do momentu całkowitego jej złamania. Na rysunku 14 przedstawiono przykładowy pomiar siły w funkcji ugięcia wraz z pomiarem tempa zdarzeń EA – N_t dla dwóch skrajnych wartości stężenia mannitolu (0,2 M i 0,8 M), w których umieszczane były próbki na czas 24 h. Analiza tych zależności pokazuje, że tkanka bardziej uwodniona (umieszczona w niskich stężeniach mannitolu) osiąga wyższe wartości siły maksymalnej i ugięcia w momencie złamania. W związku z tym nachylenie krzywej siła-ugięcie maleje wraz z odwodnieniem tkanki. Jest to zjawisko podobne jak w przypadku testu TPA. Z punktu widzenia mikrostruktury, uwodnienie powoduje wzrost wstępnego naprężenia ścian komórkowych oraz zwiększenie sił adhezji między komórkami. Dlatego warunki rozwoju procesu pękania w teście łamania również się zmienią pod wpływem uwodnienia. Nacięcie przez ściany komórkowe wykonane ostrym nożem powoduje wymuszenie miejsca, w którym rozpoczyna się pękanie. Uginanie materiału prowadzi do rozwoju tej szczeliny poprzez kolejne ściany komórkowe lub między komórkami. Większe uwodnienie komórek z jednej strony powoduje, że dodatkowa energia potrzebna na rozerwanie ściany komórkowej będzie niższa, a z drugiej strony, że dodatkowa energia potrzebna na rozwój pękania międzykomórkowego będzie wyższa, ponieważ komórki przylegają silniej o siebie. W konsekwencji wraz ze wzrostem uwodnienia tkanki jabłka obserwuje się:

- wyższe wartości N_t na jednostkę ugięcia, co może być spowodowane zwiększeniem się prawdopodobieństwa przekroczenia granicy wytrzymałości ścian komórkowych na rozciąganie i zmianie sposobu rozwoju szczeliny z pękania międzykomórkowego, które nie generowało sygnału emisji aku-

stycznej, na pękanie poprzez ściany komórkowe będące źródłem silnego sygnału akustycznego,

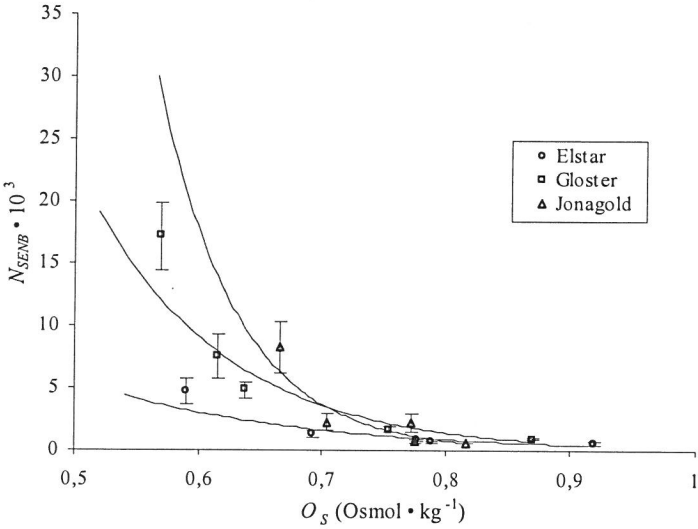
- wzrost nachylenia krzywej siła-ugięcie będący prawdopodobnie wynikiem wzrostu sił przylegania komórek do siebie.



Rys. 14. Przykładowe zależności siła-ugięcie oraz tempo zdarzeń emisji akustycznej N_t – ugięcie w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB dla próbek jabłek odmiany Elstar po umieszczeniu próbki w 0,2 M i 0,8 M roztworze mannitolu przez 24 h
Fig. 14. Exemplary relationships force-bending and AE events rate N_t – bending in single edge notched bend test – SENB for apple samples of Elstar cultivar after soaking in 0.2 M and 0.8 M mannitol solutions for 24 h

W tabeli 4 przedstawiono średnie wartości deskryptorów emisji akustycznej N_{SENB} i A_{SENB} zarejestrowane w testach SENB wraz z dwoma wielkościami mechanicznymi W_f oraz K_2 dla próbek jabłek zróżnicowanych pod względem osmotyczności. Wartości

deskryptorów wyznaczano dla zakresu ugięcia do chwili, gdy siła spadła do zera lub przyjęła stałą wartość bliską zeru (dla niektórych próbek rozpołowiona próbka pozostawała w kontakcie z próbnikiem, stąd niezerowa końcowa wartość siły na rysunku 14. W tabeli tej podano również przedziały ufności przy $\alpha = 0{,}05$. Dopasowanie różnych funkcji dla danych uzyskanych w teście SENB pokazało, że występuje wykładniczy spadek zarówno deskryptorów EA jak i parametrów mechanicznych wraz ze wzrostem osmotyczności soków wewnątrzkomórkowych (podobnie jak na rysunku 15). Kryterium przyjęcia funkcji wykładniczej było uzyskanie dla niej najwyższych wartości współczynników korelacji R dopasowania do danych eksperymentalnych (przy 24 powtórzeniach w każdej serii pomiarowej). Współczynniki R prezentowane są w tabeli 4 wraz z poziomami istotności korelacji p.



Rys. 15. Wpływ osmotyczności próbek jabłek na liczbę zdarzeń emisji akustycznej N_{SENB} w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB. Punkty są wartościami średnimi, przedziały ufności wyznaczono dla $\alpha = 0{,}05$

Fig. 15. An influence of apple's samples osmolality on AE events N_{SENB} in single edge notched bend test – SENB. Points are mean values, confidence intervals are for $\alpha = 0.05$

Dla wszystkich analizowanych zmiennych uzyskano ujemne współczynniki korelacji R przy $p = 0{,}00$ (tab. 4). Świadczy to o istotnym zmniejszaniu się zarówno deskryptorów EA, jak i parametrów mechanicznych w funkcji osmotyczności soków wewnątrzkomórkowych. Szczególnie wysokie współczynniki korelacji uzyskano dla odporności na kruche pękanie K_2 wyznaczone ze wzoru (2), która przy określonej geometrii próbki i odległości od podpór jest liniową funkcją siły maksymalnej w tym teście. Również deskryptory emisji akustycznej wykazują wysokie, istotne korelacje (porównywalne z K_2) z osmotycznością próbki. Dla przykładu, na

Tabela 4. Deskryptory sygnału emisji akustycznej (N_{SENB} – liczba zdarzeń, A_{SENB} – średnia amplituda) oraz parametry trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB (K_2 – odporność na kruche pękanie, W_f – praca) dla próbek jabłek o różnej osmotyczności O_S. C – seria kontrolna. Współczynniki korelacji R dla zależności danego parametru od osmotyczności wyznaczone zostały dla 24 próbek w serii, p – poziom istotności korelacji

Table 4. Acoustic emission descriptors (N_{SENB} – AE events, A_{SENB} – mean of AE amplitude) and parameters of single edge notched bend – SENB (K_2 – fracture toughness, W_f – work) for apple's samples with different osmolality O_S. C – control samples. Correlation coefficients R for relationship between a certain parameter and osmolality were obtained for 24 samples in series, p – significance level of correlation

O_S (Osmol ·kg^{-1})	$N_{SENB}\cdot10^3$	A_{SENB} (j.um. – arb.units)	W_f(mJ)	K_2(kPa·m^{0,5})
		Elstar		
0,59	4,70 ±1,01	47,3 ±4,74	2,75 ±0,55	32,9 ±2,48
0,69	1,30 ±0,27	29,7 ±2,67	2,17 ±0,52	28,9 ±2,33
C- 0,78	0,81±0,08	22,8 ±1,99	2,26 ±0,28	25,9 ±1,35
0,79	0,69 ±0,06	20,3 ±1,29	1,85 ±0,24	22,4 ±1,61
0,92	0,59±0,14	14,2 ±0,86	0,73 ±0,23	9,94 ±1,03
R	–0,80	–0,89	–0,57	–0,82
p	0,00	0,00	0,00	0,00
		Gloster		
0,57	17,2 ±2,75	100 ±12,5	7,99 ±1,52	51,9 ±3,20
0,62	7,51 ±1,72	70,6 ±10,85	5,77 ±0,68	42,1 ±2,65
C- 0,64	4,79 ±0,61	54,5 ±6,59	5,02 ±0,42	42,3 ±2,28
0,76	1,68 ±0,28	28,8 ±3,37	3,97 ±0,49	29,6 ±2,63
0,87	0,92 ±0,09	17,6 ±0,98	1,55 ±0,43	13,9 ±1,04
R	–0,90	–0,89	–0,82	–0,91
p	0,00	0,00	0,00	0,00
		Jonagold		
0,67	8,18 ±2,06	54,5 ±7,66	3,71 ±0,60	34,0 ±3,22
0,70	2,26 ±0,69	34,4 ±4,59	1,93 ±0,34	28,0 ±2,83
C- 0,77	2,18 ±0,73	40,0 ±9,20	2,20 ±0,32	29,0 ±1,78
0,78	0,72 ±0,12	20,7 ±2,05	2,15 ±0,36	23,6 ±3,14
0,82	0,58 ±0,05	15,6 ±0,78	0,97 ±0,21	12,4 ±1,26
R	–0,50	–0,48	–0,37	–0,44
p	0,00	0,00	0,00	0,00

rysunku 15 pokazano zmiany liczby zdarzeń N_{SENB} w funkcji osmotyczności. Analizując dane w tabeli 4 widoczne jest, że szczególnie wrażliwymi odmianami na zmianę osmotyczności są Elstar i Gloster. Dla odmiany Jonagold zmiany analizowanych parametrów są mniejsze. Należy zwrócić również uwagę na znacznie wyższe średnie wartości analizowanych parametrów dla próbek odmiany Gloster w zakresie osmotyczności niższych (próbki uwodnione) od serii kontrolnej w porównaniu do dwóch pozostałych odmian. Wartości te zbliżają się dla wszystkich odmian w zakresie osmotyczności wyższych od serii kontrolnej (próbki odwodnione).

4.2.2. Wpływ temperatury na propagację pęknięć

W tabeli 5 przedstawiono zmiany wartości deskryptorów emisji akustycznej i parametrów mechanicznych tkanki jabłka pod wpływem temperatury w teście przebicia. W teście przebicia używano całych jabłek, dlatego ze względów proceduralnych przeprowadzono tylko testy w zakresie temperatur 2-20°C, które uzyskiwano poprzez umieszczenie owoców na 24 h w chłodni o zadanej temperaturze. Natomiast dla pozostałych testów, gdzie używa się wyciętych próbek zastosowano dodatkowo temperatury 30-60°C, które uzyskano poprzez zanurzenie próbek w roztworach o określonej temperaturze przez okres 10 min. Dokładną procedurę kontroli temperatury opisano w rozdziale 3.3.2. Wyniki dla testu TPA i SENB przedstawiono odpowiednio w tabelach 6 i 7. Analizując wyniki przedstawione w tabelach 5, 6 i 7 można stwierdzić, że mimo innego sposobu ustalania temperatury w obu zakresach, w poszczególnych przedziałach (2-20°C oraz 30-60°C) obserwuje się tendencję do spadku wartości parametrów emisji akustycznej i parametrów mechanicznych wraz ze wzrostem temperatury. Zaprezentowano to na przykładzie liczby zdarzeń emisji akustycznej na rysunkach 16 i 17.

W zakresie temperatur 2-20°C we wszystkich testach obserwuje się podobne zmiany analizowanych parametrów. Tak jak to pokazano na rysunkach 16 i 17 wzrost temperatury w tym zakresie powoduje istotny spadek rejestrowanej liczby zdarzeń N_P, N_{TPA} oraz N_{SENB}. Wyniki w tabelach 5, 6 i 7 pokazują, że podobnie zachowuje się średnia amplituda emisji akustycznej A_P, A_{TPA} oraz A_{SENB}.

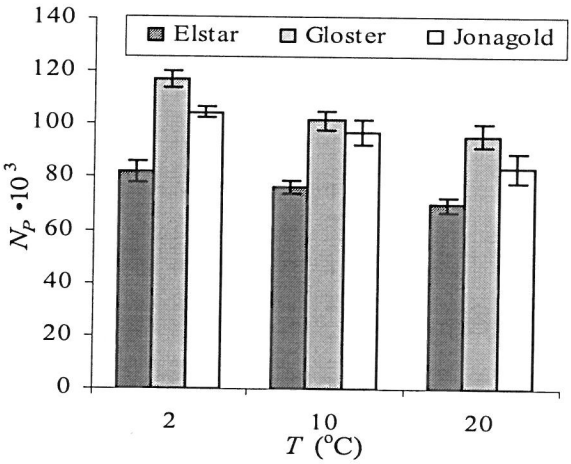
W zakresie temperatur 30-60°C, podobnie jak w zakresie 2-20°C, obserwuje się dalszy spadek wartości liczby zdarzeń i amplitudy sygnału EA (rys. 17 i tab. 6, 7). Jednak pomiędzy 20°C a 30°C widoczny jest wyraźne skokowy wzrost mierzonych wartości. Jest to spowodowane różną metodyką ustalania temperatury w tych zakresach. W zakresie 30-60°C temperaturę ustalano poprzez umieszczenie próbek w wodnym roztworze soli nieaktywnych osmotycznie na 10 min. Dlatego, ze względu na różnice stężeń substancji osmotycznie czynnych w roztworze zewnętrznym i soków wewnątrzkomórkowych może nastąpić pobranie wody przez komórki i wzrost turgo-

ru (zmniejszenie osmotyczności soków wewnątrzkomórkowych). Zmniejszenie się osmotyczności powoduje (tab. 3 i 4) wzrost wartości deskryptorów emisji akustycznej i większości parametrów mechanicznych.

Table 5. Zmiany deskryptorów emisji akustycznej (N_P – liczba zdarzeń, A_P – średnia amplituda) i parametr mechaniczny (F_P – jędrność) w teście przebicia dla różnych temperatur T próbek. Przedziały ufności przy $\alpha = 0{,}05$

Table 5. Changes of acoustic emission descriptors (N_P – AE events, A_P – mean amplitude) and mechanical parameter (F_P – firmness) from puncture test for different samples temperature T. Confidence intervals at $\alpha = 0.05$

T (°C)	Elstar			Gloster			Jonagold		
	$N_P \cdot 10^3$	A_P (j.um. arb.units)	F_P (N)	$N_P \cdot 10^3$	A_P (j.um. arb.units)	F_P (N)	$N_P \cdot 10^3$	A_P (j.um. arb.units)	F_P (N)
2	82,1 ±3,97	243 ±12,4	44,3 ±1,37	117 ±3,1	324 ±17,3	78,6 ±1,8	105 ±2,0	299 ±18,2	49,8 ±2,8
10	76,5 ±2,37	219 ±6,20	46,4 ±2,48	102 ±3,8	298 ±19,7	80,8 ±2,9	96,9 ±4,5	250 ±29,9	43,3 ±1,4
20	69,6 ±2,95	208 ±9,55	40,3 ±1,41	95,7 ±4,4	291 ±29,0	72,4 ±3,9	83,5 ±5,3	228 ±17,4	37,3 ±1,2



Rys. 16. Liczba zdarzeń N_P w teście przebicia w funkcji temperatury T jabłek. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$

Fig. 16. AE events N_P from puncture test in a function of apples temperature T. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

Tabela 6. Zmiany deskryptorów emisji akustycznej (N_{TPA} – liczba zdarzeń, A_{TPA} – średnia amplituda) oraz parametrów profilowej analizy tekstury – TPA ($H1$ – twardość1, $H2$ – twardość2, C_O – spójność i S_P – elastyczność) dla różnych temperatur T próbek. Przedziały ufności dla $\alpha = 0,05$
Table 6. Changes of AE descriptors (N_{TPA} – AE events, A_{TPA} – mean of AE amplitude) and parameters of texture profile analysis test – TPA ($H1$ – hardness1, $H2$ – hardness2, C_O – cohesiveness and S_P – springiness) for different samples temperature T. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

T (°C)	Elstar						Gloster						Jonagold					
	N_{TPA} $\cdot 10^3$	A_{TPA} (j.um.)	$H1$ (N)	$H2$ (N)	C_O	S_P	N_{TPA} $\cdot 10^3$	A_{TPA} (j.um.)	$H1$ (N)	$H2$ (N)	C_O	S_P	N_{TPA} $\cdot 10^3$	A_{TPA} (j.um.)	$H1$ (N)	$H2$ (N)	C_O	S_P
2	32,0 ±1,47	44,5 ±2,57	38,5 ±1,66	21,1 ±1,32	0,048 ±0,004	0,794 ±0,045	35,2 ±1,83	41,7 ±3,74	34,6 ±1,97	20,6 ±1,53	0,039 ±0,003	0,526 ±0,052	35,2 ±1,83	41,7 ±3,74	34,6 ±1,97	20,6 ±1,53	0,039 ±0,003	0,526 ±0,052
10	30,2 ±1,55	40,7 ±2,34	35,6 ±1,99	18,2 ±1,40	0,047 ±0,005	0,734 ±0,042	38,5 ±2,51	51,9 ±5,56	36,1 ±0,81	23,9 ±1,19	0,047 ±0,003	0,525 ±0,048	38,5 ±2,51	51,9 ±5,56	36,1 ±0,81	23,9 ±1,19	0,047 ±0,003	0,525 ±0,048
20	25,4 ±1,20	37,4 ±2,51	37,5 ±2,64	17,1 ±1,89	0,049 ±0,004	0,816 ±0,033	34,2 ±1,45	40,3 ±2,15	30,2 ±1,15	18,1 ±1,29	0,042 ±0,005	0,573 ±0,065	34,2 ±1,45	40,3 ±2,15	30,2 ±1,15	18,1 ±1,29	0,042 ±0,005	0,573 ±0,065
30	34,5 ±1,50	43,2 ±2,73	30,9 ±1,44	19,5 ±1,89	0,053 ±0,008	0,607 ±0,075	32,9 ±2,84	38,9 ±4,62	28,8 ±1,61	18,1 ±1,64	0,053 ±0,006	0,494 ±0,060	32,9 ±2,84	38,9 ±4,62	28,8 ±1,61	18,1 ±1,64	0,053 ±0,006	0,494 ±0,060
42	23,0 ±1,89	31,1 ±2,01	29,0 ±1,04	13,9 ±0,92	0,037 ±0,004	0,628 ±0,048	32,1 ±2,60	40,9 ±4,36	28,6 ±1,90	18,0 ±1,46	0,048 ±0,006	0,457 ±0,043	32,1 ±2,60	40,9 ±4,36	28,6 ±1,90	18,0 ±1,46	0,048 ±0,006	0,457 ±0,043
60	11,9 ±3,02	24,9 ±2,44	23,3 ±2,75	9,71 ±1,40	0,031 ±0,003	0,531 ±0,028	6,53 ±3,00	19,4 ±2,93	13,9 ±2,99	6,62 ±1,17	0,045 ±0,009	0,489 ±0,040	6,53 ±3,00	19,4 ±2,93	13,9 ±2,99	6,62 ±1,17	0,045 ±0,009	0,489 ±0,040

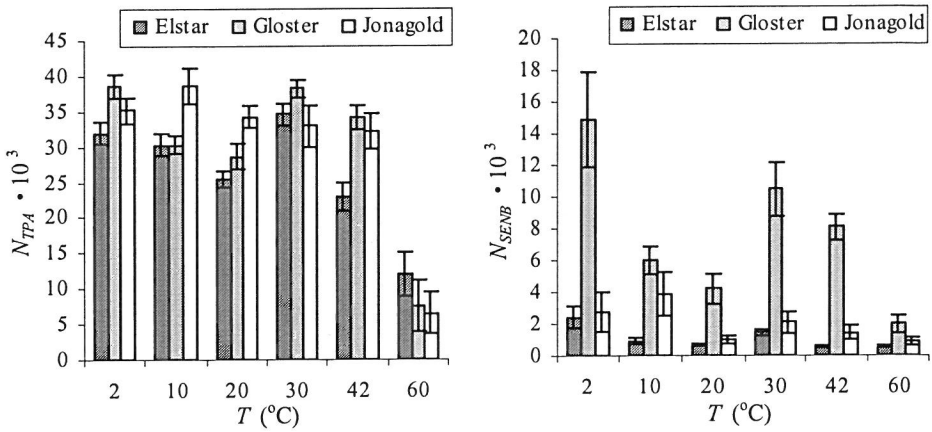
j. um. – arb. units.

Tabela 7. Zmiany deskryptorów sygnału emisji akustycznej (N_{SENB} – liczba zdarzeń, A_{SENB} – średnia amplituda) oraz parametrów trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB (W_f – praca, K_2 – odporność na kruche pękanie) dla różnych temperatur T próbek. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$

Table 7. Changes of AE descriptors (N_{SENB} – AE events, A_{SENB} – mean of AE amplitude) and parameters of single edge notched bend – SENB (W_f – work, K_2 – fracture toughness) for different samples temperature T. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

T	Elstar				Gloster				Jonagold			
(°C)	N_{SENB} $\cdot 10^3$	A_{SENB} (j.um.)	W_f (mJ)	K_2 (kPa·m^{0,5})	N_{SENB} $\cdot 10^3$	A_{SENB} (j.um.)	W_f (mJ)	K_2 (kPa·m^{0,5})	N_{SENB} $\cdot 10^3$	A_{SENB} (j.um.)	W_f (mJ)	K_2 (kPa·m^{0,5})
2	2,42 ±0,69	44,3 ±7,65	2,16 ±0,28	24,8 ±1,44	14,9 ±3,01	101 ±18,2	5,36 ±0,43	47,6 ±2,17	2,80 ±1,26	37,6 ±7,09	2,26 ±0,28	28,3 ±1,67
10	0,93 ±0,14	25,4 ±3,10	1,76 ±0,28	23,1 ±1,67	5,99 ±0,89	62,7 ±8,23	4,71 ±0,27	43,0 ±1,31	3,86 ±1,36	45,4 ±8,42	2,54 ±0,38	29,3 ±1,85
20	0,67 ±0,07	23,4 ±3,16	1,20 ±0,16	19,3 ±1,05	4,21 ±0,95	52,7 ±8,75	3,84 ±0,32	38,5 ±1,81	1,02 ±0,25	31,8 ±5,34	1,15 ±0,15	20,3 ±1,26
30	1,47 ±0,20	33,6 ±3,17	1,33 ±0,22	21,4 ±1,49	10,5 ±1,67	85,4 ±11,4	5,15 ±1,00	39,2 ±3,55	2,07 ±0,74	33,6 ±4,48	1,60 ±0,35	23,1 ±2,41
42	0,61 ±0,07	21,1 ±1,10	0,85 ±0,23	17,3 ±2,01	8,10 ±0,82	86,6 ±11,6	4,29 ±0,30	39,1 ±1,66	1,41 ±0,41	33,6 ±5,55	1,10 ±0,17	20,8 ±1,29
60	0,55 ±0,10	16,1 ±1,03	0,36 ±0,13	11,5 ±1,53	1,95 ±0,58	35,9 ±10,2	1,94 ±0,41	22,3 ±2,75	0,87 ±0,20	25,4 ±3,91	0,89 ±0,21	16,7 ±1,56

j.um. – arb.units.



Rys. 17. Liczba zdarzeń N_{TPA} i N_{SENB} w testach profilowej analizy tekstury – TPA (lewy) i trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB (prawy) w funkcji temperatury T próbek. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$

Fig. 17. AE events N_{TPA} and N_{SENB} from texture profile analysis test – TPA (left) and single edge notched bend test – SENB (right) test in a function of samples temperature T. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

Parametry mechaniczne również wykazują tendencję spadkową wraz ze wzrostem temperatury, jednak zmiany te są mniej wyraźne. Spośród nich najbardziej znaczące zmiany zanotowano dla parametrów mechanicznych uzyskanych w teście SENB (tab. 7). W pozostałych testach (przebicia i TPA), różnice pomiędzy wynikami dla kolejnych temperatur bardzo często nie wykazują istotnych zmian spadkowych lub wzrostowych (tab. 5 i 6).

Temperatura jest katalizatorem reakcji chemicznych, w tym enzymatycznej degradacji pektyn w tkance jabłka. Temperatura 2°C, w której przechowywano jabłka, spowalnia te reakcje. Wyższe temperatury otoczenia, takie jak w eksperymencie: 10 i 20°C, powodują przyśpieszenie reakcji enzymatycznych i nawet po jednym dniu przechowywania w tych warunkach może zajść pewna degradacja pektyn. Degradacja pektyn powoduje między innymi utratę spójności międzykomórkowej. Objawia się to mięknięciem tkanki. Temperatura powyżej 30°C i umieszczenie próbek w roztworze wodnym dają efekt stopniowej maceracji tkanki, czyli termicznej degradacji łańcuchów polimerowych pektyn (Bateman 1968, Waldron i in. 1997). W związku z tym można stwierdzić, że niezależnie od sposobu, wzrost temperatury powoduje osłabienie wiązań międzykomórkowych i prowadzi do stopniowej zmiany sposobu rozwoju szczeliny z pękania poprzez ściany komórkowe na pękanie międzykomórkowe.

W poprzednim rozdziale stwierdzono, że źródłem sygnału akustycznego w odkształcanej tkance jabłka mogą być rozrywane ściany komórkowe. W związku z tym, zmiana sposobu pękania pod wpływem temperatury na pękanie międzykomórkowe, nie generujące sygnału akustycznego, będzie powodowało spadek rejestrowanej liczby zdarzeń N (rys. 16 i 17 oraz tab. 5, 6 i 7). Spadek amplitudy sygnału akustycznego wraz ze wzrostem temperatury (tab. 5, 6 i 7) można natomiast tłumaczyć spadkiem sprężystości materiału pod wpływem temperatury i tym samym większym tłumieniem propagującej do sensora fali sprężystej.

4.3. Zastosowanie emisji akustycznej do monitorowania zmian właściwości jabłek podczas przechowywania

4.3.1. Wpływ czasu przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego na właściwości mechaniczne i sygnał emisji akustycznej

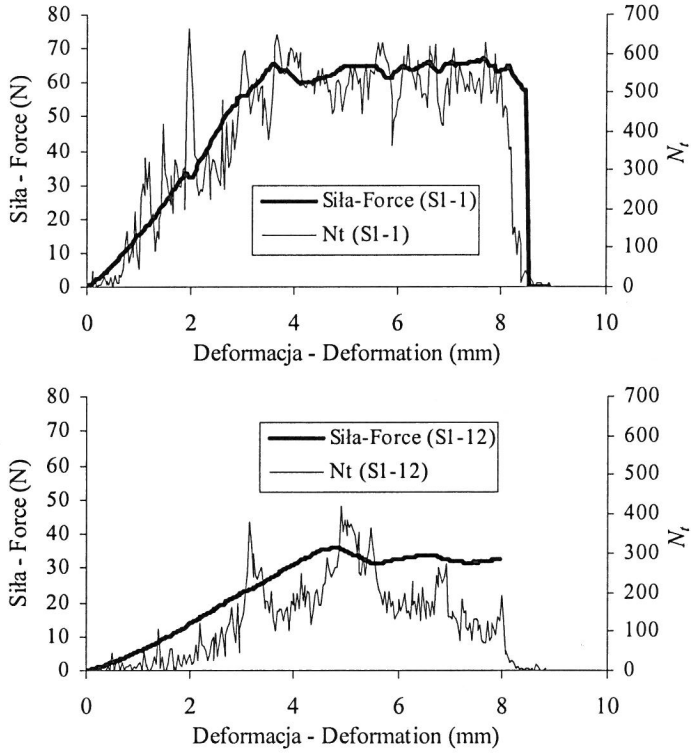
Na rysunku 18 przedstawiono przykładowy wynik testu przebicia po 1 dniu (seria S1-1) oraz po 12 dniach (seria S1-12) przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego dla odmiany Elstar.

Wbijanie próbnika o kulistym zakończeniu powoduje początkowo jednostajny wzrost siły spowodowany wzrostem powierzchni kontaktu z materiałem oraz reakcją na wbijanie kolejnych warstw komórek tkanki. Przy głębokości około 3-5 mm (w zależności od stanu badanego materiału) siła osiąga w przybliżeniu pewną stałą wartość (rys. 18). Osiągany jest stan równowagi, w którym dodatkowa praca wykonywana podczas wbijania próbnika jest zużywana między innymi na rozwój procesów niszczenia struktury komórkowej, które wywołuje emisję akustyczną.

Kształt zależności siła-deformacja w teście przebicia zmienia się w zależności od czasu przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego zmienia się. Wraz z czasem przechowywania zmniejsza się nachylenie początkowego prostoliniowego odcinka krzywej oraz wartość maksymalnej siły osiąganej w teście, zdefiniowanej jako jędrność. Dodatkowo można zauważyć, że zależność siła-deformacja świeżego jabłka (seria S1-1) w dalszej części jej przebiegu ma mniej ustabilizowany charakter. Widoczne są liczne gwałtowne skoki rejestrowanej siły, podczas gdy dla jabłka po 12 dniowym okresie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego (seria S1-12) zmiany siły są bardziej płynne.

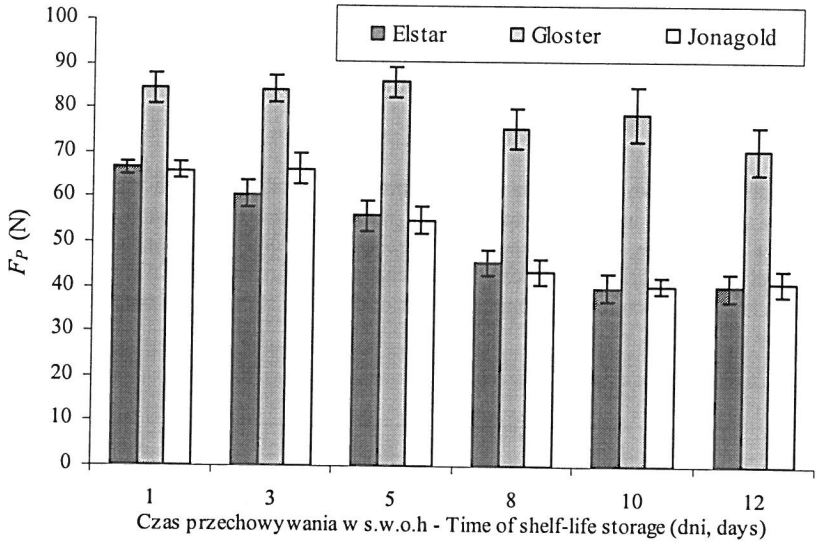
Analizując sygnał akustyczny rejestrowany w teście przebicia jabłka zaobserwowano, że sygnał jest generowany podczas całego procesu wbijania wgłębnika w strukturę. Początkowo, tempo zdarzeń N_t w jednostce czasu jest niewielkie i wzrasta wraz z zagłębianiem próbnika. Przy deformacji, przy której siła osiąga w przybliżeniu ustabilizowaną wartość (wykazując tylko niewielkie chwilowe zmiany), tempo zdarzeń N_t oscyluje w przybliżeniu na stałym poziomie dla jędrnych jabłek (seria S1-1)

lub oscylacyjnie maleje dla jabłek o niższej jędrności (seria S1-12). Szczegółowa analiza zarejestrowanych przebiegów w eksperymencie pokazuje, że wysokie tempo zdarzeń N_t jest rejestrowane przy gwałtownych spadkach siły. Spadki siły podczas wbijania są wynikiem niszczenia kolejnych obszarów struktury komórkowej, co generuje silny sygnał akustyczny. Prawdopodobnie im większy jest ten obszar (zawierający więcej komórek), tym rejestrowanych jest więcej zdarzeń akustycznych w danej chwili.



Rys. 18. Przykładowe zależności siła-deformacja oraz tempo zdarzeń N_t – deformacja w teście przebicia jabłek odmiany Elstar po 1 dniu (seria S1-1) oraz po 12 dniach (seria S1-12) przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego
Fig. 18. Exemplary relationships force-deformation and AE events rate N_t – deformation in puncture test of apples Elstar cultivar after 1 day (series S1-1) and after 12 days (series S1-12) of shelf-life

Na rysunku 19 przedstawiono średnie wartości jędrności F_P w teście przebicia dla trzech badanych odmian jabłek podczas 12-dniowego okresu przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Dla wszystkich odmian obserwuje się istotny spadek jędrności w tych warunkach przechowywania.



Rys. 19. Zmiany jędrności F_P w teście przebicia podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 19. Firmness F_P changes in puncture test of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

Wyniki przedstawione na rysunku 19 są jakościowo podobne do tych uzyskanych w pracy Rybczyńskiego i Dobrzańskiego jr.(2002). Do opisu zmian jędrności podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego autorzy ci zaproponowali model potęgowy z ujemnym wykładnikiem. Konopacka i Płocharski (2002) również obserwowali zmniejszenie się jędrności podczas tego typu przechowywania, który wyraźnie nie miał liniowego charakteru, jednak nie zaproponowali modelu tego zjawiska. Uwzględniając fakt, że jabłka, nawet długo przechowywane, zawsze będą wykazywały pewną wytrzymałość mechaniczną, jak również konsument zawsze będzie mógł usłyszeć pewien dźwięk podczas nagryzania oraz, że w momencie zbioru jabłka posiadają pewną skończoną jędrność, w niniejszej pracy przyjęto, funkcję wykładniczą $y = a \cdot \exp(-bx)$ do opisu tego zjawiska. W tabeli 8 zaprezentowano macierz współczynników korelacji R dla wykładniczej zależności jędrności F_P, liczby zdarzeń N_P i średniej amplitudy sygnału A_P w teście przebicia jabłek odmian Elstar, Gloster i Jonagold od czasu przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Przedstawione w tabeli 8 współczynniki korelacji R są istotne przy $p < 0.05$.

W omawianym eksperymencie, przechowywanie w symulowanych warunkach obrotu handlowego powoduje utratę jędrności, opisaną za pomocą funkcji wykładniczej, szczególnie dla odmian Elstar i Jonagold, dla których R wynosi

odpowiednio –0,8 i –0,82 (tab. 8). Odmiana Gloster okazała się mniej wrażliwa na tego typu przechowywanie, choć zmiany były istotne statystycznie ($R = -0,4$, $p < 0,05$). Dla tej odmiany jędrność była wyraźnie wyższa podczas całego okresu przechowywania w porównaniu do odmian Elstar i Jonagold.

Tabela 8. Współczynniki korelacji R dla wykładniczych zmian jędrności F_P, liczby zdarzeń N_P i średniej amplitudy sygnału A_P w teście przebicia jabłek w czasie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. R wyznaczono dla 24 próbek w każdej z 6 serii pomiarowych
Table 8. Correlation coefficients R for exponential changes of firmness F_P,, AE events N_P and mean of AE amplitude A_P in puncture test of apples in time of shelf-life storage. R is obtained for 24 samples in each 6 series

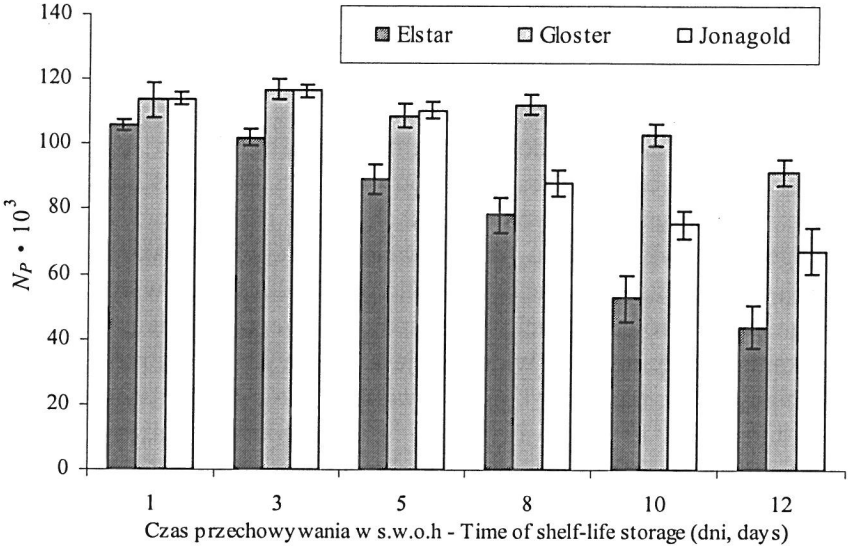
Parametr Parameter	R		
	Elstar	Gloster	Jonagold
	Czas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego Time of shelf-life storage		
N_P	–0,80	–0,54	–0,81
A_P	–0,90	–0,70	–0,88
F_P	–0,80	–0,40	–0,82

Podobnie do jędrności, oba analizowane deskryptory: liczba zdarzeń N_P i średnia amplituda A_P emisji akustycznej zmniejszają się z czasem przechowywania jabłek (rys. 20 i 21). Stwierdzono wyższe lub podobne współczynniki korelacji R dla zmian tych wielkości w czasie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego w porównaniu do analogicznych uzyskanych dla jędrności F_P (tab. 8). Najwyższe współczynniki korelacji deskryptorów emisji akustycznej z czasem przechowywania zanotowano dla odmian Elstar i Jonagold, podobnie jak w przypadku zależności jędrność-czas przechowywania dla tych odmian. Widoczne również jest, że dla odmiany Gloster współczynniki korelacji dla zależności poszczególnych deskryptorów EA z czasem przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego są znacznie wyższe niż współczynnik uzyskany dla jędrności tej odmiany (tab. 8). Należy również zauważyć, że deskryptory emisji akustycznej (rys. 20 i 21) dla odmiany Gloster nie są tak wyraźnie wyższe od tych uzyskanych dla pozostałych odmian, jak to było w przypadku jędrności (rys. 19), szczególnie w początkowym okresie przechowywania.

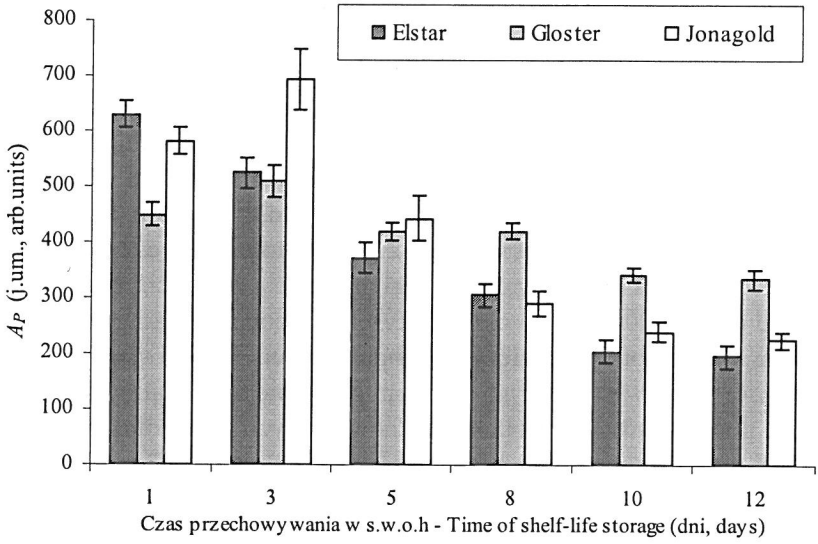
Spośród analizowanych zależności najwyższe wartości R uzyskano dla zmian średniej amplitudy sygnału A_P w czasie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Dlatego deskryptor ten może być szczególnie przydat-

ny w ocenie zmian tekstury związanych z procesami pękania oraz w ocenie właściwości sprężystych miąższu jabłek podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego.

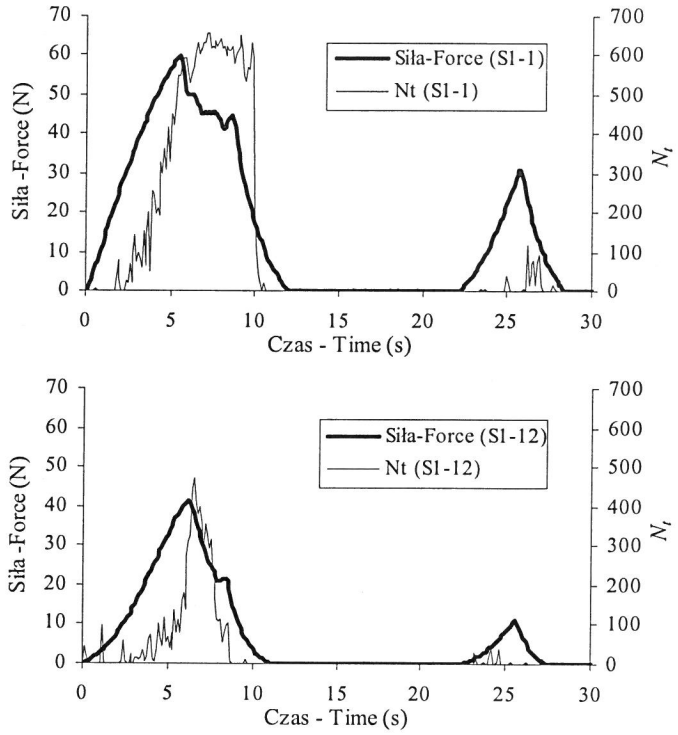
Testy profilowej analizy tekstury (TPA) cylindrycznych próbek pokazały, że przechowywanie jabłek znacząco wpływa na wyniki pomiarów. Na rysunku 22 pokazano przykładowe wyniki testu TPA po 1 dniu (S1-1) i po 12 dniach (S1-12) przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Uzyskane siły w poszczególnych cyklach testu (definiowane w teście TPA jako twardości *H1* i *H2*) maleją wraz z czasem przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Maleje również nachylenie prostoliniowego przebiegu w pierwszym cyklu ściskania. Na rysunku 22 widoczne jest, że siła po 5 s dla próbek świeżych jabłek odmiany Elstar (seria S1-1) osiąga wartość około 60 N, natomiast dla próbek po 12 dniach (S1-12) wynosi tylko 30 N. Szczegółowa analiza tych wartości dla odmian i dla poszczególnych okresów przechowywania zostanie przedstawiona w dalszej części pracy. Po osiągnięciu granicy wytrzymałości siła spada, co jest wynikiem makropękania i tym samym uwolnienia energii sprężystości. Proces makropękania rozwija się aż do osiągnięcia zadanego poziomu 20% odkształcenia próbki. W drugim cyklu (rys. 5b), osiągane wartości siły są znacznie niższe przy odkształceniu do tego samego poziomu, ponieważ ściskany jest materiał z powstałymi wcześniej pęknięciami. Następuje tylko dalszy ich rozwój. Praktycznie od momentu, gdy siła w pierwszym cyklu osiągnie wartość około 10 N, niezależnie od stanu próbki rozpoczyna się rejestracja sygnału emisji akustycznej, która, tak jak to stwierdzono wcześniej, jest wynikiem mikropękania struktury komórkowej tkanki. Początkowo tempo zdarzeń N_t rośnie gwałtownie osiągając maksimum po przekroczeniu granicy wytrzymałości. Najwyższe tempo zdarzeń rejestrowane jest po osiągnięciu granicy wytrzymałości do momentu osiągnięcia zadanego poziomu odkształcenia równego 20%. Wartości N_t rejestrowane w pierwszym cyklu dla jabłek odmiany Elstar maleją wraz z długością okresu przechowywania od około 600/0,1 s do około 300/0,1 s. Chociaż zasadnicza różnica polega na tym, że dla próbek świeżych tempo zdarzeń N_t po osiągnięciu granicy wytrzymałości ustala się na stałym wysokim poziomie aż do zatrzymania głowicy ściskającej, podczas gdy dla próbek przechowywanych przez dłuższy czas wysokie wartości tempa zdarzeń rejestrowane są tylko chwilowo. Gdy rozpoczyna się drugi cykl ściskania w teście TPA i następuje dalszy rozwój pękania rozpoczyna się również emisja akustyczna. Tempo zdarzeń w tym cyklu jest jednak znacznie niższe niż w cyklu pierwszym i praktycznie nie ma wpływu na całkowitą liczbę zdarzeń zarejestrowaną w teście.



Rys. 20. Zmiany liczby zdarzeń N_P w teście przebicia podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 20. Changes of AE events N_P in puncture test of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



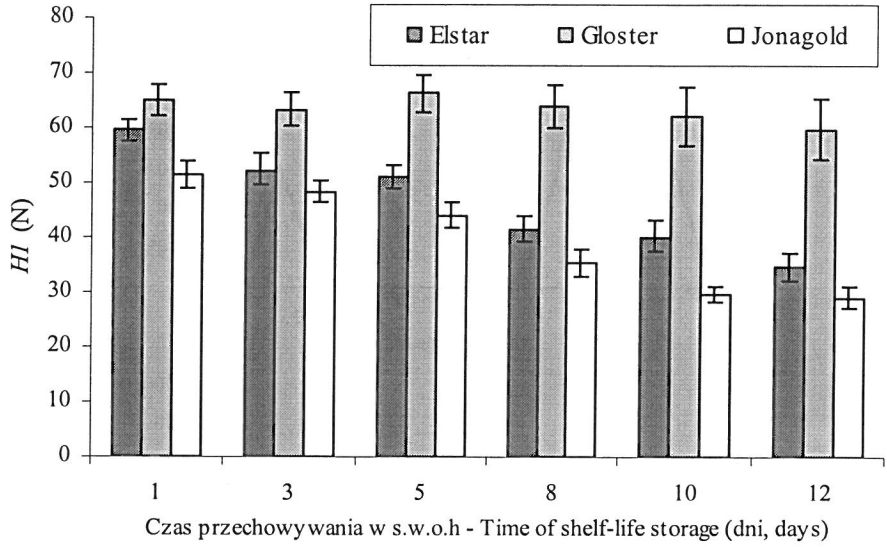
Rys. 21. Zmiany średniej amplitudy A_P w teście przebicia podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 21. Changes of mean of AE amplitude A_P in puncture test of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



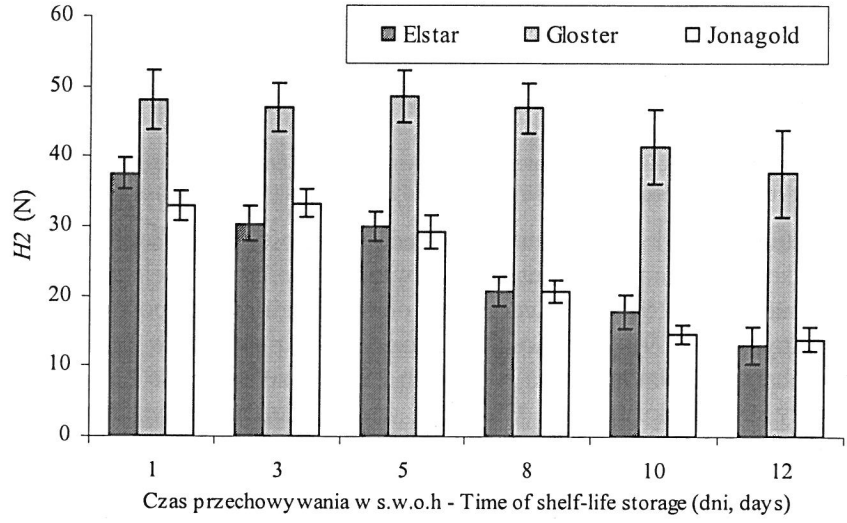
Rys. 22. Przykładowe zależności siła-czas oraz tempo zdarzeń N_t – czas w teście profilowej analizy tekstury – TPA jabłek odmiany Elstar po 1 dniu (seria S1-1) oraz po 12 dniach (seria S1-12) przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego

Fig. 22. Exemplary relationships force-time and AE events rate N_t – time in texture profile analysis test – TPA of Elstar cultivar apples after 1 day (series S1-1) and after 12 days (series S1-12) of shelf-life

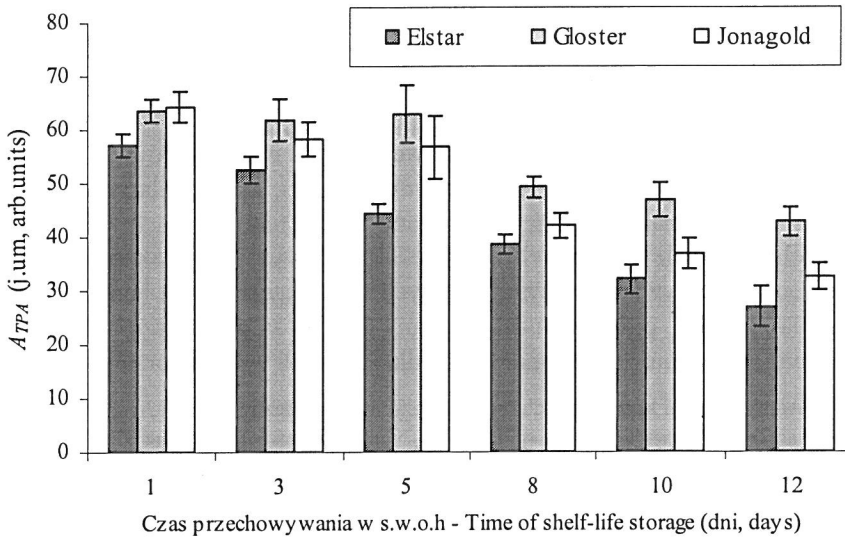
Na rysunkach 23 i 24 przedstawiono średnie wartości twardości *H1* i *H2* z testu TPA, dla których zanotowano najwyższe współczynniki korelacji z czasem przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego spośród parametrów mechanicznych (tab. 9). Zależności dla pozostałych parametrów testu TPA mają podobny charakter. Natomiast na rysunkach 25-26 przedstawiono oba analizowane deskryptory emisji akustycznej. Charakter zmian wielkości uzyskanych w teście TPA podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego jest podobny do tego obserwowanego w teście przebicia: podczas przechowywania następuje zmniejszenie się wartości twardości *H1* i *H2* oraz liczby zdarzeń N_{TPA} i średniej amplitudy A_{TPA} emisji akustycznej. Z podobnych przesłanek jak to omawiano w przypadku testu przebicia podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego, funkcja opisująca zmiany parametrów uzyskanych w teście TPA może mieć charakter wykładniczy.



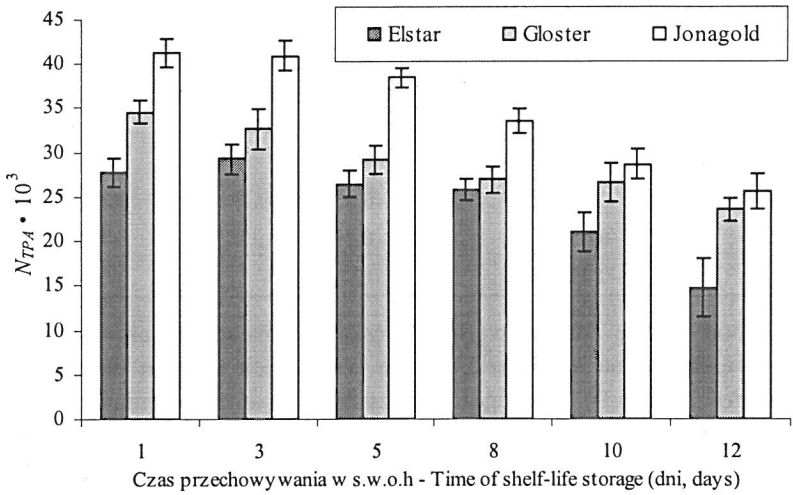
Rys. 23. Zmiany twardości *H1* w teście profilowej analizy tekstury – TPA podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 23. Changes of hardness *H1* in texture profile analysis test – TPA of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



Rys. 24. Zmiany twardości *H2* w teście profilowej analizy tekstury – TPA podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 24. Changes of hardness *H2* in texture profile analysis test – TPA test of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



Rys. 25. Zmiany średniej amplitudy A_{TPA} w teście profilowej analizy tekstury – TPA podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 25. Changes of mean of AE amplitude A_{TPA} in texture profile analysis test – TPA test of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



Rys. 26. Zmiany liczby zdarzeń N_{TPA} w teście profilowej analizy tekstury – TPA podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$
Fig. 26. Changes of AE events N_{TPA} in texture profile analysis test – TPA test of apples during shelf-life storage. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

W tabeli 9 przedstawiono współczynniki korelacji R dla wykładniczych zmian analizowanych parametrów mechanicznych oraz deskryptorów emisji akustycznej w teście TPA jabłek w czasie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Współczynniki korelacji R są istotne przy $p < 0,05$. Przechowywanie w symulowanych warunkach obrotu handlowego (serie od S1-1 do S1-12) powoduje znaczący spadek wszystkich rejestrowanych wartości, oprócz elastyczności S_P dla odmian Gloster i Jonagold, gdzie zanotowano wzrost tego parametru. Spośród wielkości mechanicznych uzyskanych w teście TPA najwyższe współczynniki korelacji z czasem przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego zanotowano dla *H1* i *H2*, przy czym dla odmiany Gloster są one niższe niż dla pozostałych odmian, podobnie jak to zanotowano dla jędrności w teście przebicia.

Tabela 9. Współczynniki korelacji R dla wykładniczych zmian liczby zdarzeń N_{TPA}, średniej amplitudy A_{TPA}, twardości *H1*, twardości *H2*, spójności C_O i elastyczności S_P w teście TPA jabłek w czasie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. R wyznaczono dla 24 próbek w każdej z 6 serii pomiarowych

Table 9. Correlation coefficients for exponential changes of AE events N_{TPA}, mean of AE amplitude A_{TPA} hardness *H1*, hardness *H2*, cohesiveness C_O and springiness S_P in TPA test for apples in time of shelf-life storage. R is obtained for 24 samples in each 6 series

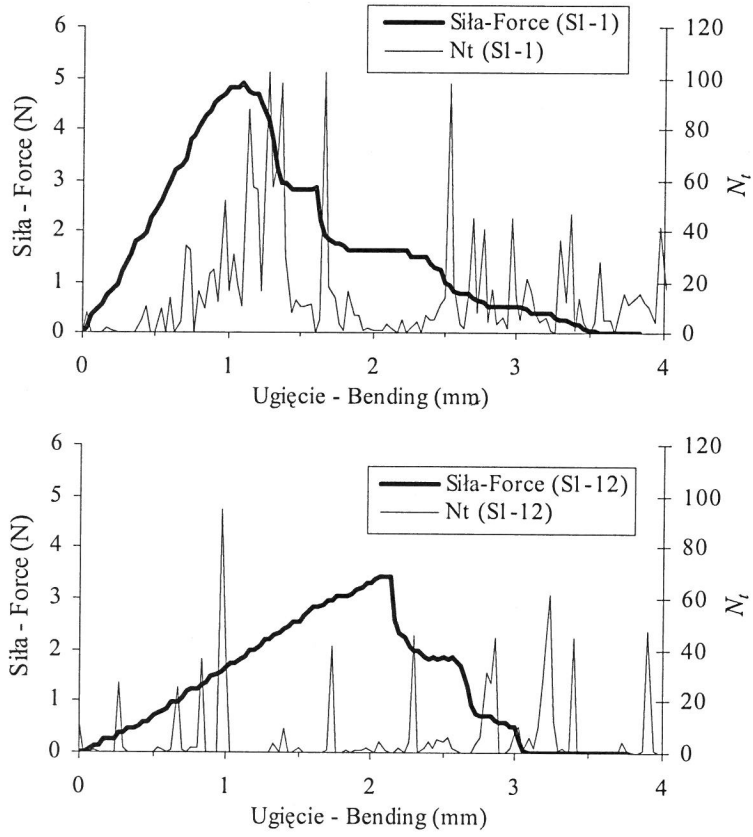
Parametr Parameter	R		
	Elstar	Gloster	Jonagold
	Czas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego Time of shelf-life storage		
N_{TPA}	–0,58	–0,64	–0,78
A_{TPA}	–0,83	–0,70	–0,82
H1	–0,78	–0,19	–0,85
H2	–0,78	–0,33	–0,83
C_O	–0,45	–0,19	–0,44
S_P	–0,23	0,27	0,38

Biorąc pod uwagę zmianę wartości deskryptorów emisji akustycznej podczas przechowywania można stwierdzić, że dla wszystkich odmian mają one wysokie ujemne wartości (tab. 9). Szczególnie przydatna w ocenie zmian tekstury jabłek podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego może być średnia amplituda sygnału A_{TPA} (rys. 25), dla której współczynnik korelacji R dla zmian w czasie przechowywania jest wyższy od współczynnika dla N_{TPA} (rys. 26) i jest wyższy niż dla zmian parametrów mechanicznych, z wyjątkiem zależności uzyskanych dla odmiany Jonagold, gdzie współczynniki uzyskane dla *H1* i *H2* mają najwyższe wartości (tab. 9).

W teście TPA zarejestrowano znacznie niższe wartości liczby zdarzeń N_{TPA} emisji akustycznej oraz niższą średnią amplitudę A_{TPA} w porównaniu do testu przebicia. Niższe wartości liczby zdarzeń wiążą się z mniejszym obszarem podlegającym niszczeniu niż ma to miejsce podczas przebijania próbnikiem o średnicy 11,1 mm. W ściskanej jednoosiowo cylindrycznej próbce propagacja pęknięć odbywa się w formie szczelin (Haman i Konstankiewicz 2000), gdzie uwalniana jest energia. Natomiast elementy strukturalne w pozostałym obszarze próbki mogą podlegać deformacjom nie osiągając granicy wytrzymałości. Dokonując oględzin próbek jabłek po teście TPA zauważono, że zniszczenie ma postać szczeliny lub zbioru przypadkowo zorientowanych szczelin względem kierunku jednoosiowego ściskania. Kierunek szczeliny w niektórych przypadkach był prostopadły do kierunku ściskania, w innych miał formę płaszczyzny ścięcia dochodzącej do jednej z płaszczyzn ściskających. Również powierzchnia tych szczelin była różna. Wiąże się z tym różna i przypadkowa dla różnych próbek liczba najsłabszych elementów strukturalnych podlegających pęknięciu. Niższa średnia amplituda w teście TPA w porównaniu do testu przebicia jest natomiast związana między innymi ze sposobem wyznaczania tej wielkości. Średnią amplitudę sygnału emisji akustycznej wyznaczano ze wszystkich przedziałów czasowych t = 100 ms podczas testu, również z tych gdzie nie było żadnego sygnału emisji akustycznej, tzn. gdzie $A_t = 0$. W teście przebicia sytuacja taka zdarzała się bardzo rzadko, ponieważ zagłębiający się w tkankę wgłębnik podczas testu miał stale kontakt z próbką. Podczas gdy w teście TPA brano także do obliczeń etap pomiędzy cyklami, kiedy głowica pomiarowa powracała do punktu początkowego i nie było sygnału EA.

Na rysunku 27 zaprezentowano przykładowe wykresy uzyskane w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym (SENB) po 1 dniu (S1-1) i po 12 dniach (S1-12) przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Stwierdzono, że przechowywanie w symulowanych warunkach obrotu handlowego powoduje znaczące zmiany w kształcie uzyskiwanych zależności. Przechowywanie powoduje spadek nachylenia krzywej siła-ugięcie oraz tym samym zmniejszenie maksymalnej wartości siły osiąganej w teście. Po osiągnięciu przez próbkę granicy wytrzymałości na zginanie następuje początkowo gwałtowny spadek siły, a następnie stopniowe zmniejszanie jej wartości do zera, co następuje zazwyczaj przy ugięciu około 3,5 mm. Przebieg krzywej siła-ugięcie po osiągnięciu granicy wytrzymałości ma często charakter uskoków, choć zaobserwowano również próbki, dla który natychmiast po granicy wytrzymałości następowało całkowite rozpołowienie próbki. W procesie zginania próbki z nacięciem rozwój pęknięć rozpoczyna się od końcówki nacięcia. Proces ten emituje sygnał emisji akustycznej, jednak nie zaobserwowano by jego początek miał miejsce przy ściśle określonym ugięciu lub sile. Był on również niezależny od stanu badanego materiału. Analizując poszczególne przebiegi stwierdzono, że występowanie zdarzeń emisji akustycznej jest w tym te-

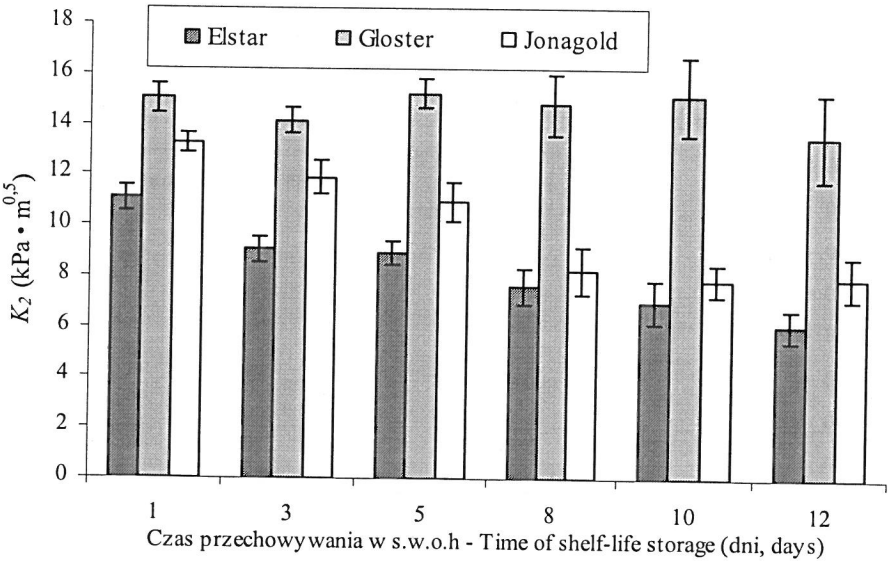
ście dla badanego materiału bardzo przypadkowe. Notowano zdarzenia akustyczne zarówno podczas prostoliniowego wzrostu siły, jak i podczas jej spadków. Charakterystyczną cechą jest, podobnie jak to obserwowano w pozostałych testach, występowanie wysokich wartości tempa zdarzeń emisji akustycznej N_t przy gwałtowniejszych spadkach siły. Dodatkowo dla próbek świeżych gęstość występowania zdarzeń w całym procesie ugięcia jest wyższa, przy czym nie zawsze chwilowe wartości tempa zdarzeń N_t były niższe niż dla próbek dłużej przechowywanych, tak jak to obserwowano w teście przebicia lub TPA. Wartości osiąganych sił w tym teście są



Rys. 27. Przykładowe zależności siła-ugięcie oraz tempo zdarzeń N_t –gięcie w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB jabłek odmiany Elstar po 1 dniu (seria S1-1) oraz 12 dniach (seria S1-12) przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego
Fig. 27. Exemplary relationships force-bending and AE events rate N_t – bending in single edge notched bend test – SENB for apples Elstar cultivar after 1 day (series S1-1) and after 12 days (S1-12) of shelf-life storage

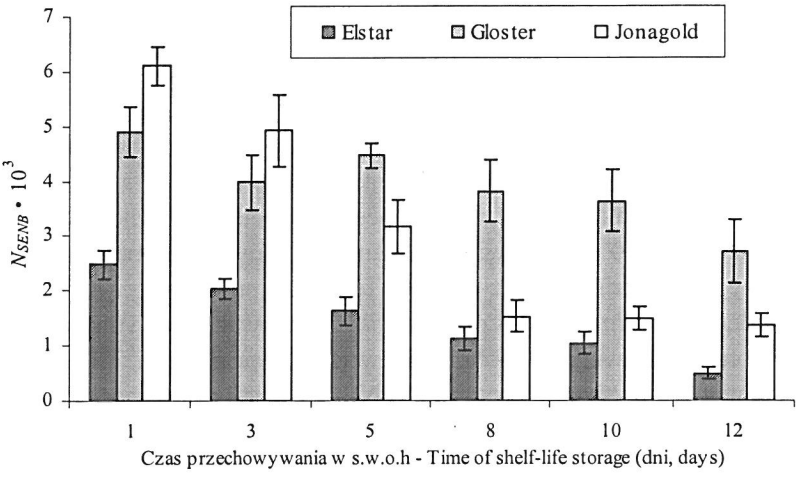
niewielkie w porównaniu do pozostałych testów również sygnał akustyczny jest znacznie słabszy, tzn. ma niższą amplitudę podobnie jak tempo zdarzeń. Z tego powodu zdarzenia, które ewidentnie pochodzą od pęknięć struktury trudno jest odróżnić od tych pochodzących od szumów. Na rysunku 27 widoczne jest, że dla ugięć wyższych niż 3,5 mm rejestruje się pewne tempo zdarzeń, które jest prawdopodobnie wynikiem tarcia złamanej próbki o próbnik. Dlatego w dalszej analizie brano pod uwagę tylko zdarzenia akustyczne występujące do ugięcia wynoszącego 3,5 mm.

Na rysunkach 28-30 przedstawiono zmiany wybranych parametrów mechanicznych i deskryptorów emisji akustycznej w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym (SENB) podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Podobnie jak w testach przebicia i TPA przyjęto, że zmiany parametrów uzyskanych w teście SENB w funkcji czasu można opisać funkcją wykładniczą.



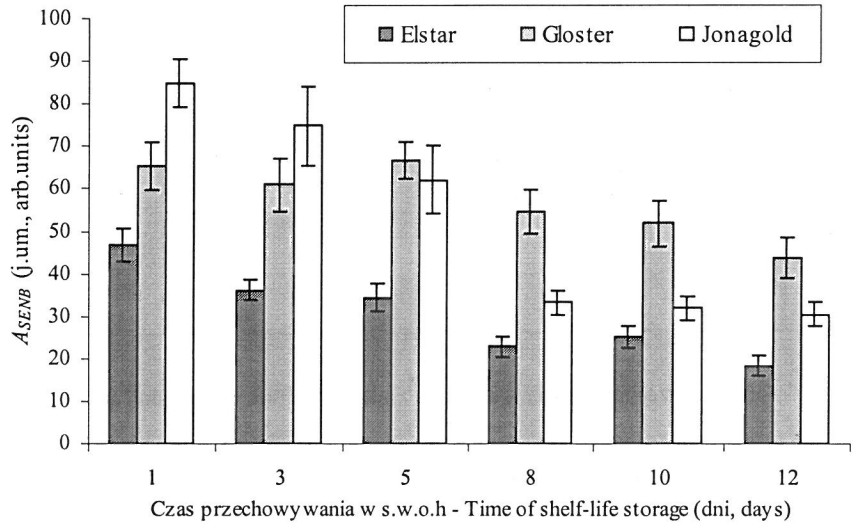
Rys. 28. Zmiany odporności na kruche pękanie K_2 w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0,05$

Fig. 28. Changes of fracture toughness K_2 in single edge notched bend test – SENB of apples during shelf-life. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



Rys. 29. Zmiany liczby zdarzeń N_{SENB} w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$

Fig. 29. Changes of AE events N_{SENB} in single edge notched bend test – SENB of apples during shelf-life. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$



Rys. 30. Zmiany średniej amplitudy A_{SENB} w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB podczas przechowywania jabłek w symulowanych warunkach obrotu handlowego – s.w.o.h. Przedziały ufności dla $\alpha = 0{,}05$

Fig. 30. Changes of mean of AE amplitude A_{SENB} in single edge notched bend test – SENB of apples during shelf-life. Confidence intervals for $\alpha = 0.05$

W tabeli 10 zamieszczono współczynniki korelacji R dla wykładniczych zmian wszystkich analizowanych wartości w czasie przechowywania (poziom istotności korelacji $p < 0,05$ dla wszystkich współczynników). Najmniejsze zmiany, choć istotne ($p < 0,05$), podczas 12-dniowego przechowywania zaobserwowano dla odmiany Gloster, dla której współczynniki korelacji dla zmian wielkości mechanicznych nie przekraczają –0,2. Zaś największe zmiany zanotowano dla odmiany Jonagold. Porównując wszystkie współczynniki korelacji, można stwierdzić, że podobnie jak to uzyskano w teście przebicia i teście TPA, najwyższe współczynniki korelacji zanotowano dla zmian średniej amplitudy A_{SENB}. Nieznacznie słabszą korelację uzyskano dla liczby zdarzeń N_{SENB}. Dlatego w przypadku tego testu oba z deskryptorów emisji akustycznej mogą być przydatne do monitorowania tekstury jabłek podczas przechowywania.

Tabela 10. Współczynniki korelacji R dla wykładniczych zmian liczby zdarzeń N_{SENB}, średniej amplitudy sygnału A_{SENB}, pracy W_f i odporności na kruche pękanie K_2 w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB jabłek w czasie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego przez 12 dni. R wyznaczono dla 24 próbek w każdej serii z 6 pomiarowych
Table 10. Correlation coefficients R for exponential changes of AE events N_{SENB}, mean of AE amplitude A_{SENB}, work W_f and fracture toughness K_2 in single edge notched bend test – SENB for apples in time of time shelf-life storage during 12 days. R is obtained for 24 samples in each 6 series

Parametr Parameter	R		
	Elstar	Gloster	Jonagold
	Czas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego Time of shelf-life storage		
N_{SENB}	–0,77	–0,43	–0,83
A_{SENB}	–0,78	–0,47	–0,84
W_f	–0,52	–0,14	–0,64
K_2	–0,70	–0,18	–0,73

4.3.2. Wpływ czasu przechowywania w niskiej temperaturze i kontrolowanej atmosferze na właściwości mechaniczne i sygnał emisji akustycznej

Wyniki testów mechanicznych z zastosowaniem emisji akustycznej próbek przechowywanych długoterminowo i w różnych warunkach przedstawiono w tabeli 11. Podane wartości są procentowymi zmianami względem wyników uzyskanych dla pierwszego dnia eksperymentu (względem serii S1-1).

Długość i sposób przechowywania ma znaczący wpływ na parametry materiału. Przechowywanie w normalnej atmosferze w temperaturze obniżonej do 2°C i wilgotności powietrza RH > 80% przez 42 dni (seria AN-42) powoduje zmniejszenie wszystkich zarejestrowanych parametrów, zarówno mechanicznych jak i deskryptorów emisji akustycznej. Wyjątkiem jest elastyczność S_P uzyskana w teście TPA, dla

Tabela 11. Względne zmiany deskryptorów emisji akustycznej (N_P, N_{TPA}, N_{SENB} – liczba zdarzeń, A_P, A_{TPA}, A_{SENB} – średnia amplituda) i parametrów mechanicznych odpowiednio w testach przebicia - P, profilowej analizy tekstury – TPA i trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB (F_P – jędrność, $H1$ – twardość1, $H2$ – twardość2, C_O – spójność, S_P – elastyczność, W_f – praca, K_2 – odporność na kruche pękanie) dla jabłek przechowywanych w różnych warunkach (AN – atmosfera normalna, AK-atmosfera kontrolowana, S2 – symulowane warunki obrotu handlowego) przez różne okresy czasu w stosunku do materiału w serii S1-1

Table 11. Relative changes of AE descriptors (N_P, N_{TPA}, N_{SENB}, – AE events, A_P, A_{TPA}, A_{SENB} – mean of AE amplitude) and mechanical parameters in puncture – P, texture profile analysis – TPA, single edge notched bend – SENB respectively (F_P – firmness, $H1$ – hardness1, $H2$ – hardness2, C_O – cohesiveness S_P – springiness, W_f – work, K_2 – fracture toughness) for apples stored in different conditions (AN – normal atmosphere, AK – control atmosphere, S2 – shelf-life) during different periods relatively to material in series S1-1

Parametr / Parameter	Elstar				Gloster				Jonagold			
	AN-42	AN-84	AN-84+S2-10	AK-112	AN-42	AN-84	AN-84+S2-10	AK-112	AN-42	AN-84	AN-84+S2-10	AK-112
N_P	–46±4	–64±4	–84±3	–11±2	–8±3	–26±5	–57±7	–1±2	–20±5	–51±2	–73±2	–12±3
N_{TPA}	–12±7	–22±7	–73±5	–2±5	–15±6	–6±4	–40±10	3±6	–21±4	–33±3	–64±4	–6±4
N_{SENB}	–65±5	–74±3	–82±3	–28±9	–6±16	–48±8	–70±18	–25±6	–51±12	–85±1	–90±3	–71±6
A_P	–72±1	–75±1	–83±2	–60±3	–34±3	–47±4	–60±4	–25±4	–53±6	–71±2	–77±1	–50±4
A_{TPA}	–40±3	–48±5	–66±2	–15±5	–21±4	–24±5	–48±6	–5±8	–37±5	–53±3	–62±2	–14±7
A_{SENB}	–49±4	–52±4	–60±4	7±11	–7±11	–27±7	–48±16	9±9	–39±10	–63±3	–72±4	–50±6
F_P	–38±3	–50±2	–60±2	–25±3	–15±3	–33±4	–51±4	–9±4	–30±3	–48±3	–56±3	–30±3
$H1$	–39±3	–49±4	–58±3	–36±3	–16±4	–29±4	–54±4	–17±3	–31±4	–56±2	–54±3	–32±4
$H2$	–53±3	–64±4	–79±3	–45±6	–26±6	–34±7	–70±6	–22±3	–34±6	–68±3	–71±3	–36±6
C_O	–27±8	–36±6	–49±6	–40±7	–32±9	–32±9	–56±7	–29±5	–16±8	–40±7	–28±7	–19±10
S_P	1±4	–6±6	–26±4	3±8	22±9	11±9	–2±8	–4±10	19±13	1±8	15±7	15±16
W_f	–65±8	–86±3	–73±9	–23±16	–25±8	–34±12	–46±24	–11±9	–56±10	–91±1	–77±8	–52±9
K_2	–46±5	–65±2	–45±6	–14±8	–9±4	–30±7	–46±12	–5±4	–37±5	–71±2	–51±6	–35±5

której nie stwierdzono jednoznacznych tendencji zmian wartości. Zakres zmian pozostałych parametrów jest jednak różny. Można natomiast jednoznacznie stwierdzić, że zmiany poszczególnych parametrów są wyraźnie mniejsze dla odmiany Gloster niż dla pozostałych badanych odmian (tab. 11), podobnie jak to zaobserwowano podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego. Wydłużenie czasu przechowywania w warunkach chłodniczych do 84 dni (seria AN-84, tab. 11) powoduje dalszy spadek analizowanych wartości. Najwyższe spadki wartości wszystkich analizowanych parametrów uzyskano po 84 dniach przechowywania w warunkach chłodniczych i przeniesieniu jabłek do pomieszczenia o temperaturze 20°C i wilgotności RH > 90% na kolejne 10 dni (seria AN84+S2-10, tab. 11). Dla jabłek przechowywanych w kontrolowanej atmosferze i obniżonej temperaturze (seria AK-112, tab. 11), nawet przez 112 dni, uzyskane wyniki zmniejszyły się w najmniejszym stopniu. Są one zazwyczaj wyższe niż wyniki dla jabłek przechowywanych przez 42 dni w atmosferze normalnej. Dla niektórych parametrów uzyskanych dla jabłek po przechowywaniu w kontrolowanej atmosferze nie nastąpiły żadne lub wystąpiły bardzo minimalne zmiany w stosunku do materiału wyjściowego. Szczególnie dla odmiany Gloster większość parametrów praktycznie nie zmieniła się (zmiany w tych przypadkach były nieistotne statystycznie).

4.3.3. Interpretacja uzyskanych wyników

Jak pokazano powyżej, dla jabłek po pierwszym dniu eksperymentu (9 lub 26 dni po zbiorze) uzyskano najwyższe wartości parametrów mechanicznych i najwyższe wartości deskryptorów emisji akustycznej w każdym teście. Podczas przechowywania następuje spadek tych wartości, w różnym stopniu, zależnie od sposobu przechowywania i odmiany. Głównym procesem decydującym o właściwościach mechanicznych tkanki jest enzymatyczna degradacja pektyn, która powoduje spadek jej parametrów wytrzymałościowych. Osłabienie mechaniczne jest spowodowane zmniejszeniem adhezji międzykomórkowej. Z punktu widzenia procesu w skali mikro, degradacja pektyn powoduje osłabienie pektynowych wiązań międzykomórkowych i stopniową zmianę sposobu pękania struktury komórkowej z pękania poprzez ściany komórkowe na pękanie międzykomórkowe. Tempo degradacji jest zależne od temperatury i dostępności tlenu. Umieszczenie jabłek w obniżonej temperaturze (atmosfera normalna) spowalnia procesy enzymatyczne podobnie jak zmniejszenie zawartości tlenu w atmosferze (atmosfera kontrolowana).

Zmniejszanie się wartości liczby zdarzeń i amplitudy sygnału emisji akustycznej może być bezpośrednio związane ze sposobem pękania struktury komórkowej oraz ze zmianą właściwości mechanicznych poszczególnych elementów struktury komórkowej i tym samym całej tkanki.

Ściany komórkowe zawierające sieć mikrofibrylli celulozowych traktuje się jako materiał sprężysty, szczególnie wytrzymały na rozciąganie. Natomiast pektyny traktuje się jako materiał plastyczny (Niklas 1992, Pitt 1982, Pit i Chen 1983). Stąd już w poprzednich pracach Zdunka (2000) oraz Zdunka i Konstankiewicz (2001, 2004) na temat zastosowania emisji akustycznej w tkankach roślinnych postawiono hipotezę, że źródłem sygnału akustycznego w tego typu materiale są pękające ściany komórkowe. Badania te przeprowadzono jednak na tkance ziemniaka o znacznie bardziej zwartej strukturze z mniejszą ilością przestworów międzykomórkowych, która ma tendencję to pękania poprzez rozrywanie ścian komórkowych. Hipotezę tę potwierdza niniejszy eksperyment dla tkanki jabłka. Zmiana sposobu pękania podczas przechowywania jabłek i zmniejszenie się przy tym liczby zarejestrowanych zdarzeń akustycznych są związane ze zmniejszeniem się liczby pękniętych komórek podczas testu. Pęknięta komórka oznacza rozerwaną ścianę komórkową. Wraz z czasem przechowywania, w procesie pękania tkanki, udział pękniętych komórek zmniejsza się na korzyść liczby „odklejonych" komórek. Procesy zachodzące w pektynowych lamellach, które są materiałem plastycznym, nie powinny generować znaczącego sygnału akustycznego.

Drugim, równoległym do degradacji pektyn procesem zachodzącym podczas przechowywania jest naturalne zmniejszenie się turgoru, którego zmiana jest znacznie mniejsza niż uzyskana przy osmotycznym nawadnianiu i odwadnianiu tkanki. Jednak podczas przechowywania nawet w wysokich wilgotnościach (RH > 90%) może powodować pewne zmiany w uwodnieniu tkanki i tym samym w warunkach rozwoju pęknięć generujących sygnał akustyczny. Spadek turgoru jest z jednej strony zmniejszeniem się wartości wstępnego naprężenia ścian komórkowych, z drugiej powoduje zmniejszenie sił przylegania komórek do siebie. Dlatego przy jednostkowym odkształceniu tkanki mniejsza ilość ścian komórkowych osiągnie swoją wytrzymałość na rozciąganie i bardziej prawdopodobne stanie się pękanie międzykomórkowe. W konsekwencji wysychanie tkanki podczas przechowywania również prowadzi do zmniejszenia się rejestrowanej liczby zdarzeń akustycznych.

Amplituda sygnału akustycznego jest zależna od szeregu czynników, między innymi od wielkości źródła, od odległości źródła od sensora EA, od współczynnika sprężystości materiału oraz od naprężenia w źródle w momencie pęknięcia (Malecki i Opilski 1994).

Degradacja pektyn powoduje osłabienie wiązań międzykomórkowych, co jest bardzo dobrze udokumentowane w literaturze, oraz najprawdopodobniej zmianę wytrzymałości ścian komórkowych. W literaturze podaje się, że dla jabłek to drugie zjawisko jest znacznie słabsze niż dla innych owoców (Redgwell i in. 1997). Niemniej oba te procesy mogą mieć decydujący wpływ na rejestrowany sygnał akustyczny. Z jednej strony zmiana sposobu pękania z pękania sprężystych ścian komórkowych na pękanie w pektynowych lamellach, które są materiałem o cechach

plastycznych, zmniejsza liczbę zarejestrowanych zdarzeń akustycznych, a z drugiej strony zmniejszenie wytrzymałości ścian komórkowych może powodować generowanie sygnału akustycznego o mniejszej amplitudzie.

Rejestrowana przez sensor amplituda sygnału akustycznego może być niższa również ze względu na tłumienie przez materiał. Sygnał akustyczny jest bardziej tłumiony w ośrodku mniej sprężystym. Degradacja pektyn powoduje spadek sprężystości tkanki widoczne w poszczególnych testach jako zmniejszenie się nachylenia krzywej siła-czas. Dlatego podczas przechowywania następuje również wzrost tłumienia i trudno jest określić jednoznacznie, które z tych zjawisk ma istotniejszy wpływ na obserwowany w eksperymencie spadek średniej amplitudy sygnału emisji akustycznej.

Biorąc pod uwagę wcześniejszy wniosek, że poszczególne zdarzenia emisji akustycznej pochodzą od niszczonych komórek możliwe jest oszacowanie i śledzenie liczby pęknięć ścian komórkowych podczas poszczególnych testów mechanicznych.

Pierzynowska-Korniak i in. (2002) podają, że średnia średnica komórek dla jabłek wynosi 0,05-0,5 mm. Potwierdzają to mikroskopowe badania własne. Biorąc średnią wartość z tych średnic, i zakładając kulisty kształt komórek, objętość jednej komórki wynosi około 0,01 mm^3. Podczas wbijania próbnika w teście przebicia niszczone są kolejne warstwy komórek pod próbnikiem, które zmiażdżone podążają wraz z próbnikiem w głąb próbki. Niemożliwe jest jednak bez szczegółowych badań mikroskopowych oszacowanie całkowitej objętości zniszczonego materiału. Biorąc jednak pod uwagę tylko objętość części zagłębionej próbnika, można stwierdzić z pewnością, że minimalna objętość uszkodzonego materiału po zagłębieniu próbnika o średnicy 11,1 mm na głębokość 8 mm wynosi około 770 mm^3. Do objętości tej należy dodać objętość obszarów tkanki przyległych do próbnika, szczególnie pod próbnikiem. Przeliczając to z uwzględnieniem szacunkowej objętości jednej komórki, minimalna liczba zniszczonych komórek w teście przebicia wynosi około n = 75 000 komórek. Do liczby tej należy dodać komórki zniszczone pod oraz wokół próbnika. Natomiast maksymalna suma zdarzeń emisji akustycznej N_P w teście przebicia zarejestrowanych dla najświeższych jabłek (1 dzień przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego - seria S1-1) wynosiła około 110 000 zdarzeń.

W teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym, którą nacięto, powierzchnia przełomu jest większa niż 64 mm^2 (iloczyn szerokości próbki i odległości w linii prostej od końcówki nacięcia do miejsca przyłożenia próbnika). Dzieląc tę wartość przez średni przekrój komórki wynoszący 0,06 mm^2 uzyskujemy, że na powierzchni tego najmniejszego możliwego przełomu znajduje się średnio około n = 1000 komórek, a maksymalne liczby zdarzeń N_{SENB} w teście SENB dla próbek świeżych zależnie od odmiany wahały się od 2000 do 6000 zdarzeń.

Zarejestrowane liczby zdarzeń emisji akustycznej N w teście przebicia i teście SENB, w którym możliwe było oszacowanie z przybliżeniem objętości lub powierzchni zniszczonego materiału, są w obu przypadkach wyższe w stosunku do przybliżonych liczb zniszczonych komórek n w tych testach. Podane liczby komórek n zawarte w objętości zniszczonego materiału są wartościami minimalnymi. Należy do nich dodać w pierwszym przypadku komórki zniszczone wokół próbnika w teście przebicia, a w teście SENB należy uwzględnić większą powierzchnię (nie płaszczyznę) przełomu oraz możliwą propagację pęknięcia po nie najkrótszej drodze do górnej powierzchni próbki. Dodatkowo w teście SENB, jeżeli przełom występuje w postaci rozerwania ściany komórkowej, rozerwanie komórki musi nastąpić w dwóch miejscach. Wówczas wartość n należy pomnożyć przez 2, czyli w jednym teście SENB następuje minimum 2000 pęknięć ścian komórkowych. Podobne zjawisko nie jest wykluczone dla niektórych komórek w teście przebicia. Dlatego można przyjąć, że pomiary liczby zdarzeń przy pomocy emisji akustycznej dają bardzo zbliżone wartości do rzeczywistej liczby pęknięć ścian komórkowych w teście mechanicznym. Dla potwierdzenia tej tezy należy podkreślić, że rząd wielkości liczby zdarzeń oraz minimalnej liczby niszczonych komórek jest taki sam.

Jak to opisano wyżej, powstałe po teście TPA szczeliny w próbce mają dosyć przypadkowy i wielokierunkowy charakter, dlatego trudno jednoznacznie stwierdzić jaka objętość materiału próbki uległa zniszczeniu w tym teście. Przyjmując natomiast, że dla świeżych jabłek średnia liczba zdarzeń N_{TPA}, która wynosiła od 28 000 do 42 000 zależnie od odmiany, jest wynikiem pękania ścian komórkowych, średnią powierzchnię szczelin powstałych w wyniku dwukrotnego ściśnięcia próbki można oszacować na 1 600-2 400 mm^2 (przy założeniu, że średnica komórek w jabłku wynosi średnio 0,27 mm).

Należy także wziąć pod uwagę pewne czynniki, które trudno jest ilościowo uwzględnić w powyższych szacunkach:

- Tarcie może powodować powstawanie sygnału emisji akustycznej. Może to być tarcie materiału o próbnik lub tarcie wewnętrzne. Sygnał tworzony w tym procesie podwyższa liczbę zdarzeń.
- Nieznana jest rzeczywista średnia wielkość komórek w materiale, której w tym eksperymencie nie mierzono. Dla tkanek zbudowanych z mniejszych komórek na drodze próbnika przebicia lub w płaszczyźnie przełomu próbki SENB powinno zajść więcej pęknięć ścian i tym samym rejestrowana będzie wyższa liczba zdarzeń. By hipotezę tę potwierdzić, należy przeprowadzić szczegółowe porównanie liczby zdarzeń w teście mechanicznym z pomiarami wielkości komórek i z mikroskopową obserwacją sposobu rozwoju pęknięć w materiale.
- Wynik pomiaru amplitudy i liczby zdarzeń emisji akustycznej zależy od ustawień systemu pomiarowego. Przed właściwym eksperymentem wybra-

no takie wzmocnienia, poziom dyskryminacji i taką pozycję sensora oraz konfigurację systemu by zapewnić maksymalną czułość. Niskie wzmocnienie lub za wysoki poziom dyskryminacji zmniejsza nieznacznie liczbę rejestrowanych zdarzeń. W próbach testowych odnaleziono wartości wzmocnień, które nie powodują generowania szumów własnych wzmacniacza i nie są rejestrowane zdarzenia przy „wolnym" przebiegu głowicy maszyny wytrzymałościowej. Daje to pewność, że rejestrowany sygnał pochodzi wyłącznie od próbki. Jednak w chwili obecnej nie ma możliwości przeskalowania systemu pomiarowego w celu określenia dokładnej korelacji pomiędzy liczbą zdarzeń a ilością pękniętych ścian komórkowych. W tym celu należałoby wykonać szczegółowe badania mikroskopowe.

Porównując średnie wartości parametrów mechanicznych i deskryptorów EA w poszczególnych testach dla jabłek zaraz po zbiorze widoczne jest, że odmiana Gloster wykazuje wyższe wartości parametrów mechanicznych, tj. jędrności, twardości, odporności na kruche pękanie. Natomiast liczba zdarzeń i amplituda emisji akustycznej dla tej odmiany jest albo niższa albo zbliżona do pozostałych odmian. Ten interesujący fakt można tłumaczyć tym, że odmienne właściwości mechaniczne tej odmiany mogą być wynikiem pewnego czynnika, który nie wpływa na powstawanie i propagację sygnału akustycznego. Biorąc pod uwagę wniosek, że źródłem sygnału emisji akustycznej są pękające ściany komórkowe, a pękanie w pektynowych lamellach nie powoduje generowania fali sprężystej, można wnioskować, że wyższe wartości parametrów mechanicznych odmiany Gloster mogą być spowodowane wyższą wytrzymałością pektynowych połączeń komórkowych dla tej odmiany. Wówczas wynikowa wytrzymałość tkanki jest wyższa, przy podobnej liczbie rozerwanych komórek w teście, które są związane z rejestrowaną liczbą zdarzeń EA. Wspomniana wyższa wytrzymałość pektynowych połączeń w jabłkach odmiany Gloster w stosunku do pozostałych badanych odmian jest utrzymywana również podczas przechowywania. Obserwowane zmiany, zarówno parametrów mechanicznych jak i deskryptorów emisji akustycznej, są znacznie wolniejsze niż dla pozostałych odmian. Może to świadczyć o wolniejszej degradacji pektyn w tej odmianie.

4.4. Zastosowanie emisji akustycznej do oceny tekstury jabłek

4.4.1. Analiza sensoryczna

Dla każdej odmiany i terminu oraz sposobu przechowywania wykonano analizę sensoryczną. W panelu uczestniczyło 10 przeszkolonych osób, które według instrukcji oceniały poszczególne cechy w skali od 0 do 10. Dana osoba spożywała dwie próbki dla danej odmiany w każdym terminie przechowywania. Instrukcja i skala, którą się posługiwali, została opisana w rozdziale 3.3. Porównanie wartości po-

szczególnych cech oceny sensorycznej pokazało, że istnieje między nimi liniowa korelacja. W tabeli 12 przedstawiono współczynniki korelacji regresji liniowej pomiędzy poszczególnymi cechami uzyskane z uwzględnieniem wszystkich ocen (około 200 ocen dla jednej odmiany).

Istnieje wysoka korelacja pomiędzy ocenami kruchości, chrupliwości i twardości jabłek. Najwyższa z nich wystąpiła pomiędzy kruchością i chrupliwością, dwoma wielkościami związanymi z generowanym dźwiękiem podczas spożywania produktu (R = 0,87-0,91). Korelacja ta pokazuje, że tkanka jabłka, która podczas nagryzania siekaczami jest bardzo hałaśliwa, również podczas żucia trzonowcami emituje głośny i długo trwający dźwięk. Prawdopodobnie jest to spowodowane tym, że dla jabłek w odróżnieniu od suchych produktów spożywczych nawilżanie śliną podczas żucia trzonowcami nie jest tak istotne i dlatego rozróżnienie kruchości od chrupliwości nie jest dla jabłek konieczne.

Podobna wysoka korelacja istnieje pomiędzy twardością a kruchością (R = 0,84-0,86) oraz twardością a chrupliwością (R = 0,84-0,87), czyli twardość w ocenie sensorycznej koreluje silnie z głośnością dźwięku generowanego podczas spożywania jabłek. Jest to zrozumiałe, ponieważ amplituda sygnału akustycznego zależy między innymi od naprężenia w źródle pęknięcia oraz wartości uwolnionej energii sprężystości. Dla materiału sprężystego osiągnięcie granicy wytrzymałości powoduje nagłe zerwanie wiązań i uwolnienie energii, wówczas ilość energii uwolnionej jest proporcjonalna do energii sprężystości w chwili pęknięcia. Wysoka twardość oznacza mniejsze tłumienie fali sprężystej i wyższą amplitudę rejestrowaną przez zmysł słuchu.

Wysokie współczynniki korelacji uzyskano również dla zależności kruchości (lub chrupliwości) z soczystością (R = 0,64-0,72). Porównując wyniki dla poszczególnych odmian stwierdzono, że współczynniki te są wyższe niż dla zależności twardość-soczystość (R = 0,6-0,66). Wyższa soczystość oznacza, że więcej komórek ulega rozerwaniu podczas nagryzania i żucia. Stąd zrozumiałe jest, że soczystość jest silniej związana z procesami pękania zachodzącymi w ścianach komórkowych, które jak to pokazano w poprzednich rozdziałach, są źródłem dźwięku. Natomiast twardość jest złożeniem wytrzymałości ścian komórkowych i wytrzymałości pektynowych połączeń międzykomórkowych, z których ten drugi proces nie emituje dźwięku i ma ujemny wpływ na soczystość.

Mączystość jest przeciwstawną cechą do soczystości, ponieważ związana jest ze wzrostem udziału pękania międzykomórkowego w procesie niszczenia. Zmniejsza się więc tym samym soczystość tkanki. W niniejszych testach sensorycznych najwyższe ujemne korelacje zaobserwowano właśnie dla zależności mączystości z soczystością. Pozostałe cechy słabiej korelują z mączystością, jednak w większości przypadków korelacja kruchość lub chrupliwość z mączystością jest wyższa niż korelacja twardość-mączystość.

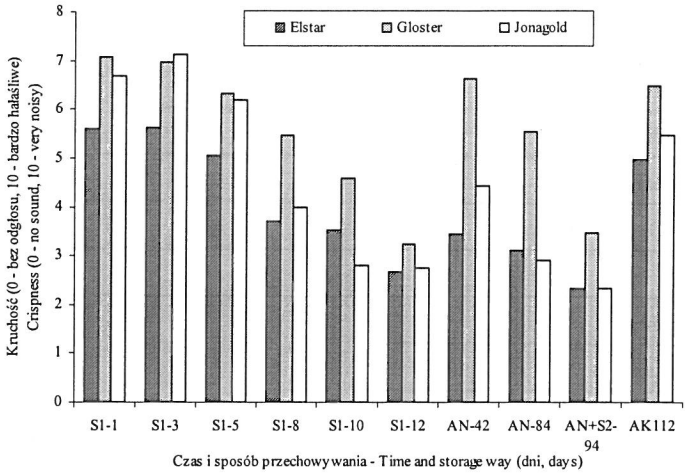
Tabela 12. Matryca współczynników korelacji *R* między cechami oceny sensorycznej jabłek. Wszystkie korelacje są istotne ($p < 0,01$)
Table 12. Correlation matrix *R* among sensory attributes of apples. All correlations are significant ($p < 0.01$)

Parametr Parameter	Kruchość Crispness	Twardość Hardness	Chrupliwość Crunchiness	Soczystość Juiciness	Mączystość Mealiness
		Elstar			
Kruchoś – Crispness	1				
Twardość – Hardnes	0,86	1			
Chrupliwość – Crunchiness	0,87	0,87	1		
Soczystość – Juiciness	0,69	0,66	0,72	1	
Mączystość – Mealiness	–0,33	–0,33	–0,28	–0,38	1
Ocena ogólna – Overall texture	0,70	0,67	0,70	0,75	–0,44
		Gloster			
Kruchoś – Crispness	1				
Twardość – Hardnes	0,84	1			
Chrupliwość – Crunchiness	0,89	0,87	1		
Soczystość – Juiciness	0,64	0,60	0,65	1	
Mączystość – Mealiness	–0,43	–0,41	–0,44	–0,47	1
Ocena ogólna – Overall texture	0,63	0,52	0,61	0,73	–0,52
		Jonagold			
Kruchoś – Crispness	1				
Twardość – Hardness	0,84	1			
Chrupliwość – Crunchiness	0,91	0,85	1		
Soczystość – Juiciness	0,71	0,58	0,71	1	
Mączystość – Mealiness	–0,45	–0,45	–0,44	–0,38	1
Ocena ogólna – Overall texture	0,80	0,68	0,80	0,71	–0,53

W ogólnej ocenie tekstury, która była definiowana jako optymalne zharmonizowanie poszczególnych cech, najważniejsze znaczenie ma soczystość (R = 0,7-0,75). W dalszej kolejności kruchość i chrupliwość, a najmniejszy wpływ na ogólną ocenę tekstury ma twardość i mączystość (mączystość ma negatywny wpływ na odczucie

wysokiej jakości). Wynik ten pokazuje, że cechy, które są związane z procesami pękania ścian komórkowych, tj. soczystość, kruchość i chrupliwość są najważniejsze dla ogólnej oceny jabłek przez konsumentów.

Powyżej opisano korelacje pomiędzy cechami oceny sensorycznej jabłek. Interesujące jest również, jak te oceny zmieniają się podczas przechowywania. Na rysunku 31, jako przykład przedstawiono zmiany kruchości. Ponieważ istnieją wysokie korelacje tej wartości z innymi cechami oceny sensorycznej, wykresy dla nich są podobne do przedstawianego.



Rys. 31. Kruchość jabłek w analizie sensorycznej podczas przechowywania. Słupki są wartościami średnimi ocen 10 osób testujących po dwie próbki w danej serii
Fig. 31. Apples crispness in sensory analysis during storage. Bars are mean values of 10 panelists who tested two samples for each series

Podczas przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego następuje ciągły spadek ocenianej kruchości. Tempo tych zmian jest różne dla poszczególnych odmian. Jabłka tuż po zbiorze mają różną kruchość: Elstar najniższą, Gloster i Jonagold wyższe i zbliżone do siebie. Taki wynik utrzymuje się do 5 dnia przechowywania. Po 8 dniach kruchość odmiany Jonagold znacznie spada zbliżając się do odmiany Elstar, natomiast odmiana Gloster nadal utrzymuje wysoką ocenę tej cechy. Wyniki dla poszczególnych odmian zbliżają się do siebie po 12 dniach przechowywania.

Przechowywanie chłodnicze (seria AN) przez 42 dni zapobiega utracie kruchości i innych cech oceny sensorycznej. Szczególnie dla odmiany Gloster wyniki są podobne do materiału po zbiorze. Podobnie jak to było w początkowym okresie przechowywania w symulowanych warunkach obrotu handlowego, odmiana Jonagold ma wyższą kruchość w tym sposobie przechowywania od odmiany Elstar, a ich

wartości zbliżają się wraz z wydłużeniem czasu przechowywania (AN-84). Uzyskane wyniki dla trzech odmian po wyjęciu jabłek do pomieszczenia o temperaturze pokojowej na 10 dni (seria AN + S2-94) zbliżają się do siebie (odmiana Gloster nadal wykazuje nieznacznie wyższą kruchość). Przechowywanie jabłek w kontrolowanej atmosferze (seria AK-112) przez 112 dni pozwala utrzymać kruchość na wysokim poziomie, nieznacznie tylko niższym od materiału po zbiorze.

4.4.2. Korelacja wyników analizy sensorycznej z pomiarami instrumentalnymi

Przeprowadzenie na tym samym materiale testów instrumentalnych i analizy sensorycznej pozwoliło określić korelacje wyników z tych dwóch metod oceny tekstury jabłek. Do porównania użyto wartości średnich dla danych serii pomiarowych. W sumie dysponowano dziesięcioma seriami, które obejmowały wszystkie opisane w poprzednim rozdziale sposoby i terminy przechowywania. Dla wartości średnich wyznaczono współczynniki korelacji dla zależności między poszczególnymi cechami oceny sensorycznej a parametrami oceny instrumentalnej (tab. 13).

Szczegółowa analiza wyników pokazała, że wszystkie parametry mechaniczne korelują liniowo z cechami oceny sensorycznej. Natomiast, spośród dwóch deskryptorów emisji akustycznej, liczba zdarzeń N_P i N_{TPA} zmienia się logarytmiczne (w tabeli oznaczono jako exp(N)), natomiast N_{SENB} i średnia amplituda A_P, A_{TPA} *i* A_{SENB} zmieniają się linowo wraz z cechami oceny sensorycznej. Wszystkie współczynniki korelacji w tabeli 13 są dodatnie z wyjątkiem korelacji z mączystością.

W tabeli 13 uwypuklono te parametry oceny instrumentalnej, po jednym dla testu mechanicznego i emisji akustycznej, dla których uzyskano najwyższe współczynniki korelacji z cechami oceny sensorycznej. Spośród parametrów mechanicznych oceny instrumentalnej, najwyższe współczynniki korelacji w poszczególnych testach uzyskano dla jędrności F_P w teście przebicia, twardości *H2* w teście TPA oraz dla odporności na kruche pękanie K_2, oraz ewentualnie praca W_f w teście SENB, które w przypadku tego testu dla odmiany Jonagold są zbliżone. Natomiast spośród deskryptorów emisji akustycznej, zależnie od testu, jest to wykładnicza wartość liczby zdarzeń (oznaczona jako exp(N_P)) w teście przebicia lub A_{TPA} i A_{SENB} w testach TPA i SENB. Wyjątek stanowi najwyższa wartość R dla korelacji liczby zdarzeń N_{SENB} z oceną sensoryczną dla odmiany Elstar w teście SENB.

Porównując te współczynniki, można stwierdzić, że w większości przypadków w poszczególnych testach wymienione deskryptory emisji akustycznej lepiej korelują (lub są na bardzo zbliżonym poziomie jak to ma miejsce dla odmiany Jonagold w teście TPA) z cechami oceny sensorycznej niż parametry określane na podstawie testów mechanicznych. Należy podkreślić, że wymienione wyżej deskryptory emisji akustycznej wykazują najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkimi cechami oceny sensorycznej. Pokazuje to, że wybrane deskryptory dokładniej charakteryzują tekturę poszczególnych odmian jabłek niż ich parametry mechaniczne.

Tabela 13. Matryca współczynników korelacji R pomiędzy cechami oceny sensorycznej (KR – kruchość, TW – twardość, CH – chrupliwość, SO – soczystość, MA – mączystość, TE – ogólna ocena tekstury) i deskryptorami emisji akustycznej (N_P, N_{TPA}, N_{SENB} – liczba zdarzeń, A_P, A_{TPA}, A_{SENB} – średnia amplituda) oraz parametrami mechanicznymi odpowiednio w testach przebicia – P (F_P –jędrność), profilowej analizy tekstury – TPA ($H1$ – twardość1, $H2$ – twardość2, C_O – spójność, S_P – elastyczność) i trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB (W_f – praca, K_2 – odporność na kruche pękanie). Pogrubiono parametry o najwyższych korelacjach z oceną sensoryczną

Table 13. Correlation matrix between sensory attributes (KR– crispness, TW – hardness, CH – crunchiness, SO – juiciness, MA – mealiness, TE – overall texture) and AE descriptors (N_P, N_{TPA}, N_{SENB}, – AE events, A_P, A_{TPA}, A_{SENB} – mean of AE amplitude) and mechanical parameters in puncture – P, (F_P –firmness), texture profile analysis – TPA ($H1$ – hardness1, $H2$ – hardness2, C_O – cohesiveness S_P – springiness), single edge notched bend – SENB (W_f – work, K_2 – fracture toughness). Parameters with the highest correlation with sensory analysis are highlighted

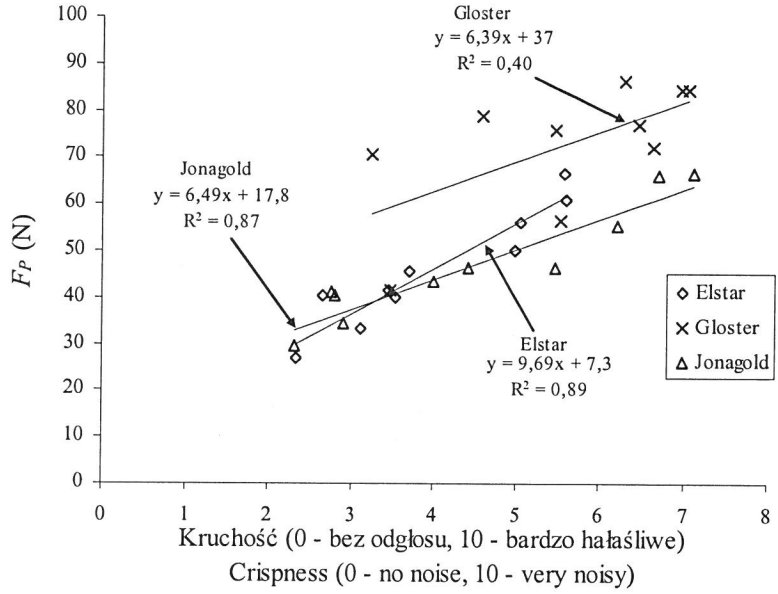
Parametr	Elstar						Gloster						Jonagold					
Parameter	KR.	TW.	CH.	SO.	MA.	TE.	KR.	TW.	CH.	SO.	MA.	TE.	KR.	TW.	CH.	SO.	MA.	TE.
exp(N_P)	**0,97**	**0,96**	**0,95**	**0,97**	**–0,76**	**0,90**	**0,74**	**0,71**	**0,70**	**0,76**	**–0,65**	**0,62**	**0,95**	**0,98**	**0,94**	**0,90**	**–0,87**	**0,95**
A_P	0,87	0,91	0,89	0,88	–0,56	0,81	0,60	0,59	0,60	0,75	–0,55	0,48	0,92	0,93	0,94	0,89	–0,64	0,89
F_P	**0,95**	**0,96**	**0,93**	**0,94**	**–0,76**	**0,88**	**0,63**	**0,61**	**0,61**	**0,71**	**–0,66**	**0,52**	**0,94**	**0,96**	**0,95**	**0,91**	**–0,74**	**0,92**
exp(N_{TPA})	0,88	0,86	0,86	0,85	–0,83	0,83	0,87	0,85	0,85	0,75	–0,66	0,74	0,94	0,95	0,92	0,88	–0,87	0,94
A_{TPA}	**0,98**	**0,98**	**0,98**	**0,97**	**–0,82**	**0,94**	**0,88**	**0,88**	**0,89**	**0,88**	**–0,82**	**0,77**	**0,97**	**0,97**	**0,95**	**0,94**	**–0,84**	**0,97**
$H1$	0,89	0,90	0,86	0,88	–0,65	0,82	0,47	0,45	0,44	0,58	–0,60	0,36	0,95	0,97	0,95	0,91	–0,79	0,93
$H2$	**0,94**	**0,96**	**0,91**	**0,93**	**–0,73**	**0,89**	**0,60**	**0,58**	**0,57**	**0,72**	**–0,70**	**0,50**	**0,97**	**0,98**	**0,97**	**0,94**	**–0,80**	**0,96**
C_O	0,75	0,78	0,70	0,73	–0,54	0,68	0,46	0,44	0,43	0,63	–0,55	0,37	0,90	0,91	0,92	0,89	–0,69	0,87
S_P	0,72	0,68	0,64	0,68	–0,79	0,67	–0,16	–0,16	–0,19	–0,16	–0,09	–0,19	–0,63	–0,58	–0,63	–0,60	0,21	–0,61
N_{SENB}	**0,98**	**0,98**	**0,98**	**0,96**	**–0,78**	**0,97**	0,81	0,79	0,79	0,84	–0,83	0,76	0,87	0,89	0,90	0,85	–0,62	0,84
A_{SENB}	0,88	0,88	0,88	0,86	–0,82	0,93	**0,87**	**0,87**	**0,87**	**0,83**	**–0,86**	**0,83**	**0,93**	**0,93**	**0,95**	**0,92**	**–0,65**	**0,91**
W_f	0,85	0,85	0,82	0,86	–0,71	0,83	0,20	0,17	0,17	0,31	–0,34	0,09	0,87	0,90	0,88	0,84	–0,73	0,84
K_2	**0,87**	**0,87**	**0,85**	**0,88**	**–0,73**	**0,86**	**0,52**	**0,49**	**0,48**	**0,59**	**–0,62**	**0,44**	**0,87**	**0,89**	**0,88**	**0,84**	**–0,74**	**0,84**

Na rysunkach 32-37 przedstawiono zależność wybranych parametrów oceny instrumentalnej z kruchością uzyskaną w ocenie sensorycznej. Do prezentacji wybrano te parametry, które najlepiej korelują z oceną sensoryczną w poszczególnych testach instrumentalnych. Każdy punkt na wykresie jest średnią dla danego okresu i sposobu przechowywania.

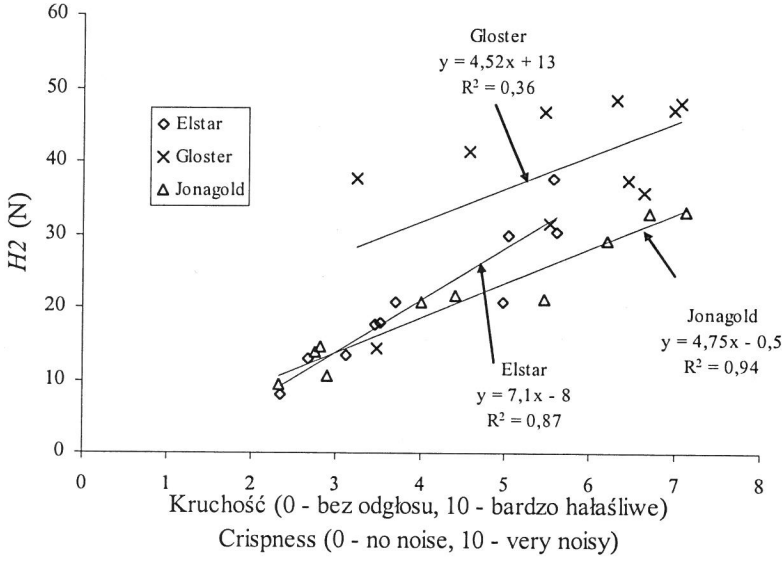
Wyniki przedstawione na rysunkach 32-34 oraz wysokie korelacje cech oceny sensorycznej z niektórymi parametrami mechanicznymi (tab. 13) potwierdzają, że testy mechaniczne mogą być z powodzeniem stosowane do oceny tekstury jabłek. Jednak używając testu mechanicznego należy uwzględnić odmianę jabłek. Widoczne jest wyraźne przesunięcie krzywych dla odmiany Gloster w stosunku do pozostałych odmian. Dla odmiany tej zanotowano najniższe współczynniki korelacji dla zależności parametrów uzyskanych w analizie sensorycznej z parametrami mechanicznymi. Świadczy to o tym, że użycie parametrów mechanicznych jako wyznaczników, w tym wypadku kruchości, wymaga indywidualnego skalowania dla poszczególnych odmian jabłek. Dotyczy to również innych zależności parametrów mechanicznych z cechami w ocenie sensorycznej. Szczególnie interesujące jest to, że przesunięcie dla odmiany Gloster zaobserwowano również w przypadku zależności parametrów mechanicznych z twardością uzyskaną w analizie sensorycznej. Świadczy to o tym, że rozumienie twardości przez osobę spożywającą fragment jabłka nie odpowiada ściśle wytrzymałościowym parametrom mechanicznym tkanki, tj. jędrności, twardości lub odporności na kruche pękanie.

Pomiary parametrów mechanicznych w testach destrukcyjnych są obecnie najczęściej stosowanym instrumentalną metodą oceny zespołu cech tekstury jabłek. Uważa się, że poprawnie symulują procesy podczas gryzienia i żucia produktów spożywczych. Wyniki prezentowane na rysunkach 32-34 i tabeli 13 potwierdzają te obserwacje. Jednak niektóre cechy tekstury takie jak kruchość i chrupliwość, są przede wszystkim związane z natężeniem i częstością występowania zdarzeń akustycznych podczas nagryzania tkanki. Jak stwierdzono wcześniej, liczba zdarzeń N oraz średnia amplituda A silniej koreluje z cechami oceny sensorycznej niż parametry mechaniczne. Prace prowadzone dotychczas przez innych autorów pokazują, że bardziej kruchy produkt emituje zazwyczaj głośniejszy dźwięk o wyższych częstotliwościach (Dacremont 1995, Lee i in. 1988, Vickers 1984, 1985). Zauważono również, że zarówno liczba akustycznych zdarzeń n oraz ich średnia amplituda A (Drake 1965) lub iloczyn tych wielkości nA (Vickers 1983) korelują pozytywnie z oceną organoleptyczną żywności. W powyższych pracach rejestrowano dźwięk podczas nagryzania próbki przez osobę oceniającą produkt. Dlatego nie można tych metod zaliczyć do typowo instrumentalnych.

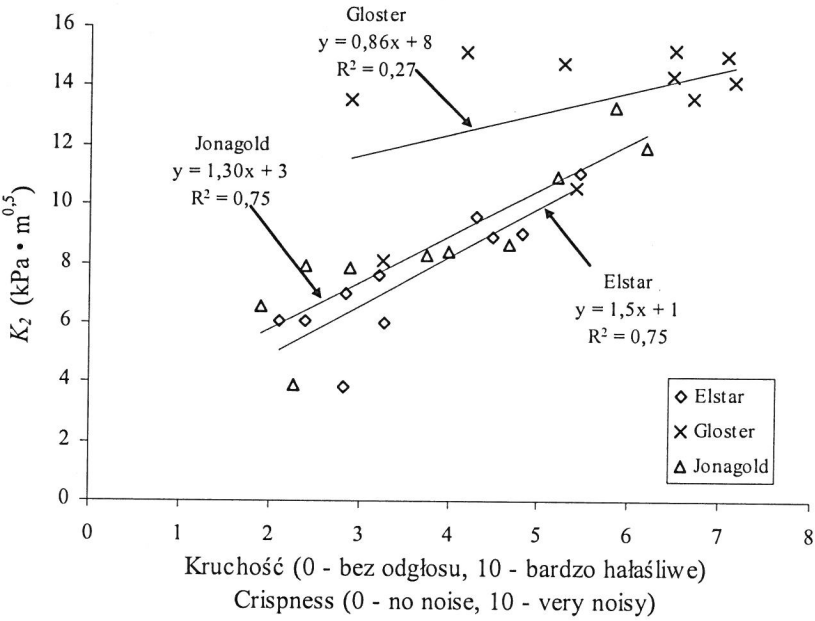
Uzyskane w opisywanym eksperymencie wysokie korelacje liczby zdarzeń N i średniej amplitudy A sygnału emisji akustycznej z kruchością i chrupliwością



Rys. 32. Zależność pomiędzy kruchością jabłek i jędrnością F_P w teście przebicia
Fig. 32. Relationship between apples crispness and firmness F_P in puncture test



Rys. 33. Zależność pomiędzy kruchością jabłek i twardością *H2* w teście profilowej analizy tekstury – TPA
Fig. 33. Relationship between apples crispness and hardness *H2* in texture profile analysis test – TPA



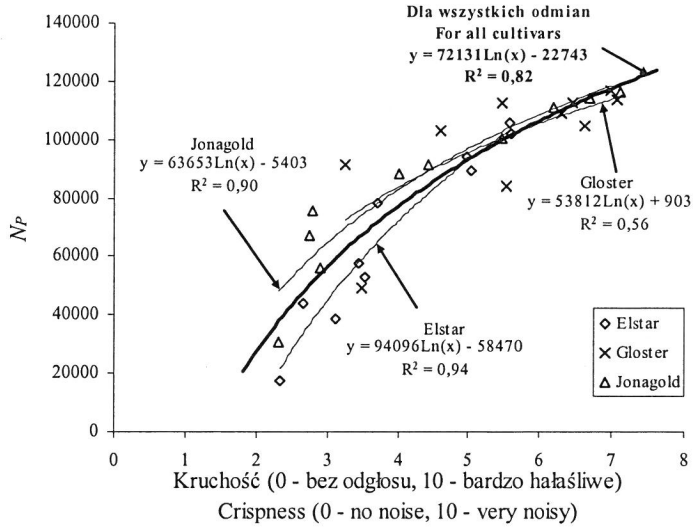
Rys. 34. Zależność pomiędzy kruchością jabłek i odpornością na kruche pękanie K_2 w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB
Fig. 34. Relationship between apples crispness and fracture toughness K_2 in single edge notched bend test – SENB

potwierdzają, że osoby oceniające te cechy mogą kierować się przede wszystkim częstością występowania zdarzeń akustycznych lub/i ich amplitudą. Podjęto również próbę określenia korelacji iloczynu $N \cdot A$ wartości uzyskanych w proponowanej metodzie z oceną sensoryczną (podobnie jak w pracy Vickers (1983)), jednak nie uzyskano znaczącego polepszenia współczynników korelacji między tymi ocenami. Uzyskane współczynniki dla iloczynu były niższe niż dla N i A traktowanych oddzielnie. Jak wspomniano wcześniej, w niniejszym eksperymencie nie zauważono zmian widma częstotliwościowego sygnału EA podczas przechowywania, więc niemożliwe jest stwierdzenie czy również zakres częstotliwości emitowanego sygnału podczas testu mechanicznego koreluje z oceną sensoryczną.

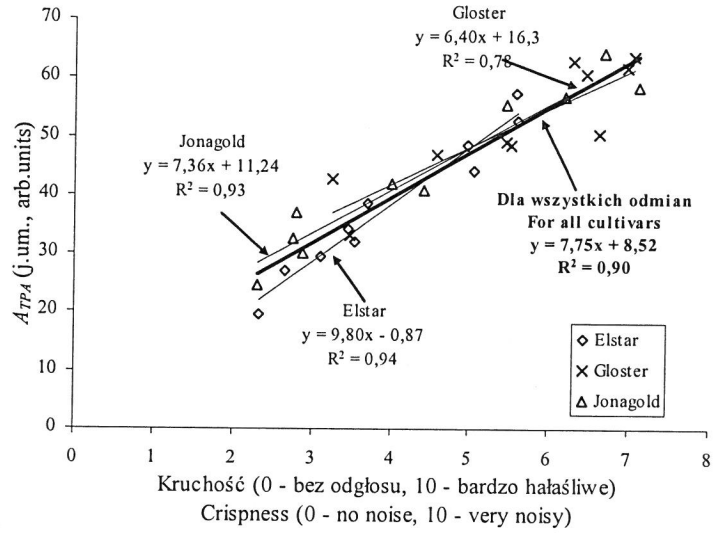
Nie tylko kruchość i chrupliwość, a również pozostałe cechy związane pośrednio z emisją dźwięku podczas spożycia, a bezpośrednio związane ze sposobem pękania struktury komórkowej, czyli soczystość i mączystość są bardzo dobrze wyznaczane przez pomiar liczby zdarzeń lub średniej amplitudy emisji akustycznej w testach mechanicznych. Soczystość i mączystość, dwie przeciwstawne cechy, są związane z podatnością struktury komórkowej na pękanie, a dokładniej na sposób jej pękania. Soczystość jest tym wyższa, im więcej ścian komórkowych zostanie zniszczonych

i tym samym więcej soku wewnątrzkomórkowego zostanie uwolniona. Z tego względu soczystość koreluje z liczbą zdarzeń EA, które jak udowodniono, są wynikiem pękania poszczególnych ścian komórkowych. Mączystość jabłek pojawia się, gdy dominującym procesem podczas nagryzania staje się pękanie międzykomórkowe, które nie jest źródłem sygnału emisji akustycznej. Ujemna korelacja liczby zdarzeń EA z mączystością jest wynikiem jednoczesnej mniejszej liczby pęknięć ścian komórkowych. Silna korelacja deskryptorów EA z twardością jest spowodowana tym, że amplituda sygnału akustycznego jest zależna od stanu naprężenia w źródle EA i od sprężystości materiału. Im wyższe te wartości, tym wyższa amplituda sygnału, ponieważ uwalniana energia w procesie pękania może być wówczas wyższa i propagująca w materiale fala jest słabiej tłumiona.

Na rysunkach 35-37 widoczne jest, że krzywe zależności pomiędzy wybranymi deskryptorami emisji akustycznej a cechami oceny sensorycznej dla poszczególnych odmian leżą bardzo blisko siebie, inaczej niż to było w przypadku zależności parametrów mechanicznych z oceną sensoryczną (odmiana Gloster odbiegała od pozostałych odmian). Wynik ten sugeruje, że ocena kruchości przy pomocy emisji akustycznej w testach mechanicznych może być niezależna od testowanej odmiany, a jedynie od stanu materiału związanego ze sposobem i terminem przechowywania. Podobnie jest w przypadku innych cech sensorycznych badanych odmian, dla których zależności z wartościami deskryptorów emisji akustycznej można przedstawić wspólną krzywą.

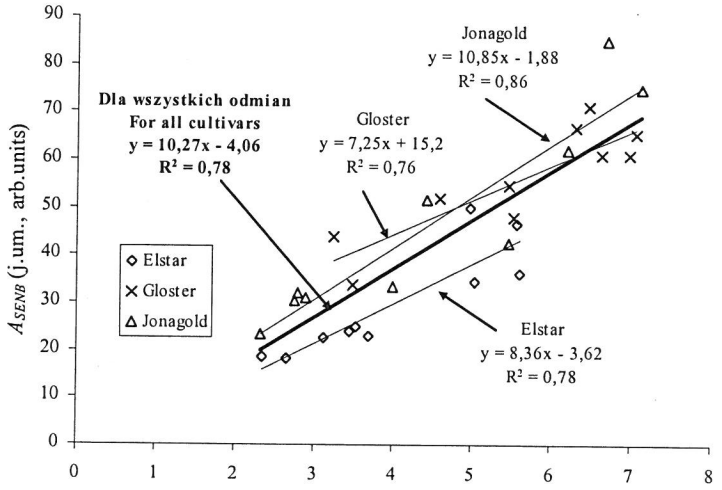


Rys. 35. Zależność pomiędzy kruchością jabłek i liczbą zdarzeń N_P w teście przebicia
Fig. 35. Relationship between apples crispness and AE events N_P in puncture test



Rys. 36. Zależność pomiędzy kruchością jabłek i średnią amplitudą A_{TPA} w teście profilowej analizy tekstury – TPA

Fig. 36. Relationship between apples crispness and mean of AE amplitude A_{TPA} in texture profile analysis test – TPA



Rys. 37. Zależność pomiędzy kruchością jabłek i średnią amplitudą A_{SENB} w teście trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB

Fig. 37. Relationship between apples crispness and mean of AE amplitude A_{SENB} in single edge notched bend test – SENB

5. PODSUMOWANIE

Dźwięk generowany podczas spożywania jabłek odgrywa ważną rolę w ocenie ich tekstury. Powstanie sygnału akustycznego jest związane z nagłymi procesami pękania struktury komórkowej jabłek. W tkance roślinnej podstawowy szkielet mechaniczny, odpowiedzialny za określone właściwości teksturalne, tworzony jest przez połączone ze sobą komórki. Sposób pękania takiej struktury oprócz wrażeń dźwiękowych, czyli kruchości i chrupliwości, ma również odzwierciedlenie w tak ważnych parametrach tekstury jak soczystość i mączystość. Dlatego poznanie mechanizmów pękania i praw nimi rządzących jest niezmiernie istotne dla dalszych prac związanych z kontrolą i poprawą jakości jabłek oraz innych owoców i warzyw.

W pracy zaproponowano oryginalne i nowe rozwiązania metodyczne oparte na metodzie rejestracji emisji akustycznej do instrumentalnej oceny tekstury jabłek oraz do opisu procesów pękania podczas różnych testów mechanicznych w tym materiale. Metoda emisji akustycznej była wykorzystywana dotychczas dla wielu innych materiałów. Znalazła ona szereg istotnych zastosowań, również wśród produktów spożywczych, głównie suchych. Dotychczasowe zastosowania emisji akustycznej do świeżych tkanek roślinnych (materiałów uwodnionych, tj. bulwy ziemniaka i w niewielkim stopniu jabłka) ograniczone były do wybranych zagadnień związanych z detekcją procesu pękania i poznania wpływu wybranych parametrów, takich jak prędkość odkształcenia i turgor, na początkowe etapy tego procesu. Natomiast w niniejszej pracy po raz pierwszy wykonano kompleksowe badania dla jednego materiału z uwzględnieniem jego różnych cech oraz przy użyciu różnych testów mechanicznych. Założeniem tych badań było skoncentrowanie się na praktycznych aspektach oceny tekstury jabłek przy pomocy metody emisji akustycznej, a ich dalekosiężnym celem było uzyskanie wiedzy potrzebnej do rozpoczęcia prac konstrukcyjnych nad nowym urządzeniem do instrumentalnej oceny tekstury jabłek na podstawie sygnału akustycznego. Przeprowadzone badania przyniosły szereg metodycznych i praktycznych wniosków w tym zakresie. Ogólnie można stwierdzić, że uzyskano nową metodę, która za pomocą parametrów związanych z sygnałem akustycznym generowanym podczas testu mechanicznego, w sposób znacznie dokładniejszy niż sam test mechaniczny, umożliwia opis procesów pękania w tym materiale oraz monitorowanie zmian tekstury jabłek, szczególnie wielkości związanych z dźwiękiem generowanym podczas niszczenia.

5.1. Źródła emisji akustycznej i analiza procesu pękania jabłek

Podstawowym procesem pękania, który można badać przy pomocy zaproponowanej metody jest rozrywanie ścian komórkowych. Ściany komórkowe, będąc materiałem sprężystym o pewnej granicy wytrzymałości na rozciąganie, pękają, ponie-

waż wewnątrz komórek istnieje ciśnienie, które wzrasta wraz z odkształcaniem komórki. Pękając, ściana komórkowa generuje falę sprężystą, propagującą w materiale i docierającą do sensora emisji akustycznej. Posługując się ogólnie przyjętą nomenklaturą, ściana komórkowa jest źródłem emisji akustycznej. Hipoteza ta została częściowo udowodniona w poprzednich pracach z tego zakresu (Zdunek i Konstankiewicz 2001, 2004). Wyniki uzyskane w niniejszym eksperymencie to potwierdzają. Proces pękania w świeżej tkance roślinnej może również odbywać się w pektynowych połączeniach międzykomórkowych. Pektyny będąc materiałem plastycznym, co wynika z literatury, nie pękają w gwałtowny sposób, więc jest mało prawdopodobne by mogły stać się źródłem sygnału akustycznego. Użycie jabłka jako materiału badawczego charakteryzującego się szybszym i bardziej znaczącym zakresem zmian w postaci degradacji pektyn pod wpływem różnych czynników (temperatura, przechowywanie), niż to ma miejsce na przykład w ziemniaku, znacznie lepiej udokumentowało to zagadnienie.

Wydaje się, że degradacja pektyn, powodująca utratę spójności międzykomórkowej, ma najważniejszy wpływ na właściwości mechaniczne, procesy pękania oraz w konsekwencji na teksturę jabłek. Utrata spójności międzykomórkowej spowodowana enzymatycznymi procesami zachodzącymi podczas przechowywania lub też temperaturą (maceracja) powoduje zmianę preferencyjnego sposobu pękania tkanki jabłka z pękania poprzez rozrywanie ścian komórkowych na pękanie międzykomórkowe. Spada liczba rozerwanych ścian komórkowych i zwiększa się liczba odseparowanych od siebie komórek w danym teście mechanicznym na jednostkę odkształcenia. Maleją również wartości parametrów wytrzymałościowych tkanki, ponieważ jeden ze składników szkieletu komórkowego traci swą wytrzymałość. Dlatego w eksperymencie zaobserwowano spadek jędrności, twardości oraz odporności na kruche pękanie tkanki jabłka pod wpływem tych czynników. Można to podsumować stwierdzeniem, że parametry wytrzymałościowe są „wrażliwe" na stopień degradacji pektyn międzykomórkowych.

Zmniejszenie się liczby pękniętych komórek w wyniku degradacji pektyn, zgodnie z postawioną hipotezą, że źródłem sygnału akustycznego są rozerwane komórki, powinno powodować zmiany w rejestrowanych wartościach deskryptorów EA. Tak rzeczywiście zaobserwowano to w eksperymencie. Zarówno liczba zdarzeń emisji akustycznej, jak i jej średnia amplituda malały wraz ze stopniem degradacji pektyn, czyli wraz ze zmniejszeniem się liczby rozerwanych komórek. Stąd, poprzez analogię, uprawnione jest stwierdzenie, że liczba zdarzeń EA może odpowiadać rzeczywistej liczbie rozerwanych ścian komórkowych w teście mechanicznym. Na potwierdzenie tej tezy przeprowadzono szacunkowe obliczenia, które wykazały, że przy założeniu pewnej średniej wielkości komórki, zarejestrowanych jest zwykle

więcej, ale o tym samym rzędzie wielkości, zdarzeń akustycznych niż szacunkowa minimalna liczba zniszczonych ścian komórkowych. Gdy dodatkowo uwzględni się trudną do oszacowania liczbę zniszczonych komórek poza obszarem zajmowanym przez wbity próbnik w teście przebicia lub uwzględni się przypadkowy rozwój szczeliny, liczba zniszczonych komórek może jeszcze bardziej się zbliżyć do liczby zarejestrowanych zdarzeń.

Średnia amplituda sygnału EA zależy głównie od stanu naprężeń w źródle oraz od tłumienia fali w materiale. Jeżeli przyjąć, że granica wytrzymałości ściany komórkowej nie zmienia się w tak znaczący sposób podczas degradacji pektyn jak to się dzieje w połączeniach międzykomórkowych, co wynika z literatury, to mięknięcie materiału w wyniku tej drugiej zmiany powoduje wzrost tłumienia i tym samym obserwowany spadek amplitudy sygnału EA podczas testów mechanicznych.

W pracy przeanalizowano również zmiany procesu pękania tkanki jabłka przy zmianie jej uwodnienia. Uwodnienie, czyli poziom wstępnego naprężenia ścian komórkowych, powoduje zmianę właściwości materiału istotnych dla procesów pękania. Wyższe wstępne naprężenie ścian komórkowych oznacza, że praca potrzebna do rozerwania ściany komórkowej będzie niższa. Na jednostkę odkształcenia w teście przebicia lub w teście TPA zajdzie więcej pęknięć w tej postaci. Uwodnienie powoduje również wzrost siły przylegania komórek do siebie. W związku z tym zmieniają się warunki rozwoju pęknięć. Materiał będzie miał tendencję do pękania poprzez rozrywanie ścian komórkowych. Ma to konsekwencje we wzroście nachylenia krzywej siła-odkształcenie w poszczególnych testach oraz we wzroście liczby zarejestrowanych zdarzeń emisji akustycznej. Wzrasta również średnia amplituda sygnału akustycznego ze względu na wzrost sprężystości i spadek tłumienia propagującej w materiale fali sprężystej. Wyniki tej części eksperymentu również potwierdzają tezę, że źródłem sygnału akustycznego w tkance jabłka są rozrywane ściany komórkowe.

5.2. Emisja akustyczna w ocenie tekstury jabłek

Jabłka świeże i jędrne są również kruche. Podobnie tkanka jabłka o wysokim turgorze i nie poddana działaniu wysokiej temperatury ma cechy materiału bardziej kruchego. Kruchość należy rozumieć dwojako, jako cecha „akustyczna" związana z głośnym dźwiękiem generowanym podczas jej niszczenia oraz jako cecha „mechaniczna" związana z wyższą podatnością na pękanie (mniejsza siła potrzebna do zapoczątkowania procesu pękania widocznego na krzywej siła-odkształcenie). W tym pierwszym przypadku, do jej określenia może służyć proponowana metoda emisji akustycznej. W drugim, wystarczające jest użycie testu mechanicznego, chociaż zazwyczaj obserwuje się wysokie korelacje pomiędzy parametrami akustycznymi i mechanicznymi. Kruchość jako cecha tekstury rozu-

miana jest w ten pierwszy sposób, tak też została zdefiniowana na potrzeby analizy sensorycznej w eksperymencie, im głośniejszy dźwięk tym wyższa kruchość. Jak wykazano, liczba zdarzeń EA lub średnia amplituda sygnału EA, zależnie od testu, bardzo dobrze koreluje z oceną sensoryczną jabłek. Szczególnie wysokie korelacje uzyskano dla tych cech oceny sensorycznej, które związane są z procesami pękania, tj. kruchość, chrupliwość i soczystość. Te cechy sensoryczne bardzo wysoko korelują między sobą, ponieważ wynikają z tego samego procesu. Jak wspomniano wcześniej, rozrywane ściany komórkowe jako element sprężysty są źródłem sygnału akustycznego. Dlatego liczba rozerwanych ścian będzie związana z odczuciem kruchości i chrupliwości. Soczystość, będąca wynikiem uwolnienia soku wewnątrzkomórkowego, również zależy od liczby rozerwanych ścian komórkowych. Amplituda sygnału dźwiękowego docierającego do narządu słuchu osoby oceniającej zależeć będzie również od ogólniej sprężystości tkanki, w tkance jędrnej tłumienie będzie niższe niż w tkance miękkiej. W związku z tym odczuwana kruchość czy chrupliwość będzie zależna nie tylko od liczby pękniętych komórek, ale również od tego o ile sygnał zostanie stłumiony. W związku z tym instrumentalny pomiar liczby zdarzeń EA oraz średniej amplitudy EA, które są zależne od tych samych zjawisk co organoleptycznie oceniana kruchość, chrupliwość i soczystość, w proponowanej metodzie daje możliwość bezpośredniej instrumentalnej oceny wyżej wymienionych cech sensorycznych na podstawie zjawisk generowania i propagacji fali akustycznej w materiale. Potwierdzają to wyższe współczynniki korelacji dla deskryptorów EA niż dla parametrów mechanicznych. Jest to jeden z najważniejszych sukcesów niniejszej pracy, który daje podstawę do rozpoczęcia prac mających na celu wprowadzenie do praktyki metody emisji akustycznej i opisanych w pracy rozwiązań pomiarowych. Ważnym wynikiem użycia deskryptorów emisji akustycznej do instrumentalnej oceny tekstury jabłek, z punktu widzenia potencjalnej aplikacji, jest możliwość użycia jednej krzywej kalibracyjnej. Jak zaobserwowano dla trzech badanych odmian, zależności deskryptor EA – cecha oceny sensorycznej pokrywają się.

Potencjalne zastosowania praktyczne metody emisji akustycznej w proponowanym rozwiązaniu nie ograniczają się tylko do zastąpienia panelu sensorycznego w ocenie cech „dźwiękowych" tekstury jabłek. Możliwe jest również monitorowanie zmian właściwości tego materiału podczas przechowywania, szczególnie tych związanych z uwodnieniem i stopniem degradacji pektyn. Również w tym przypadku zaobserwowano znaczną poprawę współczynników korelacji, gdy do monitorowania zmian podczas przechowywania w warunkach symulowanego obrotu handlowego użyje się deskryptorów emisji akustycznej zamiast parametrów mechanicznych.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych testów z użyciem nowego systemu opartego na pomiarach mechanicznych z emisją akustyczną dla jabłek z uwzględnieniem stopnia ich uwodnienia, temperatury oraz czasu i sposobu przechowywania, jak również porównanie proponowanej metody instrumentalnej z oceną sensoryczną sformułowano następujące, najważniejsze wnioski:

1. W celu analizy właściwości tkanki jabłka pod kątem zjawisk akustycznych podczas testów mechanicznych wystarczający jest pomiar sygnału emisji akustycznej w paśmie 1-16 kHz.
2. Źródłem emisji akustycznej w tkance jabłka są rozrywane w procesie odkształcania ściany komórkowe, pękanie międzykomórkowe nie generuje sygnału akustycznego.
3. Pomiar liczby zdarzeń emisji akustycznej podczas testu może dostarczyć ilościowej informacji o liczbie pękniętych ścian komórkowych w tkance jabłka.
4. Wartości zarejestrowanych deskryptorów emisji akustycznej zależą od stopnia degradacji pektyn tkanki jabłka. Degradacja pektyn w wyniku przechowywania lub temperatury powoduje zmianę sposobu pękania z pękania ścian komórkowych na pękanie międzykomórkowe. Towarzyszy temu istotny spadek wartości liczby zdarzeń i średniej amplitudy sygnału emisji akustycznej.
5. Wartości zarejestrowanych deskryptorów emisji akustycznej zależą od turgoru tkanki jabłka. Wraz ze wzrostem turgoru (mniejsze wartości osmotyczności) wzrasta liczba rozerwanych ścian komórkowych na jednostkę odkształcenia. Liczba zdarzeń i średnia amplituda sygnału emisji akustycznej istotnie ujemnie korelują z osmotycznością soków wewnątrzkomórkowych tkanki jabłka.
6. Cechy oceny sensorycznej jabłek silnie korelują między sobą, szczególnie wysokie współczynniki korelacji zanotowano pomiędzy cechami związanymi z procesami pękania (soczystość, mączystość) i głośnością dźwięku odbieranego przez oceniających (kruchość, chrupliwość). W ogólnej ocenie tekstury jabłek najważniejszymi cechami są w kolejności: soczystość, kruchość i chrupliwość.
7. W celu instrumentalnej oceny tekstury jabłek możliwe jest użycie niektórych parametrów mechanicznych testów przebicia, profilowej analizy tekstury – TPA lub trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym – SENB. Jednak deskryptory emisji akustycznej lepiej korelują z wynikami analizy sensorycznej jabłek niż parametry mechaniczne. Liczba zdarzeń i średnia amplituda sygnału emisji akustycznej w dowolnym teście mechanicznym może być użyta do oceny soczystości, kruchości i chrupliwości związanych z procesami pękania tkanki jabłek.
8. Ocena tekstury jabłek przy pomocy emisji akustycznej może być dokonywana niezależnie od odmiany. Możliwe jest użycie jednej krzywej kalibracyjnej dla badanych odmian.

7. PIŚMIENNICTWO

Abbott J.A, Affeldt H.A., Liljedahl L.A., 1992. Firmness measurements of stored 'Delicious' apples by sensory methods, Magness-Taylor, and sonic transmission. Journal of the American Society for Horticultural Science,117, 590-595.

Abbott J.A., 1999. Quality measurements of fruits and vegetables. Postharvest Biology and Technology, 15, 201-225.

Abbott J.A., Lu R., Upchurch B.L., Stroshine R.L., 1997. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. Horticulture Review, 20, 1-120.

Alvarez M. D., Canet W. Lopez M.E., 2002. Influence of deformation rate and degree of compression on textural parameters of potato and apple tissues in texture profile analysis. European Food Research and Technology, 215, 13-20.

Alvarez M.D, Saunders D.E.J., Vincent J.F.V., 2000a. Effect of turgor pressure on the cutting energy of stored potato tissue. European Food Research and Technology, 210, 331-339.

Alvarez M.D., Canet W., 2002. Effect of osmotic adjustment on the rheology of potato tissue. The use of discriminant analysis for interpretation. European Food Research and Technology, 214, 83-90.

Alvarez M.D., Saunders D.E.J., Vincent J.F.V., Jeronimidis G., 2000b. An engineering method to evaluate the crisp texture of fruit and vegetables. Journal of Texture Stud., 31, 457-473.

ASAE 2000. Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASAE Standard 368.4. Am. Soc. Agr. Eng., St. Joseph, MI.

Bajema R.W., Hyde G.M., Baritelle A.L., 1998. Turgor and temperature effects on dynamic failure properties of potato tuber tissue. Transaction of ASAE, 41, 3, 741-746.

Bateman D.F., 1968. The enzymatic maceration of plant tissue. Netherlands Journal of Plant Pathology, 74, 67-90.

Ben-Arie R., Kislev N., 1979. Ultrastructural changes in the cell wall of ripening apple and pear fruit. Plant Physiology, 64, 197-202.

Bourne, M. C., 2002. Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. Second Edition. Academic Press, London.

Chen J., Karlsson C., Povey M., 2005. Acoustic envelope detector for crispness assessment of biscuits. Journal of Texture Studies, 36, 139-156.

Chen P., Sun Z., 1991. A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. Journal of Agricultural Engineering Research, 49, 85-98.

Christensen C.M., Vickers Z.M., 1981. Relationships of chewing sounds to judgments of food crispness. Journal of Food Science, 46, 574-578.

Cooke J.R., Rand R.H., 1973. A mathematical study of resonance in fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model. Journal of Agricultural Engineering Research, 18, 141-157.

Dacremont C., 1995. Spectral composition of eating sound generated by crispy, crunchy and crackly foods. Journal of Texture Studies, 26, 27-43.

De Belie N., De Smedt V., De Baerdemaeker J., 2000. Principal component analysis of chewing sounds to detect differences in apple crispness, Postharvest Biology and Technology, 18, 2, 109-119.

De Belie N., Harker F.R., De Baerdemaeker J., 2002. Crispness judgement of royal gala apples based on chewing sounds. Biosystems Engineering, 81, 3, 297-303.

De Belie N., Sivertsvik M., De Baerdemaeker J., 2003. Differences in chewing sounds of dry-crisp snacks by multivariate data analysis. Journal of Sound and Vibration, 266, 625-643.

De Belie N., Tu K., Jancsók P., De Baerdemaeker J., 1999. Preliminary study on the influence if turgor pressure on body reflectance of red laser light as a ripeness indicator for apples. Postharvest Biology and Technology, 16, 279-284.

De Smedt V., Pauwels E., De Baerdemaeker J., Nicolai B., 1998. Microscopic observation of mealiness in apples: a quantitative approach. Postharvest Biology and Technology, 14, 151-158.

Dobrzanski jr. B., Rybczynski R., Gołacki K., 2000. Quality parameter of storage apple as a firmness. International Agrophysics, 14, 2, 149-157.

Drake B.K., 1963. Food crushing sounds. An introductory study. Journal of Food Science, 28, 233–241.

Drake B.K., 1965. Food crushing sounds. Comparison of subjective and objective data. Journal of Food Science, 30, 556-559.

Duizer L., 2001. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. Food Science and Technology, 12, 17-24.

Dumas B., Xu W.L., Bronlund J., 2005. Jaw mechanism modeling and simulation. Mechanism and Machine Theory, 40, 821-833.

Duprat F., Grotte M.G., Pietri E., Studman C.J., 1995. A multi-purpose firmness tester for fruits and vegetables. Computer and Electronics in Agriculture, 12, 211-223.

Fillion L., Kilcast D., 2000. Concept and measurements of freshness of fruits and vegetables. Leatherhead Food RA Research Reports No. 770.

Fillion L., Kilcast D., 2002. Consumer perception of crispness and crunchiness in fruits and vegetables. Food Quality and Preference, 13, 23-29.

German J., 2005. Podstawy Mechaniki Pękania, Skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych. Wydawnictwo Inst. Odlewnictwa, Kraków.

Gołacki K., 1993. Influence of deformation speed and water potential on parameters of plant tissue critical resistance. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 399, 77-81.

Gondek E., Lewicki P.P., Ranachowski Z., 2006. Influence of water activity on the acoustic properties of breakfast cereals. Journal of Texture Studies, 37, 497-515.

Gross K.C., Wang C.Y., Saltveit M., 2002. The commercial storage of fruits, vegetables and florist and nursery stocks. Agricultural Handbook, No 66, doi: http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/.

Haman J., Konstankiewicz K., 2000. Destruction processes in the cellular medium of a plant – theoretical approach. International Agrophysics, 14, 37-42.

Harker F.R., Hallett I.C., 1992. Physiological changes associated with development of mealiness of apple fruit during cool storage. Hortscience, 27, 12, 1291-1294.

Harker F.R., Maindonald J., Murray S.H., Gunson F.A., Hallett I.C., Walker S.B., 2002. Sensory interpretation of instrumental measurements 1: texture of apple fruit. Postharvest Biology and Technology, 24, 225-239.

Harker F.R., Redgwell R.J., Hallet I.C., Murray S.H., 1997a. Texture of fresh fruit. Horticulture Reviews, 20, 121-224.

Harker F.R., Stec M.G.H., Hallett I.C., Bennett C.L., 1997b. Texture of parenchymatous plant tissue: a comparison between tensile and other instrumental and sensory measurements of tissue strength and juiciness. Postharvest Biology and Technology, 11, 63-72.

Harker F.R., White A., Gunson F.A., Hallett I.C., De Silva H.N., 2006. Instrumental measurement of apple texture: A comparison of the single-edge notched bend and penetrometer. Postharvest Biology and Technology, 39, 185-192.

Hartfield S.G.S., Knee M., 1988. Effect of water loss on apples in storage. International Journal of Food Science and Technology, 23, 575-585.

Ilker R., Szczesniak A.S, 1990. Review paper structural and chemical bases for texture of plant foodstuffs. Journal of Texture Studies, 21, 1-36.

ISO 8589:1998 – Analiza sensoryczna – Ogólne wytyczne dotyczące projektowania pracowni analizy sensorycznej.

Konopacka D., Płocharski W.J., 2002. Effect of picking maturity, storage technology and shelf-life on changes of apple firmness of 'Elstar', 'Jonagold' and 'Gloster' cultivars. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 10, 15-26.

Konopacka D., Płocharski W.J., 2004. Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability. Postharvest Biology and Technology, 32, 205-211.

Konstankiewicz K., Zdunek A., 2000. Method of acoustic emission in the studies of cracking processes in plant tissues, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 3, 2, doi: www.ejpau.media.pl.

Konstankiewicz K., Zdunek A., 2001. Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue. International Agrophysics, 15, 1, 27-30.

Kowalska H., Lenart A., 2003. Ruch wody i substancji rozpuszczonych w jabłkach odwadnianych osmotycznie. Technica Agraria, 2, 1, 13-22.

Kunzek H., Kabbert R., Gloyna D., 1999. Aspects of material science in food processing: changes in plant cell walls of fruits and vegetables. Z Lebensm Unders Forsch, A 208, 233-50.

Lapsley K.G., Escher F.E., Hoehn E., 1992. The cellular structure of selected apples varieties. Food Structure, 11, 339-349.

Lee III, Deibel W.E, Glembin A.E., Munday E.G., 1988. Analysis of food crushing sounds during mastification: frequency-time studies. Journal of Texture Studies, 19, 27-38.

Lewicki P.P., Gondek E., Ranachowski Z., 2003. Influence of water activity on acoustic emission of breakfast cereals. AMAS Workshop on Nondestructive Testing of Materials NTM'03, 93-109.

Lin T.T., Pitt R.E., 1986. Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure. Journal of Texture Studies, 17, 291-313.

Lucas P.W., Prinz J.F., Agrawal K.R., Bruce I.C., 2002. Food physics and oral physiology. Food Quality and Preference, 13, 203-213.

Luyten H., Plijter J.J., Van Vliet T., 2004. Crispy/crunchy crusts of cellular solid foods: a literature review with discussion. Journal of Texture Studies, 35, 445-492.

Magness J.R., Taylor G.F., 1925. An improved type of pressure tester for the determination of fruit maturity. USDA Cir. No. 350.

Malecki I., Opilski A., 1994. Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania, PASCAL Publications, Warszawa.

Marzec A., Lewicki P.P., Ranachowski Z., Dębowski T., 2003. Cereal food texture evaluation with application of mechanical and acoustical methods. AMAS Workshop on Nondestructive Testing of Materials NTM'03, 111-131.

Mohsenin N.N., 1986. Physical properties of plant and animal materials. 2nd Ed. Gordon and Breach Science Publ., New York.

Muramatsu N., Sakurai N., Wada N., Yamamoto R., Tanaka K., Asakura T., Ishikawa-Takano Y., Nevis J., 2000. Remote sensing of fruit textural changes with laser doppler vibrometer. Journal of the American Society for Horticultural Science, 125, 120-127.

Ng A., Waldron W.K., 1997. Effect of steaming on cell chemistry of potatoes (*Solanum tuberosum* cv. Bintje) in relation to firmness. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45, 3411-3418.

Niklas K.J., 1992. Plant biomechanics, an engineering approach to plant form and function, The University Chicago Press.

Pierzynowska-Korniak G., Zadernowski R., Fornal J., Nesterowicz J. 2002. The microstructure of selected apple varieties. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 5, 2. doi: www.ejpau.media.pl.

Pitt R.E., Chen H.L., 1983. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. Transaction of ASAE, 26, 6, 1275-1280.

Pitt, R.E., 1982. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. Transaction of ASAE, 25, 6, 1776-1784.

PN – ISO 11036 – Analiza sensoryczna, Metodologia, Profilowanie tekstury.

PN – ISO 1105 – Analiza sensoryczna, Identyfikacja i wybór deskryptorów do ustalenia profilu sensorycznego z użyciem metod wielowymiarowych.

PN-87/H-04335, Metoda badania odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia, PKN, MiJ, 1987.

Prussia S.E., Astleford J.J., Hung Y-C, Hewlett R., 1994. Non-destructive firmness measuring device. U.S. Patent No. 5,372.030.

Puchalski C., Brusewitz, G.H., 1996. Watermelon abrasion resistance parameters from friction tests. Transaction of the ASAE, 39, 5, 1765 -1771.

Puchalski C., Sosnowski S., Brusewitz, G.H., 2003. Non-destructive measurements of apple firmness using friction and impact sensors. Acta Agrophysica, 2, 1, 161-171.

Puchalski C., Brusewitz, G.H., Dobrzański jr. B., Rybczyński R., 2002. Relative humidity and wetting affect friction between apple and flat surface. International Agrophysics, 16, 67-71.

Ranachowski Z., 1997. Pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej. Prace IPPT, Warszawa, 6.

Redgwell R.J., MacRae E.A., Hallett I., Fischer M., Perry J., Harker R., 1997. In vivo and in vitro swelling of cells walls during fruit ripening. Planta, 203, 162-173.

Rohm H., 1990. Consumer awareness of food texture in Austria. Journal of Texture Studies, 21, 363-373.

Roudat G., Dacremont C., Vales Pamies B., Colas B., Meste M., 2002. Crispness. A critical review on sensory and material science approaches. Trends in Food Science & Technology, 13, 217-227.

Rybczyński R., Dobrzański jr. B., 2002. Fizyczne aspekty pomiaru jędrności jabłek, Acta Agrophysica, 69.

Sanchez-Morcillo V., Perez-Arjona I., 2007. Subdiffractive propagation in a bidimansional sonic crystal. Hydroacoustics, 10, ed. Polish Acoustical Soc. Gdańsk, 85-92.

Shmulevich I., Galili N., Benichou N., 1995. Development of nondestructive method for measuring the shelf-life of mango fruit. In: Proc. Food Processing Automation IV Conf., Chicago IL, 275-287.

Stablemicrosystems, 1996. TPA Testing, doi: http://www.stablemicrosystems.com/tpa.htm.

Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Part 10, E-399-81, American Society for Testing and Materials, 592-621, 1981.

Sun Da-Wen, Li B., 2002. Microstructural change of potato tissue frozen by ultrasound-assisted immersion freezing. Journal of Food Engineering, 57, 337-345.

Szczesniak A. S., 2002: Texture is a sensory property. Food Quality and Preference, 13, 215-225.

Szczesniak A.S., 1963. Classification of textural characteristics. Journal of Food Science, 28, 385-389.

Szczesniak A.S., 1971. Consumer awareness of texture and of other food attributes, II. Journal of Texture Studies, 2, 196-206.

Szczesniak A.S., 1972. Consumer awareness of and attitudes to food texture. II: Children and Teenagers. Journal of Texture Studies, 3, 206-217.

Szczesniak A.S., 1988. The meaning of textural characteristics-crispness. Journal of Texture Studies, 19, 51-59.

Szczesniak A.S., Brandt M.A., Friedman H.H., 1963. Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and the sensory methods of texture evaluation. Journal of Food Science, 28, 397-403.

Szczesniak A.S., Khan E.L., 1971. Consumer awareness of and attitudes to foodtexture. I: Adults. Journal of Texture Studies, 2, 280-295.

Szczesniak A.S., Khan E.L., 1984. Texture contrasts and combinations: a valued consumer attribute. Journal of Texture Studies, 15, 285-301.

Szczesniak A.S., Kleyn, D.H., 1963. Consumer awareness of texture and other food attributes. Food Technology, 17, 74-77.

Szczesniak A.S., Loew B.J., Skinner E.Z., 1975. Consumer texture profile technique. Journal of Food Science, 40, 1253-1256.

Van Buren J.P., 1979. The chemistry of texture in fruits and vegetables. Journal of Texture Studies, 10, 1-23.

Vickers Z.M., 1983. Crackliness: relationships of auditory judgments to tactile judgments and instrumental acoustical measurements. Journal of Texture Studies, 15, 49-58.

Vickers Z.M., 1984. Crispness and crunchiness – a difference in pitch? Journal of Texture Studies, 15, 157-163.

Vickers Z.M., 1985. The relationships of pitch, loudness and eating technique to judgments of crispness and crunchiness of food sound. Journal of Texture Studies, 16, 85-95.

Vickers Z.M., 1980. Food Sound: How much information do they contain? Journal of Food Science, 45, 1494-1496.

Vickers Z.M., Bourne M.C., 1976. A psychoacoustical theory of crispness, Journal of Food Science, 41, 1158-1164.

Vincent J.F.V., 2004. Application of fracture mechanics to the texture of food. Engineering Failure Analysis, 11, 695-704.

Vincent J.F.V., Saunders D.E.J., Beyts P., 2002. The use of stress intensity factor to quantify "Hardness" and "Crunchiness" objectively. Journal of Texture Studies, 33, 149-59.

Waldron K.W., Parker M.L., Smith A.C., 2003. Plant cell walls and food quality. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2, 101-119.

Waldron K.W., Smith A.C., Parr A.J., Ng A., Parker M.L., 1997. New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. Trends in Food Science & Technology, 8, 213-221.

Williams J.G., Cawood M.J., 1990. European Group on Fracture: K_c and G_c Methods for Polymer. Polymer Testing, 9, 15-26.

Yoshikawa S., Nishimaru S., Tashiro T., Yoshida M., 1970. Collection and classification of words for description and food texture. I. Collection of words. Journal of Texture Studies, 1, 437-442.

Zdunek A., 2000. Zastosowanie metody emisji akustycznej do badania procesów pękania tkanek roślinnych na przykładzie tkanki bulwy ziemniaka. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN w Lublinie.

Zdunek A., Bednarczyk J., 2006. Effect of mannitol treatment on ultrasound emission during texture profile analysis of potato and apple tissue. Journal of Texture Studies. 37, 339–359.

Zdunek A., Konstankiewicz K., 1997, Acoustic emission as a method for detection of plant tissue fracturtes caused by external forces, International Agrophysics, 11, 223-227.

Zdunek A., Konstankiewicz K., 2001. Emisja akustyczna w badaniu procesów pękania tkanek roślinnych. Acta Agrophysica, 55.

Zdunek A. Konstankiewicz K., 2004. Acoustic emission in investigation of plant tissue micro-cracking. Transaction of ASAE, 47, 4, 1171-1177.

Zdunek A., Ranachowski Z., 2006. Acoustic emission in puncture test of apples during shelf-life. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Agricultural Engineering, 9, 4. doi: www.ejpau.media.pl.

8. STRESZCZENIE

Dźwięk generowany podczas spożywania jabłek odgrywa ważną rolę w ocenie ich tekstury. W tkance roślinnej podstawowy szkielet mechaniczny, odpowiedzialny za określone właściwości teksturalne, tworzony jest przez połączone ze sobą komórki. Sposób pękania takiej struktury oprócz wrażeń dźwiękowych, czyli kruchości i chrupliwości, ma również odzwierciedlenie w tak ważnych parametrach tekstury jak soczystość i mączystość. Dlatego poznanie mechanizmów pękania i praw nimi rządzących jest niezmiernie istotne dla dalszych prac związanych z kontrolą i poprawą jakości jabłek oraz innych owoców i warzyw.

Celem pracy było opracowanie instrumentalnej metody do oceny wybranych cech tekstury jabłek na podstawie metody emisji akustycznej. Przeprowadzono kompleksowe badania z użyciem nowego systemu do rejestracji sygnału emisji akustycznej w trzech testach mechanicznych: test przebicia, profilowej analizy tekstury (TPA) i trójpunktowego łamania próbki z karbem jednostronnym (SENB). Badania przeprowadzono dla trzech odmianach jabłek: Elstar, Gloster i Jonagold z uwzględnieniem sposobu i czasu przechowywania. Określono też korelację między wynikami oceny instrumentalnej przy pomocy nowej metody z oceną sensoryczną. Dodatkowo zbadano wpływ turgoru i temperatury na rozwój procesów pękania podczas różnych testów mechanicznych.

W pracy zaproponowano oryginalne i nowe rozwiązania metodyczne oparte na metodzie emisji akustycznej do instrumentalnej oceny tekstury jabłek oraz do opisu procesów pękania podczas różnych testów mechanicznych. Założeniem tych badań było skoncentrowanie się na praktycznych aspektach oceny tekstury jabłek przy pomocy tej metody, a ich dalekosiężnym celem jest uzyskanie wiedzy potrzebnej do rozpoczęcia prac konstrukcyjnych nad nowym urządzeniem do instrumentalnej oceny tekstury jabłek na podstawie sygnału akustycznego. Przeprowadzone badania przyniosły szereg metodycznych i praktycznych wniosków.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w celu analizy właściwości tkanki jabłka pod kątem zjawisk akustycznych podczas testów mechanicznych wystarczający jest pomiar sygnału emisji akustycznej w paśmie 1-16 kHz. Źródłem emisji akustycznej są rozrywane ściany komórkowe, natomiast pękanie międzykomórkowe nie generuje sygnału akustycznego. Pomiar liczby zdarzeń emisji akustycznej może dostarczyć ilościowej informacji o liczbie pękniętych ścian komórkowych. Wartości zarejestrowanych deskryptorów emisji akustycznej zależą od stopnia degradacji pektyn (w wyniku przechowywania lub działania temperatury) oraz od stopnia uwodnienia tkanki (turgoru), które mają wpływ na sposób pękania struktury komórkowej. Wraz z uwodnieniem wzrasta liczba rozerwanych ścian ko-

mórkowych na jednostkę odkształcenia w teście mechanicznym, tkanka uwodniona staje się bardziej „krucha". Wzrost temperatury tkanki jabłka powoduje istotny spadek wartości deskryptorów emisji akustycznej w każdym teście mechanicznym w wyniku zmiany sposobu rozwoju szczeliny z pękania ścian komórkowych na pękanie międzykomórkowe, będące wynikiem degradacji pektyn. Zauważono również, że podczas przechowywania następuje spadek liczby zdarzeń emisji akustycznej w testach mechanicznych, który spowodowany jest między innymi zmianą sposobu pękania w wyniku degradacji enzymatycznej pektyn z pękania ścian komórkowych na pękanie międzykomórkowe i tym samym zmniejszaniem się liczby rozerwanych ścian komórkowych. Podczas przechowywania następuje spadek średniej amplitudy emisji akustycznej w testach mechanicznych jabłek, który spowodowany jest spadkiem ogólnego modułu sprężystości tkanki (wzrostem tłumienia fali sprężystej) w wyniku zmniejszenia się spójności międzykomórkowej oraz prawdopodobnie nieznacznym spadkiem wytrzymałości ścian komórkowych.

Cechy oceny sensorycznej silnie korelują między sobą, szczególnie wysokie współczynniki korelacji zanotowano pomiędzy cechami związanymi z procesami pękania (soczystość, mączystość) i głośnością dźwięku odbieranego przez oceniających (kruchość, chrupliwość). W ogólnej ocenie tekstury najważniejszymi cechami są w kolejności: soczystość, kruchość i chrupliwość.

W celu instrumentalnej oceny tekstury jabłek możliwe jest użycie niektórych parametrów mechanicznych testów przebicia, TPA lub SENB. Jednak deskryptory emisji akustycznej lepiej korelują z wynikami analizy sensorycznej jabłek niż parametry mechaniczne. Dlatego pomiary emisji akustycznej dostarczają dokładniejszej i bezpośredniej informacji o teksturze jabłek. Liczba zdarzeń i średnia amplituda sygnału emisji akustycznej w dowolnym teście mechanicznym może być użyta do oceny soczystości, kruchości i chrupliwości. Stwierdzono, że ocena tekstury jabłek przy pomocy emisji akustycznej nie zależy od odmiany. Możliwe jest użycie jednej krzywej kalibracyjnej.

Podsumowując można stwierdzić, że uzyskano nową metodę, która za pomocą parametrów związanych z sygnałem akustycznym generowanym podczas testu mechanicznego, w sposób znacznie dokładniejszy niż sam test mechaniczny, umożliwia opis procesów pękania w tym materiale oraz monitorowanie zmian tekstury jabłek, szczególnie wielkości związanych z dźwiękiem generowanym podczas niszczenia.

Słowa kluczowe: jabłka, tekstura, jakość, emisja akustyczna, analiza sensoryczna

9. SUMMARY

INSTRUMENTAL METHOD BASED ON ACOUSTIC EMISSION FOR EVALUATION OF SELECTED TEXTURE ATTRIBUTES OF APPLES

Sound generated during eating of apples plays important role in its texture evaluation by consumers. In a plant tissue, a cellular skeleton which is responsible for certain mechanical properties, is created by bonded cells. The way of cracking of such structure, apart of sound properties i.e. crispness and crunchiness sense, determines also juiciness and mealiness. Therefore, knowledge about mechanism of cracking and physical laws governing this process is very important for further work on monitoring and improvement of apples quality and other fruits and vegetables.

The aim of this work was development a new method based on acoustic emission for evaluation of selected texture attributes of apples. In order to do this, a complex experiment was performed with using of new system for acoustic emission signal recording in three mechanical tests: puncture test, texture profile analysis (TPA), single edge notched bend (SENB). The experiment was performed on three cultivars of apples: Elstar, Gloster and Jonagold with taking into account storage way and storage time. A correlation between results of the instrumental evaluation and sensory analysis was found also. Additionally, an influence of turgor and temperature on cracking development during mechanical testing was investigated.

In the work an original and new methodological solution based on acoustic emission method was proposed for instrumental texture evaluation and for cracking processes analysis during different mechanical testing for apples. An approach of this research was focusing on practical aspects of apple texture evaluation by the acoustic emission method. The goal for the future is starting work on new device development for instrumental texture evaluation of apples. The results of this experiment have provided many methodological and practical conclusions.

The experiment has allowed to conclude that for analysis of apple tissue sound properties during mechanical testing its is enough to record acoustic emission signal in the 1-16 kHz frequency range. The sources of acoustic emission are cell walls ruptured in the process of deformation, cell debonding does not generate the acoustic signal. Analysis of the number of acoustic events during testing provides information about the number of ruptured cell walls. Values of the acoustic emission descriptors depends on pectin degradation level (as a result of storage or temperature) and on turgor level which have an influence on cracking mode of the tissue. With turgor increase the number of ruptured cell walls per deformation unit also increase, the tissue become more "brittle". Temperature increase causes significant decrease of values of acoustic emission descriptors in each mechanical test as a result of change of cracking mode from cell wall rupturing to cell-cell debonding which is result of

pectin degradation. It was noticed that during storage the number of acoustic events decreases which is caused by change of cracking mode, as a result of enzymatic pectin degradation, from cell wall rupturing to cell-cell debonding thereby decrease of number of ruptured cells. During storage, decrease of the mean acoustic emission amplitude is observed in the mechanical tests which is caused by decrease of the modulus of elasticity (increase of damping of the elastic wave) as a result of weakening of cell-cell adhesion and probably as a result of small decrease of the cell walls strength.

There are strong correlations among sensory attributes. Especially high correlation coefficients between attributes related to cracking processes (like juiciness and mealiness) and sound loudness detected by panelists (like crispness and crunchiness) were found. The moist important attributed for overall texture evaluation was juiciness, crispness and crunchiness.

In order to evaluate apple texture instrumentally, some of the mechanical parameters (from the puncture, TPA or SENB test) can be used as well. However, acoustic emission descriptors correlate better with sensory evaluation than the mechanical one. Therefore, acoustic mission provides more precise and direct information obtained instrumentally about apple texture. The number of acoustic emission events and the mean acoustic emission amplitude in any mechanical test can be used for evaluation juiciness, crispness and crunchiness which are related to cracking processes of the tissue. It was stated that the texture evaluation by the acoustic emission can be done independently on cultivar and one calibration curie can be used only.

In summary, it can be stated that a new method was developed. The method, using parameters of acoustic signal generated during mechanical testing. The method allows more precisely than the mechanical test only describing cracking processes in the material and allows monitoring of texture change of apples, especially attributes related to sound generated in during cracking.

Keywords: apple, texture, quality, acoustic emission, sensory analysis

Adres autora:

Artur Zdunek
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin
e-mail: a.zdunek@ipan.lublin.pl