

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

ACTA AGROPHYSICA

69

Rafał Rybczyński, Bohdan Dobrzański jr

**FIZYCZNE ASPEKTY POMIARU
JĘDRNOŚCI JABŁEK**

Monografia

Lublin 2002

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. rzecz. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk

prof. dr hab. J. Laskowski

prof. dr hab. I. Dechnik

prof. dr hab. P.P. Lewicki

prof. dr hab. D. Drozd

prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. F. Dubert

prof. dr hab. E. Niedźwiecki

prof. dr hab. J. Fornal

prof. dr hab. J. Sielewiesiuk

prof. dr hab. E. Kamiński

prof. dr hab. W. Stępniewski

prof. dr hab. A. Kędziora

prof. dr hab. Z. Ślipek

prof. dr hab. T. Kęsik

prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. Cz. Koźmiński

Redaktorzy tomu

doc. dr hab. Bohdan Dobrzański, jr

dr inż. Rafał Rybczyński

Opiniowała do druku

prof. dr hab. Justyna Wieniarska

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl
<http://www.ipan.lublin.pl>

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci. w sieci Internet
pod adresem <http://psjc.icm.edu.pl>

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2002

Publikacja dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych

ISSN 1234 - 4125

Wydanie I. Nakład 120 egz. Ark. wyd. 6,1
Skład komputerowy: Agata Woźniak
Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	5
2. JAKOŚĆ OWOCÓW I CZYNNIKI JĄ KSZTAŁTUJĄCE - NORMY	6
3. POMIAR JĘDRNOŚCI W OCENIE JAKOŚCI - ZALECENIA	10
4. URZĄDZENIA UŻYWANE PRZY POMIARACH JĘDRNOŚCI - METODY POMIAROWE	12
4.1. Subiektywne metody oceny tekstury	13
4.2. Obiektywne metody badania właściwości mechanicznych	13
5. JĘDRNOŚĆ JABŁEK	19
6. METODY EKSPERYMENTALNE	26
7. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MIĄŻSZU JABŁEK	27
8. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE SKÓRKI JABŁEK	34
9. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE JABŁEK	40
10. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE PRZYPowierzchniowej WARSTWY TKANKI JABŁEK	46
11. DEFORMACJA W OBSZARZE PODPARCIA OWOCU	58
12. PODSUMOWANIE	63
13. PIŚMIENNICTWO	67
14. STRESZCZENIE	75
15. SUMMARY	75

1. WSTĘP

Jabłka są podstawowym gatunkiem owoców produkowanych w Polsce. Jako europejski producent owoców Polska znajduje się w pierwszej szóstce wraz z Włochami, Hiszpanią, Francją, Niemcami i Grecją. Największym światowym producentem jabłek są Chiny, importerem zaś Niemcy, gdzie import świeżych jabłek jest na poziomie 60 % własnej produkcji. Do największych eksporterów świeżych jabłek zaliczyć można Francję, Nową Zelandię oraz Belgię.

W przeliczeniu na jednego mieszkańca najwięcej świeżych jabłek spożywa się w Austrii i Turcji (35 kg), następnie w Belgii (25 kg) oraz w Niemczech, Grecji, we Włoszech i w Holandii (20 kg). Spożycie świeżych jabłek na poziomie 15 kg notuje się we Francji, w Polsce, Argentynie, Hiszpanii i Nowej Zelandii, na poziomie 10 kg w USA, Kanadzie i Anglii, zaś 6 - 7 kg spożywa się w Japonii, Brazylii i RPA. W Rosji spożycie wynosi 5 kg, a w Chinach zaledwie 1 kg na mieszkańca [35,39,86,94].

Średni roczny wzrost produkcji sadowniczej w ostatnich latach wynosił około 7%. W strukturze gatunkowej produkcji owoców największy udział, około 70%, stanowią jabłka. Wzrost produkcji jabłek osiągnięty został poprzez wprowadzenie nowych odmian, zwiększenie areału sadów intensywnych i wydajności z jednostki powierzchni.

Najwięcej jabłek - około 2 mln ton przerabia się w USA. Stanowi to 43% ogólnej produkcji tych owoców w Stanach Zjednoczonych. Na drugim miejscu znajduje się Polska przerabiając około 1,1 mln ton, stanowi to jednak aż 58% produkcji. W relacji udziału przerabianych jabłek do ogólnej ich produkcji nasz kraj zajmuje pierwsze miejsce na świecie. Zasadniczy wpływ na tak wysoki udział jabłek przeznaczonych dla przemysłu w naszym kraju ma niska jakość jabłek oraz przestarzały dobór odmian. Są to istotne wady naszego sadownictwa, które jednak miały wpływ na rozwój przemysłu przetwórczego; zwłaszcza produkcję koncentratu jabłkowego. Wobec dynamicznego rozwoju produkcji koncentratu w Chinach można spodziewać się w najbliższym czasie spadku cen tego produktu na rynku światowym. Wynika stąd, że należy zwiększać w strukturze produkcji udział jabłek odmian deserowych, których dobra jakość mogłaby wpłynąć na wzrost spożycia jabłek w Polsce oraz zapewnić wzrost eksportu świeżych jabłek [93,94].

Wśród kryteriów przydatności odmian dla rynku należy uwzględnić pory dojrzewania owoców, ich wielkość, barwę oraz takie cechy jak jędrność, kruchość, soczystość, dobry smak, aromat oraz atrakcyjne zabarwienie skórki. Należy również brać pod uwagę trwałość przechowalniczą i wytrzymałość na transport oraz prawidłowy termin zbioru mający istotny wpływ na zdolność przechowalniczą owoców i ich jakość [82,83,133,146].

W ogólnej strukturze produkcji jabłek konsumpcyjnych w Polsce przeważają odmiany późnojesienne i zimowe. Osiągają one dojrzałość dopiero po kilku, a nawet kilkunastu tygodniach. W celu przedłużenia podaży na rynku należy stworzyć owocom właściwe warunki. Konieczne jest schłodzenie owoców bezpośrednio po zbiorze oraz utrzymanie odpowiedniej wilgotności i temperatury na stałym i niskim poziomie podczas przechowywania. Podczas przechowywania następują zmiany nie tylko w ich składzie chemicznym, a także we właściwościach fizycznych. Dzięki rejestracji niektórych parametrów fizycznych istnieje możliwość oceny dojrzałości owoców oraz określenia ich jakości [39,40,44,74,83,88,105,106, 114,139].

Jakość jest to bardzo ważny czynnik w produkcji i zbycie owoców determinujący cenę, a związany z wymaganiami konsumentów. Studman [133] definiuje jakość owoców jako kombinację atrybutów i właściwości, kształtujących ich wartość. Kader [82] zwraca uwagę na takie czynniki jakościowe jak: masa, średnica, wielkość, kształt, powierzchnia, kolor, defekty - fizyczne, fizjologiczne i genetyczne, zanieczyszczenia biologiczne, a przede wszystkim na wartości smakowe i teksturę - cechę związaną z właściwościami mechanicznymi.

W celu sprostania wymaganiom konsumentów konieczna jest ciągła kontrola jakości produktów na rynku. W tym celu powstaje szereg zaleceń i przepisów pomagających przygotować towar do handlu i przeprowadzić kontrolę jego jakości podczas obrotu. W Polsce standardy jakościowe owoców i warzyw oraz ich opakowań określają Polskie Normy lub Normy Branżowe. W związku z wejściem Polski do UE, ponad 50 norm międzynarodowych dotyczących owoców i warzyw świeżych, suchych i suszonych zostało wydanych przez Polski Komitet Normalizacyjny jako Projekty Polskich Norm do stosowania na zasadzie dobrowolności. Są to jednak pewne wymagania minimalne, które nie w pełni odzwierciedlają jakość owoców, ich ocenę konsumencką oraz wymagania współczesnego rynku.

2. JAKOŚĆ OWOCÓW I CZYNNIKI JĄ KSZTAŁTUJĄCE – NORMY

W celu sprostania wyzwaniom rynku i wymaganiom konsumentów konieczna jest ciągła kontrola jakości produktów. Jakość jest to bardzo ważny czynnik w produkcji i zbycie owoców wpływający na cenę, a związany jest głównie z wymaganiami nabywców. Dlatego, też powstaje szereg zaleceń i przepisów pomagających przygotować towar do handlu i przeprowadzić kontrolę jego jakości podczas obrotu. Norma ISO 9000 określa jakość jako całość cech i właściwości produktu czy usług mających związek z ich zdolnością do zaspokojenia ustalonych czy oczekiwanych potrzeb, natomiast Kadar [82] definiuje jakość owoców jako połączenie ich cech i właściwości, które dają im wartość żywności.

W Polsce standardy jakościowe owoców oraz ich opakowań określają Polskie Normy lub Normy Branżowe. Zalecenia dotyczące świeżych jabłek zawarte są w dwóch normach:

1. PN-R-75501:1993 - przedmiotem normy są jabłka odmian uprawnych *Malus domestica Borkh* L. dostarczane konsumentowi w stanie świeżym. Norma nie obejmuje jabłek przeznaczonych do przetwórstwa. W normie tej zwrócono szczególną uwagę na:

- stopień dojrzałości,
- stopień i charakter wybarwienia,
- kształt owocu,
- sortowanie wg wielkości,
- jednorodność w ramach opakowania,
- stan i wygląd opakowania,
- sposób prezentacji w opakowaniu,
- oznakowanie.

2. PN-69/R-75021 - przedmiotem normy jest oznaczanie jakości owoców świeżych w obrocie krajowym. Norma ta określa:

- sposoby badania jakości oraz
- zasady pobierania próbek.

Normy te podają jedynie zalecenia ogólne i następujące wymagania: jabłka powinny być najwyższej jakości, mieć kształt, wielkość i barwę typową dla danej odmiany oraz nie uszkodzoną szypułkę i skórkę, natomiast brak jest zaleceń o charakterze szczegółowym; określających poziom jakości parametrami obiektywnymi takimi jak np.: jędrność, zawartość cukrów czy kwasów.

Według Herregodsa [73] jabłka o optymalnej jakości powinny charakteryzować odpowiednie cechy:

- masa > 200 g,
- jędrność = 7 kG/cm²,
- wartość refraktometryczna > 13° Brix'a,
- kwasowość - kwas jabłkowy nie mniej niż 4,2 g/l,
- kolor - czerwony, intensywny, paskowany na całym owocu.

Wśród niepożądanych cech zewnętrznych wymienia: defekty i uszkodzenia, tłustą czy zbyt zieloną lub grubą skórkę, a wśród opisujących miąższ zwraca uwagę na mączystość oraz kwaśny smak.

Pladdet i in. [109] podają optymalny poziom jędrności, zawartości cukrów i kwasów dla jabłek trzech odmian:

Tabela 1. Zalecenia optymalnej jakości jabłek trzech odmian [109]**Table 1.** Quality index for three apple varieties [109]

Odmiany	Cukry (stopnie Brix'a)	Kwasy (% kw. jabłkowego)	Jędrność (kG/cm ²)
Jonagold	13-14	0,5-0,6	6
Koksa Pomarańczowa	14	0,7-0,8	5-6
Elstar	14	0,8	6

Konsument nie zawsze zdaje sobie sprawę z odżywczej i zdrowotnej jakości produktu, często nie widzi różnicy w zawartości witaminy C czy też innych składników żywieniowych w jabłku. Istnieją także różnice w preferencjach oceny konsumenckiej zarówno między poszczególnymi ludźmi jak i terytorialne. Obserwuje się zróżnicowanie wymagań ze względu na płeć, wiek, grupę społeczną, rasę i narodowość. Pladdet i in. [109] podają, że nie można liczbowo ściśle określić wartości dla poszczególnych parametrów optymalnej jakości jabłek, stąd też należy posługiwać się przedziałami, w których powinny się one zawierać. Dla jabłek odmiany Jonagold w krajach europejskich optymalna zawartość cukrów oceniana w stopniach Brix'a powinna się zawierać między 12 a 15, jędrność między 45 a 70 N, a zawartość kwasów (głównie kw. jabłkowego) między 0,5 a 0,8% [73].

Każdy z płodów ogrodniczych musi zostać zebrany w odpowiednim czasie. Zależnie od przeznaczenia i sposobu wykorzystania, termin i okres zbioru jest różny. Optymalny termin zbioru jabłek przeznaczonych do przechowywania to przedział czasu, nieraz 3-4 dni. Owoce znajdować się muszą w takim stadium rozwoju fizjologicznego, które umożliwi zbiór, zabezpieczy prawidłowy przebieg przechowywania; gwarantując zakończenie procesu dojrzewania i osiągnięcia charakterystycznej jakości oraz pełnej przydatności konsumpcyjnej [129]. Do określenia terminu zbioru często są używane takie parametry jak: indeks skrobiowy, kolorowe karty, jędrność oraz indeks Streifa; obejmujący jędrność, ekstrakt oraz indeks skrobiowy [131]. Owoce zbyt wcześnie zebrane mają niższą jakość, a zebrane zbyt późno charakteryzują się krótszym okresem przechowywania. Herregods [74] porównał parametry jakościowe jabłek odmiany Jonagold zbieranych w dwóch terminach:

Tabela 2. Parametry jakości jabłek zbieranych w dwóch terminach [74]**Table 2.** Apple quality parameters for two picking date [74]

Jonagold	7.09.1993	21.09.1993
masa owocu (g)	185	209
barwa podstawowa	5,7	5,6
jędrność (kG/cm ²)	8,5	7,5
ekstrakt	12,3	14,6
indeks skrobiowy	2,9	6,1
powierzchnia rumieńca (%)	8,2	19,2

Kadar [82] określając cechy wpływające na jakość owoców i warzyw wymienia jako najważniejsze:

Czynniki higieniczne i kwarantannowe:

- kwarantanna - pasożyty (larwy o różnych stadiach dojrzałości oraz osobniki dorosłe)
- bezpieczeństwo konsumenta - zawartość naturalnych toksyn, substancji rakotwórczych, zanieczyszczeń mikrobiologicznych, metali ciężkich oraz mykotoksyn.

Wygląd:

- rozmiar - masa, objętość, wielkość,
- kształt - regularny, długość/średnica,
- powierzchnia - gładka, woskowana, lśniąca,
- kolor - jednolity, intensywny,
- defekty fizyczne - pęknięcia, zranienia, obicia,
- patologiczne - grzyby, owady,
- fizjologiczne - zbrązowienia, defekty genetyczne.

Tekstura i czynniki smakowe:

- tekstura - twardość, kruchość, soczystość, włóknistość,
- smak - słodkie, kwaśne, gorzkie, aromatyczne, bezzapachowe,
- wartości odżywcze - zawartość włókna, węglowodany, białko, witaminy, sole mineralne, itp.

Tekstura w przypadku świeżych owoców i warzyw to te cechy produktów, które można mierzyć w sposób obiektywny w funkcji wielkości fizycznych takich jak: siła, czas i przemieszczenie, deformacja, odkształcenie, ale oceniana jest również organoleptycznie [49,81,89,142]. Przy czym cechy jakościowe takie jak: wielkość owoców,

jakość skórki, świeżość, barwa koloru podstawowego, procent wybarwienia, obecność obić, uszkodzeń i chorób mają zwykle wpływ na cenę produktu.

Pladett i in. [109] określili dla jabłek trzech odmian relatywną ważność kryteriów (Tab. 3), którymi zainteresowany jest konsument:

Tabela 3. Preferencje konsumentów w ocenie jakości jabłek [109]

Table 3. The consumer quality apple assessment [109]

Odmiany	Cukry	Kwasy	Jędrność	Ogółem
Jonagold	35%	15%	50%	100%
Koksa Pomarańczowa	40%	20%	40%	100%
Elstar	20%	30%	50%	100%

Dla poszczególnych odmian jabłek pewne kryteria ich jakości są pozytywniej oceniane niż inne i mają większe znaczenie w ocenie jakości, niemniej jednak z przeprowadzonych badań wynika, że najistotniejszym kryterium z punktu widzenia konsumenta jest jędrność.

3. POMIARY JĘDRNOŚCI W OCENIE JAKOŚCI - ZALECENIA

Magness i Taylor [98] jako pierwsi określili jędrność jabłek stosując test przebijania miąższu na określoną głębokość. W zaleceniach dotyczących badania jakości konsumpcyjnej jabłek Grupa Ekspertów Unii Europejskiej [115] jako jedyną metodę badania jędrności wymienia test przebijania Magnessa-Taylora. Test znany pod tą nazwą polega na pomiarze wartości siły potrzebnej do wciśnięcia czy wbicia próbnika o średnicy 11,1 mm (w przypadku gruszek stosuje się trzpień o średnicy 8 mm) na głębokość 8 mm. Do badań rutynowych wyżej wymieniona grupa ekspertów zaleca stosowanie instrumentów o stałych liniowych prędkościach przesuwu głowicy¹. Alternatywnie dopuszcza również stosowanie przenośnych ręcznych penetrometrów, np. Effe-Gi.

Obok testu przebijania prowadzi się badania dotyczące analizy profilowej tekstury jabłek. Analiza ta obejmuje badania organoleptyczne składowych tekstury oraz pomiary instrumentalne, polegające na ściskaniu cylindrycznych wycinków jabłek (o średnicy od 1,0 cm do 1,8 cm i wysokości w granicach 0,9 do 2,5 cm) do 25% ich pierwotnej wysokości.

¹ wymagania te spełniają maszyny wytrzymałościowe

I tak w najprostszej analizie organoleptycznej przy oznaczaniu jędrności jabłek wykorzystuje się zazwyczaj skalę liniową od 0 do 100 punktów, o długości 100 mm z odpowiednimi określeniami brzegowymi badanych wyróżników. Oceniający nanoszą na skalę swoją ocenę stosownie do własnego subiektywnego wrażenia, którego odbiór ma podwójny aspekt:

- gnostyczny, czyli jakościowe rozpoznanie zjawiska i ocena jego natężenia, oraz
- emocjonalny, który ma odpowiedzieć na pytanie w jakim stopniu dana cecha odpowiada oceniającym.

Wyniki ocen degustatorów poddawane są zazwyczaj następnie konwersji do wartości liczbowych z zakresu 10-cio stopniowej skali jednostek umownych [40].

W niektórych krajach dla poszczególnych odmian jabłek sugeruje się potrzebę badania jędrności oraz zakresy, którymi powinny się charakteryzować owoce w momencie zbioru. Dla jabłek odmian Jonagold, Elstar, Golden Delicious zaleca się, aby jędrność owoców znajdowała się w granicach 68,7-73,6 N/cm² i 78,5-83,4 N/cm² dla jabłek odmian Boskoop oraz Gloster [40]. Wprawdzie sama jędrność nie może stanowić podstawy do ustalenia terminu zbioru, gdyż w okresie przed zbiorem niewiele się zmienia, ale w połączeniu z innymi cechami jakościowymi ma istotne znaczenie.

Pladdet i in. [109] wśród najważniejszych cech jakościowych jabłek odmian: Jonagold, Koksa Pomarańczowa i Elstar wyróżniają właśnie jędrność. Uważają oni, że udział jędrności w ogólnej ocenie jakości przez konsumentów jest tak duży, jak pozostałych parametrów jakościowych razem wziętych. Za optymalny poziom jędrności dla tych odmian podają wartość ok. 6 kG/cm². Dla odmiany Jonagold optimum jędrności podaje także Herregods [74], ale według niego zakres akceptowalności jest szerszy 44,1-68,7 N/cm². Autor ten podaje, iż preferencja jakości przez konsumenta jest wielkością zależną od płci, narodowości, wieku, upodobań indywidualnych czy pochodzenia społecznego. Badania rynkowe przeprowadzone we Francji wykazały znaczne rozbieżności w subiektywnej ocenie jabłek tych samych odmian w zależności od daty i miejsca zakupu. Kadar [83] podaje wymagania kwalifikacji jakościowej jabłek różnych odmian, dla których jędrność powinna zawierać się w przedziale 18-23 lb. Płocharski i Konopacka [110] w oparciu o ocenę organoleptyczną określili optymalne wartości jędrności jabłek trzech odmian: Elstar (52 N), Jonagold (52 N) i Gloster (54 N).

4. URZĄDZENIA UŻYWANE PRZY POMIARACH JĘDRNOŚCI - METODY POMIAROWE

Instrumentalny pomiar właściwości mechanicznych owoców realizowany jest za pomocą urządzeń umożliwiających wykonanie oznaczeń jednej lub kilku cech materiału badanego, względnie wykonanie jego pełnej charakterystyki mechanicznej. W pierwszym przypadku są to stosunkowo proste konstrukcje przyrządów pomiarowych o napędzie ręcznym i mechanicznym np. szeroko obecnie stosowany penetrometr Magness-Taylor'a. Mają one dość ograniczone możliwości pomiarowe zaś podstawowe elementy robocze tych urządzeń mogą być instalowane w aparatach uniwersalnych.

W laboratoriach badawczych spotkać można aparaty różnych typów i firm, ponadto występują jednostkowe oryginalne rozwiązania krajowe i zagraniczne opracowywane do specjalistycznych pomiarów. Większość z tych przyrządów działa na podobnej zasadzie. Jednak należy zaznaczyć, iż do badania wytrzymałości owoców oraz innych płodów rolnych najlepiej dostosowane są uniwersalne maszyny firmy INSTRON. Materiał biologiczny jest poddawany ściskaniu, rozrywaniu czy ścinaniu, a rejestrowane są czas, siła, przemieszczenie, odkształcenie oraz naprężenie. Aparaty uniwersalne przystosowane są do przyłączenia szeregu wymiennych elementów roboczych w zależności od rodzaju testu, kształtu próbki i celu badań. Są to urządzenia złożone z dwóch niezależnych układów służących do: wymuszenia odkształceń badanej próbki (układ napędowy) oraz rejestracji powstałych sił, naprężeń oraz przemieszczeń (układ pomiarowy). Ze względu na rozwiązania konstrukcyjne układu napędowego i sposób przenoszenia naprężeń dzielimy je na urządzenia:

- mechaniczne,
- hydrauliczne,
- elektryczne.

Realizując badania wytrzymałościowe materiałów roślinnych należy dokładnie określić prędkość przemieszczenia elementu obciążającego, gdyż lepko-sprężysty charakter deformacji zależy od prędkości deformacji i czasu. W dawnych urządzeniach zwracano uwagę, aby prędkość narastania naprężeń (siły) była mniejsza od prędkości rejestracji układu pomiarowego (przy określonej częstotliwości próbkowania). Zazwyczaj, w testach ustala się stały liniowy przyrost deformacji lub siły. Przy testowaniu materiałów biologicznych częściej stała jest prędkość przesuwu głowicy pomiarowej, gdyż rozwiązanie to jest prostsze i mniej kosztowne [40,80,98].

Pomiar parametrów mechanicznych owoców, a zarazem ich jędrności ma za zadanie otrzymanie określonej informacji o materiale. Zastosowana technika pomiarowa powinna charakteryzować się efektywnością i realizowalnością. Działając określonym obciążeniem na obiekt obserwujemy jego reakcje, które można badać przy użyciu subiektywnych i obiektywnych metod.

4.1. Subiektywne metody oceny tekstury

Charakterystyki produktów istotne z punktu widzenia konsumenta powinny być wyznaczane metodami organoleptycznymi lub skorelowanymi z wrażeniem ludzkim, ostatecznym sędzią jakości. Ponieważ przemysł rolno-spożywczy opiera się na ocenie konsumentów, żaden z testów oceniających produkty ogrodnicze nie jest uważany za dostatecznie wartościowy zanim nie będzie skorelowany z oceną organoleptyczną. Metody wykorzystujące tzw. zespoły oceniające (składające się z osób doświadczonych o określonych kwalifikacjach), opierające się na statystycznych i psychometrycznych podstawach mają na celu minimalizację subiektywnego aspektu pomiaru.

Bourne [16] podzielił metody subiektywne oceny materiałów biologicznych na nieniszczące i niszczące oraz ustne, ręczne i wzrokowe. Pomimo to nie można oczekiwać całkowitego obiektywizmu psychofizycznych testów w których odczucia i preferencje indywidualne są czynnikiem oceniającym. W tego rodzaju testach biorą udział różne grupy mięśni jak również organów zmysłów.

Przy ocenie jędrności produktów tylko palce wchodzi w bezpośredni kontakt z materiałem. Scott Blair i Coppen [124] stwierdzili, iż ręka jest stosunkowo czuła na zmiany modułu sprężystości lecz nieczuła na zmiany lepkości badanego produktu. Oczywiście kulturowe gusty i żywnościowe przyzwyczajenia jak również wygląd mogą mieć wpływ na końcową ocenę. Czynniki te nie zawsze mogą być jednoznacznie określone i łatwo kontrolowane. Przy tego rodzaju metodach konieczna jest wiedza związana z fizjologią, psychologią oraz mechaniką procesów zachodzących w trakcie oceny organoleptycznej [40].

4.2. Obiektywne metody badania właściwości mechanicznych

Obiektywne pomiary mają na celu wyeliminowanie elementu ludzkiego oraz czynnika osobowego przy ocenach mechanicznego zachowania badanego materiału [98,136,137,145].

W ostatnich latach opracowano wiele metod oceny zachowań mechanicznych owoców wyznaczając: napężenie, odkształcenie, energie potrzebną do uszkodze-

nia produktu jak i inne parametry. Najpowszechniej stosowanym jest test przebijania polegający na pomiarze siły potrzebnej do wciśnięcia czy wbicia próbnika w testowany materiał. Obecnie dostępne są następujące urządzenia: Magnessa-Taylor, Chatillona oraz Effe-Gi. Przyrząd Magnessa-Taylora wyposażono w dwa wymienne cylindryczne próbki z zaokrąglonymi końcówkami o średnicy 7/16 cala (11,1 mm) dla jabłek i 5/16 cala (7,9 mm) dla gruszek. Siła wciskania próbki zależy od naprężenia sprężyny umieszczonej w rękojeści. Przyrządy obecnie stosowane różnią się rozwiązaniami technicznymi, lecz mają zwykle te same końcówki penetrometrów. Wartość siły penetracji to jeden z najczęściej używanych wyznaczników dojrzałości i strat podczas przechowywania owoców i warzyw. W miarę zbliżania się dojrzałości zbiorczej owoców zmniejsza się ich jędrność. Mięknienie postępuje nadal w okresie przechowywania i z reguły jabłko w stanie dojrzałości konsumpcyjnej wykazuje o połowę mniejszą jędrność niż w stanie dojrzałości zbiorczej.

Lange i Ostrowski [88] podali jędrność (lb) jabłek w chwili zbioru oraz po zakończeniu okresu przechowywania w chłodni wynosząca dla odmian: Wealthy - 14 i 7,5, Malinowa Oberlandzka - 13,5 i 7,5, McIntosh - 14 i 8,0, Landsberska - 14 i 7,5, Cesarz Wilhelm - 20 i 7,5, Starking - 14 i 11 oraz Boiken 19,5 i 13,5. Fekete i Felföldi [48] przy użyciu przyrządu konstrukcji własnej, wyposażonego w wymienne cylindryczne próbki wyznaczyli współczynniki sprężystości. Uzyskane wartości parametru dla badanych odmian jabłek pozwoliły na podział odmian na dwie grupy:

- twarde - Gloster, Jonagold, Jonathan oraz Jonee,
- miękkie - Golden Spur oraz Mutsu.

Bourne [17] przeprowadził przegląd teorii i zastosowań testów przebijania używanych przy pomiarach roślin i płodów rolnych. Przy pomiarach za pomocą ręcznych przyrządów różnice wyników powodowane w głównej mierze przez czynnik osobowy dochodzą do 20% [19]. Wyniki te wskazują na potrzebę kontroli procesu odkształcania próbek, a co zatem idzie konieczność konstrukcji innych przyrządów pomiarowych [140,144]. Bourne i in. [18] oraz Płocharski i in. [111] zamontowali wgłębniki używane w ręcznych przyrządach do uniwersalnej maszyny Instron, co pozwoliło automatycznie rejestrować przebieg zmian siły podczas testu.

Z próbą przebijania związany jest problem, czy skórka powinna być pozostawiona na powierzchni testowanej, co ma związek z siłą potrzebną do jej przebicia. W wypadku pozostawienia skórki, siła potrzebna do jej przecięcia jest sumowana z siłą konieczną do wciśnięcia wgłębnika w materiał co widoczne jest w postaci

wzrostu maksymalnej wartości siły w zakresie granicy płynności biologicznej [14]. Trudnym jest również porównanie danych otrzymanych w wyniku testowania materiału badanego wgłębnikami o różnej średnicy. Dlatego, też wskazana jest ich standaryzacja w określonej grupie eksperymentów.

W trakcie oddziaływania na materiał biologiczny rejestruje się nie tylko siłę, ale również i odkształcenie. Brak jest obecnie prostych, zunifikowanych i niedrogich przyrządów do pomiaru odkształcenia podobnych do zaproponowanych np. przez Magnessa-Taylora przy pomiarze jędrności.

Bourne [15] zaproponował użycie zmodyfikowanego penetrometru do pomiaru odkształcenia. Jest to prosty i niedrogi przyrząd, nadający się do użytku zarówno w laboratorium jak i w warunkach polowych. Finney [52] oraz Finney i in. [53] opracowali nieniszczącą metodę pomiaru deformacji opartą na rezonansie akustycznym.

W badaniach owoców korzystano z różnych metod opartych na testach ściskania całych obiektów jak również ich wycinków. Jednakowe naprężenia w każdym punkcie powierzchni wywołujące odkształcenie objętościowe zapewnia test ściskania hydrostatycznego, który to pozwala na obliczenie modułu sprężystości objętościowej. Test ten nie stwarza jednak warunków obciążeń spotykanych często w praktyce dla całych płodów rolnych takich jak owoce. Morrow i Mohsenin [102] zbudowali przyrząd do badania wpływu ciśnienia hydrostatycznego na próbki jabłek. Sharma i Mohsenin [125] oraz Miles i Rehkugler [95] określili wielkość naprężenia, odkształcenia i modułu sprężystości objętościowej produktów ogrodniczych poddanych ściskaniu hydrostatycznemu. Perry i Chang [107] poddając ciśnieniu hydrostatycznemu owoce wyznaczyli moduły sprężystości dla jabłek (3,34 MPa) oraz brzoskwiń (0,41 MPa).

Szytywność wiązań międzykomórkowych i ścianek komórkowych oraz ciśnienie turgorowe wpływają na moduł sprężystości tkanki roślinnej. Falk i in. [46] wyznaczyli zależność pomiędzy sprężystością tkanki, a ciśnieniem turgorowym. Gołacki i in. [66,67] badając zmienność cech mechanicznych miększu jabłek stwierdzili ścisły związek modułów sprężystości z potencjałem wodnym.

Mohsenin i Goehlich [99] opracowali techniki, urządzenia i oprzyrządowanie do pomiaru świeżych owoców poddanych ściskaniu przy: wzrastającym obciążeniu, stałym obciążeniu, obciążeniach udarowych oraz cięciu i wciskaniu próbnika. Wyznaczono naprężenie, odkształcenie i energię powodującą uszkodzenie produktu. Stwierdzono, iż powyższe parametry w granicy wytrzymałości biologicznej są związane z początkiem uszkodzenia i zmiany barwy miększu jabłka, zaś energia potrzebna do rozerwania skórki jest dobrym parametrem

określającym jej odporność na przebijanie i ścinanie. Rybczyński i Dobrzański [120] dzieląc owoc na trzy części określili mechaniczną odporność miąższu owoców letnich odmian jabłek otrzymując następujące zakresy dla parametrów: moduł sprężystości (0,97-1,33 MPa), siła niszcząca (1,1-2,9 N) oraz energia niszcząca (0,3-0,73 mJ). Gołacki [65] opisał metodę wyznaczania parametrów mechanicznych materiałów roślinnych w kształcie walca. Chappell i Hamann [22] ściskając osiowo cylindryczne próbki miąższu jabłek trzech odmian: Winesap, Golden i Red Delicious wyznaczyli w teście ściskania wartości modułu Younga w zakresie 985-2729 psi.

Garcia i in. [62] badali wpływ turgoru owoców i ich twardości na stopień obicia jabłek i gruszek. Wyznaczyli oni maksymalną siłę i deformację skórki przy przekłuciu. W wyniku utraty turgoru w trakcie przechowywania wzrastała wartość deformacji. Clevenger i Hamann [31] wykazali, iż duży procent oporów występujących w jabłku znajduje się w samej skórce owocu. Podczas wykonywanych testów wyznaczyli oni między innymi moduł sprężystości skórki owoców trzech odmian: Winesap, Golden i Red Delicious, których wartości zawierały się w zakresie 1370-2085 psi. Przy czym skórka jabłek odmiany Winesap była najodporniejsza na rozrywanie pomimo, że charakteryzowała się najmniejszym modułem sprężystości.

Voisey i McDonald [143] stwierdzili, iż wytrzymałość skórki jest jednym z ważniejszych czynników mających wpływ na odporność owoców na pęknięcie. Schoorl i Holt [123] wyznaczyli odporność jabłek na pęknięcie. Zaś Mohsenin i Goehlich [99] używając dwóch rodzajów testów stwierdzili, iż wytrzymałość samej skórki jest około 42 % niższa od jej wytrzymałości na jabłku.

Arnold i Mohsenin [8] przeprowadzili przegląd technik pomiarowych i metod analizy otrzymanych danych stosowanych przy osiowym ściskaniu ciał biologicznych. Stwierdzono, iż przy analizie danych zróżnicowanie wyników otrzymywanych w tego rodzaju testach może być zredukowane poprzez użycie teorii Hertza, a w mniejszym zakresie teorii Boussinesqa. Badacze wskazali na konieczność zwrócenia szczególnej uwagi w trakcie przeprowadzania testów na:

- sposób umocowania próbki,
- rodzaj przenoszącego obciążenie elementu (kształt i wielkość),
- szybkość obciążania,
- interpretację krzywej siła-deformacja.

Abott i in. [4] jako pierwsi zastosowali techniki komputerowe do odczytu i rejestracji parametrów mechanicznych materiału biologicznego, uzyskanych przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron.

Zmiany reakcji mechanicznej owoców w trakcie trwałych statycznych obciążeń są spowodowane naprężeniami dużo mniejszymi od tych, które wywołują uszkodzenie przy uderzeniu czy ściskaniu.

Mohsenin i Goehlich [99] badając pełzanie tkanki owocu, użyli urządzenie w którym rejestrowano trwałe odkształcenie obiektu pod wpływem stałego obciążenia. Fridley i in. [60] podczas pomiaru relaksacji naprężeń owoców stwierdzili spadek wartości siły w trakcie tego procesu. Clevenger i Hamann [31] badając mechaniczne zachowanie skórki jabłka w trakcie pełzania i relaksacji wskazali na jej lepko-sprężysty charakter. Zaproponowali również użycie modeli reologicznych oraz stwierdzili, że w pomiarach tego rodzaju koniecznym jest uwzględnienie czynnika czasu.

Pętłe histerezy dla jabłek wyznaczył Mohsenin i in. [98-101] oraz Bieluga [12]. Przy badaniu mechanicznej histerezy próbka jest obciążana (poniżej granicy płynności biologicznej), a następnie odciążana do zera. Stwierdzono, iż wzrost prędkości odkształcania powoduje zmniejszenie strat w wyniku histerezy. Wielkość pętli histerezy jest funkcją sprężystości materiału, jednocześnie miarą określającą zdolność materiału do absorpcji i akumulacji energii czy tłumienia drgań bez spowodowania jego uszkodzenia. Tego typu pomiary są przydatne przy badaniach obciążeń uderowych oraz tłumieniu drgań w transporcie owoców.

Badając charakter związania owocu z rośliną Barnes [10], Fluck i Ahmed [56] oraz Tsatsarelis i in. [141] określali siłę i energię związania oraz ich stosunek do masy owocu, używając do tego celu proste ręczne przyrządy. Stwierdzono wpływ stopnia dojrzałości produktów na wyznaczone parametry. Przeprowadzono wiele innych prób pomiarów właściwości mechanicznych owoców w warunkach obciążeń statycznych np. badano rozciąganie tkanki jabłka, siłę odrywającą skórkę od miąższu, odporność na ścieranie jak również wykorzystywano te badania do charakterystyki odmian jabłek [72,87,91,104].

Metody pomiaru właściwości mechanicznych owoców w warunkach obciążeń dynamicznych mają krótszą historię. Metody te posiadają wiele zalet takich jak np. szybkość wykonania przy minimalnych zmianach chemicznych czy zazwyczaj bardzo małe odkształcenia badanego materiału (zwykle ok. 1%) co pozwala na zachowanie liniowego charakteru zależności naprężenie-odkształcenie.

Wykonano wiele badań dla określenia wytrzymałości owoców na uszkodzenia powstające w wyniku uderzenia. Stwierdzono, iż energia potrzebna do uszkodzenia produktu przy obciążeniach dynamicznych jest większa niż w warunkach obciążeń statycznych, zaś dla wartości odkształcenia mamy do czynienia z zależnością odwrotną [54,55,58,59,108].

Wcześniejsze badania miały głównie charakter doświadczalno-porównawczy. Zazwyczaj nie używano urządzeń pozwalających na wyznaczenie zależności naprężenie-odkształcenie. Takie produkty jak np. jabłka [38,68] były swobodnie spuszczone z określonej wysokości na podłoże, następnie zaś szacowano powstałe uszkodzenia w wyniku uderzenia. Wykonywano również próby swobodnego upadku masy na produkt [54,56,100] oraz używano wahadła [58,79,99,106]. Z czasem starano się udoskonalić te proste urządzenia. Mohsenin i Goehlich [99] przymocowali indukcyjny przetwornik odkształceń liniowych do ramienia wahadła, aby rejestrować deformacje owocu podczas uderzenia. Deformacja pomiędzy 0,03-12 mm mogła być mierzona i rejestrowana w funkcji czasu. Fluck i Ahmed [56] w trakcie próby swobodnego upadku masy na produkt zastosowali akcelerometr do pomiaru zmiany prędkości deformacji w funkcji czasu podczas uderzenia. Autorzy ci stwierdzili, iż energia i czas deformacji rośnie wraz ze wzrostem masy uderzenia. Zaś wzrost prędkości uderzenia powoduje zmniejszenie czasu jego trwania oraz wzrost maksymalnej energii odkształcenia. Mohsenin i in. [100] zaproponowali metodę jednoczesnego pomiaru siły i deformacji podczas uderzania owocu. Zaś Clark [30], Davis i Rehkgugler [33] oraz Bieluga [13] wykorzystali do rejestracji zmian zachodzących w badanym materiale biologicznym poddanych próbom udarowym technikę szybkich zdjęć. De Baerdemaeker i in. [34] wyznaczyli wytrzymałość jabłek za pomocą charakterystyki rejestrowanych sił uderzenia w trakcie upadku produktu na podłoże. Stwierdzili, iż udarowe siły twardszych owoców odznaczają się wyższą częstotliwością pików siły.

Yamamoto i in. [147] uderzali swobodnie wiszący owoc drewnianym wahadłem. Określono maksymalną częstotliwość, która jest zależna od ciężaru próbki. W zestawieniu z wynikami otrzymanymi z próby Magnessa-Taylora i subiektywną oceną nie uzyskano zadawalających korelacji.

Wielu badaczy starało się opisać zachowanie się owoców podczas uderzenia za pomocą modeli reologicznych [23,57,60,69,78,90].

Metoda opierająca się na zjawisku rezonansu mechanicznego jest wykorzystywana dla wyznaczenia częstotliwości rezonansowej, jak również określenia modułu Younga, modułu ścinającego, współczynnika strat itp. przy danej częstotliwości drgań. Zastosowanie testów opartych na rezonansie mechanicznym do badania materiałów biologicznych przedstawił Finney [52]. Zastosowanie wibracji i rezonansu przy sortowaniu owoców z uwzględnieniem ich stopnia dojrzałości wydaje się mieć duże znaczenie praktyczne.

Abbot i in. [2] wyznaczyli częstotliwość rezonansową dla całych jabłek jak i cylindrycznych wycinków miąższu oraz moduł sprężystości, dla którego wartości zawierały się w zakresie (1,7-4,5 MPa) a "współczynnik twardości" w zakresie 20-4000 Hz. Finney [50,51] badając mechaniczny rezonans jabłek odmiany Red Delicious, użył również w tym celu całych owoców jak i cylindrycznych wycinków miąższu. Powyższą próbę wykonał w zestawieniu z próbą Magnessa-Taylora i subiektywną oceną, dla której uzyskano dobre zależności. Morrow i in. [103] badając przy częstotliwości 20-330 Hz, wpływ wcześniejszego statycznego obciążenia (10-40 N) jabłek odmiany Red Delicious, zaobserwowali wzrost wartości modułu sprężystości.

Wielu badaczy [10,32,63,96] określało wpływ wibracji na związanie produktów ogrodniczych z rośliną. Starano się wyznaczyć optymalną częstotliwość drgań potrzebną do oderwania owoców. Tego rodzaju badania mają duże znaczenie związane z mechanizacją zbioru np. jabłek, cytrusów itp. produktów opartej na urządzeniach wykorzystujących drgania.

Badania nad obciami tkanki jabłek w opakowaniach zrzuconych z określonej wysokości na podłoże wykazały, iż stopień ich obicia nie zależy od sposobu pakowania owoców. Zaś zachowanie jabłek w skrzynkach można przedstawić modelując ich ułożenie w kolumny [75]. Holt i Schoorl [76,77] opisali metodę określania obić w wielowarstwowych opakowaniach z jabłkami, wykorzystując ruch owoców w kolumnie, a Smock i Gross [128] stwierdzili prostą zależność między liczbą i wielkością obić na jabłkach, a szybkością zmniejszania się jędrności miąższu.

Kadar [83] definiuje jędrność jako jakościową cechę żywności związaną z właściwościami mechanicznymi produktu, którą człowiek jest zdolny rozpoznać i ocenić jej natężenie przy pomocy swoich zmysłów.

Stosowanie obiektywnych metod pomiaru opartych na ocenie fizycznych wielkości pozwoli na wyeliminowanie elementu ludzkiego oraz czynnika osobowego przy ocenie jędrności jabłek; cechy zależnej od mechanicznych właściwości owoców.

5. JĘDRNOŚĆ JABŁEK

Tijskens i in. [139] badając naturę jędrności jabłek odmiany Elstar stwierdzili, iż jest to kombinacja różnych czynników wywodzących się z następujących procesów czy właściwości które generują wytrzymałość na ściskanie czy żucie:

- ciśnienie turgorowe wewnątrz komórek, warunkujące prężność tkanki,
- układ granularny w komórce wpływający na wytrzymałość (np. skrobia),

- siły kohezji wewnątrz komórki, związane ze składem chemicznym i fizycznymi właściwościami ściany komórkowej,
- siły adhezji pomiędzy komórkami, związane ze składem chemicznym i fizycznymi właściwościami blaszki środkowej,
- struktura i kształt poszczególnych komórek (rozmiar komórek i ich powierzchnia kontaktu),
- struktura i kształt tkanki, w szczególności wytrzymałość i rozmieszczenie tkanki naczyniowej.

Podkreślają, że pierwsze cztery punkty reprezentują składowe (siły) na bazie chemiczno-fizycznej, dwa ostatnie punkty reprezentują podłoże histologiczne i morfologiczne. Każdy z tych czynników jest w większym lub mniejszym stopniu obecny, a pomiędzy nimi występuje interakcja wpływając na jędrność pojedynczego owocu. Na przykład podstawowym czynnikiem wpływającym na jędrność truskawki jest turgor, a za tym prężność tkanki, natomiast dla świeżych jabłek decydujący wpływ mają siły adhezji pomiędzy komórkami (łańcuch pektyn) - owoc jest kruchy i soczysty, a uszkodzenie powoduje wypływ soku. Dla jabłek przechowywanych mięszk jest mączysty i suchy, wytrzymałość zależna jest od właściwości ścian komórkowych i uszkodzenie owocu nie powoduje dużego wypływu soku.

Instrumentalne pomiary jędrności owoców dobrze korelują z sensoryczną oceną tekstury i dają możliwość wychwycenia bardziej subtelnych różnic niż test organoleptyczny. W tego rodzaju badaniach próbki są poddawane zazwyczaj ściskaniu, rozrywaniu czy ścinaniu w kombinacji lub jako pojedyncze operacje.

Kiedy materiał jest poddawany rozciąganiu, ściskaniu czy cięciu jego początkowa długość zmienia się o określoną wielkość. Siła przenoszona jest przez powierzchnię, jednak równomierność naprężeń zależy od jednorodności materiału i dokładności kontaktu pomiędzy materiałem a obciążającą powierzchnią. Rezultaty mogą być rejestrowane w następujących układach:

- siła (F) i deformacja (d),
- naprężenie (σ) i odkształcenie (ε).

Badania właściwości mechanicznych owoców koncentrują się na:

- określeniu parametrów i charakterystyk mechanicznych pomocnych w opisie danego modelu mechaniczno-reologicznego,
- ocenie porównawczej na tym samym przyrządzie pomiarowym,
- ocenie w warunkach imitujących działanie jakiego materiały biologiczne są poddawane w praktyce np. żywność podczas żucia.

Klasyczne metody badawcze stosowane w fizyce, mechanice czy wytrzymałości materiałów mają ograniczone zastosowanie przy testowaniu materiałów biologicznych. Interpretacja wyników badań wytrzymałościowych materiałów technicznych opiera się o założenia, że materiał jest ciągły, jednorodny i izotropowy, a deformacja zachodzi w zakresie małych odkształceń. Ma to jednak ograniczone zastosowanie do materiałów pochodzenia biologicznego.

W badaniach właściwości mechanicznych eksperymentator często przedstawia daną cechę materiału za pomocą charakterystycznych krzywych modelowych, opisujących zależności tych czynników, których wpływ na jej zmienność jest wyraźna. Modele matematyczne przedstawiają cechę mechaniczną materiału w postaci jedno- lub wieloparametrowego równania o różnym stopniu uogólnienia. Modele strukturalne (najczęściej stosowane do opisu właściwości reologicznych) należy traktować nie jako opis czy wyjaśnienie struktury materiału, lecz wyłącznie jako jej reprezentację. W drugim przypadku model ma stanowić uproszczony opis układu i dla swej przydatności nie powinien zawierać zbyt wielu szczegółów o niewielkim znaczeniu [80,98,117,130,136,139,145].

Badanie wytrzymałości materiałów wymaga wyznaczenia naprężeń oraz odkształceń podczas obciążania. Naprężenia określa się jako rozkład siły działającej na powierzchnię ciała i wyraża w jednostkach równoważnych ciśnieniu. W zależności od tego jak jest skierowana siła działająca na ciało, rozróżnia się naprężenia rozciągające, ściskające i ścinające (styczne). Odkształcenie wyraża zmianę wymiaru lub kształtu ciała w odniesieniu do jego pierwotnego wymiaru lub kształtu i jest parametrem bezwymiarowym (często stosuje się pojęcie odkształcenie względne).

Z reologicznego punktu widzenia, materiał odkształca się na trzy sposoby: sprężysto, plastycznie i lepkko. W materiale doskonale sprężystym odkształcenie jest natychmiastowe po przyłożeniu siły, wprost proporcjonalne do naprężenia i zanika całkowicie po jej odjęciu. W materiale doskonale plastycznym deformacja nie pojawia się do chwili osiągnięcia pewnej wielkości naprężenia, zwanej granicą płynięcia. Odkształcenie jest wtedy trwałe i nie ma powrotu do stanu normalnego. W materiale doskonale lepkim, deformacja pojawia się natychmiast po przyłożeniu naprężenia, lecz w odróżnieniu od ciał sprężystych jest proporcjonalna do prędkości odkształcenia i jest nieodwracalna. [14,17,48,65,80,98,102].

Owoce wykazują zwykle połączone cechy materiałów sprężystych i lepkich. Do opisu zachowania się tych materiałów w ogólnych lub specyficznych warunkach stosuje się modele lub empiryczne równania (tzw. modele fenomenologiczne), których opis matematyczny rzadko ma związek z podstawowymi właściwościami struktury materiału.

Analiza zależności naprężenie-odkształcenie, lub analiza krzywych odkształcenia pod wpływem działania siły wykazała, że dla niektórych owoców tradycyjne modele złożone wyłącznie ze składników sprężystości i lepkości nie zawsze odpowiadają zachowaniu się tych materiałów. W takich przypadkach wprowadza się dodatkowe rodzaje elementów w celu przedstawienia zjawiska plastyczności, wewnętrznego pęknięcia struktury lub wzrostu wytrzymałości (w wyniku ściskania, twardnienia wywołanego odkształceniem lub skutkiem konstrukcji biochemicznej materiału) [22,40,70,71,78,80,98].

W pewnych granicach obciążeń dla większości materiałów wartości naprężenia są proporcjonalne do wartości odkształceń (prawo Hooke'a). W badaniach właściwości mechanicznych owoców i warzyw znalazły również zastosowanie teoretyczne metody analizy opracowane przez Hertza i Boussinesq'a. Pierwsza z tych metod jest używana do określania maksymalnego naprężenia na powierzchni kontaktu oraz modułu sprężystości w przypadku wciskania ciała o wypukłym kształcie w inne ciało lub ściskaniu go płaską płytką. Metodę Boussinesq'a stosuje się przy wyznaczaniu modułu sprężystości oraz studiowaniu zmian zachodzących w badanym materiale powstających w wyniku nacisku próbника w kształcie walca. W praktyce trudny jest do zastosowania jednoznaczny model badawczy ze względu na możliwość wystąpienia trwałej deformacji na skutek zmiany struktury materiału.

Odształcenia powstające w materiałach biologicznych są związane z warunkami czasowymi i prędkością deformacji. Przy stałej prędkości deformacji otrzymuje się typową charakterystykę naprężenie-odkształcenie (Rys. 1). Część OA krzywej ma charakter lepko-sprężysty. Punkt A jest granicą płynności biologicznej, po przekroczeniu której występuje dalsze odkształcenie bez wzrostu naprężenia. Jest to początek procesu niszczenia komórek. Stosunek części OA krzywej pozwala na obliczenie modułu sprężystości. Dalej krzywa ma charakter plastyczny. Punkt C, to granica wytrzymałości biologicznej odpowiadająca niszczeniu makrostruktury tkanek np. przebicie skórki jabłka. Powierzchnia OAB pod częścią OA krzywej opisuje energię potrzebną do osiągnięcia granicy płynności biologicznej, zaś pod krzywą OAC granicy wytrzymałości biologicznej [9,98].

Jedną z najbardziej znanych cech świeżych owoców związaną między innymi z ich wytrzymałością mechaniczną i dojrzałością jest jędrność. Jędrność to cecha, która jest często używana do oszacowania jakości owoców. Dla większości produktów ogrodniczych jędrność skorelowana jest z dojrzałością. Generalnie, jędrność owocu obniża się stopniowo gdy owoc staje się dojrzalszy i spada gwałtownie gdy zaczyna przejrzeć. Przejrzałe i uszkodzone owoce stają się stosunkowo miękkie. Tak więc jędrność może być użyta jako kryterium przy

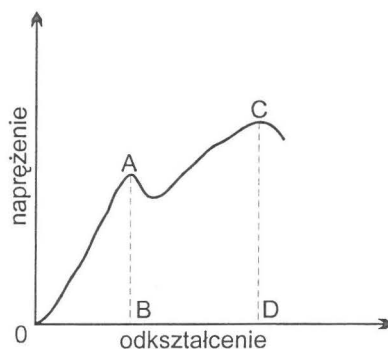
sortowaniu produktów rolniczych na różne grupy dojrzałości czy dla oddzielenia przejrzałych i uszkodzonych owoców od zdrowych. Fekete i Felföldi [48] rekomendują tę cechę jako podstawową właściwość owoców, bardzo ważną dla ich jakości, zbioru, dojrzałości, przechowywania i dalszego przetwarzania. Opracowano wiele metod pomiaru jędrności jabłek [1,3,6,24,25,36,45,47,112,117,126,127,132,134,138] jak również interesowano się ich właściwościami mechanicznymi w trakcie zbioru, sortowania, pakowania i przechowywania [7,11,20,21,26,37,121,122].

Metody pomiaru jędrności owoców można podzielić na bezpośrednie: ściskanie, ścinanie, uderowe, spadek swobodny oraz pośrednie: wibracja, akustyczne i inne, jednak jędrność odwzorowywana wartością siły potrzebnej do wbicia lub wciśnięcia określonego próbnika w materiał na określoną głębokość to jeden z najczęściej używanych wyznaczników dojrzałości i strat podczas przechowywania owoców.

W ostatnich latach opracowano wiele nowych przyrządów i technik pomiarowych przydatnych przy ocenie właściwości fizycznych owoców [5,27-29,61,85,91,97,113,135,148]. Chen [24] przedstawił przegląd różnych właściwości takich jak: gęstość, jędrność, charakterystyki wibracji, promieniowanie X i gamma, optyczne, elektryczne i NMR na których bazują te metody badawcze. Wiele z tych metod opiera się o bardzo zaawansowane rozwiązania techniczne. Jednak wielu badaczy uważa, iż część z tych technik ma małą przydatność w badaniach jakości w związku z niewielką korelacją tych metod z jędrnością owoców [40,42-44,110,126]. Niejednokrotnie budowa anatomiczna obiektu badań warunkuje rodzaj testów mechanicznych mogących być użytych w eksperymencie.

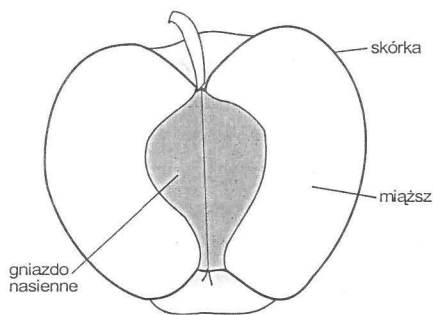
Jabłko zbudowane jest z widocznych na przekroju trzech części (Rys. 2):

- Skórki zbudowanej z kilku warstw komórek pełniących funkcję typu: ograniczenia transpiracji, wymiany gazowej poprzez szparki oraz magazynowania wody i gromadzenia różnych produktów przemiany materii. Jest to bariera ochrona owocu na styku z środowiskiem zewnętrznym. Skórka jest częścią jabłka, która ze względu na swą funkcję ochronną, może świadczyć o stanie dojrzałości owocu oraz o jego odporności na obicia.



Rys. 1. Typowa charakterystyka naprężenie-odkształcenie.

Fig. 1. The typical stress-strain curve.



Rys. 2. Uproszczony schemat budowy anatomicznej jabłka.

Fig. 2. The simplification of anatomical apple structure.

- Miąższu zbudowanego z komórek mięsistych poprzeczanych komórkami przewodzącymi dzielącymi się na komórki łykowe - transportujące środki odżywcze, komórki ksylemu i wodę. Przeważająca w strukturze owocu tkanka mięsista składa się z komórek parenchymatycznych i przestrzeni międzykomórkowych, które u dojrzałego jabłka stanowią około 25% jego objętości. Struktura miąższu ma charakter drobno lub grubo ziarnisty; zwięzły lub luźny; suchy lub soczysty; biały, kremowy czy zielonkawy.

Miąższ jabłka pełni między innymi również funkcję mechaniczną. W stanie turgoru skutecznie przeciwdziała odkształcaniu. Wszelkie siły ściskające, w tym stanie zostają zamienione na siły rozciągające ściany komórkowe, na które są one bardziej wytrzymałe.

- Gniazda nasienne zawierające nasiona i pustą przestrzeń wypełnioną gazem [116].

Ocena wybranego parametru mechanicznego na tym samym przyrządzie pomiarowym ma zazwyczaj na celu powiązanie tego wskaźnika z praktyczną przydatnością surowca np.: pomiary penetrometryczne w trakcie dojrzewania owoców (optymalizacja terminu zbioru). Do tego celu wykorzystywane są wzorcowe testy mechaniczne umożliwiające określenie niektórych parametrów wytrzymałościowych, często jednak bez uwzględnienia wpływu czasu i prędkości deformacji.

Miąższ jest tą częścią owocu, której właściwości mechaniczne najbardziej wpływają na subiektywne odczucia konsumenckie podczas gryzienia [40,82,98,110], dlatego ważnym wydaje się obiektywna ocena wytrzymałości miąższu na ściskanie. Najprostszym, a zarazem umożliwiającym zadowalającą interpretację testem służącym do badania właściwości mechanicznych owoców jest test ściskania pomiędzy równoległymi płaszczyznami. Wyróżnia się on prostym oprzyrządowaniem oraz względną łatwością i szybkością wykonania - co jest szczególnie ważne w przypadku dużej liczby pomiarów. Test ściskania jest jednym z podstawowych testów mechanicznych stosowanych w technice i materiałoznawstwie, zapewniając prawidłową interpretację wyników. W metodzie

tej można traktować miąższ jako materiał jednorodny i przygotować powtarzalne próbki o stałych wymiarach. Test ten jest niszczący, jednak możliwość potraktowania miąższu jako powtarzalnej próbki materiału oraz zastosowanie metod obliczeniowych używanych w wytrzymałości materiałów nie pozwala pominąć tej metody w badaniach.

Niektórzy badacze twierdzą, że skórka jest częścią owocu, która odpowiada za jego właściwości mechaniczne [31,62,99,143]. Wśród testów mechanicznych jedynym z prostych testów pozwalającym na prawidłową interpretację wyników jest test rozciągania. Dlatego konieczne było zaproponowanie metody pozwalającej na ocenę wpływu różnych czynników na właściwości mechaniczne skórki owoców.

Zwraca uwagę duża popularność prób przebiciowych i test ten, choć został dokładnie opisany i znormalizowany dla jabłek i gruszek, pozwala tylko na rejestrację maksymalnej siły, która nie zawsze odpowiada wytrzymałości tkanki, a także nie pozwala na pomiar warstwy bezpośrednio leżącej pod skórą [40,118,119]. Stosowanie testu penetrometrycznego ma wiele zalet takich jak: niska cena urządzenia, przyzwyczajenia producentów, powszechność stosowania prowadzi jednak często do niepełnej oceny właściwości mechanicznych owoców, a ostateczny wynik obarczony jest zazwyczaj błędem. Zatem pomiar siły nie zawsze odpowiadający maksymalnym naprężeniom, często zależny jest od prędkości deformacji i sprawności mierzącego czy usunięcia skórki nie w pełni spełnia wymogi obecnych standardów pomiarów. Dlatego, też na bazie testu penetrometrycznego postanowiono zaproponować inny parametr niż siła charakteryzujący jędrność owocu oraz opracować założenia konstrukcyjne prostego urządzenia do pomiaru jędrności owoców.

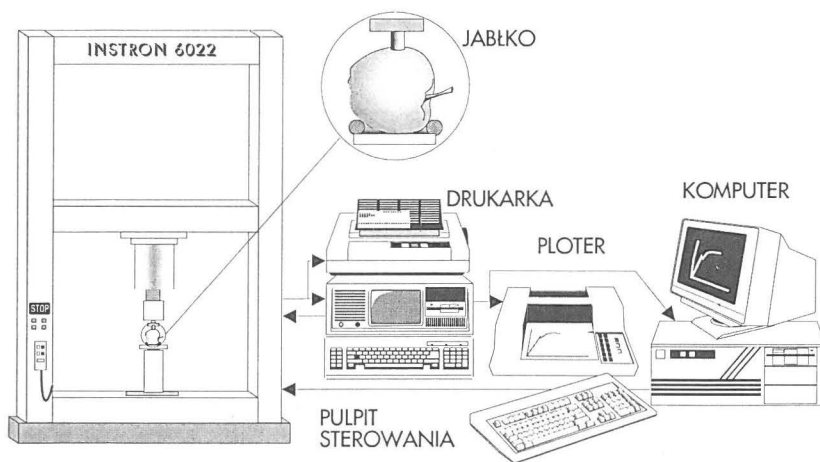
Skórka i przypowierzchniowa warstwa miąższu jabłka są najbardziej narażone na uszkodzenia mechaniczne, a stan owocu jego dojrzałość czy jędrność jest oceniana przez dotyk czyli wrażenia w oparciu o kontakt z tą warstwą. Zazwyczaj warstwa przypowierzchniowa miąższu jabłka podlega odkształceniu nie zaś miąższ poniżej tej warstwy tkanek. Dlatego badanie tej tkanki wydaje się bardzo celowym [40,41,120]. Problem powstaje gdy próbujemy opisać niejednorodny materiał; składający się z skórki i miąższu - materiałów o zupełnie zróżnicowanej budowie i zróżnicowanych właściwościach mechanicznych. Dlatego też, w celu określenia właściwości mechanicznych przypowierzchniowej warstwy tkanki jabłka (najbardziej narażonej na uszkodzenia), należałoby opracować jej model obejmujący właściwości mechaniczne miąższu i skórki owoców.

Celowym wydaje się opracowanie, na bazie podstawowych właściwości mechanicznych, prostego urządzenia do pomiaru jędrności jabłek w zakresie quasi-niedestrukcyjnej deformacji oraz zaproponowanie parametru powiązanego z ich jędrnością pozwalającego na ocenę jakości owoców bez konieczności preparacji wycinków tkanki.

6. METODY EKSPERYMENTALNE

Testy wytrzymałościowe są często używane do oceny owoców i określania ich właściwości mechanicznych. Metody te bazują na precyzyjnym opisie charakterystyki siła-przemieszczenie obciążanego materiału. Moduł sprężystości jest jedną z podstawowych właściwości mechanicznych wyrażających zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem ciał sprężystych poddanych zewnętrznemu obciążeniu. Z uwagi na to, że tkanka jabłek w rzeczywistości nie jest sprężysta, wartość modułu sprężystości może różnić się w zależności od prędkości obciążania, wartości przyłożonej siły oraz wartości wywołanego odkształcenia. Z tego też powodu, określając moduł sprężystości i jego wartość ustalono warunki obciążenia, wartość siły i odkształcenia oraz wymiary próbek.

W pomiarach właściwości mechanicznych jabłek wykorzystuje się często maszyny wytrzymałościowe np. firmy INSTRON (Rys. 3) stosując zazwyczaj standardowe procedury [9,64] opracowane przez producenta dla poszczególnych rodzajów testów. W trakcie testów rejestrowane są najczęściej wartości w układzie



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego.

Fig. 3. The schematic view of measuring set.

pomiarowym siła-przemieszczenie. Dane te umożliwiają wyznaczenie następujących wielkości:

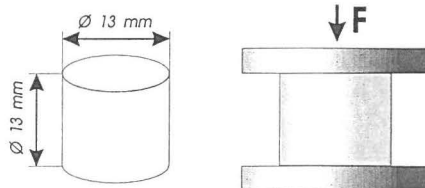
- F - siła odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej tkanki,
- d - deformacja odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej tkanki,
- W - praca deformacji odpowiadająca granicy wytrzymałości tkanki,
- E - moduł sprężystości wyznaczony w zakresie deformacji sprężystej z krzywej siła-przemieszczenie poniżej granicy płynności biologicznej.

Jednak wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych dla owoców wymaga wprowadzenia pewnych założeń upraszczających:

- próbki mają określone wymiary o stałych polach powierzchni przekroju, a tkanka owocu w zakresie niewielkich odkształceń zachowuje właściwości sprężyste i jest jednorodnie izotropowa,
- obciążenie ma charakter statyczny, elementy obciążające są sprężyste, nie podlegają odkształceniu, a na powierzchni kontaktu z próbką nie występują siły tarcia.

7. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MIĄŻSZU JABŁEK

Wycinek miąższu w kształcie walca (Rys. 4) ściskano między równoległymi płytkami w komorze roboczej maszyny wytrzymałościowej aż do momentu uszkodzenia próbki charakteryzującym się gwałtownym i stałym spadkiem wartości rejestrowanej siły.

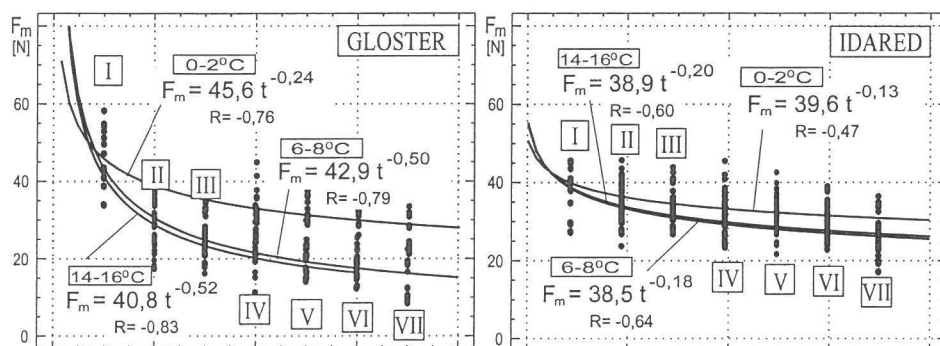


Rys. 4. Test ściskania miąższu owoców.

W trakcie przechowywania dla większości terminów badań, rejestrowane maksymalne siły istotnie różniły się statystycznie nawet już po 5 tygodniach a wartości siły F_m malały wraz ze wzrostem czasu i temperatury przechowywania wskazując na utratę jędrności miąższu jabłek. Średnie wartości siły uzyskane w teście ściskania walcowej próbki miąższu jabłek przechowywanych w trzech zakresach temperatur zawierały się w przedziale: od 13,7 do 46,2 N dla odmiany Gloster, od 22,6 do 38,1 N dla odmiany Idared, a od 15,7 do 30,7 N dla odmiany Jonagold. Wytrzymałość na ściskanie miąższu F_m (Rys. 5) przechowywanych jabłek odmiany Gloster nawet dla warunków przechowywania $0 \pm 2^\circ\text{C}$ charakteryzowała się bardzo wyraźną tendencją spadkową, którą opisuje funkcja potęgowa: $F_m = 45,6t^{-0,24}$ dla $R = -0,76$. Wyraźny spadek tych wartości od 46,2 N

Fig. 4. The compression test of apple flesh.

do 24,4 N (dla odmiany Gloster) następował już po 5-ciu tygodniach przechowywania. W temperaturze $0\div 2^{\circ}\text{C}$ zaobserwowano stopniowy oraz wolniejszy spadek wartości siły od 38,1 N do 28,7 N, szczególnie dla odmiany Idared (Rys. 9), o którym świadczy niższy współczynnik korelacji $R = -0,47$ ($F_m = 39,6t^{-0,13}$). Największy spadek wartości nastąpił u jabłek przechowywanych w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$ przy czym u odmiany Gloster zaobserwowano podobnie istotny spadek wielkości tego parametru w temperaturze $6\div 8^{\circ}\text{C}$.

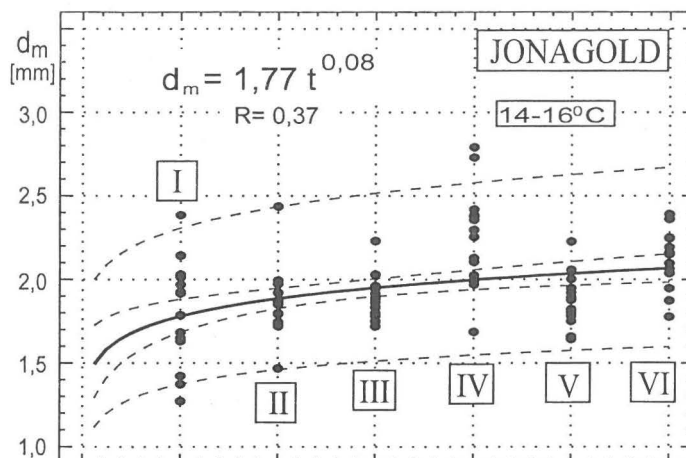


Rys. 5. Siła F_m odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej miąższu przechowywanych jabłek uzyskana w teście ściskania (termin badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 5. The force F_m caused mechanical damage of apple flesh obtained at compression test (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

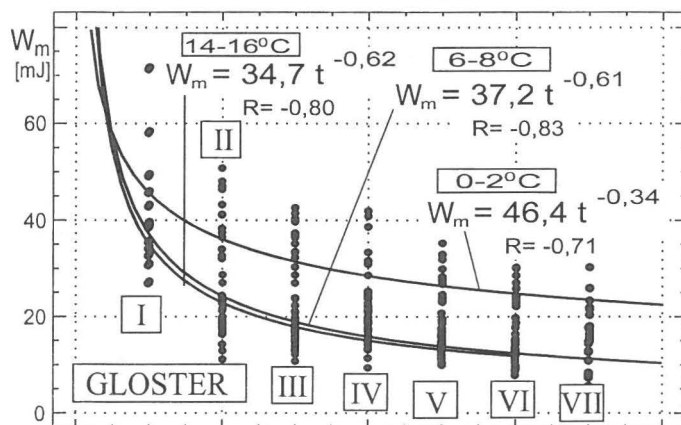
Deformacja d_p powodująca uszkodzenie miąższu badanych odmian wykazywała lekką tendencję spadkową w trakcie przechowywania i mieściła się w zakresie 1,4-2,3 mm. Za wyjątkiem odmiany Jonagold przechowywanej w temperaturze $14-16^{\circ}\text{C}$, dla której zanotowano lekki wzrost wartości badanego parametru opisanego funkcją potęgową $d_m = 1,77 t^{0,08}$ dla $R = 0,37$ (Rys. 6).

Praca potrzebna do uszkodzenia walcowej próbki miąższu (odmiana Gloster) wyznaczona w teście ściskania bezpośrednio po zbiorze wynosiła 42 mJ (Rys. 7). U jabłek przechowywanych w temperaturze $14-16^{\circ}\text{C}$ i $6-8^{\circ}\text{C}$ zaobserwowano gwałtowny spadek wartości badanego parametru po okresie 5-ciu tygodni. Owoce przechowywane w temperaturze $0-2^{\circ}\text{C}$ charakteryzowały się stałą tendencją spadkową wielkości energii uszkodzenia próbki, uzyskując wartość 21 mJ dla ostatniego terminu badań - dwukrotnie większą niż w przypadku pozostałych warunków przechowywania.



Rys. 6. Deformacja d_m odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej miąższu przechowywanych jabłek uzyskana w teście ściskania (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 6. The deformation d_m caused mechanical damage of apple flesh obtained at compression test (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

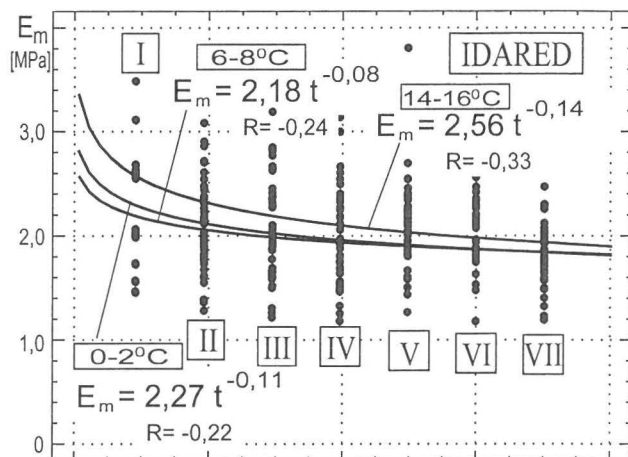


Rys. 7. Praca W_m odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej miąższu przechowywanych jabłek uzyskana w teście ściskania (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 7. The work W_m caused mechanical damage of apple flesh obtained at compression test (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

Zależność pracy zniszczenia W_m od czasu przechowywania t opisują funkcje potęgowe: $W_m = 46,4t^{-0,34}$ dla $0 \div 2^\circ\text{C}$ przy $R = -0,71$, $W_m = 37,2t^{-0,61}$ dla $6 \div 8^\circ\text{C}$ przy $R = -0,83$ i $W_m = 34,7t^{-0,62}$ dla $14 \div 16^\circ\text{C}$ przy $R = -0,80$. Wartości współczynnika R wskazują na wyraźny wpływ czasu przechowywania na wyznaczany parametr. Podobne zależności stwierdzono dla dwóch pozostałych badanych odmian, niemniej jednak wielkości współczynnika R mieszczące się w zakresie od $-0,77$ do $-0,41$ wskazują na mniejszy wpływ czasu przechowywania na badaną cechę.

Średnie wartości modułu sprężystości E_m miąższu jabłek wyznaczone w teście ściskania osiowego, przechowywanych w trzech zakresach temperatur, zawierały się w przedziale: od 1,0 do 2,7 MPa dla odmiany Gloster, od 1,5 do 2,6 MPa dla odmiany Idared i od 1,1 do 2,3 MPa dla odmiany Jonagold. W trakcie przechowywania wartości modułu sprężystości miąższu jabłek malały, za wyjątkiem odmiany Idared, której owoce niezależnie od warunków i terminu przechowywania charakteryzowały się miąższem o wysokiej jędrności, a zależność modułu sprężystości od czasu przechowywania t opisana funkcją potęgową ($E_m = 2,27t^{-0,11}$ dla $0 \div 2^\circ\text{C}$ przy $R = -0,22$, $E_m = 2,18t^{-0,08}$ dla $6 \div 8^\circ\text{C}$ przy $R = -0,24$ i $E_m = 2,56t^{-0,14}$ dla $14 \div 16^\circ\text{C}$ przy $R = -0,33$) nie wykazywała statystycznie istotnych różnic oraz wpływu czasu na utratę jędrności (Rys. 8).



Rys. 8. Moduł sprężystości E_m wyznaczony w teście ściskania wycinka miąższu przechowywanych jabłek (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

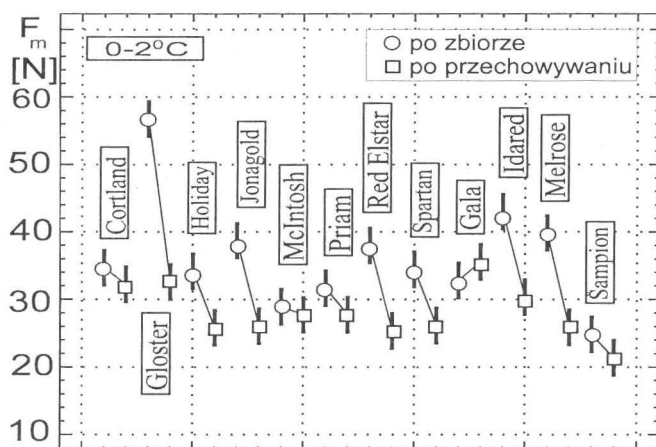
Fig. 8. The elasticity modulus E_m obtained at compression test of apple flesh (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

Uzyskane wartości modułu sprężystości dla miąższu jabłek odmian Gloster i Jonagold podczas przechowywania charakteryzowały się znacznym spadkiem wartości już po 5-ciu tygodniach od daty zbioru, a w następnych terminach badań utrzymywały się na zbliżonym poziomie. Podczas przechowywania jędrność spada, przy czym wyraźniejszą utratę jędrności miąższu jabłek wyznaczoną za pomocą testu ściskania zaobserwowano w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$.

Wśród badanych odmian jabłek zaobserwowano charakterystyczne cechy wyróżniające je pod względem właściwości mechanicznych:

- odmiana Gloster - wyraźny spadek wartości siły niszczącej i modułu sprężystości w pierwszym okresie przechowywania,
 - odmiana Idared - wysokie wartości parametrów wytrzymałościowych w całym okresie przechowywania (niezależnie od czasu i temperatury),
- odmiana Jonagold - najniższa wytrzymałość mechaniczna miąższu w okresie dojrzałości zbiorczej i ich nieznaczny choć statystycznie istotny spadek w trakcie przechowywania.

Średnie wartości siły uzyskane w teście ściskania F_m powodującej uszkodzenie miąższu jabłek 12 odmian prezentuje Rys. 9. W większości wypadków przechowywanie chłodnicze miało istotny statystycznie wpływ i powodowało spadek siły wywołującej uszkodzenie miąższu (Gloster, Holiday, Jonagold, Red Elstar, Spartan, Idared i Melrose) dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

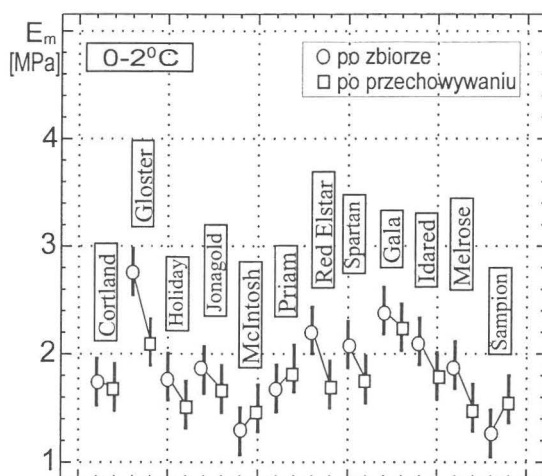


Rys. 9. Siła F_m odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej miąższu jabłek uzyskana w teście ściskania.

Fig. 9. The force F_m caused mechanical damage of apple flesh obtained at compression test.

Podobna tendencja była obserwowana dla odmian: Cortland, McIntosh, Priam i Šampion, jednak nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic. Zakres (21,3÷56,7 N) zawierał wszystkie wartości otrzymane w teście ściskania. Mięsz owoców odmiany Gloster był znacząco wytrzymalszy po zbiorze (56,7 N), zaś po przechowywaniu wartość ta spadła do 32,5 N. Siła ściskająca w zakresie deformacji niszczącej mięszu wyznaczona dla odmian: Cortland, McIntosh, Priam i Idared osiągała podobne wartości. Najniższe wartości siły powodującej uszkodzenie mięszu jabłek odmiany Šampion obserwowano zarówno dla owoców o dojrzałości zbiorczej (24,8 N) jak i konsumpcyjnej (21,0 N).

Średnie wartości modułu sprężystości mięszu E_m jabłek odmian Cortland, Gala, Gloster, Holiday, Jonagold, Idared, McIntosh, Melrose, Priam, Red Elstar, Spartan, Šampion wyznaczone w teście ściskania przedstawiono na Rys. 10. Zaobserwowano nieznaczny spadek sprężystości po przechowywaniu chłodniczym. Jednak tylko dla mięszu odmian Gloster i Red Elstar stwierdzono istotne statystycznie różnice. Najwyższą wartość modułu sprężystości mięszu (2,7 MPa) otrzymano dla odmiany Gloster w stadium dojrzałości zbiorczej.



Rys. 10. Moduł sprężystości E_m wyznaczony w teście ściskania wycinka mięszu jabłek.

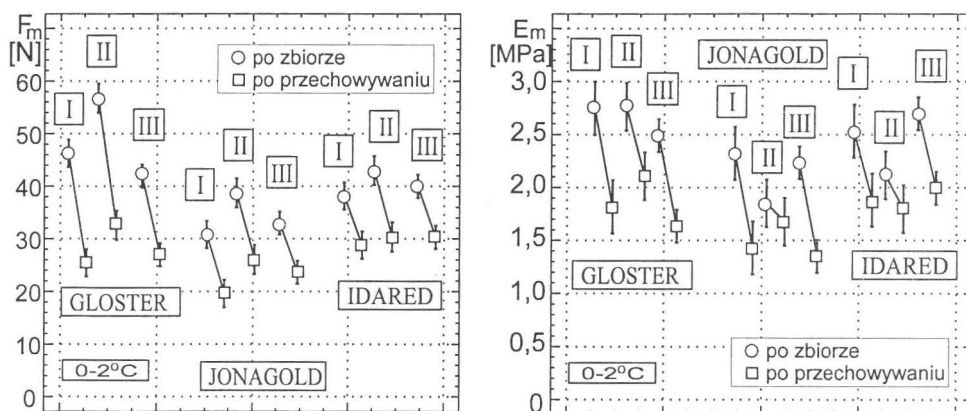
Fig. 10. The elasticity modulus E_m obtained at compression test of apple flesh.

Parametry mechaniczne: siła ściskająca i moduł sprężystości wyznaczone w teście ściskania wycinka mięszu w kształcie walca pomiędzy równoległymi płytkami pozwoliły na podział jabłek badanych odmian na dwie grupy. Właściwości mechaniczne owoców scharakteryzowane powyższymi parametrami nie zmieniają się istotnie dla odmian: Cortland, McIntosh, Priam, Gala i Šampion natomiast wartości te dla mięszu jabłek odmian: Gloster, Holiday, Jonagold, Red Elstar, Spartan, Idared i Melrose, po przechowywaniu maleją.

Średnie wartości siły F_m powodującej uszkodzenie ściskanego miąższu jabłek odmian: Gloster, Jonagold i Idared wyznaczone w teście ściskania w kolejnych latach badań przedstawiono na Rys. 11. Istotnie najwyższe wielkości siły zanotowano w drugim roku badań zarówno po zbiorze (Gloster - 55,4 N i Jonagold - 39,6 N) jak i przechowywaniu (Gloster - 32,8 N). Zaś spadek jej wartości po przechowywaniu w poszczególnych latach dla wszystkich badanych odmian był istotny statystycznie.

Podobną tendencję charakteryzował się moduł sprężystości wyznaczony dla wycinka miąższu (Rys. 11). W większości przypadków spadek wielkości badanego parametru po przechowywaniu był istotny statystycznie. Jedynie w drugim roku badań sprężystość miąższu jabłek odmian: Jonagold i Idared nie różniła się istotnie, mieszcząc się w przedziale od 1,7 MPa do 2,1 MPa.

Duża powtarzalność uzyskanych wyników wskazuje na brak istotnego wpływu lat badań w większości przypadków na wytrzymałość mechaniczną (siła uszkodzenia) oraz sprężystość (moduł sprężystości) miąższu jabłek badanych odmian.

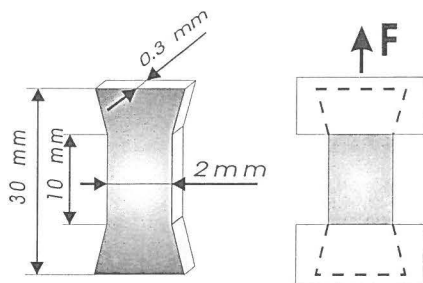


Rys. 11. Siła F_m oraz moduł sprężystości E_m wyznaczone w teście ściskania wycinka miąższu jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Fig. 11. The force F_m and the elasticity modulus E_m obtained at compression test of apple flesh (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

8. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE SKÓRKI JABŁEK

Testy rozciągania przeprowadzono zgodnie z metodyką stosowaną w wytrzymałości materiałów (Rys. 12). Próbki skórki pobierano równoległe do osi owocu



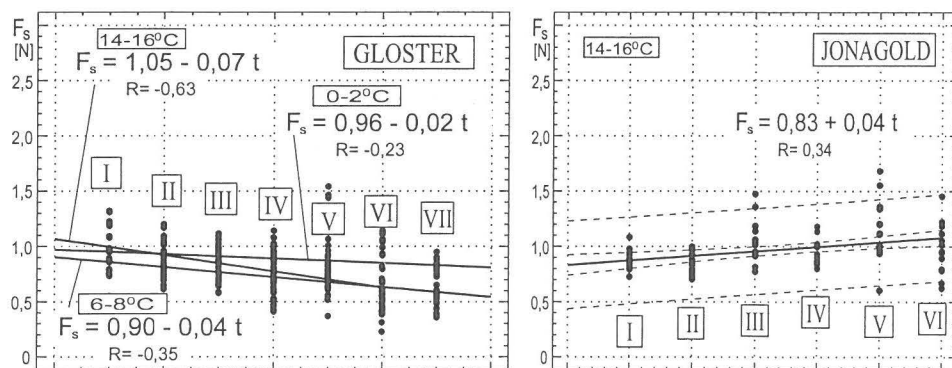
Rys. 12. Test rozciągania skórki owoców.

Fig. 12. The tension test of apple skin.

przy pomocy specjalnie opracowanego wykrojnika bezpośrednio przed wykonaniem pomiaru aby ograniczyć wysychanie.

Siła potrzebna do rozerwania wycinka skórki jabłek F_s , bezpośrednio po zbiorze wynosiła dla poszczególnych odmian: 0,93 N - Gloster, 1,32 N - Idared, i 0,87 N - Jonagold. W trakcie przechowywania dla większości terminów, rejestrowane siły nie różniły się statystycznie pozostając na tym samym poziomie (niezależnie od tempera-

tury przechowywania). W temperaturze $0 \div 2^\circ\text{C}$ przez cały okres przechowywania skórka jabłek odmiany Gloster (Rys. 13) charakteryzowała się podobnymi właściwościami, dla której wartości siły zawierały się w zakresie $0,78 \div 0,99$ N. Współczynniki zależności prostoliniowej $F_s = 0,96 - 0,02t$ dla temperatury $0 \div 2^\circ\text{C}$ przy $R = -0,23$ potwierdzają brak wpływu czasu na wytrzymałość na rozrywanie skórki jabłek tej odmiany. W wyższych zakresach temperatur zaobserwowano nieznaczny spadek wartości (wzrost bezwzględnej wartości współczynnika



Rys. 13. Siła F_m odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej skórki przechowywanych jabłek uzyskana w teście rozciągania (termin badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 13. The force F_m caused mechanical damage of apple skin obtained at tension test (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

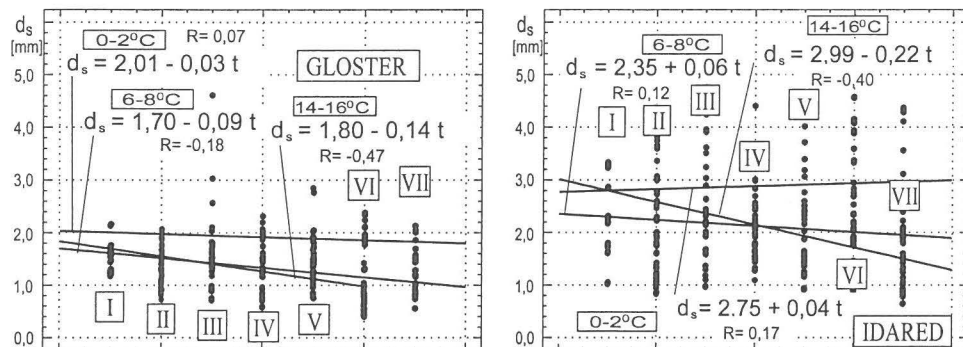
korelacji), lecz czas przechowywania również nie wpływał istotnie na zmiany wytrzymałości skórki jabłek odmiany Gloster na rozciąganie. Średnie wartości siły rozerwania skórki jabłek odmiany Idared we wszystkich temperaturach nie różniły się istotnie statystycznie w trakcie przechowywania. Wartości F_s dla skórki jabłek odmiany Jonagold przechowywanych w wyższych temperaturach podczas całego okresu, w którym wykonywano badania wykazywały niewielkie tendencje wzrostu, o czym świadczą dodatnie współczynniki kierunkowe zależności prostoliniowej $F_s = 0,83 + 0,04t$ przy $R = 0,34$ dla $14 \div 16^\circ\text{C}$ (Rys. 16), lecz wartości tego parametru uzyskane nawet w ostatnich terminach nie różniły się istotnie w stosunku do wartości uzyskanych bezpośrednio po zbiorze.

Deformacja d_s powodująca rozerwaniu wycinka skórki jabłek odmiany Jonagold wykazywała bardzo lekką tendencję wzrostową w trakcie przechowywania opisaną funkcjami prostoliniowymi o współczynnikach korelacji mieszczącym się w zakresie 0,16-0,18 w zależności od warunków przechowywania. Odwrotną tendencję zaobserwowano w wypadku odmiany Gloster (wszystkie temp. przechowywania) i Idared (za wyjątkiem temp. $0 \div 2^\circ\text{C}$) (Rys. 14). Wyraźnie spadek ten uwidocznił się w temperaturze $14 \div 16^\circ\text{C}$ o czym świadczą ujemne współczynniki kierunkowe zależności prostoliniowej $d_s = 1,80 - 0,14t$ przy $R = -0,47$ dla odmiany Gloster i $d_s = 2,99 - 0,22t$ przy $R = -0,40$ dla odmiany Idared, lecz wartości uzyskane nawet w ostatnich terminach nie różniły się istotnie w stosunku do wartości uzyskanych bezpośrednio po zbiorze.

Za wyjątkiem odmiany Jonagold (Rys. 18), dla której zanotowano lekki wzrost wartości pracy rozerwania wycinka skórki owocu, w przypadku dwóch pozostałych odmian stwierdzono spadek wielkości badanego parametru opisanego zależnościami prostoliniowymi w funkcji czasu o czym świadczą ujemne współczynniki kierunkowe szczególnie dla warunków przechowywania $14 \div 16^\circ\text{C}$, jabłka odmiany Gloster: $W_s = 1,14 - 0,12t$ dla $R = -0,41$ (Rys. 15). Niemniej jednak niski poziom wartości współczynników korelacji związany jest z małymi różnicami pomiędzy wielkościami badanego parametru w trakcie przechowywania.

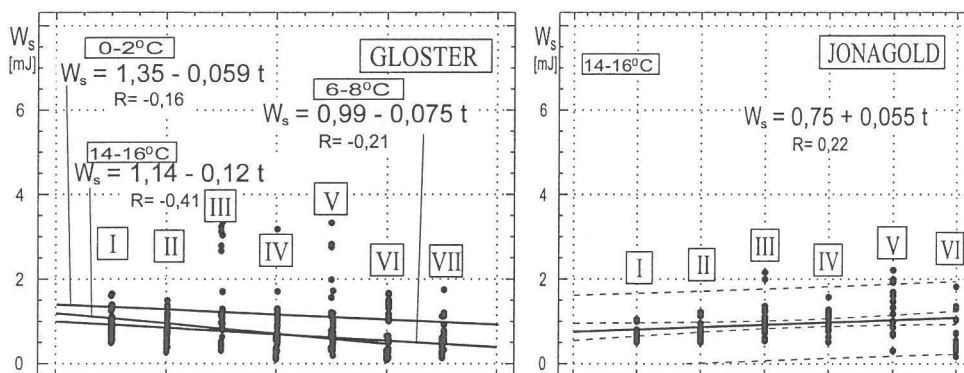
Wyznaczony moduł sprężystości E_s w teście rozciągania, bezpośrednio po zbiorze, przyjmował następujące wartości: 9,8 MPa - Gloster, 9,6 MPa - Idared i 9,1 MPa - Jonagold, co wskazuje na podobne właściwości mechaniczne skórki tych odmian. W trakcie przechowywania w chłodni w temperaturze $0 \div 2^\circ\text{C}$ i $6 \div 8^\circ\text{C}$ wartości modułu sprężystości pozostawały na tym samym poziomie. Dopiero przechowywanie w temperaturze $14 \div 16^\circ\text{C}$ spowodowało większe parowanie wody i wysychanie skórki co wywołało istotny statystycznie wzrost wartości modułu sprężystości już po 15 tygodniach. Uzyskane wartości modułu sprężystości E_s dla skórki jabłek odmiany Gloster (Rys. 16) przechowywanych w podwyższonej

temperaturze wykazywały pewną tendencję wzrostu podczas kolejnych tygodni przechowywania, co opisują zależności: $E_s = 8,57 + 0,83t$ przy $R = 0,45$ dla $14 \div 16^\circ\text{C}$ i $E_s = 7,36 + 0,72t$ przy $R = 0,41$ dla $6 \div 8^\circ\text{C}$. Średnie wartości modułu dla jabłek z przechowalni o temperaturze $0 \div 2^\circ\text{C}$ przez cały okres przechowywania utrzymywały się na podobnym poziomie ($9,02 \div 9,80$ MPa), wyniki uzyskane w skrajnych terminach nie różniły się istotnie, a współczynnik korelacji $R = -0,06$ bliski zera świadczy o braku zależności modułu sprężystości od czasu przechowywania w tej temperaturze.



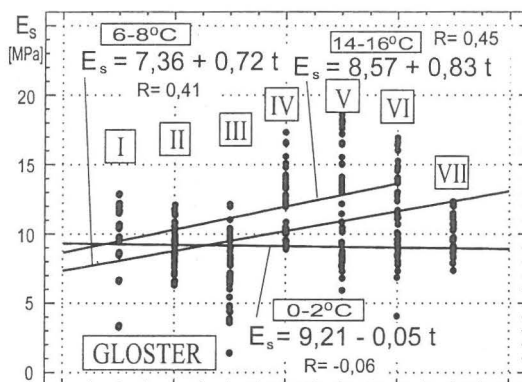
Rys. 14. Deformacja d_s odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej skórki przechowywanych jabłek uzyskana w teście rozciągania (termin badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 14. The deformation d_s caused mechanical damage of apple skin obtained at tension test (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).



Rys. 15. Praca W_s odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej skórki przechowywanych jabłek uzyskana w teście rozciągania (termin badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

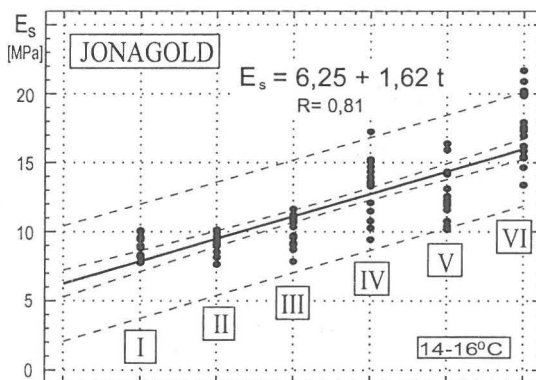
Fig. 15. The work deformation W_s caused mechanical damage of apple skin obtained at tension test (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).



Rys. 16. Moduł sprężystości E_s skórki przechowywanych jabłek wyznaczony w teście rozciągania (termin badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 16. The work deformation W_s caused mechanical damage of apple skin obtained at tension test (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

Jedynie średnie wartości modułu sprężystości uzyskane dla jabłek odmiany Jonagold przechowywanych w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$ i $6\div 8^{\circ}\text{C}$ w miarę upływu czasu wykazywały tendencję wzrostową, a zależność $E_s = 6,25 + 1,62t$ przy $R = 0,81$ dla $14\div 16^{\circ}\text{C}$ świadczy o znacznym wysuszeniu skórki i wzroście wartości E_s (Rys. 17).



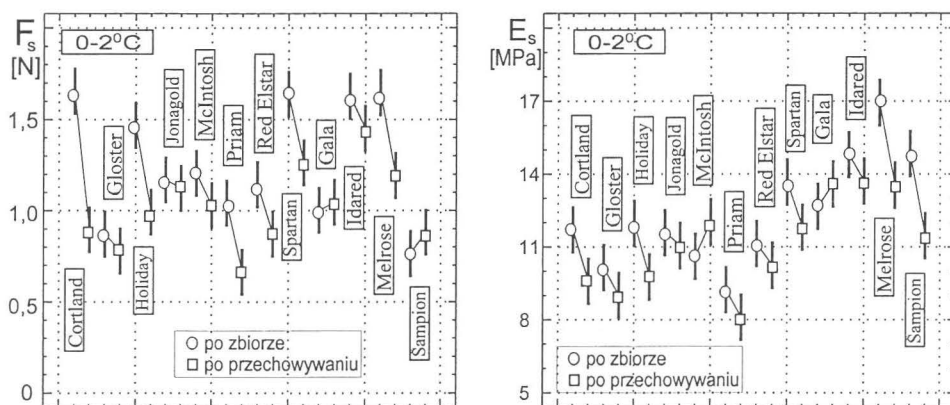
Rys. 17. Moduł sprężystości E_s skórki przechowywanych jabłek wyznaczony w teście rozciągania (termin badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 17. The work deformation W_s caused mechanical damage of apple skin obtained at tension test (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25).

Owoce w temperaturze $14\pm 16^{\circ}\text{C}$ wraz ze wzrostem czasu przechowywania posiadały coraz mocniejszą skórkę co potwierdza, że jabłka w gorszych warunkach tracą więcej wody i ich skórka staje się bardziej sucha i sprężysta odznaczając się często większymi wartościami modułu sprężystości E_s .

Opracowana metoda badania właściwości mechanicznych skórki owoców oraz metoda preparacji jej wycinków pozwala na wyznaczenie: wytrzymałości skórki na rozciąganie, deformacji podczas rozrywania, pracy potrzebnej do rozerwania skórki oraz wyznaczenie modułu sprężystości - wielkości niezależnej od wymiarów próbki, dokładnie opisującej cechy materiałowe skórki jabłek.

Zaobserwowano istotnie statystyczne zróżnicowanie wartości siły rozerwania wycinka skórki otrzymane w testach dla różnych odmian jabłek w stadium dojrzałości zbiorczej i po przechowywaniu (Rys. 18). Dla skórki jabłek odmian: Cortland, Holyday, Priam, Red Elstar, Spartan i Melrose siła rozerwania F_s po przechowywaniu osiągała istotnie niższe wartości, a wartości zawierały się w zakresie $0,66\text{ N}\div 1,65\text{ N}$. Podobna tendencja została zaobserwowana dla odmian Gloster, Jonagold, McIntosh i Idared, jednak nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic.



Rys. 18. Siła F_s oraz moduł sprężystości E_s wyznaczone w teście rozciągania wycinka skórki jabłek.

Fig. 18. The force F_s and the elasticity modulus E_s obtained at tension test of apple skin.

Rysunek 21 przedstawia moduł sprężystości E_s skórki jabłek odmian Cortland, Gala, Gloster, Holyday, Jonagold, Idared, McIntosh, Melrose, Priam, Red Elstar, Spartan, Šampion w stadium dojrzałości zbiorczej i po przechowywaniu chłodniczym. Wartości modułu sprężystości skórki jabłek zawierały się w zakresie od 8,10 MPa dla odmiany Priam do 16,94 MPa dla

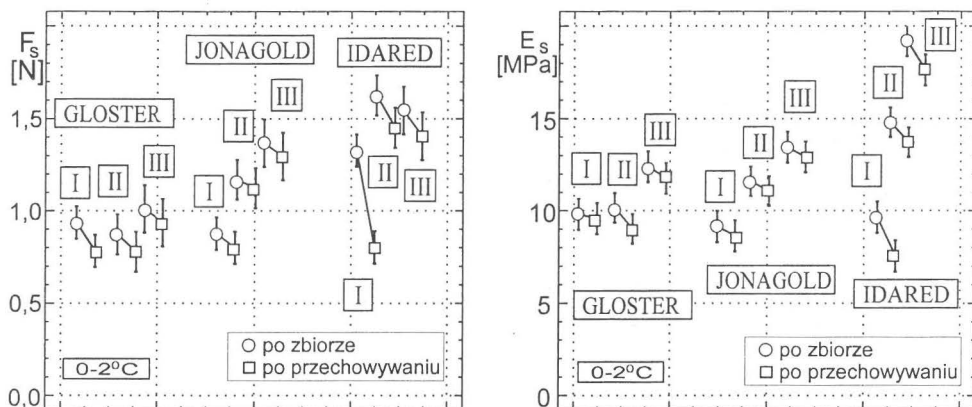
odmiany Melrose. Przy czym wartości uzyskane dla odmian: Cortland, Holyday, Spartan, Melrose i Šampion wskazują ujemny wpływ przechowywania na wytrzymałość skórki tych odmian. Najwyższe wartości (16,94 MPa - Melrose, 14,84 MPa - Šampion i 14,80 MPa - Idared) otrzymano dla skórki jabłek w stadium dojrzałości zbiorczej. Po przechowywaniu najwyższe wartości zostały zaobserwowane dla odmian: Idared - 13,71 MPa i Melrose - 13,55 MPa. Moduł sprężystości wyznaczony dla skórki jabłek 12 odmian wskazywał, iż wytrzymałość skórki jest cechą odmianową i różnice pomiędzy odmianami są w wielu przypadkach istotne. Wpływ przechowywania na moduł sprężystości skórki jest istotny statystycznie tylko dla jabłek następujących odmian: Cortland, Holiday, Melrose, Spartan i Šampion.

Parametry uzyskane w teście rozerwania wycinka skórki badanych 12 odmian jabłek umożliwiły wyselekcjonowanie owoców o wytrzymalej mechanicznie skórce na przykład odmiany: Idared i Melrose oraz charakteryzującą się delikatną skórą odmianę Priam.

Średnie wartości siły F_s rozerwania skórki jabłek odmian: Gloster, Jonagold i Idared wyznaczone w kolejnych latach badań przedstawiono na Rys. 19. W przypadku owoców odmiany Gloster nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic wartości wyznaczonego parametru wynikających z terminu czy kolejnego roku badań. Jedynie w pierwszym roku badań dla skórki jabłek odmiany Idared po przechowywaniu zaobserwowano istotny spadek wielkości siły rozerwania w granicach od 1,32 N do 0,81 N. Jednocześnie uzyskany w pierwszym roku badań parametr dla owoców odmian: Jonagold i Idared był istotnie statystycznie mniejszy zarówno po zbiorze jak i przechowywaniu w porównaniu z pozostałymi latami badań.

Wyznaczony moduł sprężystości E_s skórki jabłek: Gloster, Jonagold i Idared przedstawia Rys. 19. Istotnie najwyższe wartości sprężystości zanotowano w trzecim roku badań zarówno po zbiorze (Gloster - 12,23 MPa, Jonagold - 13,61 MPa i Idared - 19,31 MPa) jak i po przechowywaniu (Gloster - 11,87 MPa, Jonagold - 12,98 MPa, Idared - 17,73 MPa). Spadek wartości E_s po przechowywaniu w poszczególnych latach dla wszystkich badanych odmian, za wyjątkiem jabłek odmiany Idared w pierwszym roku badań, nie był istotny statystycznie. Wytrzymałość skórki na rozerwanie charakteryzuje jej odporność na uszkodzenia mechaniczne, natomiast wartości modułu sprężystości wyznaczone w zakresie niewielkich odkształceń, opisują dokładnie właściwości materiałowe skórki jabłek. Pozwoliło to zaobserwować wpływ poszczególnych lat badań na zmienność sprężystości tej tkanki; szczególnie u jabłek odmian Idared i Jonagold.

Wyznaczone wartości modułu sprężystości E_s uzyskane w teście rozciągania skórki w zakresie niewielkich odkształceń umożliwiły zaobserwowanie wpływu lat badań na zmianę właściwości mechanicznych skórki jabłek badanych odmian.



Rys. 19. Siła F_s oraz moduł sprężystości E_s wyznaczone w teście rozciągania wycinka skórki jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Fig. 19. The force F_s and the elasticity modulus E_s obtained at tension test of apple skin (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

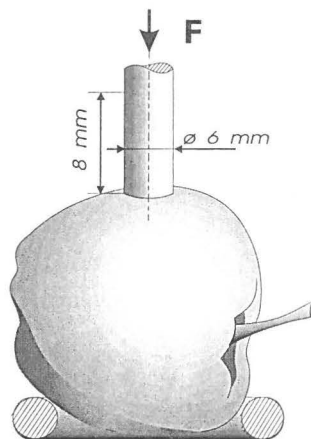
9. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE JABŁEK

Test polegał na pomiarze wartości siły i deformacji w zakresie odkształceń niszczących, pracy deformacji niezbędnej do zniszczenia tkanki jabłka oraz wyznaczenia jej sprężystości w zakresie małych odkształceń (Rys. 20).

Średnia wartość siły F_p przebicia skórki zarejestrowanej w teście penetracji bezpośrednio po zbiorze wynosiła dla jabłek odmian: Gloster - 36,3 N, Idared - 35,2 N i Jonagold - 24,6 N (Rys. 21). W trakcie przechowywania w całym zakresie stosowanych temperatur rejestrowane siły istotnie statystycznie różniły się już po 5-ciu tygodniach i malały wraz ze wzrostem czasu dla wszystkich badanych odmian. Wpływ przechowywania na wartość siły przebicia skórki opisuje silnie ujemna zależność potęgowa, dla której współczynniki korelacji zawierały się w przedziale $-0,83 \div -0,94$. Wyjątek stanowi odmiana Jonagold dla której współczynniki korelacji były niższe $(-0,47 \div -0,79)$. Współczynnik zależności potęgowej ($F_p = 32,8t^{-0,36}$ przy $R = -0,85$) dla odmiany Gloster świadczy, że również w temperaturze $0 \div 2^\circ\text{C}$ przechowywane owoce tracą jędrność opisaną powyższym parametrem. Podobne zmiany w trakcie przechowywania zaobserwo-

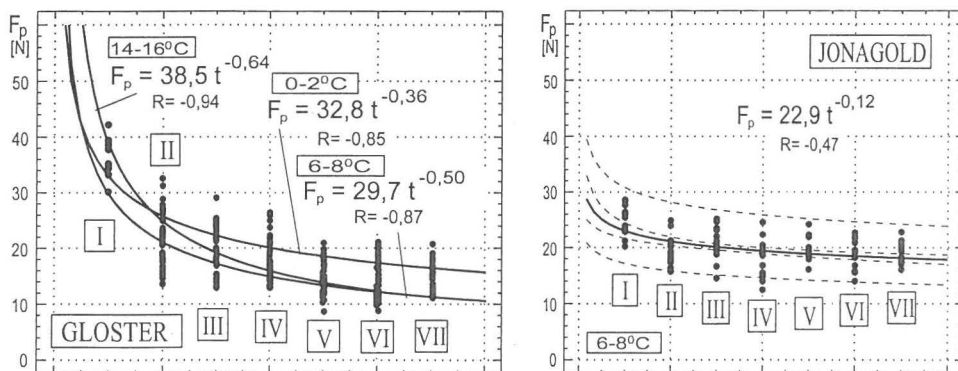
wano dla jabłek odmian Idared i Jonagold. Przykładowe zależności potęgowe opisujące cały okres przechowywania w temperaturze $6\div 8^{\circ}\text{C}$ to: $F_p = 34,8t^{-0,27}$ przy $R = -0,83$ dla odmiany Idared i $F_p = 22,9t^{-0,12}$ przy $R = -0,47$ dla odmiany Jonagold (Rys. 23), przy czym mniejsze wartości siły F_p dla jabłek odmiany Jonagold, świadczą o ich większej delikatności.

Równie wyraźnie opisują wpływ warunków przechowywania na utratę jędrności wartości deformacji przebicia skórki d_p , zwłaszcza dla wyższych temperatur. Zaobserwować można wpływ czasu przechowywania w kolejnych terminach badań, a nie tylko po pierwszym jego okresie. Średnia wartość deformacji zarejestrowanej w teście penetracji bezpośrednio po zbiorze wynosiła dla jabłek odmian: Gloster - 2,21 mm, Idared - 2,34 mm i Jonagold - 2,02 mm. Najwyższą utratę jędrności jabłek przechowywanych w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$ potwierdzają rosnące wartości deformacji przebicia zaobserwowane dla odmian: Gloster $d_p = 2,10t^{0,59}$ przy $R = 0,93$ i Jonagold $d_p = 1,84t^{0,76}$ przy $R = 0,95$ (Rys. 22), a parametry zależności potęgowej świadczą o silnym wpływie warun-



Rys. 20. Test przebijania skórki owoców.

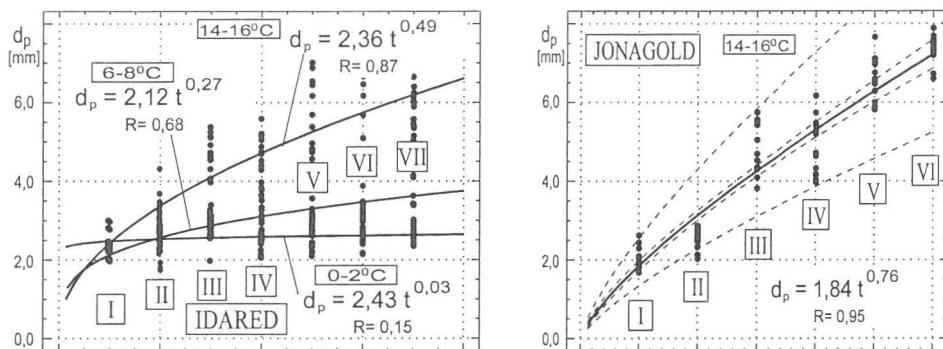
Fig. 20. The penetration test of apple.



Rys. 21. Siła F_p odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej tkanki przechowywanych jabłek uzyskana w teście penetrometrycznym (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 21. The force F_p caused mechanical damage of apple tissue obtained at penetration test (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

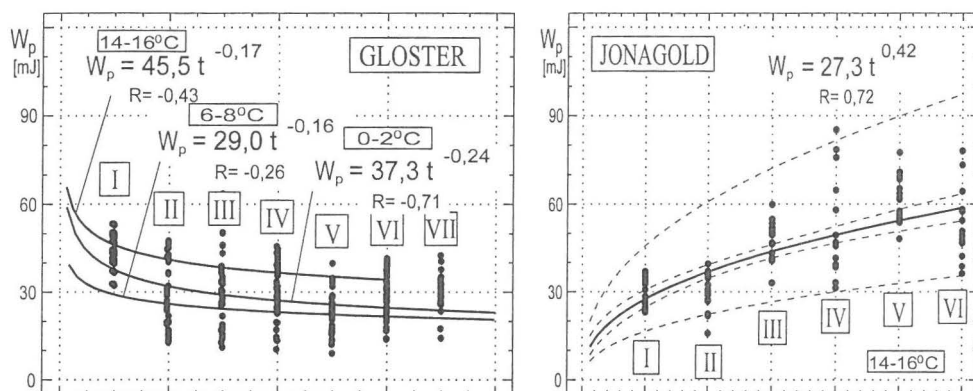
ków przechowywania. Jedynie jabłka odmiany Idared (Rys. 22) przechowywane w temperaturze $0\div 2^{\circ}\text{C}$ nie tracą swojej jędrności o czym świadczą parametry równania $d_p = 2,43t^{0,03}$ przy $R = 0,15$. Zaobserwowano istotny wzrost wartości deformacji w całym okresie przechowywania w wyższych temperaturach. Przechowywanie w temperaturze $0\div 2^{\circ}\text{C}$ powodowało istotny wzrost wartości tego parametru dla owoców odmian Gloster i Jonagold, ale dopiero po 30-tu tygodniach, a w wypadku odmiany Idared nie zaobserwowano istotnych statystycznie zmian w tym okresie badań.



Rys. 22. Deformacja d_p odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej tkanki przechowywanych jabłek uzyskana w teście penetrometrycznym (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 22. The deformation d_p caused mechanical damage of apple tissue obtained at penetration test (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

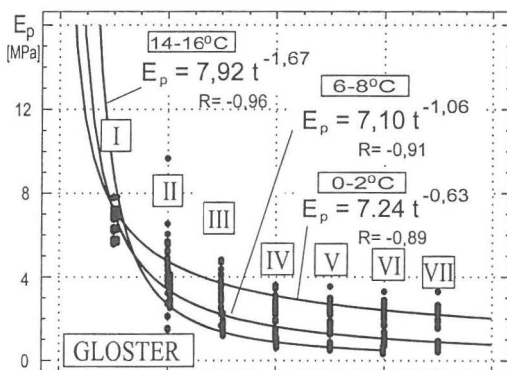
W trakcie przechowywania w zakresie temperatur: $0\div 2^{\circ}\text{C}$ i $6\div 8^{\circ}\text{C}$ rejestrowana praca W_p penetracji dla jabłek odmiany Gloster różniła się istotnie statystycznie tylko po 5 tygodniach przechowywania (Rys. 25). W warunkach przechowywania $14\div 16^{\circ}\text{C}$ przy braku istotnych różnic statystycznych obserwowano powolny spadek badanego parametru wraz z upływem czasu, czego wyrazem jest ujemny współczynnik $R = -0,43$ otrzymany dla zależności potęgowej opisującej ten proces. W przypadku owoców pozostałych odmian zaobserwowano spadek wartości badanego parametru wraz z upływem czasu dla warunków przechowywania $0\div 2^{\circ}\text{C}$. Inaczej proces ten przebiegał w pozostałych temperaturach przechowywania dla których charakter wzrostowy w miarę upływu czasu, był szczególnie wyraźny dla jabłek odmiany Jonagold przechowywanych w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$ (Rys. 23).



Rys. 23. Praca W_p odpowiadająca granicy wytrzymałości mechanicznej tkanki przechowywanych jabłek uzyskana w teście penetrometrycznym (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 23. The work deformation W_p caused mechanical damage of apple tissue obtained at penetration test (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

Średnie wartości modułu sprężystości E_p wyznaczone w zakresie niewielkiej deformacji w teście penetracji wynosiły bezpośrednio po zbiorze dla jabłek odmian: Gloster - 6,62 MPa, Idared - 6,68 MPa i Jonagold - 4,42 MPa.



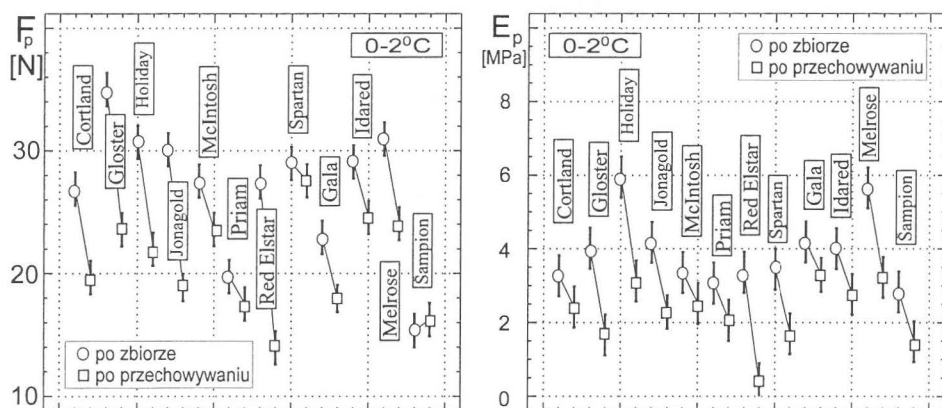
Rys. 24. Moduł sprężystości E_p uzyskany w teście penetrometrycznym przechowywanych jabłek (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 24. The elasticity modulus E_p obtained at penetration test of storage apple (study time: I - after harvest, II - after storage 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 and 30 weeks).

W trakcie przechowywania jabłek odmiany Gloster (Rys. 24) w podwyższonej temperaturze wyznaczone wartości modułu sprężystości istotnie statystycznie różniły się już po 5 tygodniach, a zmiany wraz ze wzrostem czasu opisują funkcje potęgowe: $E_p = 7,92t^{-1,67}$ przy $R = -0,96$ dla $14 \div 16^\circ\text{C}$ i $E_p = 7,10t^{-1,06}$ przy $R = -0,91$ dla $6 \div 8^\circ\text{C}$. Przechowywanie w temperaturze $0 \div 2^\circ\text{C}$ powodowało mniejszy spadek badanego parametru. Dla odmian Idared i Jonagold zaobserwowano podobną zależność. Wartości wyznaczonego parametru obniżały się w stopniowo, jednak istotnie statystycznie dopiero podczas przechowywania w wyższych temperaturach.

Jędrność owoców badanych odmian odwzorowana wartościami wyznaczonych parametrów w trakcie przechowywania w badanym zakresie temperatur spada, szczególnie w pierwszym okresie po zbiorze. Podczas dalszego przechowywania wartości te nadal maleją, choć już w mniejszym stopniu, a wyraźniejszą utratę jędrności jabłek wyznaczoną w teście penetracji zaobserwowano dla jabłek przechowywanych w temperaturze 14÷16°C.

Średnie wartości siły F_p przebicia skórki owocu otrzymane w teście penetrometrycznym dla 12 odmian jabłek są przedstawione na Rys. 25. Przechowywanie chłodnicze miało istotny statystycznie wpływ na wielkość wyznaczanej siły dla większości badanych odmian. Po zbiorze najwyższe wartości badanego parametru zaobserwowano u jabłek odmian Gloster (35,0 N), Melrose (30,9 N), Holiday (30,7 N) oraz Jonagold (30,1 N), zaś najniższe dla odmian Priam (19,7 N) i Šampion (15,3 N). Wartości siły przebicia wyznaczona w teście penetrometrycznym wyraźnie obrazują zjawisko spadku jędrności owoców badanych odmian po przechowywaniu, za wyjątkiem odmiany Spartan i Šampion. Wyznaczona powyższym parametrem jędrność jabłek tych dwóch odmian charakteryzowała się podobnym poziomem w stadium dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej. Parametr odpowiadający sprężystości, wyrażony jako moduł sprężystości E_p , wyznaczony w teście penetrometrycznym dla jabłek odmian: Cortland, Gala, Gloster, Holiday, Jonagold, Idared, McIntosh, Melrose, Priam, Red Elstar, Spartan, Šampion (Rys. 26) obniżył się po przechowywaniu chłodniczym. Dla owoców większości odmian przechowywanie miało istotny statystycznie wpływ na spadek wielkości

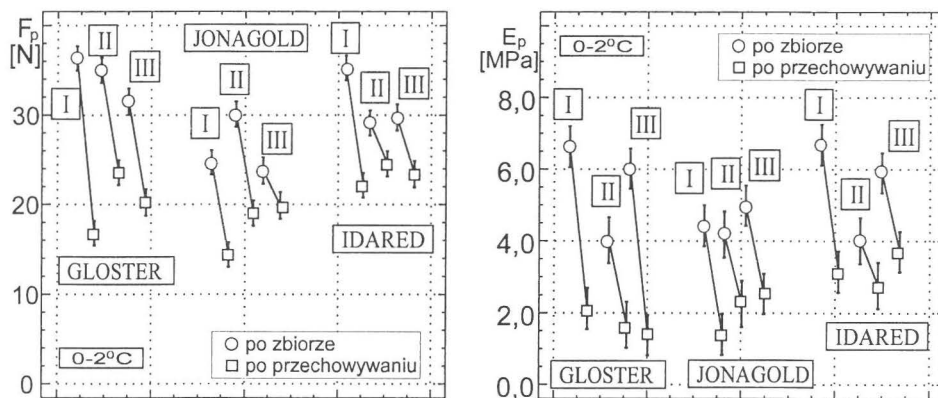


Rys. 25. Siła F_p oraz moduł sprężystości E_p uzyskane w teście penetrometrycznym przechowywanych jabłek.

Fig. 25. The force F_p and the elasticity modulus E_p obtained at penetration test of storage apple.

obliczanego parametru. Największe wartości modułu sprężystości jabłek zaobserwowano w stadium dojrzałości zbiorczej dla jabłek odmian Holiday (5,96 MPa) i Melrose (5,65 MPa), a najniższe wartości otrzymano dla owoców w stadium dojrzałości konsumpcyjnej dla odmiany Red Elstar (0,34 MPa) i wartość ta była ~10 razy mniejsza niż dla odmiany Gala (3,29 MPa), Melrose (3,22 MPa), Holiday (3,13 MPa) czy Idared (2,75 MPa). Dla wszystkich kombinacji badań przy użyciu testu penetrometrycznego, za wyjątkiem wartości siły F_p przebicia skórki jabłek odmiany Šampion, stwierdzono wyraźny wpływ przechowywania na wyznaczone parametry charakteryzujący się spadkiem ich wartości.

Średnie wartości siły przebicia skórki F_p i modułu sprężystości E_p dla jabłek odmian: Gloster, Jonagold i Idared wyznaczone w teście penetrometrycznym w kolejnych latach badań przedstawiono na Rys. 26. Jędrność owoców badanych odmian wyrażona wartościami wyznaczonych parametrów spada istotnie po przechowywaniu. Jedynym wyjątkiem były wartości modułu sprężystości jabłek odmiany Idared w drugim roku badań, dla których różnice te nie były istotne statystycznie i zawierały się w granicach od 2,7 MPa do 4,0 MPa. W przypadku owoców odmiany Jonagold nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic wartości wyznaczonego parametru E_p uwarunkowanego kolejnym rokiem badań. Jabłka pozostałych odmian po zbiorze w drugim roku badań charakteryzował istotnie najniższy poziom wartości sprężystości, wyznaczony w granicach 4 MPa. Istotnie najwyższe wartości siły przebicia skórki po zbiorze owoców zanotowano dla odmiany Jonagold w drugim roku badań - 30,1 N i odmiany



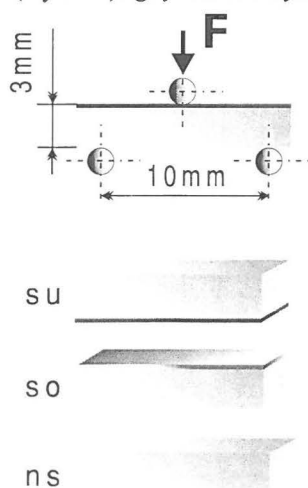
Rys. 26. Siła F_p oraz moduł sprężystości E_p wyznaczone w teście penetrometrycznym jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Fig. 26. The force F_p and the elasticity modulus E_p obtained at penetration test of apple (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Idared w pierwszym roku - 35,2 N, zaś po przechowywaniu dla odmiany Gloster w drugim roku badań - 23,9 N. Jędrność owoców badanych odmian odwzorowana wartościami siły przebiccia skórki i modułu sprężystości po przechowywaniu w kolejnych latach badań spada. Duże zróżnicowanie jędrności jabłek po przechowywaniu oraz powtarzalność uzyskanych wyników w kolejnych latach eksperymentu przy użyciu powyższej metody wskazują na przydatność stosowania tego testu w zakresie małych odkształceń do oszacowania zmienności właściwości mechanicznych owoców przechowywanych.

10. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE PRZYPOWIERZCHNIOWEJ WARSTWY TKANKI JABŁEK

Test zginania belki tkanki jabłka wykonywano w trzech położeniach próbki (Rys. 27): gdy skórka była położona od strony obciążenia (so), od strony przeciwnej (su) oraz gdy belka miąższu była bez skórki (ns).



Rys. 27. Test zginania belki tkanki jabłka.

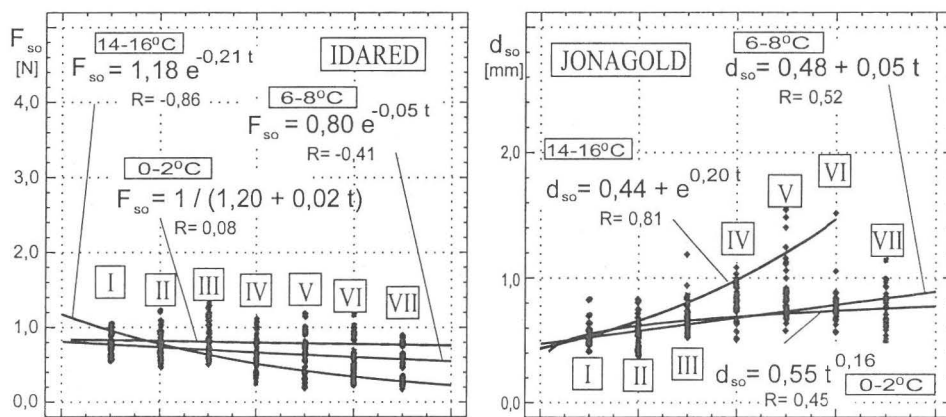
Fig. 27. The bending test of apple tissue.

W trakcie przechowywania, w całym zakresie stosowanych temperatur, rejestrowane wartości maksymalne siły F_{so} uszkodzenia belki tkanki (położenie skórki od strony obciążenia) jabłek trzech odmian malały wraz z upływem czasu. Wpływ przechowywania na wartość badanego parametru opisują ujemne zależności, dla których na przykład w wypadku owoców odmiany Idared i temperatury $14 \div 16^\circ\text{C}$ współczynnik korelacji wynosił -0,86 (Rys. 28), zaś w pozostałych przypadkach wartości były zazwyczaj bliskie -0,5. Natomiast dla wartości deformacji d_{so} stwierdzono istotny statystycznie wzrost jej poziomu w warunkach $14 \div 16^\circ\text{C}$ dla jabłek odmiany Jonagold, którą opisuje zależność potęgowa: $d_{so} = 0,44 + e^{0,20t}$ dla $R = 0,81$ (Rys. 28), a dla odmiany Gloster zależność: $d_{so} = 0,55t^{0,6}$ dla $R = 0,76$. W pozostałych kombinacjach doświadczenia badany parametr miał również tendencję

wzrostową w funkcji czasu, a współczynniki korelacji mieściły się w zakresie od 0,22 do 0,65.

W trakcie przechowywania w zakresie temperatur $14 \div 16^\circ\text{C}$ rejestrowana praca uszkodzenia badanych próbek tkanki jabłek odmiany Jonagold i Gloster miała nieznaczną tendencję wzrostową, opisaną odpowiednio zależnościami: $W_{so} = 0,18e^{0,08t}$

dla $R = 0,26$ i $W_{so} = 0,26t^{0,13}$ dla $R = 0,11$ (Rys. 29). Inaczej zależności te przebiegały w pozostałych przypadkach, charakteryzując się spadkiem wartości w miarę upływu czasu, szczególnie wyraźnie dla temperatury $0 \div 2^\circ\text{C}$. Niemniej jednak dość niski poziom wartości współczynników korelacji uzyskany dla funkcji opisujących zmiany wielkości pracy uszkodzenia badanej próbki związany jest ze niewielkimi zmianami wielkości badanego parametru w trakcie przechowywania. W zakresie małych odkształceń, takich jednak przy których może wystąpić zgniecenie przypowierzchniowej warstwy owocu uwidacznia się zróżnicowanie wyznaczonego modułu sprężystości belki E_{so} jabłek odmiany Jonagold w trakcie przechowywania, na co wskazują współczynniki funkcji wykładniczej badanego parametru w czasie: $E_{so} = 5,46e^{-0,20t}$ dla $R = -0,80$ ($0 \div 2^\circ\text{C}$), $E_{so} = 5,48e^{-0,23t}$ dla $R = -0,76$ ($6 \div 8^\circ\text{C}$) oraz $E_{so} = 4,57e^{-1,02t}$ dla $R = -0,85$ ($14 \div 16^\circ\text{C}$) (Rys. 30). Podobnie proces ten przebiegał dla owoców pozostałych badanych odmian. Jedynie dla jabłek odmiany Idared przechowywanych w warunkach $0 \div 2^\circ\text{C}$ nie stwierdzono wpływu tej temperatury na zmiany wielkości badanego parametru. Wysoki poziom wartości współczynników korelacji uzyskany dla pozostałych zależności opisujących zmiany wielkości modułu sprężystości związany jest z różnicami pomiędzy wielkościami badanego parametru w trakcie przechowywania. Warunki $14 \div 16^\circ\text{C}$ powodują w początkowym okresie wyraźny i trwały spadek sprężystości badanych owoców. W pozostałych temperaturach przechowywania dochodzi również do obniżenia poziomu sprężystości, niemniej proces zachodzi wolniej.

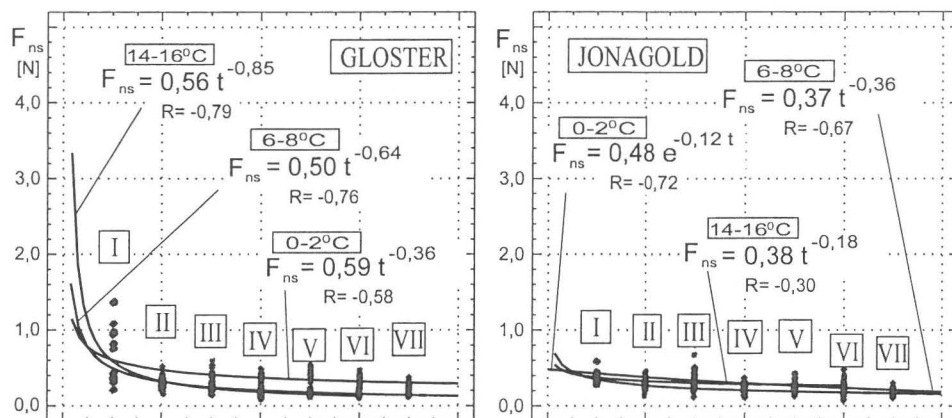


Rys. 28. Siła F_{so} i deformacja d_{so} uzyskane w teście zginania wycinka tkanki przechowywanych jabłek (terminy badań: I - po zbiorze, II - po przechowywaniu 5, III - 10, IV - 15, V - 20, VI - 25 i VII - 30 tygodni).

Fig. 28. The force F_p and the elasticity modulus E_p obtained at bending test of apple tissue (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

Podobne wartości modułów sprężystości: E_{so} i E_{su} wskazują na poprawność wykonania testu zginania i prawidłowość doboru zakresu odkształceń przy wyznaczaniu tej wielkości. Natomiast, wartości parametrów mechanicznych tkanki: F_{su} , d_{su} , W_{su} , wyznaczone w zakresie odkształceń niszczących były około dwa razy większe niż uzyskane dla belki ze skórką od strony elementu obciążającego, zarówno dla jabłek po zbiorze jak i po przechowywaniu. Wskazuje to na wyraźny wpływ oddziaływania wytrzymałości skórki w tym położeniu testowania próbki. Potwierdzają to również dużo niższe wartości otrzymane w badaniach belki samego miąższu wyciętego z przypowierzchniowej warstwy jabłka.

Dla owoców wszystkich badanych odmian wyznaczone wartości siły zginania F_{ns} malały w trakcie przechowywania. Jednak wyraźny spadek wyznaczonego parametru zaobserwowano dla jabłek odmian Gloster i Jonagold (Rys. 33) w wyższych temperaturach przechowywania $14\div 16^{\circ}\text{C}$ i $6\div 8^{\circ}\text{C}$, na co wskazuje zakres współczynników korelacji od -0,67 do -0,79 uzyskany dla funkcji opisujących zachowanie tego parametru w czasie.

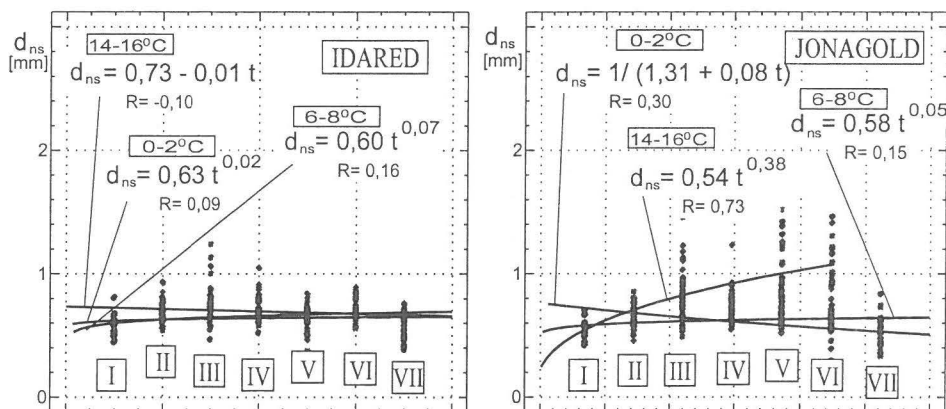


Rys. 33. Siła F_{ns} uzyskana w teście zginania wycinka tkanki przechowywanych jabłek (terminy badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 33. The force F_{ns} obtained at bending test of apple tissue (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

Zaobserwowano wyraźnie zróżnicowanie odmian reprezentowane dużą zmiennością wartości deformacji d_{ns} zginania wycinka miąższu. Brak wpływu czasu i warunków przechowywania na wartości tego parametru stwierdzono tylko w przypadku miąższu owoców odmiany Idared (Rys. 34). Jabłka odmiany Gloster charakteryzowały się słabym spadkiem poziomu deformacji d_{ns} , co potwierdzają współczynniki korelacji funkcji opisujących zmiany badanego parametru w czasie

mieszczące się w zakresie od $-0,18$ do $-0,49$. W przypadku owoców odmiany Jonagold zaobserwowano wzrost wartości deformacji d_{ns} , szczególnie istotny dla temperatury przechowywania $14 \div 16^\circ\text{C}$. Potwierdzają to również uzyskane współczynniki zależności potęgowej tego parametru w funkcji czasu: $d_{ns} = 0,54t^{0,38}$ dla $R = 0,73$ (Rys. 35).

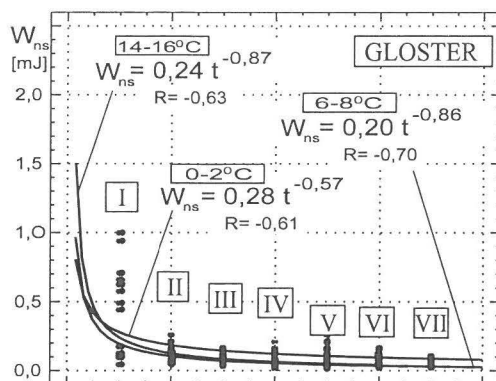


Rys. 34. Deformacja d_{ns} uzyskana w teście zginania wycinka miąższu przechowywanych jabłek (terminy badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 34. The deformation d_{ns} obtained at bending test of apple flesh (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

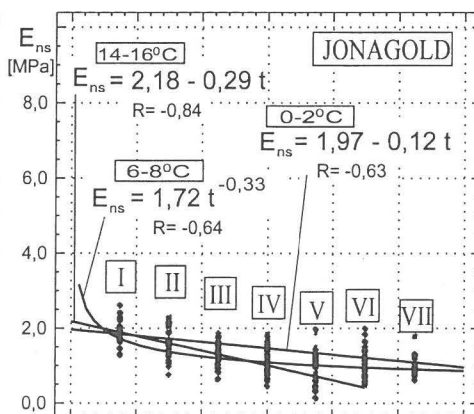
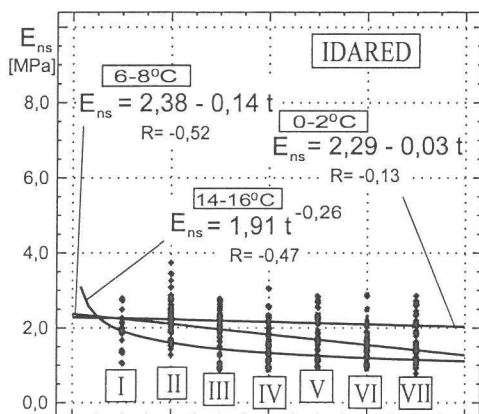
Wysoki poziom wartości współczynników korelacji (od $-0,63$ do $-0,84$) uzyskano dla zależności opisujących spadek wielkości modułu sprężystości E_{ns} zginania belki miąższu, owoców odmian Gloster (warunki przechowywania $14 \div 16^\circ\text{C}$ i $6 \div 8^\circ\text{C}$) oraz Jonagold (pełen zakres temperatur). Jedynie jabłka odmiany Idared przechowywane w temperaturze $0 \div 2^\circ\text{C}$ nie tracą swojej sprężystości (Rys. 36), o czym świadczą parametry równania $E_{ns} = 2,29 - 0,03t$ przy $R = -0,13$. W początkowym okresie przechowywania w wyższych temperaturach, zaobserwowano istotny spadek sprężystości. W trakcie przechowywania dla całego zakresu temperatur rejestrowana praca uszkodzenia W_{ns} badanych próbek tkanki jabłek odmiany Gloster charakteryzowała się wyraźnym spadkiem, który opisują zależności potęgowe o współczynnikach korelacji zawierających się w zakresie od $-0,61$ do $-0,70$ (Rys. 35). W pozostałych przypadkach zależność ta miała podobną tendencję. Jedynie zmiany tego parametru uzyskane dla owoców odmiany Jonagold przechowywanych w temperaturze $14 \div 16^\circ\text{C}$ opisuje zależność prostoliniowa: $W_{ns} = 0,12 + 0,008t$ dla $R = 0,19$, zaś uzyskane współczynniki wskazują na brak wpływu badanych czynników na wyznaczany parametr.

Wysoki poziom wartości współczynników korelacji (od -0,63 do -0,84) uzyskano dla zależności opisujących spadek wielkości modułu sprężystości E_{ns} zginania belki miąższu, owoców odmian Gloster (warunki przechowywania $14\div 16^{\circ}\text{C}$ i $6\div 8^{\circ}\text{C}$) oraz Jonagold (pełen zakres temperatur). Jedynie jabłka odmiany Idared przechowywane w temperaturze $0\div 2^{\circ}\text{C}$ nie tracą swojej sprężystości (Rys. 36), o czym świadczą parametry równania $E_{ns}=2,29-0,03t$ przy $R=-0,13$. W początkowym okresie przechowywania w wyższych temperaturach, zaobserwowano istotny spadek sprężystości.



Rys. 35. Praca W_{ns} uzyskana w teście zginania wycinka miąższu przechowywanych jabłek (terminy badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

Fig. 35. The work deformation W_{ns} obtained at bending test of apple flesh (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).



Rys. 36. Moduł sprężystości E_{ns} uzyskany w teście zginania wycinka miąższu przechowywanych jabłek (terminy badań: I – po zbiorze, II – po przechowywaniu 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 i VII – 30 tygodni).

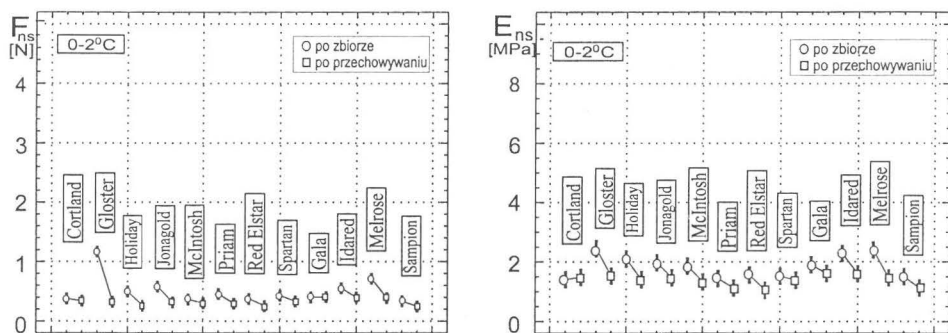
Fig. 36. The elasticity modulus E_{ns} obtained at bending test of apple flesh (study time: I – after harvest, II – after storage 5, III – 10, IV – 15, V – 20, VI – 25 and 30 weeks).

Wytrzymałość belki na zginanie po przechowywaniu różniła się dwukrotnie w zależności od kierunku obciążenia. Natomiast, moduł sprężystości miąższu jabłek bez skórki wyznaczony podczas zginania belek nie różnił się istotnie po okresie przechowywania w większości badanych przypadków. Jest to kolejny dowód wskazujący na konieczność oceny "jędrności" jabłek razem ze skórą, a nie tak jak w dotychczas stosowanych metodach po jej usunięciu. Największe zróżnicowanie sprężystości jabłek w różnym stadium dojrzałości stwierdzono przy użyciu testu zginania belki miąższu pokrytego skórą od strony obciążenia. Tego typu przypadek zginania miąższu jabłek pokrytego skórą, gdy skóra "pracuje" na ściskanie występuje podczas wgniatań czy obijania owocu. Potwierdza to, że jędrność oceniana przy pomocy testu zginania pozwala na pełne oszacowanie podatności owocu na uszkodzenia.

Metoda zginania wycinka przypowierzchniowej warstwy jabłka w kształcie belki może być użyta do pomiaru jędrności jabłek, pozwalając na pomiar w zakresie siły odpowiadającej dotykowi palców, a moduł sprężystości jest wielkością gwarantującą porównanie jędrności jabłek i wpływ warunków przechowywania oraz prawidłową ocenę stanu fizycznego owoców.

Siłę niszczącą wyznaczoną dla belki miąższu w teście zginania dla odmian: Cortland, Gala, Gloster, Holiday, Jonagold, Idared, McIntosh, Melrose, Priam, Red Elstar, Spartan, Šampion przedstawiono na Rys. 37. Dla owoców wszystkich badanych odmian wyznaczone wartości siły zginania F_{ns} malały po przechowywaniu. Jednak istotne statystycznie różnice stwierdzono tylko dla odmian Gloster, Holyday, Jonagold i Melrose. Najwyższe wartości siły po zbiorze zaobserwowano dla jabłek odmian Gloster (1,17 N) i Melrose (0,71 N). Najniższe wartości otrzymano dla odmiany Šampion: 0,33 N po zbiorze i 0,24 N po przechowywaniu. Parametr ten dla jabłek innych badanych odmian po przechowywaniu zawierał się w zakresie 0,25÷0,58 N.

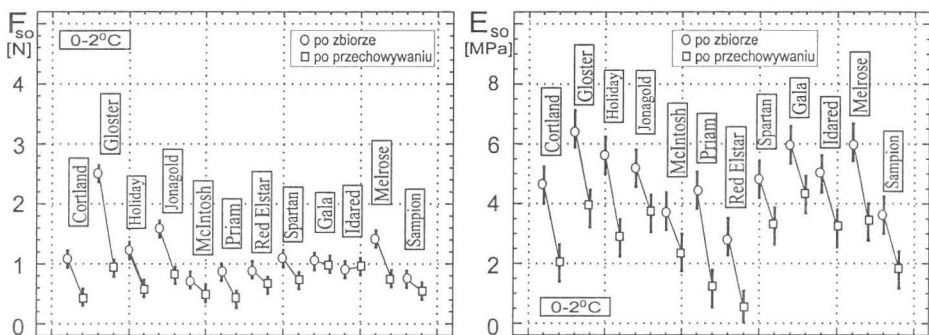
Średnie wartości modułu sprężystości E_{ns} wyznaczone dla zginanej belki miąższu dla 12 odmian są przedstawione na Rys. 37. Parametr ten osiąga wartości w zakresie 1,04÷2,45 MPa. Przechowywanie chłodnicze miało istotny statystycznie wpływ na spadek wielkości modułu sprężystości dla owoców większości badanych odmian. Jedynie w wypadku jabłek odmiany Cortland wyznaczany parametr osiągnął podobny poziom (po zbiorze - 1,41 MPa i po przechowywaniu - 1,49 MPa).



Rys. 37. Siła F_{ns} oraz moduł sprężystości E_{ns} uzyskane w teście zginania wycinka mięszu przechowywanych jabłek.

Fig. 37. The force F_{ns} and elasticity modulus E_{ns} obtained at bending test of apple flesh.

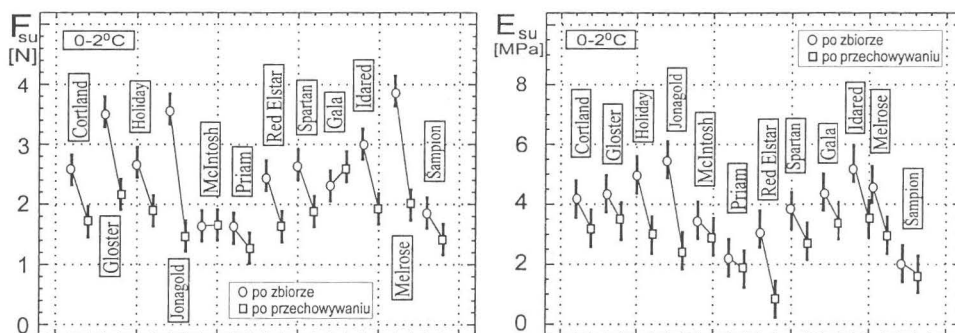
Podobne tendencje zaobserwowano dla wartości siły F_{so} wyznaczonej dla belki mięszu pokrytej skórą od strony obciążenia (Rys. 38). Najwyższe wartości po zbiorze zostały zaobserwowane dla odmian Gloster (2,50 N), Jonagold (1,58 N) i Melrose (1,42 N). Parametr ten dla jabłka innych badanych odmian zawierał się w zakresie 0,44÷1,22 N. Wyższe wartości badanego parametru w porównaniu do poprzedniego testu wskazują na wpływ wytrzymałości skórki na wytrzymałość mechaniczną powierzchniowej warstwy tkanek jabłka. Wartości modułu sprężystości E_{so} (Rys. 38) wyznaczone podczas testu zginania belki mięszu pokrytej skórą od strony obciążenia wskazują bardziej wyraźnie wpływ przechowywania na spadek jędrności owoców oraz pozwalają na zróżnicowanie odmian. Wartości tego parametru wyznaczone dla jabłek po zbiorze zawierają się w zakresie od 2,90 MPa (Red Elstar) do 6,50 MPa (Gloster) i były prawie dwa razy większe niż po przechowywaniu.



Rys. 38. Siła F_{so} oraz moduł sprężystości E_{so} uzyskane w teście zginania wycinka tkanki przechowywanych jabłek.

Fig. 38. The force F_{so} and elasticity modulus E_{so} obtained at bending test of apple flesh.

Wartości parametru mechanicznego F_{su} (Rys. 39) wyznaczone dla jabłek po zbiorze i przechowywaniu były około dwa razy większe niż uzyskane dla belki tkanki testowanej ze skórą od strony elementu obciążającego i zawierały się w przedziale od 1,35 N do 3,88 N. Pozwala to zaobserwować oddziaływanie wytrzymałości skórki w tym położeniu testowanej próbki. Wyraźny spadek wartości F_{su} po przechowywaniu zaobserwowano dla jabłek odmian: Cortland, Gloster, Holiday, Jonagold, Red Elstar, Spartan, Idared i Melrose. Dla owoców pozostałych odmian nie stwierdzono istotnych różnic statystycznych. W teście zginania belki miąższu pokrytej skórą od strony podpory uzyskano podobny poziom wartości modułu sprężystości E_{su} (Rys. 39) do omawianego wcześniej parametru E_{so} . Stwierdzono wpływ przechowywania na spadek badanego parametru, niemniej jednak tylko w przypadku jabłek odmian: Holiday, Jonagold, Red Elstar, Idared i Melrose był on istotny statystycznie. W większości przypadków zaobserwowano obniżenie wartości parametrów mechanicznych wyznaczonych w teście zginania tkanki jabłek 12 odmian po przechowywaniu. Szczególnie zmiany modułu sprężystości E_{so} wyznaczonego w teście zginania belki miąższu pokrytej skórą od strony obciążenia wyraźnie wskazują wpływ przechowywania na sprężystość owocu oraz pozwalają na dokładne oszacowanie różnic odmianowych.

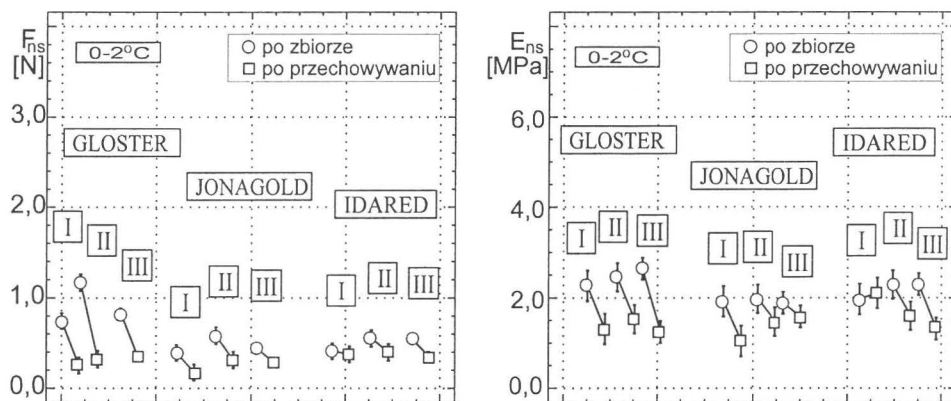


Rys. 39. Siła F_{su} oraz moduł sprężystości E_{su} uzyskane w teście zginania wycinka tkanki przechowywanych jabłek.

Fig. 39. The force F_{su} and the elasticity modulus E_{su} obtained at bending test of apple tissue.

Parametry mechaniczne: siła uszkodzenia i moduł sprężystości uzyskane w teście zginania belki przypowierzchniowej warstwy tkanki wykorzystane do oceny wpływu przechowywania na jędnosc jabłek zweryfikowano w trzech kolejnych latach badań. Rysunek 40 przedstawia wyznaczone średnie wartości powyższych parametrów dla belki miąższu owoców odmian: Gloster, Jonagold i Idared. Istotnie najwyższe

poziom siły F_{ns} zaobserwowano w drugim roku badań dla jabłek odmiany Gloster - 1,19 N i odmiany Jonagold - 0,56 N, po zbiorze. Dla owoców badanych odmian nie zaobserwowano po przechowywaniu istotnych różnic w wielkości tego parametru. Jednak wyraźnie uwidocznił się wpływ przechowywania na badaną cechę. Podobne zależności zaobserwowano dla wyznaczonego modułu sprężystości E_{ns} , za wyjątkiem pierwszego roku badań i owoców odmiany Idared dla których parametr ten był na podobnym poziomie bliskim 2 MPa, zarówno po zbiorze jak i przechowywaniu. Lata badań nie miały istotnego wpływu na wartość modułu sprężystości wyznaczonej w teście zginania belki miąższu, o czym świadczy brak istotnych różnic pomiędzy średnimi uzyskanymi dla tego parametru.



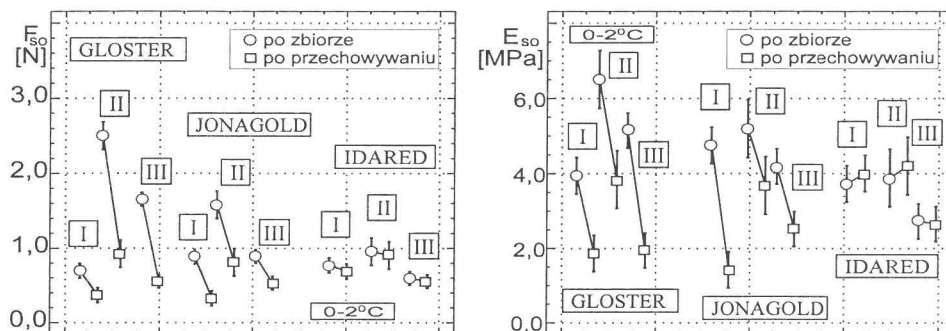
Rys. 40. Siła F_{ns} oraz moduł sprężystości E_{ns} uzyskane w teście zginania wycinka miąższu przechowywanych jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Fig. 40. The force F_{ns} and the elasticity modulus E_{ns} obtained at bending test of apple flesh (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 and III – 1998/1999).

Średnie wartości siły F_{so} wyznaczone dla belki miąższu pokrytej skórą od strony obciążenia dla jabłek odmian: Gloster, Jonagold i Idared w trzech kolejnych latach badań są przedstawione na Rys. 41. Istotnie najwyższe wartości zostały zaobserwowane w drugim roku eksperymentu dla owoców odmian: Gloster, po zbiorze - 2,50 N i po przechowywaniu - 0,94 N oraz Jonagold, po zbiorze - 1,58 N i po przechowywaniu - 0,82 N. Parametr ten wyznaczony dla jabłek odmiany Idared wykazywał większą stabilność zawierając się w zakresie od 0,53 N do 0,95 N i nie podlegał istotnym zmianom uwarunkowanym przechowywaniem czy kolejnym rokiem badań.

Podobne zależności zaobserwowano dla modułu sprężystości E_{so} wyznaczonego w tym teście (Rys. 41). W przypadku przechowywanych jabłek odmiany

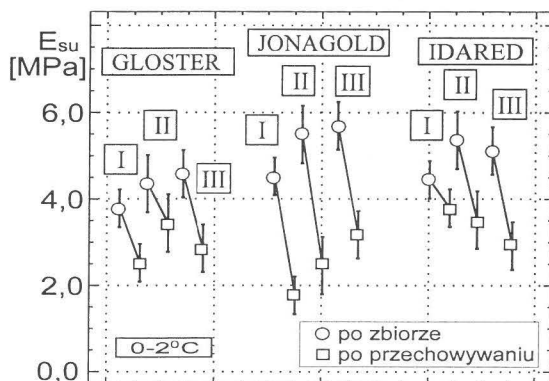
Idared, za wyjątkiem trzeciego roku badań, nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic wartości wyznaczonego parametru uwarunkowanego latami badań. Istotnie najwyższe wartości zostały zaobserwowane w drugim roku eksperymentu dla jabłek odmiany Gloster, po zbiorze (6,51 MPa) i po przechowywaniu (3,84 MPa), a najniższe w pierwszym roku dla jabłek odmiany Jonagold po przechowywaniu (1,43 MPa).



Rys. 41. Siła F_{so} oraz moduł sprężystości E_{so} uzyskane w teście zginania wycinka miąższu przechowywanych jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Fig. 41. The force F_{ns} and the elasticity modulus E_{ns} obtained at bending test of apple flesh (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 and III – 1998/1999).

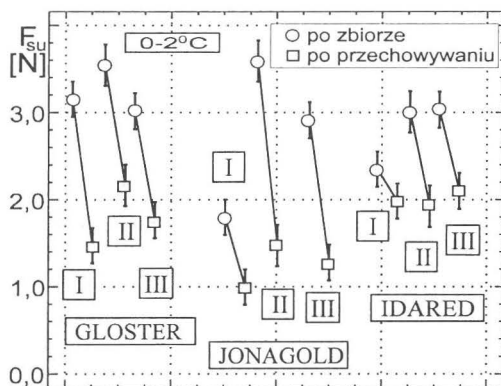
Zbliżony poziom wartości modułu sprężystości E_{su} zanotowano w teście zginania belki pokrytej skórą od strony podpory (Rys. 42). W większości przypadków zaobserwowano istotny wpływ przechowywania na wartości modułu sprężystości. Jednak nie stwierdzono istotnych różnic dla średnich wartości powyższego parametru między latami badań.



Rys. 42. Moduł sprężystości E_{su} uzyskany w teście zginania wycinka tkanki przechowywanych jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

Fig. 42. The elasticity modulus E_{su} obtained at bending test of apple tissue (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 and III – 1998/1999).

Średnie wartości siły F_{su} wyznaczone dla belki mięszu pokrytego skórą od strony podpory dla jabłek odmian: Gloster, Jonagold i Idared w trzech kolejnych latach badań są przedstawione na Rys. 43. Zanotowano istotnie wyższy poziom wartości tego parametru niż w pozostałych dwóch przypadkach: F_{ns} i F_{so} . Nie stwierdzono istotnego wpływu kolejnych lat badań na zróżnicowanie wartości siły uszkodzenia, za wyjątkiem owoców odmian: Jonagold i Idared po zbiorze, dla których zakres w którym zawierały się wartości F_{su} był dość szeroki i mieścił się w przedziale od 1,79 N do 3,58 N.



Rys. 43. Siła F_{su} uzyskana w teście zginania wycinka tkanki przechowywanych jabłek (rok badań: I – 1996/97, II – 1997/98 i III – 1998/1999).

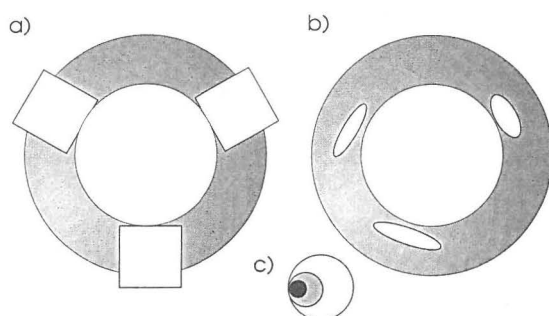
Fig. 43. The force F_{su} obtained at bending test of apple tissue (study year: I – 1996/97, II – 1997/98 and III – 1998/1999).

Dla większości przypadków różnego położenia belki mięszu w teście zginania zaobserwowano istotny wpływ przechowywania na wartości parametrów mechanicznych takich jak: siła uszkodzenia i moduł sprężystości. Jednak lata badań nie miały tak istotnego wpływu na krytyczne wartości mechaniczne uzyskane w teście zginania belki tkanki jabłek w różnych wariantach o czym świadczy brak istotnych różnic pomiędzy średnimi dla tych parametru. Szczególnie stabilnie zachowywał się wyznaczony moduł sprężystości warunkowany kolejnymi latami badań.

11. DEFORMACJA W OBSZARZE PODPARCIA OWOCU

Metody oparte na rejestracji zależności siła-deformacja wymagają precyzyjnych technik pomiarowych dla wyznaczenia tych wielkości. Nie powtarzalna i ograniczona wielkość pola powierzchni kontaktu owocu z podporą jest często przeszkodą dla prawidłowego wykonania testu.

Pomiar deformacji obiektu podpartego jednostronnie elementem o innym kształcie niż próbnik oraz wypukły i nieregularny kształt jabłek powoduje, że deformacja owocu od strony penetrometru i od strony przeciwej; to jest podpory, jest różna z obu stron. Wpływa to na niedokładność pomiaru odkształcenia, a niepewność tego która ze stron właściwie podlega deformacji w większym stopniu, była przyczyną badania deformacji owocu dla różnego kształtu podpór oraz penetrometrów (Rys. 44).



Rys. 44. Pole powierzchni kontaktu podpory potrójnej wahliwej (a), torusa (b) oraz penetrometrów o średnicy: 3, 6, i 11 mm (c).

Fig. 44. The contact area of triple support (a), ring (b) and penetrometer with diameters: 3, 6 and 11 mm (c).

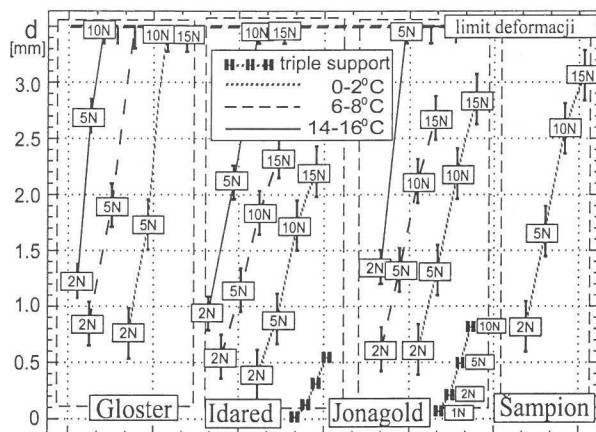
Podpora składająca się z trzech wahliwych ramion zapewnienia całkowite przyleganie owocu z podporą, a zarazem stałą powierzchnię kontaktu 300 mm^2 .

Dla porównania penetrometr o średnicy 3 mm posiada powierzchnię przekroju ponad 40 razy mniej niż powierzchnia kontaktu potrójnej podpory. Ze względu na małą powierzchnię kontaktu równą $7,06 \text{ mm}^2$, wyznaczono deformację pod wpływem tego próbnika tylko dla wartości sił progowych: 0,5 i 1 N.

Pole powierzchni przekroju pozostałych penetrometrów o średnicy 11 i 6 mm wynosiło odpowiednio $94,9 \text{ mm}^2$ i $28,3 \text{ mm}^2$; czyli ponad 3 i 10 razy mniej niż powierzchnia kontaktu potrójnej podpory.

Średnie wartości deformacji d owocu obustronnie opartego na podwójnym torusie dla poziomów siły: 2, 5, 10 i 15 N (odmiany: Gloster, Idared, Jonagold i Šampion) przedstawia Rys. 45. Otrzymane rezultaty wskazują, iż przy poziomie siły 2 N deformacja osiąga wartości w zakresie $0,3 \div 1,3 \text{ mm}$. Zaś poziomowi siły 5 N odpowiadają wyższe wartości deformacji ($1,3 \div 2,4 \text{ mm}$). Przechowywanie w temperaturze $14\text{--}16^\circ\text{C}$ miało statystycznie istotny wpływ na wielkość deformacji wyznaczonej dla badanych odmian przy wszystkich poziomach siły. Interesujące okazało się, iż dla poziomu siły 10 i 15 N wyznaczona deformacja jabłek odmiany Gloster (przechowywanych we wszystkich badanych temperaturach) wynosiła ponad 3,5 mm. Tak duże wartości otrzymane dla podpory pierścieniowej spowodowane były początkowo małą powierzchnią kontaktu podpory z owocem o nieregularnym kształcie.

Dla jabłek odmiany Idared o podobnej jędrności, stwierdzono niższe wartości deformacji. Przy regularnym kształcie owoców tej odmiany uzyskano prawie stałe pole powierzchni kontaktu w trakcie deformacji od początku wzrostu siły co spowodowało mniejszą deformację. Jednak nie powtarzalna i ograniczona wielkość pola powierzchni kontaktu z podporą podwójnego pierścienia może wpływać na niedokładność pomiaru.

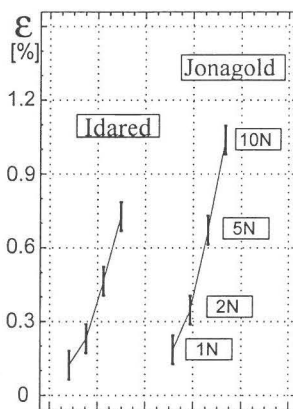


Rys. 45. Deformacja d jabłek wyznaczona dla podpory pierścieniowej (torus) i potrójnej (triple support).

Fig. 45. The apple deformation d obtained for ring and triple support.

Deformacja d dla poziomów siły 1, 2, 5, i 10 N jabłek odmian Idared i Jonagold przy użyciu potrójnej wahliwej podpory jest przedstawiona na Rys. 45. Dla każdego zakresu siły zastosowanego w tych badaniach deformacja nie przekroczyła 0,5 mm dla owoców odmiany Idared i 0,8 mm dla odmiany Jonagold. Otrzymana deformacja dla poziomu siły 2 N miała najniższą wartość i nie przekroczyła 0,2 mm dla jabłek obydwu odmian.

Odskształcenie owoców odmian Idared i Jonagold przy użyciu potrójnej wahliwej podpory przedstawione jest na Rys. 46. Średnie wartości dla następujących poziomów siły; 1, 2, 5 i 10 N dla jabłek odmiany Idared wynosiły 0,12; 0,23; 0,46 i 0,73 % oraz dla odmiany Jonagold 0,18; 0,35; 0,67 i 1,03 %. Uzyskane niskie wartości odształcenia są skutkiem zastosowania podpory składającej się z trzech wahliwych ramion o lekko sferycznym kształcie i powierzchni 10x10 mm, które zapewniają pełne przyleganie każdej z podpór a zarazem stałą powierzchnię kontaktu równą 300 mm².



Rys. 46. Odształcenie ε jabłek dla podpory potrójnej.

Fig. 46. The apple strain ε for triple support.

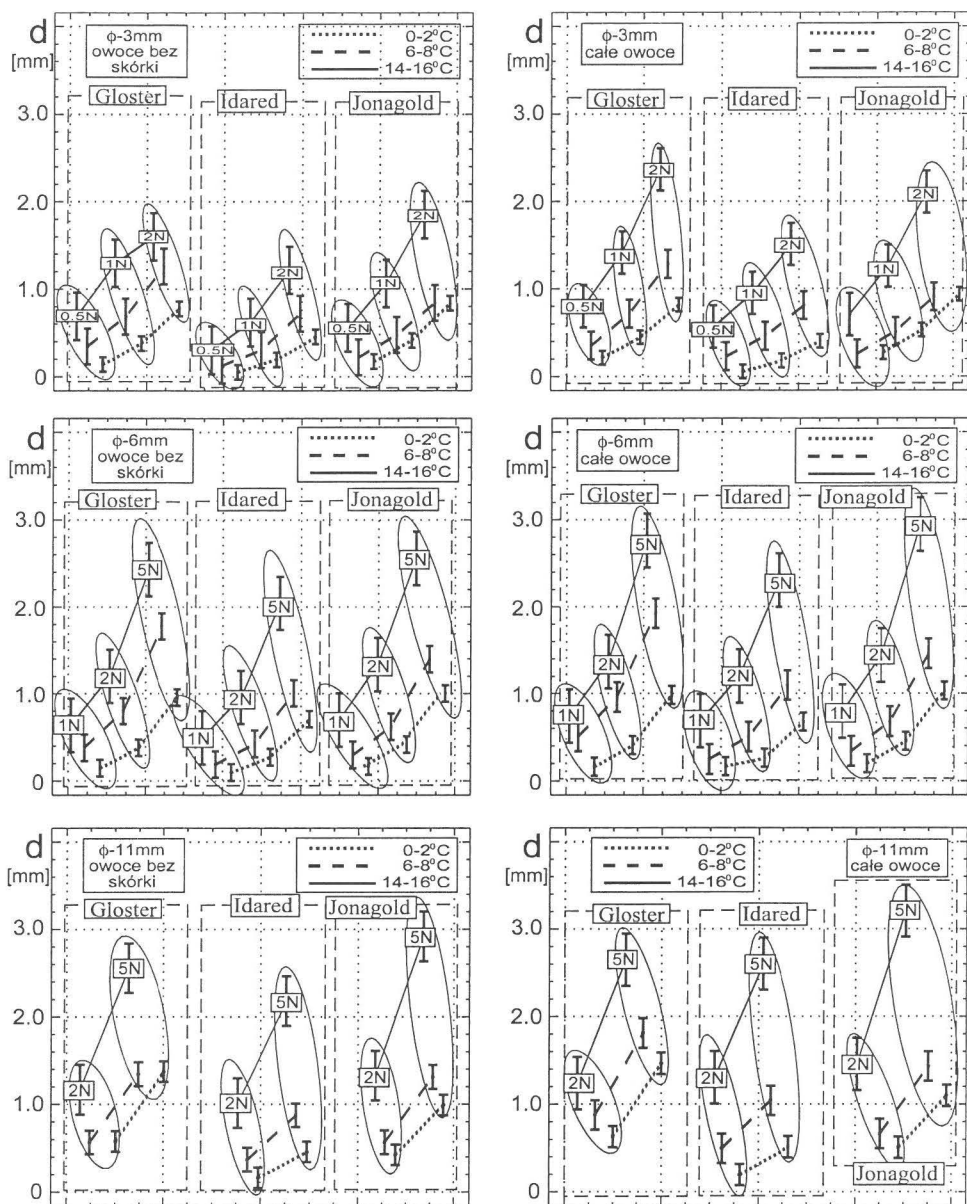
Weryfikując powyższą podporę wyznaczono deformację dla penetrometrów różnej średnicy: 3, 6 i 11 mm przy poziomach siły 0,5; 1; 2 i 5 N (Rys. 47). Deformacja owocu ze skórą penetrem o średnicy 3 mm była istotnie statystycznie większa niż dla jabłek bez skórki przy poziomie siły 2 N (Gloster). Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy badanymi temperaturami przechowywania i penetrometru o średnicy 3 mm dla wszystkich badanych odmian, szczególnie dla wartości sił progowych: 0,5 i 1 N. Pomimo, iż pole przekroju tego penetrometru równe $7,06 \text{ mm}^2$, czyli ponad 40 razy mniejsze niż powierzchnia kontaktu potrójnej podpory, wskazywałaby na celowość zastosowania tego próbnika. Jednak uzyskane wyniki przy użyciu penetrometru o tej średnicy nie różnicowały wpływu badanych czynników, co było przyczyną odrzucenia tego próbnika w dalszych badaniach.

Deformacja jabłek ze skórą i bez skórki dla penetrometru o średnicy 11 mm była na podobnym poziomie dla wszystkich badanych odmian. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic pomiędzy warunkami przechowywania; zakresy temperatur $6 \div 8^{\circ}\text{C}$ i $14 \div 16^{\circ}\text{C}$ dla badanych odmian i poziomu siły 2 N, a dla jabłek odmiany Gloster przy usuniętej skórce, nawet dla poziomu siły 5 N (Rys. 47). Pole powierzchni przekroju penetrometru – 11 mm ($94,9 \text{ mm}^2$) tylko trzy razy mniejsze niż powierzchnia potrójnej podpory jest zbyt duże, a występująca deformacja od strony podpory nie pozwala na prawidłowe oszacowanie sprężystości owocu.

Statystycznie istotny dla wielkości deformacji jabłek, wpływ warunków przechowywania stwierdzono dla penetrometru o średnicy 6 mm. Ta średnica umożliwiła zaobserwowanie istotnych statystycznie różnic dla większości badanych poziomów siły progowej.

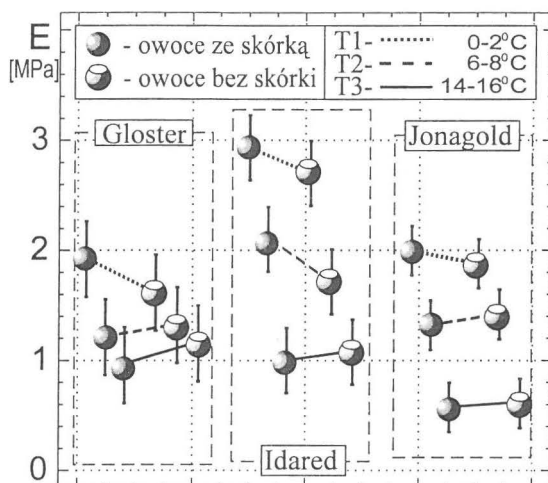
Pole powierzchni kontaktu penetrometru o średnicy 6 mm wydaje się odpowiednie do porównywania owoców różnych odmian i określania ich jędrności, a powierzchnia $28,3 \text{ mm}^2$ ponad 10 razy mniejsza niż 300 mm^2 powierzchni kontaktu potrójnej podpory zapewnia deformację jedynie od strony penetrometru co gwarantuje prawidłową ocenę stanu mechanicznego jabłek.

Analiza wyników uzyskanych dla badanych średnic penetrometrów i różnych rodzajów podpór pozwoliła na wybór próbnika o średnicy 6 mm oraz potrójnej podpory jako najbardziej odpowiednich do zastosowania w dalszych badaniach jędrności owoców. Moduł sprężystości E , wyznaczony zgodnie z tymi założeniami (Rys. 48) wskazuje, iż jabłka odmiany Idared przechowywane w temperaturze $0 \div 2^{\circ}\text{C}$ charakteryzowały się najwyższą jędrnością, która osiągnęła wartość $2,94 \text{ MPa}$ dla owoców ze skórą i $2,70 \text{ MPa}$ w wypadku miąższu. Sprężystość określająca jędrność owoców spada dla badanych odmian jabłek przechowywanych w temperaturze $6 \div 8^{\circ}\text{C}$ (T2) i $14 \div 16^{\circ}\text{C}$ (T3).



Rys. 47. Wyznaczenie zakresu deformacji tkanki jabłek do opracowanie założeń konstrukcyjnych miernika jędrności owoców.

Fig. 47. Determination of apple tissue deformation limit for designing of fruit firmness tester.



Rys. 48. Weryfikacja założeń konstrukcyjnych miernika jędrności owoców przeprowadzona na jabłkach odmian: Gloster, Idared i Jonagold przechowywanych w różnych warunkach.

Fig. 48. The elasticity modulus determined with fruit firmness tester for Gloster, Idared and Jonagold apples storage at different conditions.

W wypadku jabłek odmiany Jonagold, średnie wartości modułu sprężystości obniżyły się z 2,0 MPa dla jabłek przechowywanych w temperaturze $0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ do 0,57 MPa w temperaturze $14 \pm 16^{\circ}\text{C}$ (Rys. 48). Wyznaczony moduł sprężystości w zakresie niewielkich deformacji umożliwił porównanie wpływu warunków przechowywania i odmian na jędrność owoców, przy istotnie statystycznym zróżnicowaniu. Podobne wartości, wyznaczone dla jabłek ze skórką i dla jabłek bez skórki, czyli dla deformacji samego miąższu wskazują na możliwość pomiaru jędrności przypowierzchniowej warstwy miąższu w zakresie quasi-niedestrukcyjnym.

12. PODSUMOWANIE

Jakość jabłek staje się czynnikiem decydującym o możliwościach ich sprzedaży i w związku z tym doskonalone są techniki kontroli i sterowania jakością. Wiele cech jakościowych związanych jest z mechanicznymi właściwościami owoców. Analiza właściwości mechanicznych jabłek objętych badaniami umożliwiła fizyczną ocenę jędrności oraz wyznaczenie parametrów mechanicznych tkanki decydujących o jakości owoców w okresie przechowywania.

Jędrność owoców jest jedyną cechą wytrzymałościową wyznaczaną w praktyce sadowniczej i choć nie jest wielkością ściśle fizyczną, związana jest z właściwościami mechanicznymi tkanki owocu, dlatego ważnym było podjęcie badań dotyczących weryfikacji testów mechanicznych i wyznaczania granicznych wartości obciążeń oraz optymalnych przedziałów jędrności jabłek za pomocą metod bazujących na interpretacji zależności naprężenie-odkształcenie oraz opisie tej cechy wielkościami fizycznymi.

Niejednorodność materiału roślinnego jakim są poszczególne tkanki jabłka, a ponadto zróżnicowanie wymiarów i kształtu owoców uniemożliwiające stosowanie klasycznych zasad wytrzymałościowych oraz formuł służących do interpretacji danych eksperymentalnych wymagało opracowania wielu nowych metod pomiarowych dotyczących całych owoców lub tkanki, a w szczególności:

- właściwości mechanicznych miąższu,
- wytrzymałości mechanicznej skórki jabłek,
- penetrometrycznej oceny właściwości mechanicznych owoców,
- badania przypowierzchniowej warstwy miąższu owoców oraz
- deformacji w obszarze podparcia owocu.

Wśród nowych metod opracowana oryginalna metoda pomiaru jędrności przypowierzchniowej tkanki jabłka, warstwy decydującej o subiektywnej ocenie jakości przez konsumenta, umożliwia jednoczesną ocenę właściwości mechanicznych skórki oraz miąższu.

Miażdż jabłka pełni w owocu między innymi funkcję mechaniczną. Jędrność miąższu owoców trzech odmian: Gloster, Idared i Jonagold odwzorowana wartościami parametrów mechanicznych w trakcie przechowywania w badanym zakresie temperatur maleje, szczególnie w pierwszym okresie po zbiorze. Podczas dalszego przechowywania jędrność nadal się obniża, choć już w mniejszym stopniu przy czym wyraźniejszą utratę jędrności miąższu jabłek wyznaczoną za pomocą testu ściskania zaobserwowano w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$. Wyznaczone parametry mechaniczne: F_m i E_m umożliwiły podział przechowywanych jabłek badanych odmian na dwie grupy różniące się odmienną reakcją miąższu na obciążenia mechaniczne:

- Cortland, McIntosh, Priam, Gala i Šampion, których wartości wytrzymałości i modułu sprężystości miąższu malały po przechowywaniu,
- Gloster, Holiday, Jonagold, Red Elstar, Spartan, Idared i Melrose, dla których nie zaobserwowano istotnych statystycznie zmian badanych parametrów mechanicznych w trakcie przechowywania.

Zaobserwowano dużą powtarzalność wyników wartości wytrzymałości mechanicznej F_m oraz sprężystości E_m miąższu jabłek badanych odmian w kolejnych latach badań.

Skórka to ta część owocu, która ze względu na swą funkcję ochronną, może świadczyć o stanie dojrzałości owocu oraz o jego odporności na obicia. Zaproponowana metoda badania właściwości mechanicznych skórki owoców jabłek oraz metoda preparacji jej wycinków umożliwiła wyznaczenie: wytrzymałości skórki na rozciąganie F_s , deformacji podczas rozrywania d_s , pracy potrzebnej W_s do rozerwania skórki oraz modułu sprężystości E_s - cechy niezależnej od wymiarów próbki,

dokładnie opisującej właściwości mechaniczne badanego materiału. Jabłka w gorszych warunkach przechowywania (temperatura $14\div 16^{\circ}\text{C}$) tracą więcej wody i ich skórka staje się bardziej sucha i sprężysta na co wskazują zaobserwowane większe wartości modułu sprężystości E_s . Parametry uzyskane w teście rozciągania wycinka skórki badanych 12 odmian jabłek umożliwiły wyselekcjonowanie owoców o wytrzymałej mechanicznie skórce np. odmiany: Idared i Melrose oraz charakteryzujących się delikatną skórą np. odmiana Priam. Wytrzymałość skórki na rozerwanie określa jej odporność na uszkodzenia mechaniczne. Moduł sprężystości dokładnie opisując stan fizyczny skórki owoców, pozwala zaobserwować wpływ poszczególnych lat badań na sprężystości tej tkanki jabłek.

Wartość siły potrzebnej do wciśnięcia próbника to jeden z najczęściej używanych wyznaczników dojrzałości oraz jakości przechowywanych jabłek. Jędrność przechowywanych owoców trzech odmian wyznaczona w teście penetrometrycznym w badanym zakresie temperatur spada, szczególnie w pierwszym okresie po zbiorze. Podczas dalszego przechowywania jędrność nadal się obniża, choć już w mniejszym stopniu przy czym wyraźniejszą utratę jędrności jabłek wyznaczoną w tym teście zaobserwowano w temperaturze $14\div 16^{\circ}\text{C}$. Dla owoców badanych 12 odmian stwierdzono wyraźny wpływ przechowywania na wyznaczone parametry: F_p i E_p charakteryzujący się obniżeniem ich wartości. Duże zróżnicowanie jędrności jabłek po przechowywaniu oraz powtarzalność uzyskanych wyników w kolejnych latach eksperymentu przy użyciu powyższej metody wskazują na przydatność tego testu do oszacowania zmienności właściwości mechanicznych owoców.

Jednak stosowanie tego testu w praktyce prowadzi często do niepełnej oceny właściwości mechanicznych owoców, a ostateczny wynik obarczony jest zazwyczaj błędem, gdyż pomiar siły zależny jest od prędkości deformacji i sprawności mierzącego. Dlatego, też na bazie testu penetrometrycznego zaproponowano pomiar jędrności w ustalonych warunkach obciążeń i zakresie deformacji sprężystej.

Skórka i przypowierzchniowa warstwa miąższu jabłka są najbardziej narażone na uszkodzenia, a stan owocu określający jego dojrzałość czy jędrność jest często oceniany przez dotyk czyli odczucia ludzkie w oparciu o kontakt z tą warstwą. Test zginania pozwala na oszacowanie jędrności przypowierzchniowej warstwy tkanki jabłka. Parametry określone przy pomocy tej metody, a w szczególności moduł sprężystości dokładnie odzwierciedlają wpływ przechowywania na zmiany jędrności jabłek.

Po przechowywaniu sprężystość belki ze skórą obniżyła się dwukrotnie. Moduł sprężystości wyznaczony podczas zginania belek miąższu jabłek (bez skórki) nie różnił się istotnie. Jest to kolejny dowód o konieczności oceny

jędrności jabłek razem ze skórą, a nie tak jak w dotychczas stosowanych metodach po jej usunięciu. Największe zróżnicowanie sprężystości jabłek w trakcie przechowywania stwierdzono przy użyciu testu zginania belki mięszu pokrytego skórą od strony obciążenia. Tego typu przypadek zginania mięszu jabłka pokrytego skórą, gdy skóra "pracuje" na ściskanie występuje podczas wgniatania czy obijania owocu. W teście zginania belki mięszu pokrytej skórą od strony podpory uzyskano podobny poziom wartości modułu sprężystości E_{su} , co potwierdza prawidłowość zastosowanej metodyki badań.

W większości przypadków zaobserwowano spadek wartości parametrów mechanicznych: F_{ns} , F_{so} , F_{su} , E_{ns} , E_{so} , E_{su} wyznaczonych w teście zginania tkanki jabłek 12 odmian po przechowywaniu niemniej jednak tylko w przypadku jabłek odmian: Holiday, Jonagold, Red Elstar, Idared i Melrose był on istotny statystycznie. Szczególnie zmiany wyznaczonego modułu sprężystości E_{so} wyraźnie wskazują na wpływ przechowywania na sprężystość warstwy przypowierzchniowej owocu oraz pozwalają na dokładne oszacowanie różnic odmianowych. Jednak lata badań nie miały tak istotnego wpływu na parametry mechaniczne uzyskane w teście zginania belki tkanki jabłek w różnych wariantach o czym świadczy brak istotnych różnic pomiędzy średnimi dla tych wielkości. Szczególnie stabilnie zachowywał się moduł sprężystości warunkowany kolejnymi latami badań. Przy pomocy metody zginania wycinka przypowierzchniowej warstwy jabłka w kształcie belki można ocenić jędrności jabłek, uzyskując pomiar w zakresie siły odpowiadającej dotykowi palców, a moduł sprężystości jest wielkością gwarantującą porównanie jędrności jabłek i wpływu warunków przechowywania oraz prawidłową ocenę stanu fizycznego owoców.

Analiza wyników uzyskanych w badaniach deformacji w obszarze podparcia tkanki owoców pozwoliła na wybór próbnika o średnicy 6 mm oraz potrójnej podpory jako najbardziej przydatnych do zastosowania w konstrukcji miernika jędrności owoców. Wyznaczony zgodnie z tymi założeniami w zakresie niewielkiej deformacji moduł sprężystości umożliwił porównanie wpływu warunków przechowywania na jędrność owoców badanych odmian. Podobne wartości, wyznaczone dla jabłek ze skórą i dla jabłek bez skórki, czyli dla deformacji samego mięszu wskazują na możliwość pomiaru jędrności przypowierzchniowej warstwy mięszu w zakresie quasi-niedestrukcyjnym.

Zastosowane metody badania właściwości mechanicznych jabłek: ściskania mięszu, rozciągania skórki, penetracji całych owoców oraz zginania wycinka przypowierzchniowej warstwy pozwalają na wyznaczenie: wytrzymałości tkanki owocu, deformacji i pracy podczas obciążania oraz modułu sprężystości. Uzyskane

wyniki umożliwiły porównanie odmian jabłek pod względem jędrności, co z praktycznego punktu widzenia jest ważne w ocenie ich jakości. Jędrność owoców odwzorowana wartościami wyznaczonych parametrów w trakcie przechowywania w badanym zakresie temperatur spada, szczególnie w pierwszym okresie po zbiorze. Podczas dalszego przechowywania jędrność nadal maleje, choć już w mniejszym stopniu. Największe zróżnicowanie sprężystości jabłek w różnym stadium dojrzałości stwierdzono przy użyciu testu zginania tkanki oraz penetracji w zakresie małych deformacji.

Realizacja powyższych badań stworzyła podstawę do opracowania bazy danych właściwości mechanicznych owoców oraz założeń konstrukcyjnych miernika do quasi-niedestrukcyjnego pomiaru jędrności jabłek. Założenia konstrukcyjne miernika zapewniające deformację tylko od strony penetrometru, gwarantując dokładność oraz poprawność oceny, pozwalają na pomiar nawet niewielkich zmian stanu fizycznego jabłek przechowywanych w różnych warunkach. Opracowanie metod i opisanie przy ich zastosowaniu wybranych właściwości mechanicznych jabłek stanowi nie tylko aspekt poznawczy, ale również aplikacyjny, mogący przyczynić się do ograniczenia strat powstających podczas zbioru i transportu owoców oraz poprawienia jakości przechowywanych jabłek.

13. PIŚMIENNICTWO

1. **Abbott J. A., Affeldt H.A., Liljedahl L.A.:** Firmness measurement of stored 'Delicious' apples by sensory methods, Magness-Taylor, and sonic transmission. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 117, 590-595, 1992.
2. **Abbott J.A., Childers N.F., Bachaman C.F., Fitzgerald J.V., Matusik F.J.:** Acoustic vibration for detecting textural quality of apples. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 93, 725-728, 1968.
3. **Abbott J.A., Massie D.R.:** Nondestructive firmness measurement of apples. ASAE Paper 93-6025 St. Joseph MI, 1993.
4. **Abbott J.A., Massie D.R., Watad A.E.:** The use of a computer with an Instron for textural measurements. *J. Texture Studies*, 13, 412-417, 1982.
5. **Alchanatis V., Searcy S.W.:** A selectable wavelength imaging sensor for multispectral inspection of agricultural products. ASAE Paper No. 95-3210. St Joseph, MI, 1995.
6. **Armstrong P.R., Brown G.K.:** Non-destructive firmness measurement of apples. ASAE Paper No. 93-6023. St. Joseph, MI, 1993.
7. **Armstrong P.R., Brown G.K., Timm E.J.:** Non-destructive firmness measurement of soft fruit for comparative studies and quality control. ASAE Paper No. 95-6172. St. Joseph. MI, 1995.
8. **Arnold P.C., Mohsenin N.N.:** Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. *Transactions of the ASAE*, 78-84, 1971.

9. **ASAE Standards:** Compression test of food materials of convex shape. St. Joseph, MI: ASAE, S368.2, 37th ed., 1990.
10. **Barnes K.K.:** Detachment characteristics of lemons, Trans. of the ASAE, 41-44, 1969.
11. **Bellon V.:** Tools for fruit vegetables quality control: a review of current trends and perspectives. Proc. IV Int. Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering, Valencia-Zaragoza, Spain. v 2, 1-12, 1993.
12. **Bieluga B.:** Fizyko-mechaniczne właściwości odmian jabłek jako kryterium ich dojrzałości zbiorczej. Praca habilitacyjna, Lublin, 1976.
13. **Bieluga B.:** Wykorzystanie techniki zdjęć szybkich do określenia własności mechanicznych jabłek. ZPPNR, 237, 67-72, 1981.
14. **Bourne M.C.:** Deformation testing of foods. I. A precise technique for performing the deformation test. J. Food Sci., 32, 601-607, 1967.
15. **Bourne M.C.:** Use of the penetrometer for deformation testing of foods. J. Food Sci., 38, 720-728, 1973.
16. **Bourne M.C.:** Puncture tests vs. small-strain tests predicting consumer response to texture. Food Technol., 67-70, 1979.
17. **Bourne M.C.:** Theory and application of the puncture test in food texture measurement. w P. Sherman (ed.) Food texture and rheology, Academic Press, London 1979.
18. **Bourne M.C., Moyer J.C., Hand D.B.:** Measurement of food texture by a universal testing machine. Food Technol., 20, 522-525, 1966.
19. **Bramagle W.J., Blanpied G.D.:** Measuring apple firmness-not as easy as 1-2-3!. Am. Fruit Grower, 97-29, 1977.
20. **Brown G.K., Schulte-Pason N.L., Timm E.J., Burton C.L., Marshall D.E.:** Apple packaging line impact damage reduction. Applied Engineering in Agriculture 6(6), 759-764, 1990.
21. **Brusewitz G.H., Gartsch J.A.:** Impact parameters related to postharvest bruising of apples. Transactions of the ASAE, 32, 953-957, 1989.
22. **Chappell T.W., Hamann D.D.:** Poisson's ratio and Young's modulus for Apple flesh under compressive loading, Transactions of the ASAE, 608-610, 612, 1968.
23. **Chen S.:** Engineering analysis of viscoelastic response of fruits to impacts, Ph. D. Thesis, University of California, Davis, 1986.
24. **Chen P.:** Quality evaluation technology of agricultural products. Proc. of ICAME'96, Seoul, Korea, Vol. I, 171-190, 1996.
25. **Chen P., Ruitz-Altisent M, Barreiro P.:** Effects of impacting mass on firmness sensing of fruits. Transactions of the ASAE, 39, 1019-1023, 1996.
26. **Chen P., Sun Z.:** A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. J. Agric. Engng Res., 49(2), 85-98, 1991.
27. **Chen P., Yazdani R.:** Prediction of apple bruising due to impact on different surfaces. Transactions of the ASAE, 956-961, 1991.
28. **Chen, P., Sun Z., Huarng L.:** Factors affecting acoustic responses of apples. Transactions of the ASAE, 35, 1915-1920, 1992.

29. **Chen, P., McCarthy M.J., Kim S.M., Zion B.:** Development of a high-speed NMR technique for sensing fruit quality. ASAE paper No. 953613, Chicago, Illinois, 1995.
30. **Clark R.L.:** The development of low-impact fruit catching surfaces, Transactions of the ASAE, 608-611, 1971.
31. **Clevenger J.T., Hamann D.D.:** The behaviour of apple skin under tensile loading, Transactions of the ASAE, 34-37, 1968.
32. **Coppock G.E., Hedden S.L., Lenker D.H.:** Biophysical properties of citrus fruit related to mechanical harvesting. Transactions of the ASAE, 561-563, 1969.
33. **Davis D.C., Rehkugler G.E.:** A theoretical and experimental analysis of the apple-limb impact problem. Transactions of the ASAE, 234-239, 1971.
34. **De Baerdemaeker J., Lemaitre L.L., Meire R.:** Quality detection by frequency spectrum analysis of the fruit impact force. Transactions of the ASAE, 175-179, 1982.
35. **De Coster J.:** Szanse rozwoju sadownictwa w Europie. Sad Karłowy, 6, 34-39, 1995.
36. **Delwiche M., Sarig Y.:** A probe impact sensor for fruit firmness measurement. Transactions of the ASAE, 34, 187-192, 1991.
37. **Delwiche M.J., Tang S., Mehlschau J.:** An impact response fruit firmness sorter. Transactions of the ASAE, 31, 321-326, 1989.
38. **Dedolph R.R., Austin M.E.:** The evaluation of impact bruises on apple fruit. Proc. Amer. Hort. Sci., 80, 125-133, 1962.
39. **Dobrzańska A., Dobrzański, jr. B., Rybczyński R., Wójcik W., Bortnik B.:** Właściwości fizyczne i wartość żywieniowa przechowywanych jabłek. I Zjazd Naukowy PTA, 34-36, 1997.
40. **Dobrzański, jr. B.:** Opracowanie agrofizycznych podstaw ograniczania strat i poprawy cech jakościowych owoców. - (praca zbiorowa pod red.), Projekt Badawczy Zamawiany KBN, Nr PBZ-51-02, Spraw. Mer., IA PAN, Lublin, 1-401, 1997.
41. **Dobrzański, jr. B., Rybczyński R.:** Bending test for study of mechanical properties of apple tissue. Journal of Food Physics, 2, 13-15, 1994.
42. **Dobrzański, jr. B., Rybczyński R.:** A new firmness meter for fruit quality grading. 5th Int. Symp. on Fruit, Nut, and Veg. Prod. Eng., Davis, 10 (2), 1-6, 1997.
43. **Dobrzański, jr. B., Rybczyński R.:** Stress-strain relationship for fruit firmness estimation. Acta Horticulture, 485, 117-123, 1998.
44. **Dobrzański, jr. B., Rybczyński R., Gołacki K.:** Quality parameter of storage apple as a firmness. International Agrophysics, 14, 149-158, 2000.
45. **Duprat F., Pietri E., Grotte M.G., Studman C.J.:** A multi-purpose firmness tester for fruits and vegetables. Journal of Computers and Electronics in Agriculture, 12, 211-223, 1995.
46. **Falk S., Hertz C.H., Virgin H.I.:** On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. I. Experiments on resonance frequency and tissue rigidity. Physiologia Plant., 11, 803-807, 1958.
47. **Fekete A.:** Elasticity: a measure of fruit firmness. ASAE Paper No. 93-6598, Chicago, 1-7, 1993.
48. **Fekete A., Felföldi J.:** Fruit firmness tester. AgEng'94, Milano, Report N. 94-G-060: 1-7, 1994.
49. **Finney, Jr. E.E.:** Defining and measuring the attributes of texture in fruits and vegetables. ASAE Paper, No 68-385, ASAE, St. Joseph, Mich. 49085, 1968.

50. **Finney, Jr. E.E.:** Mechanical resonance within Red Delicious apples and its relation to fruit texture. *Transactions of the ASAE*, 13, 177-181, 1970.
51. **Finney, Jr. E.E.:** Dynamic elastic properties and sensory quality of apple fruit. *J. Texture Studies*, 2, 62-67, 1971.
52. **Finney, Jr. E.E.:** Vibration technique for testing fruit firmness. *J. Texture Studies*, 3, 263-271, 1972.
53. **Finney, Jr. E.E., Abbott J.A., Watada A.E., Massie D.R.:** Nondestructive sonic resonance and the texture of apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 103, 158-163, 1978.
54. **Fletcher S.W.:** Mechanical behaviour of processed apples. *Transactions of the ASAE*, 14-16, 1971.
55. **Fletcher S.W., Mohsenin N.N., Hammerle J.R., Tuckey L.D.:** Mechanical behaviour of selected fruits and vegetables under fast rates of loading. *Transactions of the ASAE*, 324-326, 331, 1965.
56. **Fluck R.C., Ahmed E.M.:** Impact testing of fruits and vegetables. *Transactions of the ASAE*, 660-666, 1973.
57. **Franke J.E., Rohrbach R.P.:** A nonlinear impact model for a sphere with a flat plate. *Transactions of the ASAE*, 1683-1686, 1981.
58. **Fridley R.B., Goehlich R.P., Claypool L.L., Adrian P.A.:** Factors affecting impact injury to mechanically harvested fruit. *Transactions of the ASAE*, 409-411, 1964.
59. **Fridley R.B., Adrian P.A.:** Mechanical properties of peaches, pears, apricots and apples. *Transactions of the ASAE*, 135-138, 142, 1966.
60. **Fridley R.B., Gradley R.A., Rumsey J.W., Adrian P.A.:** Some aspects of elastic behaviour of selected fruits. *Transactions of the ASAE*, 46-49, 1968.
61. **Galili N., Rosenhouse G., Mizarch A.:** Ultrasonic technique for fruit and vegetable quality evaluation. *Proc. 4th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, Valencia - Zaragoza, Spain, 281-289, 1993.
62. **Garcia Fernandez J.L., Ruiz-Altisent M., Barreiro P.:** Factors influencing apple and pear physical properties and bruise susceptibility. *XII CIGR, AgEng'94, Milano*, 2, Report N. 94-G-062, 1994.
63. **Garman C.F., Diener R.G., Stafford J.R.:** Effect of shaker type and direction of shake on apple detachment. *J. agric. Engng. Res.*, 17, 195-206, 1972.
64. **General Tension-Compression Test:** Instron 6000 Series Testing System Application Program. Catalogue Number 6100-001/A 2B, 1985.
65. **Gołacki K.:** Metoda wyznaczania parametrów mechanicznych materiałów roślinnych w kształcie walcowym. *Problemy Agrofizyki*, 65, 64-69, 1991.
66. **Gołacki K., Dobrzański, jr. B., Rybczyński R.:** The influence of storage time on failure parameters of apple. *Agric. & Biol. Eng. Conf.*, Newcastle, 4.6, 1-2, 1995.
67. **Gołacki K., Rybczyński R., Dobrzański, jr. B.:** Water potential and failure parameters of apple flesh during storage. *Acta Horticulture*, 485, 167-172, 1999.
68. **Green H.C.:** The resistance of apples to damage. *J. agric. Engng. Res.*, 7, 155-166, 1962.

69. **Hamann D.D.:** Analysis of stress during impact of fruit considered to be viscoelastic. Transactions of the ASAE, 13, 893-896, 1970.
70. **Haman J., Kostankiewicz K.:** Procesy zniszczenia w komórkowym ośrodku roślinnym. *Acta Agrophysica*, 24, 67-86, 1999.
71. **Haman J., Kostankiewicz K.:** Destruction processes in the cellular medium of a plant - theoretical approach. *International Agrophysics*, 14, 37-42, 2000.
72. **Hammerle J.R.:** A technique for evaluating fruit and vegetable abrasion resistance. Transactions of the ASAE, 672-675, 1970.
73. **Herregods M.:** Nowe metody i technologie przechowywania owoców w Europie Zachodniej. Materiały Konferencyjne „Nowe technologie i techniki przechowywania owoców”, Skierniewice, 8-14, 1994.
74. **Herregods M.:** Jak ograniczyć straty podczas przechowywania. Materiały Konferencyjne „Nowe technologie i techniki przechowywania owoców”, Skierniewice, 1-7, 1994.
75. **Holt J.E., Schoorl D., Lucas C.:** Prediction of bruising in impacted multi-layered apple packs. Transactions of ASAE, 24, 242-245, 1981.
76. **Holt J.E., Schoorl D.:** The robustness of a model predicting bruising in impacted multi-layered apple packs. *J. agric. Engng. Res.*, 28, 97-104, 1983.
77. **Holt J.E., Schoorl D.:** A theoretical and experimental analysis of the effects of suspension and road profile on bruising in multi-layered apple packs. *J. agric. Engng. Res.*, 31, 297-308, 1985.
78. **Horsfield B.C., Fridley R.B., Claypool L.L.:** Application of theory of elasticity to the design of fruit harvesting and handling equipment for minimum bruising. Transactions of the ASAE, 15, 746-749, 1972.
79. **Hyde J.F., Ingle M.:** Size of apple bruises as affected by cultivar, maturity, and time in storage. *Amer. Soc. Hort. Sci.*, 70, 1968.
80. **Jankowski T.:** Modelowanie właściwości fizycznych artykułów żywnościowych. Materiały Szkoły Letniej, Olsztyn, 19-42, 1988.
81. **Kang Tu, De Baerdemaeker J.:** Instrumental measurements to investigate apple mealy texture. *International Agrophysics*, 10, 97-102, 1996.
82. **Kader A.A.:** Postharvest quality maintenance of fruits and vegetables in developing countries. *Postharvest physiology and crop production*, Plenum: New York, 455-470, 1983.
83. **Kader A.A.:** Fruit maturity, ripening, and quality relationships. *Acta Horticulture*, 485, 203-208, 1999.
84. **Klimek G.:** Jabłka zawsze będą na polskim stole. *Top Agrar Polska*, 1, 20-21, 2000.
85. **Konstankiewicz K., Zdunek A.:** Metoda emisji akustycznej w badaniu procesów pęknięcia tkanek roślinnych. *Acta Agrophysica*, 24, 87-95, 1999.
86. **Kubiak K.:** Rynek jabłek w Polsce. *Sad Karłowcy*, 6, 24-33, 1995.
87. **Kuczyński A.:** Wykorzystanie zmienności parametrów mechanicznych i optycznych ciętego miąższu do charakterystyki odmian jabłek. Referaty i doniesienia - II Zjazd Naukowy PTA, Lublin-Dąbrowica, 196-197, 2000.
88. **Lange E., Ostrowski W.:** Przechowalność owoców. PWRiL, Warszawa, 1980.

89. **Lapsley K. G.:** Texture of fresh apples - evaluation and relationship to structure. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland. Diss. ETH No. 8802, 1989.
90. **Lee F.F., Rohrbach R.P.:** Firmness modelling and rapid relaxation modulus determination in blueberries. Transactions of the ASAE, 26, 1654-1657, 1983.
91. **Lisowa H., Wujec M., Lis T.:** Wpływ odmiany i objętościowego udziału wody na ciepłne cechy jabłek. Referaty i doniesienia - II Zjazd Naukowy PTA, Lublin-Dąbrowica, 211, 2000.
92. **Magness J.R., Taylor G.F.:** An improved type of apple tissue under cyclic loading. U.S. Dept. Circ., 350, 8, 1925.
93. **Makosz E.:** Ekonomika produkcji jabłek w Polsce. Sad Karłowcy, 6, 51-56, 1995.
94. **Makosz E.:** Jabłka zdobyły świat. Owoce-Warzywa-Kwiaty, 17-18, 1998.
95. **Miles J.A., Rehkugler G.E.:** A failure criterion for apple flesh. Transactions of the ASAE, 16, 1148-1151, 1973.
96. **Miller W.M., Morrow C.T.:** Vibrational characterization of the apple-stem system with respect to stem separation. Transactions of the ASAE, 19, 409-500, 1976.
97. **Mizrach A., Galili N., Rosenhouse G.:** Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation. Food Technology 48, 68-71, 1994.
98. **Mohsenin N.N.:** Physical Properties of Plant and Animal Materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
99. **Mohsenin N.N., Goehlich H.:** Techniques for determination of mechanical properties of fruits and development of harvesting and processing machinery. J. agric. Eng. Res., 7, 300-315, 1962.
100. **Mohsenin N.N., Goehlich H., Tukey L.D.:** Mechanical behaviour of apple fruits as related to bruising. Proc. Am. Soc. Hort. Sci., 67-77, 1962.
101. **Mohsenin N.N., Cooper H.E., Tuckey L.D.:** Engineering approach to evaluating texture factors in fruits and vegetables. Transactions of the ASAE, 6, 85-88, 1963.
102. **Morrow C.T., Mohsenin N.N.:** Consideration of selected agricultural products as viscoelastic bodies. J. Food Sci., 31, 686-693, 1966.
103. **Morrow C.T., Hamann D.D., Mohsenin N.N., Finney, Jr.E.E.:** Mechanical characterization of Red Delicious apples. Paper presented at Ann. Meeting, Am. Soc. Agric. Eng., Pullman, WA. 1971.
104. **Murase H., Segerlind L.J., Merva G.E.:** Tensile failure strain of apple tissue. ASAE, Tech. Paper, 80-3528, 1980.
105. **Nadulski R.:** Wpływ temperatury na właściwości teksturalne wybranych odmian jabłek. Referaty i doniesienia - II Zjazd Naukowy PTA, Lublin-Dąbrowica, 225-226, 2000.
106. **Nelson O.W., Mohsenin N.N.:** Maximum allowable static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in apples. J. agric. Eng. Res., 13, 305-315, 1968.
107. **Perry J.S., Chang J.C.C.:** A nondestructive hydrostatic bulk compression test for fruit. Transactions of the ASAE, 568-573, 1978.
108. **Petrell R.J., Mohsenin N.N., Wallner S.:** Dynamic mechanical properties of the apple cortex in relation to sample location and ripening. J. Texture Studies, 10, 217-223, 1980.
109. **Pladdet F.C., de Jager A., Oude Ophuis P.A.M., Hulshoff H.E., Jahae I.A.M.A.:** Evaluation of eating quality. Summary of results of an inquiry among fruitscientist, C.B.T., The Netherlands, 1-12, 1992.

110. **Plocharski W.J., Konopacka D.:** The relation between mechanical and sensory parameters of apples. *Acta Horticulture*, 485, 309-318, 1999
111. **Plocharski W., Konopacka D., Zwierz J.:** Comparison of Magness-Taylor's pressure test with mechanical, non-destructive methods of apples and pears firmness measurements. *International Agrophysics*, 14, 311-318, 2000.
112. **Puchalski C.:** Zastosowanie nieniszczącej metody do oceny jędmności jabłek. *Materiały Konferencyjne „Aktualne Problemy Inżynierii Rolniczej w Aspekcie Integracji Polski z Unią Europejską”*, Lublin, 383, 2000.
113. **Puchalski C., Brusewitz G.H.:** Apple bruise resistance determination using an electrical universal bridge. *International Agrophysics*, 14, 411-416, 2000.
114. **Puchalski C., Sienko H.:** Predicting firmness changes of apples in cold storage. XII CIGR, AgEng'94, Milano, 2, 915-916, Report N. 94-G-078, 1994.
115. **Recommendations of an EEC Working Group:** Measurement of the quality of apples. Luxembourg, Office of Official Publications of the European Communities, Catalogue number: CD-NK-85-006-EN-C, 1985.
116. **Rejman A.:** *Pomologia*. PWRiL, Warszawa, 1994.
117. **Ruiz-Altisent M., Barreiro P., Garcia J.L.:** Non-destructive quality measurement and modelling in fruits. *International Agrophysics*, 8, 445-454, 1994.
118. **Rybczyński R.:** Penetration test for fruit quality control. *Book of Abstracts, 6th ICA*, Lublin, 1, 150-151, 1997.
119. **Rybczyński R., Dobrzański B. jr.:** Modulus of elasticity of apple flesh. *Journal of Food Physics*, 2, 77-79, 1994.
120. **Rybczyński R., Dobrzański B. jr.:** Mechanical resistance of apple in different place of fruit. *International Agrophysics*, 8, 455-459, 1994.
121. **Rybczyński R., Dobrzański B. jr., Patyra T.:** A sorting machine for commercial's fruit quality improvement. *Proceedings of '97 BISFPPT*, Beijing, 77-83, 1997.
122. **Rybczyński R., Dobrzański B jr.:** Physical properties of apples after harvest. *Agricultural Engineering*, 32, 89-94, 2000.
123. **Schoorl D., Holt J.E.:** A practical method for tensile testing of apple tissue. *J. Texture Studies*, 14, 155-164, 1983.
124. **Scott Blair G.W., Coppen F.M.V.:** The subjective judgment of elastic and plastic properties of soft bodies, *Brit. J. Psychol.*, 31, 61-70, 1940.
125. **Sharma M.G., Mohsenin N.N.:** Mechanics of deformation of fruit subjected to hydrostatic pressure. *J. agric. Eng. Res.*, 15, 65-72, 1970.
126. **Shmulevich I., Galili N., Rosenfeld D.:** Firmness testing device based on fruit acoustic response. *AgEng'94 Milano*, Report N. 94-G-080: 1-9, 1994.
127. **Shmulevich I., Galili N., Rosenfeld D.:** Detection of fruit firmness by frequency analysis. *Transactions of the ASAE*, 39, 1047-1055, 1996.
128. **Smock R.M., Gross C.R.:** Respiration and ripening of apples in air purification studies. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 57, 81-92, 1951.
129. **Skrzyński J.:** Możliwości określenia optymalnego terminu zbioru jabłek. *Nowe technologie i techniki przechowywania owoców*, Skierniewice, 12-21, 1994.

130. **Stępniewski A.:** Wpływ wilgotności i temperatury na zmienność właściwości mechanicznych nasion rzepaku. Praca doktorska, IA PAN, Lublin, 1997.
131. **Streif J.:** Optimum harvest date for different apple cultivars in the „Bodensee” area. W: „Determination and prediction of optimum harvest date of apples and pears” Proc. of a meeting of the Working Group on optimum harvest date. 9-10 June, 1994, Lofthus, Norway. Editors: A. de Jager, D. Johnson, E. Hohn. office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 15-20, 1996.
132. **Studman C.J., Boyd L.:** Measurement of firmness in fruit and vegetables. AgEng'94 Milano, 896, Report N. 94-G-066, 1-9, 1994.
133. **Studman C.J.:** Quality in fresh fruit - Meaning, measurement and maintenance. AgEng'94 Milano, 897-898, Report N. 94-G-067, 1-9, 1994.
134. **Studman C.J.:** Fruit firmness measurement techniques - a new approach. International Agrophysics, 8, 461-466, 1994.
135. **Studman C.J.:** Repeated impact damage in apples. Book of Abstracts, 6th ICA, Lublin, 1, 15-18, 1997.
136. **Szot B.:** Rozwój badań właściwości fizycznych materiałów rolniczych. Problemy Agrofizyki, 5, 1972.
137. **Szot B., Dobrzański B. jr.:** Agrofizyka dla techniki rolniczej. ZPPNR, 424, 79-86, 1995.
138. **Takao H., Ohmori S.:** Development of device for nondestructive evaluation of fruit firmness. JARQ (Japan Agricultural research Quarterly), 28, 36-43, 1994.
139. **Tijssens L.M.M., Van Schaik A.C.R., Hertog M.L.A.T.M., De Jager A.:** Modeling the firmness of 'Elstar' apples during storage and transport. Acta Horticulturae, 485, 363-371, 1999.
140. **Topping A.J.:** A recording laboratory penetrometer for fruit. J. agric. Eng. Res., 26, 179-188, 1981.
141. **Tsatsarelis C.A., Akritidis C.B., Siatras A.J.:** Classification of olive varieties for effective mechanical harvesting. Transactions of the ASAE, 27, 1669-1702, 1984.
142. **Van Woensel G., Wouters A., De Baerdemaker J.:** Relation between mechanical properties of apple fruit and sensory quality. J. of Food Proc. Eng. 9, 173-189, 1987.
143. **Voisey P.W., McDonald D.C.:** An instrument for measuring the puncture resistance of fruits and vegetables. Proc. of the Amer. Soc. for Hort. Sci., 84, 557-568, 1964.
144. **Voisey P.W., McDonald D.C.:** A puncturing device for estimating the physical properties of fruits and vegetables. Can. J. Plant Scien., 46, 698-702, 1966.
145. **Walczak R.T., Horabik J.:** Fizyczne i matematyczne metody badań w agrofizyce. Acta Agrophysica, 37, 253-275, 2001.
146. **Wieniarska J., Piesiewicz J.:** Wstępne wyniki przerzedzania zawiązków odmiany Lobo. Materiały XXXIV Ogólnopolskiej Naukowej Konferencji Sadowniczej, Skierniewice, 339-342, 1996.
147. **Yamamoto H., Iwamoto M., Haginuma S.:** Acoustic impulse response method for measuring natural frequency intact fruits and preliminary applications internal quality evaluation of apples water melons, J. Texture Studies, 11, 117-126, 1980.
148. **Yuwana Y., Duprat F.:** Prediction of apple bruising based on the instantaneous impact stress and energy absorbed. International Agrophysics, 12, 113-140, 1998.

14. STRESZCZENIE

Jakość jabłek staje się czynnikiem decydującym o możliwościach ich sprzedaży i w związku z tym doskonalone są techniki kontroli i sterowania jakością. Wiele cech jakościowych związanych jest z mechanicznymi właściwościami owoców. Praca omawia badania jakości owoców jak również czynniki kształtujące tę cechę, w szczególności: pomiary jędrności, urządzenia i metody pomiarowe; subiektywne metody oceny tekstury, obiektywne metody badania właściwości mechanicznych, a także fizyczne aspekty pomiaru jędrności jabłek.

W pracy analizowano właściwości mechaniczne jabłek, dzięki którym istnieje możliwość określenia stanu owoców i ich oceny jakościowej. Przedstawiono zastosowanie różnych metod badania właściwości mechanicznych jabłek: ściskanie miąższu, rozrywanie skórki, test penetracji oraz zginania. Porównano różne odmiany pod względem jędrności owoców oraz określenia wpływu czasu, warunków przechowywania i kolejnych lat badań na wytrzymałość mechaniczną jabłek.

Słowa kluczowe: jabłko, pomiar jędrność, właściwości mechaniczne, jakość.

15. SUMMARY

PHYSICAL ASPECTS OF THE DETERMINATION OF APPLE FIRMNESS

Apple quality is the most imported factor at purchase and this causes developing of different techniques for quality control. This study was concerned with physical characteristics of fruits evaluating their quality. The objectives were to review of several methods allowing on determination of physical values related to apple quality mostly to its firmness and to determine some physical properties related to fruit quality.

The mechanical tests (compression, tension, penetration and bending) performed on apple flesh and skin using special equipment shown different behaviour of apple firmness and significance influence of storage on the mechanical properties. The elastic behaviour of fruit shown that fruit firmness decreased unequally for studied cultivars after storage.

The determination of the apple mechanical resistance was presented and quantify of effect of temperature, duration of storage and variety were discussed.

Key words: apple, firmness measurement, mechanical properties, quality.

Adresy Autorów:

Rafał Rybczyński
Bohdan Dobrzański, jr

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego
Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4
P.O. BOX 201, 20-290 Lublin 27
Tel. (0-81) 7445061, fax. (0-81) 7445067
e-mail: rryb@demeter.ipan.lublin.pl
bdob@demeter.ipan.lublin.pl