ACTA AGROPHYSICA

Piotr Baranowski

TEMPERATURA RADIACYJNA WYBRANYCH OWOCÓW I NASION JAKO PARAMETR OCENY ICH JAKOŚCI

159

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Rozprawy i Monografie 2008 (2)

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny – Józef Horabik

Zastępca Redaktora Naczelnego – Grzegorz Józefaciuk

Sekretarz Redakcji – Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna

Tomasz Brandyk, czł. koresp. PAN – przewodniczący

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

Opiniowali do druku:
prof. dr hab. Stanisław Białousz
prof. dr hab. Tadeusz Kęsik

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Wydawnictwo
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. (0-81) 744-50-61, www.ipan.lublin.pl

Streszczenia i pełne teksty prac dostępne są na stronach
www.acta-agrophysica.org

Czasopismo jest umieszczone w następujących bazach:
Thompson Scientific Master Journal List
Polish Scientific Journals Contents – Life Sci.
Biblioteka Główna i Centrum Informacji Naukowej Akademii Rolniczej w Poznaniu
Instytut Bibliotekoznawstwa i Informacji Naukowej Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
Lonicera – serwis botaniczny

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

ISSN 1234-4125

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

Wydanie I. Nakład 200 egz. Ark. 8,71
Skład komputerowy: Piotr Baranowski i Irena Kulawiak
Druk: Drukarnia *ALF-GRAF*, ul. Kościuszki 4, 20-006 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 5
2. NIENISZCZĄCE METODY OKREŚLANIA JAKOŚCI OWOCÓW I NASION 6
2.1. Parametry oceny jakości owoców i nasion 6
2.2. Teledetekcyjne metody oceny jakości owoców 10
2.3. Ocena zdolności kiełkowania nasion w oparciu o ich analizę termiczną 13
2.4. Przewodzenie ciepła w owocu 15
2.5. Podstawy termografii aktywnej 20
2.6. Termografia impulsowo-fazowa PPT (Pulsed Phase Thermography) 26
3. CEL PRACY 28
4. WYNIKI BADAŃ 29
4.1. Wykrywanie świeżych obić jabłek metodą termografii dynamicznej 29
4.1.1. Wprowadzenie 29
4.1.2. Materiał i metody 30
4.1.3. Analiza przepływu ciepła w owocach z defektami wewnętrznymi 33
4.1.4. Analiza wyników zastosowania termografii impulsowo – fazowej (PPT) do wykrywania wczesnej fazy obicia jabłek 41
4.2. Wykrywanie szklistości w jabłkach 49
4.2.1. Wprowadzenie 49
4.2.2. Materiał i metody 51
4.2.3. Analiza statystyczna rozkładu temperatury radiacyjnej powierzchni owoców . 53
4.2.4. Związek tempa ogrzewania się owoców wykazujących szklistość z ich jędrnością, gęstością oraz zawartością ekstraktu 60
4.3. Określanie zdolności kiełkowania nasion fasoli i grochu na podstawie analizy rozkładu temperatury ich powierzchni 66
4.3.1. Wprowadzenie 66
4.3.2. Materiał i metody 67
4.3.3. Zmiana rozkładu temperatury nasion w poszczególnych etapach 71
procesu pęcznienia 71
4.3.4. Rozkład temperatury radiacyjnej nasion w fazie imbibicyjnej procesu pęcznienia jako wskaźnik zdolności kiełkowania 83
5. PODSUMOWANIE 93
6. WNIOSKI 95
7. PIŚMIENNICTWO 96
8. STRESZCZENIE 104
9. SUMMARY 105

1. WSTĘP

Otwarcie granic Unii Europejskiej daje szansę na zwiększenie eksportu polskich warzyw i owoców. Jednakże, aby sprostać unijnym normom, konieczne jest szukanie nowych technologii ich selekcji i sortowania. Umowy eksportowe są bardzo restrykcyjne, a ich nieprzestrzeganie wiąże się z dużymi stratami (Nosecka 2004). Większość firm zagranicznych wymaga odpowiednio posortowanych partii owoców i warzyw o ściśle określonych normach jakościowych. Krajowi producenci odczuwają brak nowoczesnych technologii do detekcji zaburzeń wewnętrznych tkanek owoców i nasion spowodowanych przez uszkodzenia mechaniczne, dysfunkcje fizjologiczne i choroby (Drozdowicz 1976, Wójcik i in. 1999). Dlatego też poszukiwane są obiektywne, nieniszczące metody określania jakości produktów rolnych podczas zbioru, przechowywania i transportu, które spełniają normy wymagane przez zagranicznych partnerów (Konopacka i Płocharski 2004, Wójcik i in. 2007). W wielu ośrodkach badawczych na całym świecie prowadzone są badania nad opracowaniem nowoczesnych metod określania jakości płodów rolnych (Abbott 1999, Birth i in. 1985, Brosnan i Sun 2004, Brown i Sarig 1994, Zdunek 2008). Obiekty badań pochodzenia biologicznego charakteryzują się specyficznymi właściwościami cieplnymi, skomplikowaną budową oraz wrażliwością na bodźce zewnętrzne, co powoduje konieczność opracowania odrębnej metodyki badań. W przypadku zastosowania metody termograficznej powinna ona obejmować dobór parametrów rejestracji, metody analizy i przetwarzania sekwencji termogramów badanego obiektu oraz badanie właściwości cieplnych tkanek zdrowych lub uszkodzonych w celu modelowania w nich transportu ciepła (Baranowski i in. 2003, Baranowski i in. 2004, Danno i in. 1978, Kudra i Strumiłło 1998, Varith 2001, Walczak i in. 2003). Przy zastosowaniu termografii aktywnej należy dodatkowo dobrać parametry impulsu cieplnego i jego charakteru (pojedynczy impuls cieplny, fala cieplna lub ogrzewanie krokowe o odpowiedniej długości i intensywności).

Badania modelowe związku między parametrami fizykochemicznymi tkanki wybranych owoców i nasion, takimi jak: gęstość i jędrność miąższu, zawartość ekstraktu, potencjał wody w tkankach, efuzyjność cieplna tkanki zdrowej i uszkodzonej, skład chemiczny, a odpowiedzią radiometryczną na wymuszenie termiczne umożliwią pełniejsze zrozumienie procesów transportu ciepła w tych obiektach i efektywne wykorzystanie metody termografii pasywnej i aktywnej do wykrywania wewnętrznych dysfunkcji (Baranowski i in. 2001, Varith i in. 2001, Varaverbeke i in. 2006).

2. NIENISZCZĄCE METODY OKREŚLANIA JAKOŚCI OWOCÓW I NASION

2.1. Parametry oceny jakości owoców i nasion

Większość prac dotyczących badań parametrów fizykochemicznych owoców oraz nasion posługuje się terminem jakości (Chen 1996, Gunasekaren i in. 1985, Lityński 1977). Ze względu na odmienną budowę, sposób przechowywania i przeznaczenie owoców i nasion, parametry i metody określania ich jakości różnią się zasadniczo. W przypadku owoców jakość rozumiana jest zwykle jako przydatność do konsumpcji i przetwórstwa, natomiast jakość nasion to głównie ich zdolność do reprodukcji (Baranowski i in. 2005a, Bourne 1979, Hellebrand i in. 2000, Dobrzański i in. 2001, Dobrzański i in. 2003).

W określaniu jakości owoców należy wyróżnić fazę wzrostu i rozwoju oraz fazę po zbiorze. W fazie wzrostu jakość owoców modyfikowana jest w sposób zasadniczy sposobem uprawy i nawożenia gleby, zabiegami pielęgnacyjnymi, warunkami klimatycznymi oraz pogodowymi w różnych fazach rozwoju, tj. temperaturą i wilgotnością powietrza, nasłonecznieniem, ilością opadów, itd. (Ferguson i in. 1999, Hertog i in. 2004, Loenardi i in. 2000a, Loenardi i in. 2000b, Maguire i in. 1999, Paull 1999). Czynniki te decydują o jakości owoców w momencie zbioru i mają wpływ na zmiany jego właściwości w trakcie przechowywania i dystrybucji (Szczepański i Rejman 1987). Jakość owoców w fazie po zbiorze określa się poprzez różne parametry fizykochemiczne, które często nie uwzględniają historii fazy rozwojowej i tylko w sposób pośredni informują o przebiegu procesu wzrostu (Baritelle i in. 2001, Voltz i in. 1996, Woolf i Ferguson 2000, Yamada i Kobayashi 1999, Yamada i in 2004).

Powszechnie używa się terminu jakość owoców – chociaż nie ma jednoznacznej jego definicji. Jakość obejmuje różnorodne grupy cech produktu, a więc sensoryczne: wygląd, aromat, smak, tekstura; związane z wartością odżywczą: zawartość witamin i mikroelementów; składem chemicznym; właściwościami mechanicznymi i cieplnymi; występowaniem uszkodzeń i dysfunkcji fizjologicznych; itd. (Abbott 1999, Baranowski i in. 2005b, Baryłko-Pikielna 1975, Chen i De Baerdemaeker 1995, Hoehn i in. 2004). Inną przeszkodą w stworzeniu jednolitej definicji jakości owoców jest nieco inne podejście do jakości z punktu widzenia naukowego, zorientowanego głównie na sam produkt, a inne z punktu widzenia producenta czy handlowca, zorientowanych głównie na klienta (Shewfelt 1999). To drugie podejście związane jest głównie z oceną produktu pod kątem możliwości dostarczenia go klientowi w stanie spełniającym proste wymogi oceny sensorycznej oraz trwałością w miejscu dystrybucji. Zakłada się w tym podejściu, że podstawowym parametrem oceny jest akceptacja produktu przez klienta, gotowość do jego kupna i satysfakcja z jego używania. Badania dotyczące

tego podejścia obejmują studia subiektywnego odbioru cech danego produktu, bądź też studia demograficzne i kulturowe dotyczące tradycji żywienia, przyzwyczajeń konsumenckich i zmian mody odżywiania oraz najbardziej oczekiwanych sposobów wykorzystania produktów przez określone grupy (Babicz-Zielińska 1999, Land 1988).

W podejściu do jakości zorientowanym na produkt definiuje się ją jako zespół obiektywnych cech produktu mierzalnych metodami analitycznymi, umożliwiających porównanie ich wartości i przydatności do określonych celów oraz przewidywanie zmiany określonych cech produktu w czasie. Wybór parametrów określających jakość zależy od konkretnego wykorzystania, jednak istnieją w wielu krajach precyzyjne normy oraz zalecenia określające jakie cechy i właściwości należy przebadać, aby jednoznacznie określić przydatność (jakość) produktu. W podejściu zorientowanym na produkt preferuje się pomiar instrumentalny, również cech sensorycznych, gdyż jest on zwykle bardziej obiektywny, dokładny i porównywalny (Beaudry i in. 1997, Delwiche i Sarig 1991, Kavdir i Guyer 2007, Tabatabaeefar i Rajabipour 2005, Zdunek 2008).

Obserwuje się stały postęp technologii pomiaru cech sensorycznych takich jak wygląd, zapach, smak, wrażenie dotykowe. Urządzenia pomiarowe zbudowane są tak aby naśladować metody testu przeprowadzanego przez klienta lub aby test ten miał statystyczny związek z percepcją i oceną człowieka (Abbott 1999, Studman 2001).

Większość cech owoców określających ich jakość związanych jest z właściwościami fizykochemicznymi ich części wewnętrznych oraz skórki. Właściwości te podzielić można na makroskopowe, dotyczące całości lub większych części owocu (gęstość ogólna, objętość, masa, jędrność miąższu, grubość skórki, szorstkość powierzchni, zawartość ekstraktu, kształt, porowatość ogólna, zawartość aminokwasów, protein, kwasów nukleinowych, enzymów, witamin, cukrów i lipidów) oraz mikroskopowe dotyczące pojedynczych komórek lub tkanek (budowa, kształt i rozmieszczenie komórek, grubość ścian komórkowych, powierzchnia właściwa komórek, lepkość soku komórkowego) (Chen i in. 1989, Chen i in. 1996, Jordan i in. 2000, Konopacka i Płocharski 2001, Kudra i Strumiłło 1998).

Do niedawna większość właściwości wewnętrznych określano metodami inwazyjnymi. Dla przykładu, zawartość ekstraktu, jędrność miąższu, kwasowość soku, zawartość skrobi, sacharozy, fruktozy i glukozy mierzono metodą chromatografii gazowej. Coraz częściej stosuje się metody nieniszczące oceny płodów rolnych, co jest szczególnie przydatne w kontroli licznych partii owoców i warzyw na liniach sortowniczych lub w przechowalniach (Baranowski i in. 2002, Chen i in. 2003, Pieris i in. 1998, Slaughter i in. 1996). Obecnie stosuje się empiryczne metody określania związku różnych właściwości wewnętrznych owoców z właściwościami zewnętrznymi określanymi metodami bezinwazyjnymi (Francis 1980, Schmilovitch i in. 2000, Toller i in. 1992, Toller i in. 1993). Na tej zasadzie

działa system spektroskopii w bliskiej podczerwieni i elektronicznego nosa (przyrządu do odróżniania zapachów), dzięki któremu z dużą dokładnością można oszacować większość właściwości wewnętrznych owocu (Costa i in. 2003).

Jakość nasion – to zespół cech świadczących o ich odporności na niekorzystne warunki środowiska oraz zdolności do kiełkowania, dalszego wzrostu i rozwoju. Dobre i wyrównane wschody decydują o opłacalności uprawy roślin (Dąbrowska i in. 2000, Lityński 1977). Dlatego opracowano szereg obiektywnych metod oceny materiału siewnego, znormalizowanych w 1999 roku „Międzynarodowymi przepisami oceny nasion" przez Międzynarodowy Związek Oceny Nasion ISTA (International Seed Testing Association 1999). Podstawowymi parametrami określającymi jakość nasion są: czystość, tożsamość, żywotność, zdolność kiełkowania, wigor, zdrowotność i wilgotność (Dąbrowska i in. 2000).

Czystość nasion definiuje się jako procentową zawartość nasion czystych określonego gatunku w danej partii. Badanie czystości przeprowadza się na próbce analitycznej pobranej z próbki średniej. Składniki próbki rozdziela się wykorzystując sita o różnych średnicach oczek oraz diafanoskopy i wylicza w próbce udział nasion czystych, nasion innych roślin i zanieczyszczeń.

Ocena tożsamości nasion polega na określeniu w jakim stopniu badana próbka odpowiada deklarowanemu gatunkowi lub odmianie. Do testów tożsamości należą: ocena morfologiczna, test fluorescencji, testy cytologiczne i elektroforetyczne.

Określenie żywotności nasion jest podstawowym testem ich wartości użytkowej i pozwala przyporządkować nasiona do odpowiedniej klasy. Istnieją trzy sposoby określania żywotności nasion: metoda krojenia, barwienia zarodków i kiełkowania. Metoda krojenia polega na przekrojeniu lub zgnieceniu nasienia i na podstawie oględzin jego wnętrza stwierdzenia, czy jest żywotne czy martwe. Metoda ta wymaga bardzo dobrej znajomości anatomicznej budowy nasion oraz występujących w nich chorób i patologii. Kolejna metoda określania żywotności nasion polega na barwieniu zarodków. W teście tym wyjęte z nasienia zarodki umieszcza się na 24 godziny w temperaturze 30°C w roztworze chlorku tetrazoliny. W wyniku oddychania i przemian biochemicznych, żywe komórki zarodków barwią się na czerwono, a tkanki martwe pozostają nie zabarwione. Rozmieszczenie i wielkość zabarwionych tkanek świadczy w tym teście o żywotności nasion. Metoda barwienia posiada wiele wad, z których najważniejszymi są: koszt roztworu, droga specjalistyczna aparatura laboratoryjna oraz często występujące problemy z precyzyjnym preparowaniem zarodka. Najpewniejsze wyniki spośród trzech wymienionych metod daje metoda kiełkowania. Umożliwia ona określenie zdolności kiełkowania oraz energii kiełkowania poprzez zliczanie nasion w trakcie procesu kiełkowania. Jednocześnie jest ona metodą najbardziej czasochłonną.

Zdolność kiełkowania jest charakterystyką nasion zdefiniowaną przez ISTA jako zdolność nasion do wytworzenia normalnych siewek wtedy gdy zostały umieszczone w odpowiednich warunkach (temperatura, wilgotność, światło, odpowiedni substytut podłoża glebowego). Laboratoryjne procedury określania zdolności kiełkowania sprowadzają się do monitorowania liczby nasion, które wykiełkowały po odpowiednio długim czasie od rozpoczęcia procesu pęcznienia spośród reprezentatywnej (zwykle kilkaset nasion) grupy testowej. Procentowy udział nasion, które w pełni wykształciły podczas testu korzonek i kiełek określany jest jako zdolność kiełkowania.

Inną wielkością związaną ze zdolnością nasion do pełnienia funkcji reprodukcyjnej jest energia kiełkowania, którą określa się procentowo licząc kiełkujące nasiona w bardzo krótkim czasie od momentu rozpoczęcia procesu pęcznienia.

Niektórzy badacze podkreślają znaczenie wigoru nasion jako zespołu nie tylko cech samych nasion, ale również warunków glebowych i pogodowych w momencie siewu i tworzenia sadzonki, wpływających na zdolność nasion do reprodukcji (Kolasińska i Grzelak 1996, Rytko i Tulo 1984, Woyke 1987). Stwierdzono, że spadek wigoru następuje zwykle dużo wcześniej niż zmniejszenie się zdolności kiełkowania nasion. Do testów wigorowych zaliczamy testy oparte na kiełkowaniu (test oceny wzrostu siewek, cold-test, cool-test, test Hiltnera, testy kontrolowanego i przyspieszonego starzenia), testy fizjologiczne i biochemiczne (test elektroprzewodnictwa, test tetrazolinowy, test aktywności oddychania, test zawartości ATP, test aktywności dekarboksylazy kwasu glutaminowego) oraz testy złożone (test wigorowy stresu kompleksowego).

Parametr zdrowotności nasion określa stopień obecności w danej partii organizmów chorobotwórczych, tzn. bakterii, wirusów lub grzybów. W badaniach żywotności próba analityczna nasion może być testowana bez inkubacji albo po inkubacji.

Ważnym parametrem jakości nasion jest ich wilgotność, którą określa się często łącznie z innymi testami. Zawartość wody w nasionach wyraża się zwykle jako procent wagowy liczony z dokładnością do jednego miejsca po przecinku.

Ze względu na długi czas standardowych testów żywotności i zdolności kiełkowania poszukuje się nowych bardziej efektywnych i opartych na nowoczesnych rozwiązaniach technologicznych metod określania tych parametrów. Szczególne nadzieje wiązane są z technologiami nieniszczącymi opartymi na detekcji promieniowania w różnych zakresach spektrum (Grundas i in. 1999).

2.2. Teledetekcyjne metody oceny jakości owoców

Wymóg precyzyjnej kontroli i monitorowania jakości owoców w czasie zbioru i podczas ich przechowywania pobudza zainteresowanie technologiami nieniszczącymi, tj. analiza gęstości optycznej (Throop i in. 1994), kolorymetria (Dobrzański i Rybczyński 2002, Kuczyński i in. 1993, Kuczyński 2006, Lancaster i in. 1997), spektrometria i spektrofotometria (Voltz i in. 1996, Schmilovitch i in. 2000), rentgenografia (Diener i in. 1970, Kim i Schatzki, 2000, Schatzki i in. 1997, Thomas i in. 1995), rezonans magnetyczny (Faust i in. 1997, Wang i in. 1988, Clark i in. 1998), rezonans akustyczny (Armstrong i in. 1990, Schote i in. 1999, Zude i in. 2006), analiza emisji w bliskiej i średniej podczerwieni (Brown i in. 1974, Dull i in. 1989, Upchurch i in. 1994, Cheng i in. 2003, Veraverbeke i in. 2006). Połączenie metod detekcji i analizy zobrazowań w wielu zakresach spektrum poprzez stworzenie wielospektralnych systemów wspomaganych komputerowymi technikami przetwarzania obrazu umożliwiło automatyczną detekcję i klasyfikację wielu zewnętrznych i wewnętrznych defektów (Abbott 1999, Barkai-Golan 2001, Kleynen i in. 2003, Kleynen i in. 2005, Xing i in. 2005). Jednakże, niezależnie od zastosowanego zakresu fal elektromagnetycznych i złożoności informacji, która może być uzyskana ze zobrazowania, fundamentalnym zagadnieniem jest zrozumienie związku pomiędzy rejestrowanym przez detektor sygnałem a fizycznymi i fizykochemicznymi własnościami badanych obiektów.

W odniesieniu do płodów rolnych, a w szczególności owoców i warzyw, jakość wyrażona jest zbiorem cech sensorycznych (wygląd, tekstura, smak i aromat), właściwościami mechanicznymi, składem chemicznym, zawartością składników odżywczych, właściwościami funkcjonalnymi oraz ewentualnym występowaniem zaburzeń i defektów. Detekcja ich w skali przemysłowej na liniach sortowniczych możliwa jest tylko dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod widzenia komputerowego (Brosnan i Sun 2004, Chaerle i Van der Straeten 2001, Wen i Tao 2000). Istniejące obecnie systemy selekcji owoców i warzyw, wspomagane komputerowymi technikami przetwarzania i analizy obrazu, umożliwiają automatyczną detekcję oraz klasyfikację niektórych wewnętrznych i zewnętrznych defektów, jednak nie stworzono do tej pory systemu umożliwiającego całościową i spójną ocenę defektów tkanki owoców i warzyw.

Rozwój metod optycznych opartych na zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni w systemach sortowniczych umożliwił detekcję powierzchniowych defektów owoców i warzyw oraz ocenę zawartości węglowodanów, protein i tłuszczów w ich tkankach, co doprowadziło do stworzenia indeksów ich jakości (Belie i in. 1999, Chuma i in. 1982, Upcharch i in. 1990, Varith i in. 2002). Jednakże systemy pracujące w tym zakresie są ustawicznie w fazie rozwojowej.

W zastosowaniu do detekcji niektórych defektów powierzchniowych oraz zawartości ekstraktu w miąższu wymagają dalszych badań laboratoryjnych. W badaniach niektórych defektów wewnętrznych, np. brązowienia enzymatycznego miąższu, przydatna okazała się spektrofotometria różnicowa, stanowiąca część systemów wielospetralnych (Greensill i Newman 2001, Xing i in. 2005, Xing i in. 2007). Metoda ta umożliwia nie tylko detekcję, ale również identyfikację defektów wewnętrznych miąższu owoców. Znajduje się ona ciągle na etapie badań laboratoryjnych i wdrożeniowych na niewielką skalę.

Spośród metod „widzenia komputerowego", szczególnie przydatne do detekcji i identyfikacji defektów wewnętrznych, wydają się być metoda obrazowania rentgenowskiego oraz metoda rezonansu magnetycznego. Obie umożliwiają szybką i obiektywną ocenę występowania nawet bardzo głębokich zaburzeń i uszkodzeń tkanki warzyw i owoców. Ze względu na wysoki koszt i złożone instrumentarium towarzyszące tym metodom, nie są one szeroko stosowane w rutynowych testach jakości owoców na liniach sortowniczych. Poważnym ograniczeniem stosowania tych metod w chwili obecnej jest brak opracowania jednoznacznych kryteriów oceny i algorytmów klasyfikacji poszczególnych defektów owoców i warzyw (Kleynen i in. 2003, Kleynen i in. 2005).

Obecnie poszukuje się nowych technologii, które mogłyby wzbogacić istniejące wielospektralne systemy sortownicze. Podstawowymi cechami, jakie powinny spełniać fizyczne metody określania zaburzeń i defektów owoców oraz warzyw, są: bezinwazyjność, niezawodność, krótki czas detekcji, prostota obsługi systemu oraz możliwość detekcji szybko poruszających się na linii sortowniczej obiektów. Taką metodą jest niewątpliwie termografia, która w sposób zdalny i bezkontaktowy umożliwia w czasie rzeczywistym uzyskiwanie rozkładów temperatury na powierzchni badanych obiektów (Baranowski i in. 2007, Fito i in. 2004, Hellebrand i in. 2000, Walczak i in. 2004). Metoda ta polega na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania w zakresie podczerwieni termalnej emitowanego przez dowolne ciała o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego. Urządzenia termograficzne (termowizory) wizualizują to promieniowanie, w wyniku czego otrzymuje się mapę termalną badanego obiektu. Uwzględniając fakt konkurencyjności cenowej nowoczesnych urządzeń termograficznych oraz coraz lepszych parametrów technicznych, stosowanie ich w systemach automatycznej selekcji owoców i warzyw jest bardzo obiecujące.

Urządzenie termograficzne rejestruje wytworzony poprzez radiację strumień energii cieplnej, którego gęstość określona jest prawem Stefana-Boltzmanna. Dla ciał rzeczywistych ilość wypromieniowanej energii zależy zarówno od ich temperatury jak i od właściwości emisyjnych (Białousz 1999). Ze względu na radiacyjny charakter tego sposobu przekazywania energii w pomiarach bezkontaktowych temperatury stosowany jest termin „temperatura radiacyjna". Temperatura

radiacyjna jest równoważna temperaturze termodynamicznej (kinetycznej) pomnożonej przez współczynnik emisyjności danego obiektu podniesiony do potęgi jednej czwartej.

W literaturze przyjęło się stosować termin „termografia" do obrazów otrzymanych z naziemnych kamer termalnych, np. w zastosowaniach medycznych, budowlanych, itp. W teledetekcji powierzchni Ziemi, gdzie stosuje się obrazy rejestrowane skanerami lotniczymi i satelitarnymi mówi się o obrazach (zobrazowaniach) w paśmie termalnym (3-5 lub 8-12 μm).

W ostatnich latach prowadzone są badania nad wykorzystaniem termografii do określania jakości produktów pochodzenia roślinnego. Dotyczą one określania cech fizjologicznych materiałów roślinnych z uwzględnieniem charakterystyk cieplnych, np. określanie zdolności kiełkowania nasion na podstawie badania temperatury ich powierzchni we wczesnej fazie pęcznienia (Baranowski i in. 2003), określania odporności roślin na stres wodny, solny, tlenowy lub temperaturowy (Jones 1999, Matuszak i in. 2004, Walczak 2003a). W przypadku badania jakości owoców metoda termografii okazała się użyteczna do kontroli warunków ich przechowywania i przetwarzania (Ching-Cheng i Paull 2001, Walczak i in. 2003). Stosowane są metody i systemy kontroli czasu suszenia owoców pozwalające określić moment, w którym proces powierzchniowego suszenia kończy się, a rozpoczyna się wysychanie skórki owocu. Analiza obrazów termalnych owoców, często w połączeniu z analizą zobrazowań w świetle widzialnym, jest wykorzystywana do oceny średnicy owoców w sadzie, a więc do wczesnego szacowania plonu (Stajnko i in. 2004). Termografia wykorzystywana jest również do określania intensywności transpiracji owoców po zbiorze (Baranowski i in. 2005, Walczak i in. 2001). Prowadzone są także prace nad określaniem dojrzałości i mączystości jabłek oraz różnic własności mechanicznych między odmianami z wykorzystaniem pomiaru termograficznego.

Wykorzystanie termografii oraz spektroskopii fourierowskiej w podczerwieni pozwoliło na określenie współczynników emisyjności produktów rolniczych i sadowniczych. Stwierdzono, że współczynnik emisyjności powierzchni owoców i powierzchni liści zawierają się w zakresie 0,95-0,98 (Hellebrand i in. 2000, Veraverbeke i in. 2006). Dokonano również oceny przydatności metody termografii do wykrywania niewielkich uszkodzeń mechanicznych tkanki jabłek spowodowanych słabym obiciem (upuszczanie owoców z wysokości 25 cm) oraz określenie czasu, po jakim uszkodzenia te najlepiej odwzorowują się dla wybranych trzech odmian jabłek (Baranowski i in. 2005, Varith i in. 2001). W przypadku defektów wewnętrznych miąższu owoców stwierdzono, że ich detekcja możliwa jest poprzez analizę zmian w czasie temperatury poszczególnych części owoców przy występowaniu gradientu temperatury pomiędzy powierzchnią owocu a otaczającym powietrzem.

Wyniki wcześniejszych prac prowadzonych w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie nad wykorzystaniem termografii w badaniach jakości płodów rolnych stanowią przesłankę zastosowania nowoczesnej metody termografii aktywnej do badania defektów wewnętrznych tkanki owoców i warzyw. Termografia aktywna polega na pobudzeniu krótkotrwałym (od kilkunastu milisekund do kilku sekund) impulsem cieplnym powierzchni badanego obiektu i obserwacji zmian temperatury w czasie w poszczególnych punktach sekwencji termogramów. Niejednorodności właściwości cieplnych wewnątrz badanych obiektów odwzorowują się na termogramach zróżnicowaniem temperatury poszczególnych pikseli obrazu wyrażonym poprzez kontrast termalny, co umożliwia identyfikację nawet niewielkich defektów.

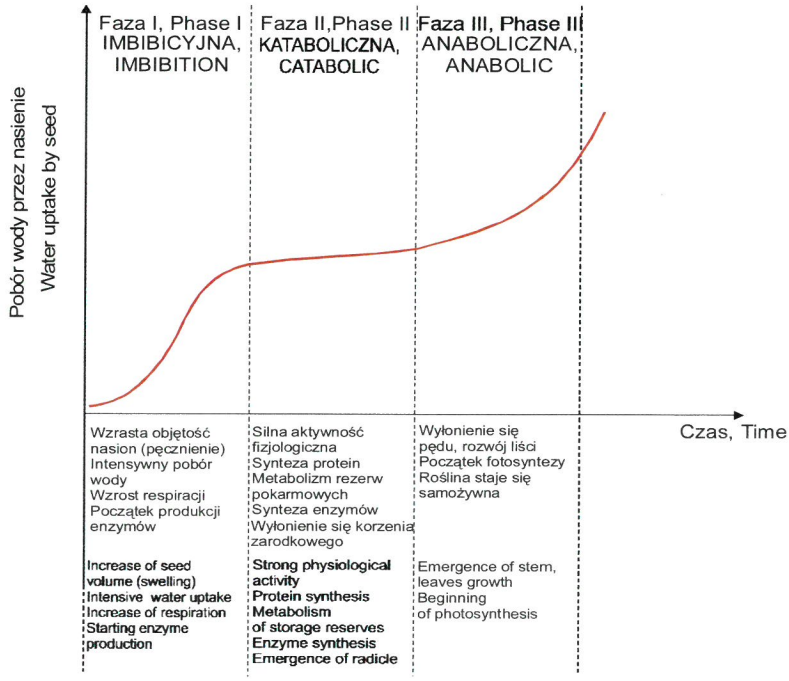
2.3. Ocena zdolności kiełkowania nasion w oparciu o ich analizę termiczną

Kiełkowanie jest złożonym procesem biologicznym, któremu towarzyszą zmiany morfologiczne i fizjologiczne w nasionach. Polegają one na wzroście zarodka i jego przejściu ze stanu anabiozy w stan aktywności fizjologicznej. Nowo wytworzone nasiona zwykle wkrótce po osiągnięciu dojrzałości posiadają zdolność do kiełkowania, jednak większość gatunków roślin do uzyskania potencjalnej zdolności kiełkowania wymaga odpowiednio długiego okresu spoczynku.

Procedura używana w metodzie oceny kiełkowania jest czasochłonna i wymaga odpowiednio licznego materiału do testu oraz precyzyjnego przestrzegania wymogów dotyczących warunków jego prowadzenia. W literaturze pojawiły się ostatnio próby zautomatyzowania procedury zliczania nasion podczas testu kiełkowania poprzez zastosowanie rejestracji obrazów nasion podczas kolejnych etapów procesu kiełkowania i odpowiedniej ich analizy (Urena i in. 2001). Jednocześnie szuka się nowych metod określania zdolności kiełkowania, które umożliwiłyby nie tylko zautomatyzowanie, ale również skrócenie czasu testowania. Najbardziej obiecujące wydają się być metody analizy zobrazowań powierzchni zewnętrznej i wnętrza nasion w różnych zakresach spektrum. Zaawansowane badania w tym zakresie dotyczą zastosowania metody rentgenograficznej, dzięki której można wykryć zewnętrzne i wewnętrzne uszkodzenia ziarniaków. Metoda pomiaru gęstości optycznej płaszczyzny przekroju podłużnego nasienia w pierwszym dniu kiełkowania opiera się na założeniu, że zmiany struktury bielma wynikające z uaktywnienia się w procesie kiełkowania enzymów, w tym enzymów amylolitycznych, mają wpływ na barwę bielma.

Można wyróżnić trzy podstawowe fazy procesu kiełkowania nasion związane ze zmianami aktywności biologicznej i zróżnicowaną intensywnością pobierania wody przez nasienie, a następnie siewkę (rys. 1): imbibicja, aktywacja (faza katabo-

liczna) oraz wzrost (faza anaboliczna). W pierwszej fazie pęcznienia nasion główną rolę odgrywa dyfuzja wody oraz hydratacyjne wchłanianie jej przez koloidy nasienia. Są to siły natury fizykochemicznej. Pobieranie wody dzięki siłom osmotycznym i metabolicznym jest właściwością nasion żywych. Do nasion martwych woda wnika głównie dzięki dyfuzji i imbibicji (hydratacji), a w przypadku półprzepuszczalnych okryw dzięki osmozie. Podczas tego procesu imbibicyjne ssanie wody przez nasiona odbywa się z siłą wyrażoną przez ekwiwalentne ciśnienie dochodzące do 102 MPa. Tak duże ciśnienie, wykonując pracę przemieszczania cząstek wody, może być zauważalne w ogólnym bilansie energetycznym na tle jednorodnie emitującej powierzchni. W fazie aktywacji istotną rolą w przebiegu procesów metabolicznych zaczyna odgrywać respiracja, ponieważ tlen dostaje się swobodnie do wnętrza pęczniejącego nasienia poprzez uszkodzoną pokrywę. Wytwarzaniu enzymów towarzyszy w tej fazie produkcja energii i zużywanie zapasów pokarmowych. Cechami fazy wzrostu jest rozwój wyraźnie ukształtowanych komórek nowej rośliny oraz wzrost świeżej i suchej masy nowej siewki kosztem ubytku masy nasienia.



Rys. 1. Pobór wody przez nasienie w różnych fazach procesu kiełkowania
Fig. 1. Water uptake by seed in various stages of germination process

W trakcie procesu kiełkowania zachodzą zmiany intensywności procesu wymiany energii z otoczeniem objawiające się zróżnicowaną temperaturą ich powierzchni. W ostatnich latach podjęto próby wyjaśnienia procesu kiełkowania poprzez analizę jego termogenezy. Badania mikrokalorymetryczne potwierdziły występowanie trzech odrębnych etapów intensywności wydzielania energii cieplnej przez nasienie podczas kiełkowania (Sigstad i Garcia 2001, Tang i in. 1991, Zhou i in. 1999). Stwierdzono szczególnie duże zmiany w krzywej termogenezy w trakcie etapu aktywacji. Na podstawie analizy krzywych termogenezy opracowano matematyczny model termogenezy procesu kiełkowania. Każdemu stadium rozwoju nasion podczas procesu kiełkowania towarzyszy określona ilość absorbowanej przez nie wody. Stwierdzono, że początkowa wilgotność nasion istotnie wpływa na ilość wody zaabsorbowanej podczas procesu kiełkowania (Nedeva i Nikolova 1999). Do czynników istotnie wpływających na zdolność kiełkowania zaliczyć można również temperaturę powietrza (zarówno jej średnią wartość, jak i intensywność zmian podczas okresu kiełkowania), fotonastyczność, czas od chwili osiągnięcia dojrzałości, warunki przechowywania uśpionych nasion a także zasolenie podłoża w trakcie kiełkowania (Lombardi i in. 1997).

W warunkach naturalnych absorpcja wody przez nasiona jest warunkowana dodatkowo innymi czynnikami niż podczas testów laboratoryjnych. Głównie parametry glebowe, tj. kwasowość, natlenienie, gęstość, wilgotność i potencjał wody glebowej, temperatura w warstwie, w której nasiona kiełkują, wpływają na energię kiełkowania nasion.

2.4. Przewodzenie ciepła w owocu

Wymiana ciepła pomiędzy ciałem stałym, np. owocem, i otoczeniem może zachodzić poprzez przewodzenie, promieniowanie i konwekcję. Ponieważ w sensie termodynamicznym ciepło nie jest funkcją stanu, jego transport rozumiany jest jako transport energii na sposób ciepła.

W większości przypadków wszystkie trzy formy wymiany ciepła występują jednocześnie, co stanowi duże wyzwanie dla modelowania przepływu ciepła. W przypadku badań laboratoryjnych, gdzie można stworzyć warunki braku ruchu powietrza w otoczeniu badanego owocu, człon konwekcyjny równania przepływu ciepła może być pominięty. Niewątpliwe wyzwanie dla modelu przepływu ciepła w owocu (i nie tylko) może stanowić uwzględnienie wymiany radiacyjnej, która szczególnie w wyższych temperaturach może mieć istotne znaczenie. Mechanizm radiacyjnej wymiany ciepła polega na emisji promieniowania elektromagnetycznego ze wszystkich elementów powierzchni analizowanego obiektu, a nie – jak w przypadku konwekcji i przewodzenia – na rozchodzeniu się dyfuzyjnym. Przy uwzględnieniu przyczynków ze wszystkich elementów wysyłających promieniowanie otrzymuje się równania całkowe, a nie różniczkowe. Większość prac dotyczących wymiany

ciepła w owocu zakłada brak składnika promieniowania przyjmując, że jedynym czynnikiem powodującym przepływ ciepła w owocu jest gradient temperatury pomiędzy nim a otoczeniem lub pomiędzy poszczególnymi warstwami owocu (Becker i Fricke 2004, Jacobi i in. 2001). W przypadku modelowania wymiany ciepła w materiałach w celu interpretacji danych termograficznych pojawiły się w ostatnim czasie próby włączenia czynnika radiacyjnego (Welty i in. 2001, Nowak i Wawrzynek 2006).

Przepływ ciepła w owocu determinowany jest jego właściwościami cieplnymi oraz innymi właściwościami fizycznymi tego obiektu, tj. rozmiar, kształt, masa, objętość, struktura wewnętrzna, grubość skórki, skład i jędrność miąższu, a także właściwościami fizycznymi otaczającego go ośrodka, tzn. ciśnieniem, gęstością, wilgotnością oraz lepkością (Newman i in. 1996, Nicolai i Baerdemaeker 1995, Shellie i Mangan 1996, Wang i in. 2001).

Właściwości cieplne decydujące o przewodzeniu ciepła w ośrodku to: ciepło właściwe, współczynnik przewodnictwa cieplnego, dyfuzyjność cieplna oraz aktywność cieplna zwana również efuzyjnością cieplną.

Ciepło właściwe, c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), informuje ile energii cieplnej jest potrzebne do ogrzania jednego kilograma materiału o jeden stopień Kelwina:

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \tag{1}$$

gdzie: m – masa (kg), Q – ilość ciepła dostarczonego (J), T – temperatura (K).

Ciepło właściwe materiałów roślinnych zależy od ich budowy, zawartości wilgotności i temperatury. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem wilgotności ciepło właściwe tych materiałów rośnie, ale zależność ta nie jest liniowa, szczególnie dla niskich wartości wilgotności. Ciepło właściwe wzrasta wraz z temperaturą. Przy niskich wartościach wilgotności miąższu zależność ta jest liniowa. Przy wartościach wilgotności wyższych od 20% zaobserwowano gwałtowny wzrost ciepła właściwego dla temperatury około 273 K, co wiąże się z przejściem fazowym ciecz/ciało stałe (Mohsenin 1980, Kaleta 1999).

Współczynnik przewodnictwa cieplnego, k ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), jest wielkością termofizyczną określającą zdolność materiału do przewodzenia ciepła. Definiuje się je jako ilość ciepła przepływającego drogą przewodzenia w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku gradientu temperatury. Zgodnie z prawem Fouriera:

$$k \equiv \frac{q}{grad\,T}, \tag{2}$$

gdzie: q – gęstość strumienia przewodzonego ciepła ($W \cdot m^{-2}$), $grad\,T$ – gradient temperatury (K).

Współczynnik przewodnictwa cieplnego zależy od składu chemicznego owocu, zawartości wody, temperatury oraz struktury wewnętrznej (porowatość, kształt, rozkład i sposób łączenia się komórek, niejednorodności i defekty wewnętrzne). Istnieją liczne empiryczne modele przewodnictwa cieplnego materiałów roślinnych określające związek tej wielkości z wilgotnością materiału, temperaturą, zawartością protein, węglowodanów, tłuszczu, porowatością (Mohsenin 1980, Pabis 1982, Sweat 1992, Kaleta 1999).

Dyfuzyjność cieplna, α ($m^2 \cdot s^{-1}$), jest to stosunek współczynnika przewodnictwa cieplnego, k, do iloczynu gęstości materiału, ρ, i ciepła właściwego, c:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}. \tag{3}$$

Zależność dyfuzyjności cieplnej od wilgotności jest nieliniowa, ponieważ zarówno gęstość, ciepło właściwe, jak i przewodnictwo cieplne materiałów roślinnych zależą od wilgotności.

Badania wpływu różnych czynników na dyfuzyjność cieplną materiałów roślinnych przeprowadzone przez Singha (1982) wykazały największy wpływ wilgotności i temperatury na tę wielkość, a znacznie mniejszy składu chemicznego i budowy.

Aktywność cieplna (efuzyjność cieplna), e ($W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), jest właściwością termofizyczną materiałów istotną przy rozpatrywaniu procesów nieustalonego przepływu ciepła w materiałach. Określa ona zdolność materiału do wymiany ciepła z otoczeniem i wyrażona jest równaniem:

$$e = \sqrt{k \rho c}. \tag{4}$$

Właściwości cieplne nasion i ziarna różnią się w sposób istotny od właściwości cieplnych owoców i warzyw ze względu inną zawartość wody i gęstość. Różne materiały roślinne charakteryzują się odmienną budową wewnętrzną, co ma również wpływ na zróżnicowanie ich właściwości cieplnych. Na przykład tkanki jabłek są bardzo porowate i zawierają duże ilości gazów, co ma istotny wpływ na ich mniejszy współczynnik przewodnictwa cieplnego w porównaniu z częściami użytkowymi niektórych warzyw. Zakresy zmian właściwości cieplnych owoców przedstawione w tabeli 1 mają znaczenie w modelowaniu w nich przepływu ciepła oraz interpretacji danych termograficznych.

Tabela 1. Wartości współczynnika przewodnictwa cieplnego i dyfuzyjności cieplnej dla wybranych owoców w zależności od wilgotności, temperatury i gęstości
Table 1. Values of thermal conductivity and thermal diffusivity of chosen fruit in relation to moisture content, temperature and density

Produkt, Product	Wilgotność wzgl. masy mokrej, Water content (%)	Temperatura, Temperature (K)	Gęstość, Density ($kg \cdot m^{-3}$)	Współczynnik przewodnictwa cieplnego, Thermal conductivity coefficient ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Dyfuzyjność cieplna, Thermal diffusivity $\cdot 10^7 (m^2 \cdot s^{-1})$	Autor Doniesienia, Author of reference
Jabłko, Apple	85-89	273-323	790-990	0,404-0,540	1,11-1,60	Lozano i in. 1979 Romaswamy i Tung 1981
Gruszka, Pear	85-87	273-314	983-1028	0,490-0,595	1,32-1,54	Gromov i Dibirov 1979
Śliwka, Plum	80-89	273-373	1030-1130	0,490-0,590	1,16-1,59	Neverov i Fedorov 1977
Brzoskwinia, Peach	89	273-301	930-1081	0,500-0,581	1,39	Ginzburg i Gromov 1987
Truskawka, Strawberry	89-92	273-301	900-931	0,460-0,462	1,24-1,34	Mohsenin 1980
Wiśnia, Sour cherry	75-84	273-303	970-1092	0,510-0,550	1,13-1,65	Ginzburg i Gromov 1987
Malina, Raspberry	84	273-283	998	0,490	1,31	Mohsenin 1980
Winogrono, Grape	80	273-283	1068	0,510	1,31	Mohsenin 1980

Przewodzenie ciepła w owocu ma charakter nieustalony, tzn. pole temperatury zmienia się w czasie (Wiśniewski 1988). Równanie nieustalonego przewodzenia ciepła dla przypadku występowania źródła wewnętrznego ciepła, q_v, oraz przy założeniu zmienności współczynnika przewodnictwa cieplnego, k, w czasie ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{1}{\rho c}\frac{\partial k}{\partial T}\left[\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right] + \frac{q_v}{\rho c}, \tag{5}$$

gdzie: x, y i z współrzędne układu kartezjańskiego.

W przypadku braku źródeł wewnętrznych ciepła oraz przy stałym współczynniku przewodnictwa cieplnego równanie to redukuje się do postaci zwanej równaniem Fouriera:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T\,. \tag{6}$$

W celu rozwiązania równań 5 lub 6 należy określić warunki jednoznaczności rozwiązania, do których w przypadku nieustalonego przepływu ciepła należą: charakterystyka geometryczna badanego obiektu (jego kształt i wymiary), własności fizyczne substancji poszczególnych składników badanego układu tworzącego obiekt, a w szczególności ich właściwości termofizyczne, warunki brzegowe charakteryzujące sposób wymiany ciepła na powierzchniach zewnętrznych badanego obiektu i warunki początkowe. Warunki brzegowe mogą być określane na różne sposoby, w zależności od specyfiki badanego układu i procesu. Warunki brzegowe Dirichleta polegają na podaniu rozkładu temperatury na powierzchni ciała w każdej chwili procesu wymiany ciepła. Zastosowanie warunków brzegowych Neumanna wymaga podania rozkładu gęstości strumieni ciepła na powierzchni ciała w każdej chwili czasu. W sytuacji, gdy procesowi przewodzenia ciepła w obiekcie towarzyszy przejmowanie ciepła między tym obiektem a otaczającym płynem, należy uwzględnić warunek brzegowy trzeciego rodzaju, tzn. warunek Fouriera. Zgodnie z prawem Newtona gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez płyn od powierzchni ciała stałego jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatury powierzchni ciała T_s i temperatury płynu T_p:

$$q_s = h(T_s - T_p)\,, \tag{7}$$

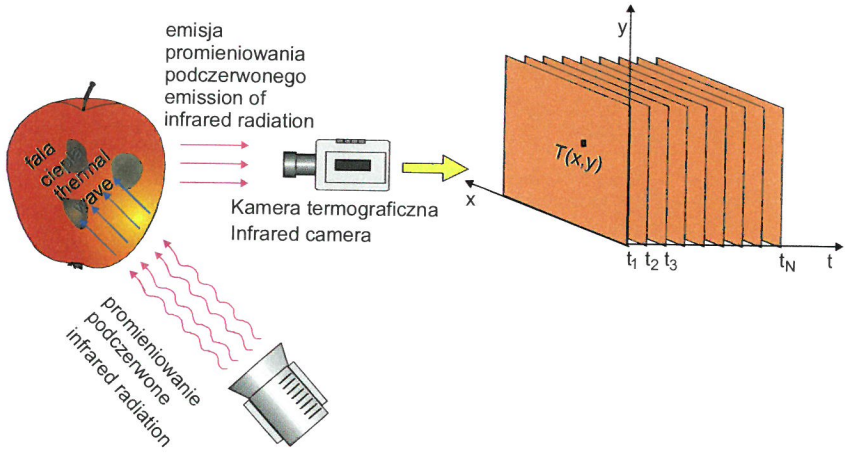
gdzie h jest współczynnikiem przejmowania ciepła ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Sformułowanie warunku brzegowego Fouriera polega na podaniu temperatury T_p płynu otaczającego rozpatrywany obiekt oraz współczynnika przejmowania ciepła h.

W przypadku prostych układów (o nieskomplikowanej geometrii i składających się z niewielkiej ilości komponentów) możliwe jest zwykle analityczne rozwiązanie nieustalonego przepływu. Natomiast w przypadku układów o skomplikowanej geometrii, gdy należy stosować nieciągłe lub tylko nieróżniczkowalne funkcje opisujące parametry fizyczne i warunki brzegowe, stosuje się do rozwiązania problemów przepływu nieustalonego np. metodę elementów skończonych (MES). Polega ona na wprowadzeniu podziału obiektu na części o skończonych wymiarach i możliwie prostych kształtach (dyskretyzacja), umożliwiających uzyskanie rozwiązania w obszarze każdej części (węźle siatki), a następnie zbudowania powiązań pomiędzy nimi. Zastosowany podział gwarantuje uzyskanie wewnątrz każdej części, rozwiązania w postaci funkcji o wystarczająco prostym kształcie. Taka aproksymacja inną funkcją o z góry narzuconej postaci może okazać się zadowalająca do rozwiązania problemu.

Rozwiązanie problemu metodą MES może być przeprowadzane w przestrzeni dwuwymiarowej (2D), gdzie często dyskretyzacja sprowadza się do podziału obszaru na trójkąty. Rozwiązanie traktuje się w tym przypadku jako obliczenie wartości w przekroju danego obiektu. Istnieje obecnie wiele pakietów oprogramowania wyposażonych również w możliwość rozwiązywania zagadnień przepływu ciepła metodą (MES) w przestrzeni trójwymiarowej (3D). Stosuje się w tych programach dyskretyzację opartą na podziale obszaru na czworościany. Modelowanie 3D pozbawione jest ograniczeń techniki 2D, ale jest bardziej wymagające pod względem mocy obliczeniowej komputera i w niektórych przypadkach nie jest niezbędne do zrozumienia istoty procesu transportu ciepła w ośrodku.

2.5. Podstawy termografii aktywnej

W ostatnich latach opracowano nową nieniszczącą metodę badania defektów wewnętrznych materiałów, zwanej termografią aktywną (Więcek i Zwolenik 1998, Maldague 2001, Ibarra-Castanedo i Maldague 2004, Meola i Carlomagno 2004). W odróżnieniu od termografii pasywnej, w której pomiar wykonuje się w warunkach naturalnego zróżnicowania temperatury pomiędzy badanymi obiektami i otaczającym je powietrzem, w termografii aktywnej konieczne jest zastosowanie zewnętrznego źródła pobudzenia cieplnego (rys. 2).



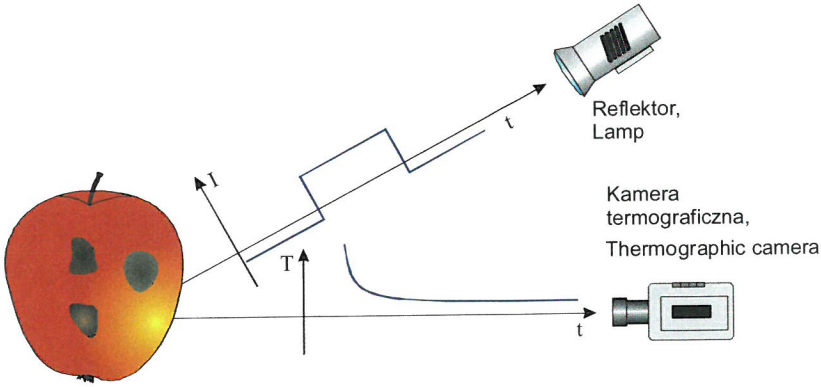
Rys. 2. Zasada termografii aktywnej
Fig. 2. Principle of active thermography

Jeżeli wewnątrz badanego obiektu występują niejednorodności właściwości cieplnych, a więc zróżnicowanie przenikania ciepła do jego wnętrza, możliwe jest otrzymanie na powierzchni śladów termalnych tych niejednorodności, a w konsekwencji kontrastów termalnych między strukturą nienaruszoną materiału i zaburzeniem. Główną zaletą metody termografii aktywnej jest możliwość detekcji defektów znajdujących się pod powierzchnią obiektu oraz oceny głębokości defektów na podstawie charakterystyki impulsu pobudzającego oraz zmian w czasie rozkładu temperatury na badanej powierzchni.

Ze względu na rodzaj impulsu pobudzającego oraz sposób przetwarzania i analizy danych termograficznych wyróżnia się: termografię impulsową (ang. pulsed thermography), termografię synchroniczną (ang. lock-in thermography), wibrotermografię (ang. vibrothermography), termografię stopniowego podgrzewania (ang. step-heating thermography), termografię impulsowo-fazową ang. (pulsed phase thermography).

Termografia impulsowa polega na krótkotrwałym (od kilku milisekund do kilku sekund) pobudzaniu termicznym badanego obiektu a następnie rejestracji sekwencji obrazów odpowiedzi obiektu na pobudzenie w fazie stygnięcia obiektu (lub ogrzewania w przypadku zastosowania pobudzenia np. strumieniem zimnego powietrza). Ciepło wnika do wnętrza badanego obiektu drogą dyfuzyjną, a obecność wewnętrznego defektu powoduje lokalną zmianę tempa dyfuzji ciepła, co odwzorowuje się na powierzchni lokalną zmianą temperatury radiacyjnej i tworzy się kontrast termalny względem nienaruszonej struktury otaczającej defekt (rys. 3).

W sekwencji zarejestrowanych termogramów głębsze defekty odwzorowują się na powierzchni później ze zmniejszonym kontrastem.



Rys. 3. Zasada termografii impulsowej: impuls prostokątny o charakterystyce natężenia $I(t)$ oraz charakterystyka odpowiedzi termicznej obiektu $T(t)$
Fig. 3. Principle of pulsed thermography: a rectangular pulse with intensity characteristics $I(t)$ and the characteristics of thermal response of studied object $T(t)$

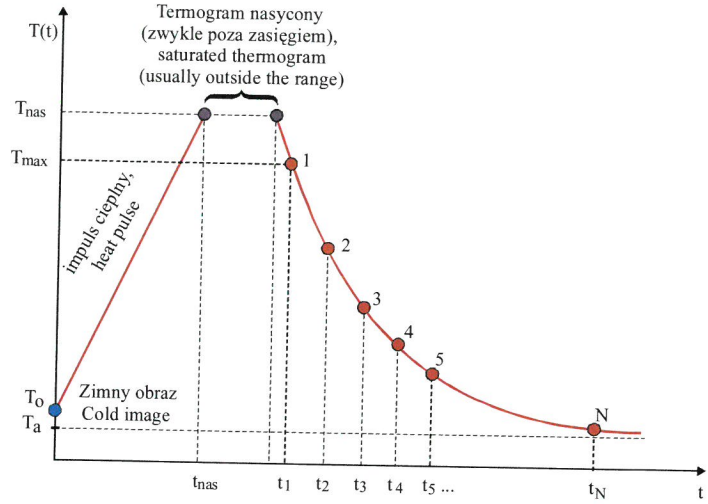
Podstawową wielkością wykorzystywaną do identyfikacji występowania defektu na termogramach jest tzw. kontrast bezwzględny ΔT określany jako różnica temperatur obszaru z defektem T_d i obszaru bez defektu T_{bd}:

$$\Delta T = T_d - T_{bd} \,. \tag{8}$$

Współczynnik kontrastu termalnego C definiuje się jako:

$$C(t) = \frac{T_d(t) - T_d(t_0)}{T_{bd}(t) - T_{bd}(t_0)} \,, \tag{9}$$

gdzie: $T_d(t)$ i $T_{bd}(t)$ to odpowiednio temperatury nad danym punktem defektu oraz nad punktem nienaruszonej struktury w danej chwili czasu t, natomiast $T_d(t_0)$ oraz $T_{bd}(t_0)$ to analogiczne wartości temperatury w chwili czasu t_0 bezpośrednio przed zadaniem impulsu cieplnego („obraz zimny"). Ten znormalizowany współczynnik minimalizuje wpływ otaczającego środowiska na kontrast termalny oraz redukuje szumy produkowane przez sam skaner.



Rys. 4. Zmiany w czasie temperatury danego punktu termogramu w termografii impulsowej
Fig. 4. Change of temperature in time for a given point of thermogram in pulsed thermography

Niekiedy korzystniejsza jest normalizacja kontrastu termalnego nie względem „obrazu zimnego", lecz względem pierwszego obrazu otrzymanego bezpośrednio po wyłączeniu impulsu cieplnego. Wzór na współczynnik kontrastu termalnego nazwany ERT (Early Recorded Image) przyjmuje wtedy postać (patrz rys. 4):

$$ERT(t) = \frac{T_d(t) - T_{d\max}(t_1)}{T_{bd}(t) - T_{bd\max}(t_1)}, \tag{10}$$

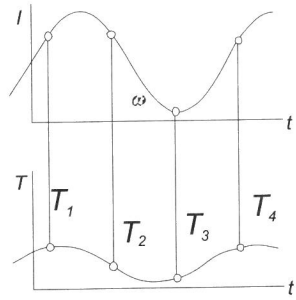
gdzie: $T_{dmax}(t_1)$ oraz $T_{bdmax}(t_1)$ to odpowiednio temperatury nad danym punktem defektu oraz nad punktem nienaruszonej struktury w danej chwili czasu t_1 odpowiadającej pierwszemu zarejestrowanemu obrazowi sekwencji po wyłączeniu impulsu cieplnego.

Inna odmiana współczynnika kontrastu, zwana współczynnikiem znormalizowanym (różnicowym), dla dowolnego punktu o współrzędnych (x, y) sekwencji zobrazowań w danym czasie t wyraża się równaniem:

$$C_n(x,y,t) = \frac{T(x,y,t) - T(x_0,y_0,t)}{T(x_0,y_0,t)}, \tag{11}$$

gdzie: x_0 i y_0 to współrzędne punktu odniesienia wybranego w wybranym obszarze defektu.

W metodzie **termografii synchronicznej** (lock-in) badany obiekt poddawany jest pobudzeniu harmonicznemu strumieniem ciepła. Rejestruje się zarówno charakterystykę pobudzenia (częstotliwość i amplitudę), jak i charakterystykę odpowiedzi cieplnej (zmiany w czasie rozkładu temperatury badanej powierzchni). Na podstawie porównania charakterystyki pobudzenia i odpowiedzi cieplnej obiektu dokonywana jest rekonstrukcja obrazów poprzez wyznaczenie amplitudogramów i fazogramów, czyli obrazów amplitudy i przesunięcia fazowego względem sygnału pobudzającego dla znanej wartości częstotliwości. Na rysunku 5 przedstawiono schemat wyznaczania amplitudy i fazy odpowiedzi cieplnej obiektu na podstawie znajomości harmonicznych przebiegów sygnału pobudzającego i odpowiedzi cieplnej.



Rys. 5. Zasada rekonstrukcji parametrycznej amplitudogramu i fazogramu
Fig.5. Principle of parametric reconstruction of ampligram and phasegram

Jeżeli znamy 4 punkty odpowiedzi cieplnej obiektu dla jednego cyklu modulacji (w czasie odpowiadającym jednemu okresowi fali pobudzającej), to na podstawie analizy szeregu Fouriera otrzymujemy następujące wzory na amplitudę A i fazę ϕ odpowiedzi cieplnej:

$$A = \sqrt{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2} \tag{12}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_4}\right). \tag{13}$$

Podstawową zaletą pobudzenia harmonicznego obiektu jest to, że wymagana jest niewielka jego moc, gdyż cała energia pobudzenia koncentruje się na jednej częstotliwości. Oprócz tego analiza fazowa termogramów jest mniej wrażliwa na wszelkiego rodzaju refleksy pochodzące od przedmiotów otaczających badany

obiekt, zmiany współczynnika emisyjności powierzchni w czasie rejestracji oraz niejednorodne oświetlenie obiektu promieniowaniem pobudzającym. Stwierdzono również większy zakres głębokości, na jakiej można badać defekty techniką lock-in w stosunku do techniki pojedynczego impulsu. Zakres ten w przypadku analizy amplitudowej jest w przybliżeniu określony poprzez długość dyfuzji cieplnej μ określonej równaniem:

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho c}}, \tag{14}$$

gdzie: k – współczynnik przewodnictwa cieplnego, ρ – gęstość ośrodka, c – ciepło właściwe (przy stałym ciśnieniu), ω – jest częstością modulacji (Hz). Dla analizy fazowej głębokość penetracji jest nawet większa i wynosi od 1,5 μ do 2 μ. Z tego powodu analiza fazowa wydaje się być bardziej atrakcyjna dla technologii nieniszczących badania defektów wewnętrznych. Analogicznie jak absolutny kontrast termalny w termografii impulsowej, w termografii lock-in definiuje się absolutny kontrast fazowy określony wzorem:

$$\Delta\phi = \phi_d - \phi_{bd}, \tag{15}$$

gdzie: ϕ_d – jest fazą dla piksela z defektem, ϕ_{bd} – fazą dla piksela bez defektu.

Inną metodą termografii aktywnej jest **metoda stopniowego ogrzewania** (step-heating thermography). Wykorzystuje się w niej krótkie impulsy laserowe (punktowe lub liniowe) ogrzewające próbkę badanego materiału i rejestruje się charakterystykę wzrostu temperatury w czasie. Metoda ta jest przydatna do wyznaczania przewodności cieplnej materiałów (głównie ciał stałych). Przewodność cieplną oblicza się na podstawie pomiaru szybkości zmian temperatury pod wpływem ogrzewania obiektu. Metoda ta stała się również przydatna do określania grubości izolacji cieplnej urządzeń grzewczych (Maldague 2001).

W metodzie **wibrotermografii** (vibrothermography) pobudzenie cieplne materiału z defektem otrzymuje się poprzez wytworzenie w nim drgań mechanicznych o kilku zadanych częstotliwościach. Urządzeniem termograficznym obserwuje się ciepło uwolnione na skutek drgań z pęknięć lub delaminacji materiału. Do pobudzenia cieplnego wykorzystuje się fale ultradźwiękowe w zakresie częstotliwości 10-20 kHz. Zaletą wibrotermografii jest możliwość obserwacji defektów wewnętrznych o niewielkich rozmiarach i usytuowanych na niegładkich powierzchniach. Jednak zastosowanie tej metody w badaniu materiałów biologicznych wydaje się wątpliwe ze względu na szkodliwy wpływ fali ultradźwiękowej na komórki organizmów żywych.

2.6. Termografia impulsowo-fazowa PPT (Pulsed Phase Thermography)

Metodę termografii impulsowo-fazowej (pulsed phase thermography) można zakwalifikować jako połączenie metody termografii impulsowej oraz metod analizy termografii lock-in. W metodzie tej sposób wymuszenia pobudzenia cieplnego oraz akwizycja danych są takie same jak w metodzie termografii impulsowej. Natomiast analizę odpowiedzi cieplnej badanego obiektu dokonuje się wykorzystując transformację Fouriera.

W termografii impulsowej stosuje się zwykle impuls prostokątny a odpowiedź termalna badanego obiektu na pobudzenie cieplne ma charakterystyczny przebieg przedstawiony na rysunku 4. Zgodnie z zasadą superpozycji, dowolną falę można aproksymować poprzez sumę czysto harmonicznych (sinusoidalnych) fal o różnych częstościach. Dla badanego impulsu prostokątnego S, rozchodzącego się wzdłuż osi x zasadę tę można przedstawić w postaci:

$$S_n(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\sum_{k=1}^{n}(-1)^{(k-1)}\frac{\cos(2k-1)\omega x}{(2k-1)}, \tag{16}$$

gdzie: n jest liczbą fal uwzględnionych w aproksymacji (im liczba ta jest większa tym aproksymacja dokładniejsza). Również sygnał odpowiedzi termicznej obiektu można przedstawić jako złożenie pewnej liczby fal, z których każda posiada różne częstości, amplitudy i opóźnienie fazowe. Stosuje się w tym celu algorytm transformacji Fouriera. Ciągła transformacja Fouriera przedstawia całkę nieskończoną funkcji wykładniczych w postaci:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cdot e^{(-j2\pi ft)}dt, \tag{17}$$

gdzie: $j^2 = -1$. W praktyce sygnałów próbkowanych (dyskretnych) stosuje się szybszą i bardziej efektywną transformację dyskretną Fouriera. W przypadku gdy mamy skończony ciąg próbek sygnału (T_0, T_1, T_2, ..., T_{N-1}) można go przekształcić w ciąg harmoniczny (F_0, F_1, F_2, ..., F_{N-1}) przy pomocy wzoru:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T_k \cdot e^{\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right)} = \mathrm{Re}_n + \mathrm{Im}_n, \tag{18}$$

gdzie: Re, Im – część rzeczywista i urojona transformaty, j – jednostka urojona, n – numer składowej harmonicznej (n = 0, 1,..N), k – numer próbki sygnału, T_k – wartość próbki sygnału. W termografii impulsowo-fazowej wykorzystuje się najczęściej do liczenia dyskretnej transformaty Fouriera, tzw. algorytmy szybkiej

transformaty Fouriera, np. algorytm Cooleya-Tukeya. Algorytmy te bazują na metodzie „dziel i rządź" dzieląc rekurencyjnie transformatę na mniejsze transformaty. Z algorytmów szybkiej transformaty Fouriera korzysta wiele komercyjnych programów obliczeniowych.

Rzeczywista i urojona część transformaty Fouriera są wykorzystane do obliczenia amplitudy i fazy:

$$A_n = \sqrt{\mathrm{Re}_n^2 + \mathrm{Im}_n^2}\,, \tag{19}$$

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}_n}{\mathrm{Re}_n}\right). \tag{20}$$

W sekwencji N termogramów badanej powierzchni znajduje się $N/2$ użytecznych składowych częstotliwościowych. Pozostała połowa zawiera informacje szumowe. Dlatego ujemne dane częstotliwościowe można bezpiecznie odrzucić.

Analiza amplitudowa i fazowa termogramów pozwala na wydobycie ważnych informacji na temat procesu wnikania ciepła do wnętrz badanych obiektów, głębokości i rozmiarów defektów podpowierzchniowych, oraz właściwości cieplnych obiektu. Jednak aby ta analiza mogła być przeprowadzona w sposób prawidłowy należy dysponować sekwencją o dobrej jakości z odpowiednio dobraną częstością próbkowania. Szczególnie istotne jest równomierne oświetlenie badanej powierzchni impulsem pobudzającym oraz odpowiedni dobór częstości próbkowania i długości sekwencji. Dla materiałów o wysokim współczynniku przewodnictwa częstotliwość rejestracji poszczególnych obrazów w sekwencji powinna być duża (nawet do 100 Hz). Dobór czasu rejestracji ma również istotny wpływ na charakterystykę fazową termogramów. Najlepszym sposobem na uniknięcie straty ważnej informacji fazowej z termogramów jest stosowanie tak długiego czasu rejestracji odpowiedzi termalnej obiektu na impuls aby temperatura ciała mogła wrócić do zbliżonej jak przed zadaniem impulsu. Problem doboru odpowiednich parametrów rejestracji wiąże się bezpośrednio z mocą obliczeniową komputera i parametrami technicznymi urządzenia termograficznego. Innym ważnym zagadnieniem przy projektowaniu doświadczenia z wykorzystaniem termografii aktywnej jest dobór odpowiedniej mocy impulsu i czasu jego trwania. Te parametry zależą głównie od właściwości termofizycznych i strukturalnych badanego obiektu. Moc sygnału pobudzającego musi być wystarczająca do zapewnienia wnikania ciepła na odpowiednią głębokość z odpowiednią szybkością.

3. CEL PRACY

Jakość owoców i nasion jest ważnym aspektem badań agrofizycznych. Jak wynika z licznych doniesień literaturowych i bezpośrednich kontaktów z producentami płodów rolnych, istnieje potrzeba poszukiwania alternatywnych metod wyznaczania fizycznych parametrów określających ich jakość.

Celem badań było opracowanie procedury fizycznej oceny jakości owoców i nasion na podstawie analizy ich temperatury radiacyjnej.

Realizację celu oparto na następujących założeniach i hipotezach:

- defekty wewnętrzne i zaburzenia fizjologiczne owoców powodują powstawanie lokalnych niejednorodności właściwości cieplnych tkanki, które uwidocznią się na obrazie termalnym ich powierzchni w wyniku zewnętrznego pobudzenia cieplnego;
- zastosowanie metody termografii aktywnej pozwoli na identyfikację kontrastu termalnego między tkanką obitą i nieobitą w jabłkach różnych odmian we wczesnej fazie po obiciu, tzn. do kilku godzin po obiciu;
- badania modelowe rozchodzenia się ciepła w owocach z obiciami umożliwią dobór optymalnych parametrów impulsu cieplnego (moc i czas ogrzewania) oraz rejestracji sekwencji (częstotliwość rejestracji i liczba obrazów w sekwencji);
- procesy natury fizjologicznej i biochemicznej zachodzące we wczesnych stadiach kiełkowania nasion wywołują zmiany ich stanu energetycznego oraz modyfikują rozkład temperatury ich powierzchni; stanowić to będzie podstawę selekcji materiału nasiennego.

Badania przeprowadzono w następujących etapach:

1. Opracowanie uproszczonego modelu przepływu ciepła wewnątrz jabłka z występującym w nim zaburzeniem właściwości cieplnych tkanki oraz eksperymentalna jego weryfikacja na podstawie badań termograficznych.
2. Dobór optymalnych dla wykrycia defektów wewnętrznych tkanki parametrów pobudzenia (moc impulsu pobudzającego oraz czas pobudzenia) oraz parametrów rejestracji termograficznej.
3. Opracowanie algorytmu identyfikacji zaburzenia na obrazie termograficznym, dzięki zaawansowanym procedurom przetwarzania obrazów.
4. Określenie związku między fizycznymi właściwościami tkanki jabłek, takimi jak: gęstość i jędrność miąższu, zawartość ekstraktu, potencjał wody w tkankach, dyfuzyjność cieplna, a odpowiedzią radiometryczną na wymuszenie termiczne.

5. Opracowanie metodyki pomiaru temperatury radiacyjnej wybranych nasion oraz sprawdzenie przydatności termografii do badania zdolności kiełkowania nasion we wczesnym okresie procesu pęcznienia.

Podjęte w tej pracy zagadnienia opracowania systemu termografii aktywnej i procedur identyfikacji i klasyfikacji defektów wewnętrznych i zaburzeń fizjologicznych tkanki owoców i nasion oraz próba matematycznego opisu procesu transportu ciepła w tych materiałach mogą mieć duże znaczenie praktyczne i stanowić będą podstawę prac wdrożeniowych.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Wykrywanie świeżych obić jabłek metodą termografii dynamicznej

4.1.1. Wprowadzenie

W procesie sortowania jabłek istotnym problemem jest opracowanie skutecznej metody wykrywania świeżo powstałych obić. Pomimo iż obicia stanowią przyczynę odrzucenia największej liczby owoców na liniach sortowniczych, do ich wykrycia stosowane są nadal metody sortowania ręcznego (Leemans i in. 2002, Xing i Baerdemaeker 2007). Obicie definiuje się jako uszkodzenie tkanki owocu na skutek sił zewnętrznych, powodujących fizyczne zmiany tekstury oraz/lub chemiczne zmiany koloru, zapachu, i tekstury (Mohsenin 1986). Występują dwa podstawowe skutki obić jabłek, tzn. brązowienie oraz mięknięcie tkanki (Opara 2007, Zeebroeck i in. 2007). Istniejące obecnie systemy sortownicze nie potrafią skutecznie oddzielić owoców z obiciami powstałymi na krótki czas przed ich inspekcją. Jest to spowodowane faktem, że większość tych systemów wykorzystuje zakres światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (do 3 μm), a więc koncentrują się na wykrywaniu brązowienia, które w przypadku świeżo obitych owoców może nie występować lub występować w sposób niewyraźny (Pen i in. 1985, Samim i Banks 1993, Xing i in. 2006). Nawet wysoce rozbudowane wizyjne systemy sortowania, przeprowadzające pełnospektralną analizę koloru i korzystające z zaawansowanych procedur przetwarzania i analizy obrazów, z sieciami neuronowymi włącznie, nie są w stanie uporać się z tym problemem (Lu i in. 1999, Peng i Lu 2005, 2006).

Większość z opracowanych do tej pory metod detekcji obić jabłek wykazuje niedostatki w przypadku ciemnego koloru skórki owoców lub niewielkich powierzchni obić. Stwierdzono, co prawda, ogromne potencjalne możliwości, jakie dają metody rentgenograficzna i rezonansu magnetycznego do wykrywania obić jabłek (Chen i in. 1989, Zion i in. 1993, Thomas i in. 1995, Schatzki i in. 1997), jednak ze względu na koszt i trudności metodyczne metody te nie zostały poza

rozwiązaniami prototypowymi włączone do istniejących systemów sortowniczych. Również zastosowanie metody spektroskopii w bliskiej podczerwieni NIR (700-2200 nm), pomimo wielu zalet do detekcji obić, wykazała niską skuteczność identyfikacji obić w przypadku jabłek wielokolorowych, np. 'Jonagold' lub 'Braeburn' i świeżych obić (Upchurch i in. 1994, Wen i Tao 2000, Kleynen i in. 2003, Xing i in. 2005, Xing i Baerdemaeker 2007).

Ze względu na niedostatki istniejących obecnie metod wykrywania świeżych obić jabłek obserwuje się rosnące zainteresowanie alternatywnymi teledetekcyjnymi metodami sortowniczymi. Wstępne badania z wykorzystaniem termografii do wykrywania obić jabłek wydają się wskazywać, że metoda ta może wnieść zupełnie nowe możliwości, pod warunkiem gruntownego zbadania procesu przewodzenia ciepła w owocu i mechanizmu powstawania kontrastu termicznego między częścią obitą i nieobitą jabłka.

Według Varitha i in. (2003) temperatura powierzchni jabłka obitego wykazuje inną temperaturę niż części bez obicia, co autorzy wiążą z hipotezą, iż tkanki po obiciu zmieniają swoje właściwości cieplne (dyfuzyjność cieplna) na skutek utraty w nich wilgoci i powstawania korkowatej tkanki o mniejszej gęstości. Autorzy ci dokonali obserwacji temperatury jabłek po silnym obiciu (upuszczenie jabłka z wysokości 0,46 m) i przechowywaniu ich w temperaturze 26°C przy wilgotności 50%.

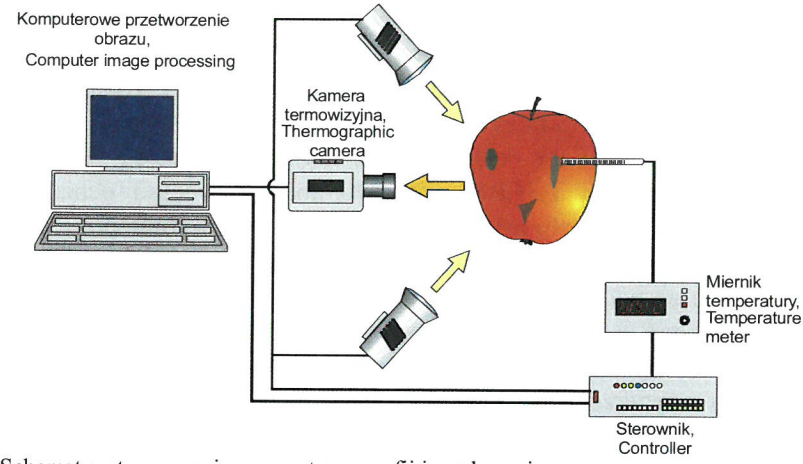
Baranowski i in. (2005) zastosowali termografię pasywną do detekcji obić w trzech odmianach jabłek: 'Jonagold', 'Ligol' i 'Gloster'. Przebiegi zmian temperatury powierzchni owocu z obiciem w czasie wykazały dla badanych trzech odmian występowanie różnic temperatury między częścią obitą i nieobitą w zakresie od 0,5°C do 1,5°C. Stwierdzono, że skuteczne wykrycie obić metodą termografii pasywnej może nastąpić po około 48 godz. od momentu uszkodzenia. Najwyższe różnice temperatury stwierdzono dla odmiany 'Jonagold', a najniższe dla odmiany 'Gloster', co wynikało z różnej jędrności tkanek tych odmian.

4.1.2. Materiał i metody

W badaniach wykorzystano następujące odmiany jabłek: 'Champion', 'Gloster' i 'Jonagold'. Materiał przywieziony z sadu bezpośrednio po zbiorze w roku 2006 przebywał przez 15 godz. w stałej temperaturze 21°C aż do momentu wykonania pomiarów termograficznych.

W badaniach zastosowano zaprojektowany i wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie system termografii aktywnej składający się z kamery VIGOcam v50, dwóch lamp halogenowych, każda o mocy 500 W, umieszczonych na specjalnym statywie, systemu sterującego z komputera czas impulsu i parametry rejestracji oraz specjalnie skonstruowanego do tego celu termometru PT-1000 o średnicy

3 mm i długości 12 cm połączonego poprzez miernik Keithley 2100 z komputerem (rys. 6). Termometr ten wykorzystano do badania wnikania impulsu cieplnego do wnętrza owocu.



Rys. 6. Schemat systemu pomiarowego termografii impulsowej
Fig. 6. Scheme of measuring system based on pulsed thermography

Obicia jabłek uzyskiwano dwoma sposobami, tzn. albo przez opuszczanie ich z wysokości 0,25 m na gładką, ceramiczną powierzchnię, albo przez przykładanie do fragmentu powierzchni jabłka plastikowego krążka o średnicy 1 cm, na który opuszczano z różnej wysokości odważnik o masie 0,02 kg. Pierwszy sposób wykorzystano w badaniach modelowych rozchodzenia się ciepła w owocu, natomiast drugi w badaniach identyfikacji obić o różnych głębokościach metodą termografii impulsowo-fazowej.

Wykorzystana w pomiarach kamera VIGOcam v50 pracuje w zakresie 8-13 μm. Kamera ta została wykonana w oparciu o detektor mikrobolometryczny o wymiarze 384 × 288 pikseli. Częstotliwość obrazu termicznego wynosi 60 Hz. Rozdzielczość termiczna NED w temperaturze 30°C wynosi 60 mK. Sekwencje obrazów termalnych oraz obrazy wideo wraz z notatkami głosowymi można zapisywać bezpośrednio w kamerze na karcie SD (1 Gb) lub w pamięci komputera. Kamera komunikuje się z komputerem poprzez port Ethernet. Wskaźnik laserowy kamery ułatwia lokalizację badanych obiektów. System wykorzystuje oprogramowanie THERM v50 do rejestracji i analizy danych z kamery. Oprogramowanie to oprócz licznych funkcji przetwarzania danych termograficznych pozwala eksportować pojedyncze obrazy i sekwencje w formacie tekstowym do innych programów (w tym przypadku ImageJ. i IR_View v1.7).

Pomiary temperatury radiacyjnej owoców prowadzono w ustalonych i kontrolowanych warunkach zewnętrznych. Laboratorium było termostatowane, a w trakcie rejestracji termograficznych kontrolowano temperaturę powietrza, wilgotność oraz ciśnienie atmosferyczne. Wszystkie serie pomiarowe przeprowadzono w temperaturze powietrza 21°C, przy wilgotności względnej 60%, w świetle dziennym.

W przeprowadzonych badaniach odległość między kamerą a badaną powierzchnią owocu wynosiła 0,5 m. Lampy halogenowe umieszczone były w odległości 0,3 m od powierzchni jabłka, a odległość między ich środkami wynosiła 0,38 m. Sekwencje termogramów wykonywano z częstotliwością 15 obrazów na sekundę i trwały one do kilku minut. Wstępną analizę termogramów wykonywano programem THERM v50. Do analizy procesu ochładzania się obiektu, z zarejestrowanych sekwencji termogramów wybierano jeden obraz wykonany bezpośrednio przed włączeniem lamp (cold image) oraz wszystkie obrazy uzyskane po wyłączeniu lamp, tworząc zbiory tekstowe z sekwencją tych obrazów. Oddzielnie utworzono zbiory zawierające obrazy z sekwencji w trakcie ogrzewania obiektu lampami. Następnie dokonano analizy zmian rozkładu temperatury na powierzchni owoców w czasie, wykorzystując oprogramowanie ImageJ oraz IR_View v 1.7. Analizy wymagające wykorzystania środowiska MATLAB wykonano we współpracy z dr Clemente Iberra-Castanedo z Uniwersytetu w Laval (Computer Vision and System Laboratory) w Kanadzie oraz podczas stypendium Szkockiego Towarzystwa Królewskiego w Scottish Crop Research Institute w Dundee, Szkocja.

W celu analizy zmian temperatury wewnątrz owoców z obiciem i bez obicia po zadaniu impulsu cieplnego, wykonano termometrem PT1000, dla kilkunastu owoców z trzech badanych odmian, pomiary temperatury na głębokościach 2 mm, 10 mm, 20 mm i 40 mm, od powierzchni skórki w kierunku radialnym. Rejestracji temperatury miernikiem Keithley 2100 dokonywano co 0,2 s, rozpoczynając pomiar na 10 s przed włączeniem impulsu o czasie trwania 3 s. Jednocześnie kamerą termowizyjną rejestrowano zmianę temperatury na powierzchni badanych owoców. Termometr wbijany był w miąższ jabłka po przeciwnej stronie niż analizowana kamerą powierzchnia. Aby maksymalnie zmniejszyć zaburzenie fali cieplnej dochodzącej od powierzchni do czujnika, zdecydowano się pomiar przeprowadzać oddzielnie dla każdej głębokości, zaczynając od środka jabłka (poziom 40 mm). Analizę danych wykonywano oprogramowaniem Excel 2000.

Przed każdym pomiarem termograficznym dla wyznaczenia gęstości owocu wykonywano pomiar jego masy wagą Metler oraz objętości poprzez pomiar objętości wypartej przezeń cieczy. Ponadto mierzono jędrność penetrometrem FT 327 firmy Facchini, przy użyciu końcówki o średnicy 11,3 mm. Na każdym

jabłku wykonano trzy pomiary (przy szypułce, w części środkowej owocu i przy kielichu). Zawartość ekstraktu oznaczano przy użyciu refraktometru Abbego firmy Zeiss w temperaturze 20°C. Każde jabłko poddane było 2 oznaczeniom – po jednym z przeciwległych stron. Zawartości ekstraktu podano w %. Po wykonaniu wszystkich pomiarów krojono jabłka, aby określić wielkości i głębokości obić.

4.1.3. Analiza przepływu ciepła w owocach z defektami wewnętrznymi

Równanie nieustalonego przewodzenia ciepła w ośrodku stałym można przedstawić jako równanie różniczkowe paraboliczne postaci:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = q_v + h_k (T_p - T), \tag{21}$$

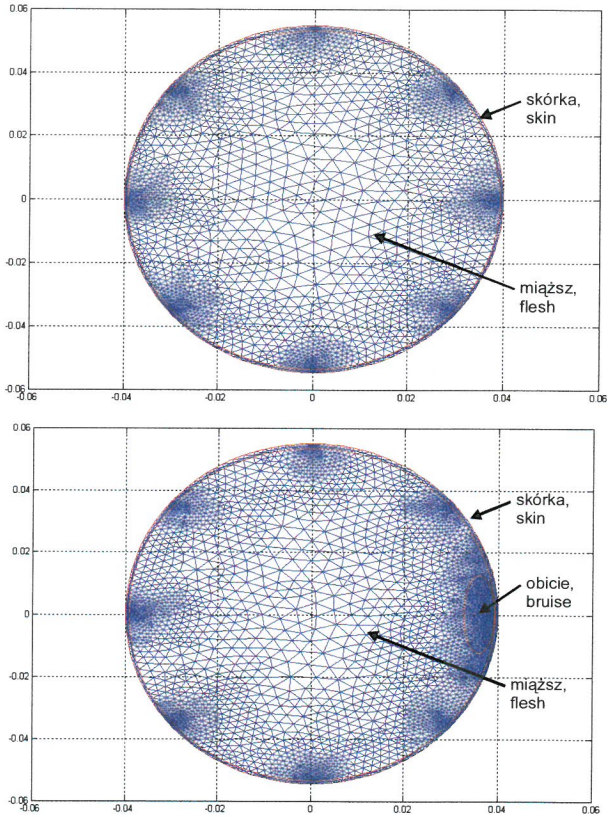
gdzie: ρ – gęstość ośrodka, c – ciepło właściwe, k – współczynnik przewodnictwa cieplnego, q_v – źródło wewnętrzne ciepła, h_k – współczynnik konwekcyjnego przenoszenia ciepła, T_p – temperatura płynu otaczającego ośrodek.

W celu modelowania przewodzenia ciepła w owocu z defektem wewnętrznym założono, że w chwili początkowej, temperatura całego wnętrza owocu wynosi $T = T_0$ dla $t = t_0$. Założono również, że wewnątrz owocu nie ma żadnego źródła wewnętrznego ciepła, tzn. $q_v = 0$.

Aby przeanalizować różne scenariusze przewodzenia ciepła wewnątrz jabłka z defektem w postaci obicia wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Posługując się narzędziem PDE Tool programu MATLAB stworzono modele jabłka w postaci elipsy o długości dłuższej półosi 5,2 cm i krótszej półosi 4 cm. Wprowadzając współśrodkowo drugą elipsę o półosiach krótszych o 0,5 cm, możliwe było wyselekcjonowanie obszaru miąższu i obszaru skórki (rys. 7). Model jabłka z obiciem zawierał bezpośrednio przy powierzchni skórki dodatkową elipsę o dłuższej półosi w kierunku pionowym reprezentującą obszar obicia.

Następnie w celu przeprowadzenia obliczeń metodą MES stworzono siatki trójkątne obu modeli bez obicia i z obiciem, liczące odpowiednio 3152 oraz 6616 węzłów oraz 6060 i 12 796 trójkątów. W badaniach modelowych rozchodzenia się ciepła w owocu przyjęto z literatury zakresy możliwych zmian gęstości, ciepła właściwego, współczynnika przewodnictwa cieplnego, i dyfuzyjności cieplnej miąższu i skórki (patrz tabela 1 oraz Mohsenin 1978 i 1986, Opara i in. 1997, Mavroudis i in. 2004). Zdecydowano się przeprowadzić modelowanie dwuetapowo. Pierwszy etap dotyczył trzysekundowego ogrzewania owocu. W etapie tym powierzchnię zewnętrzną skórki podzielono na dwie równe półelipsy: nieogrzewaną, w której obowiązywał warunek brzegowy Dirichleta z temperaturą

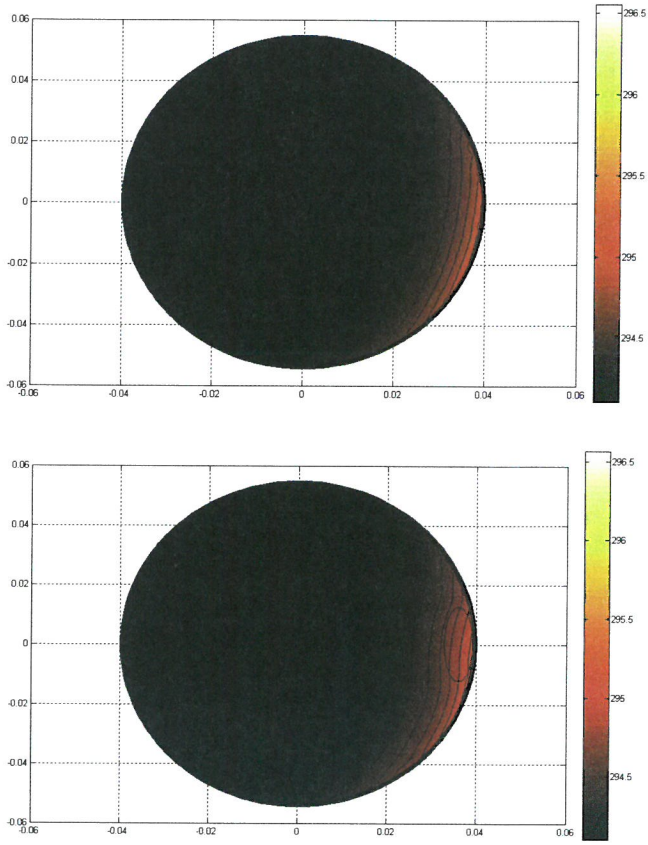
294,15 K oraz powierzchnią poddaną grzaniu, gdzie obowiązywał warunek brzegowy Neumanna z zadanym strumieniem energii 1000 $W \cdot m^{-2}$ (impuls z lamp) i współczynnikiem przenoszenia ciepła 0,5. W drugim etapie dla całej powierzchni zewnętrznej zadano warunek brzegowy Dirichleta z temperaturą 294,15 K, uwzględniając konwekcję wymuszoną z powierzchni skórki (przyjęto współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem równy 10 $W \cdot m^{-2} \cdot {}^{\circ}C^{-1}$). Obliczenia dla każdego węzła siatek wykonywano z krokiem czasowym 0,2 s.



Rys. 7. Siatki modeli jabłka bez obicia i z obiciem
Fig. 7. Mesh of an apple without bruise and with bruise

W symulacjach przyjęto (Varith 2001), że część obita jabłka przyjmuje wartości współczynnika przewodnictwa o 20% wyższe, gęstości o 5% wyższe, a ciepło właściwe ma tą samą wartość, co w części nieobitej. W tym przypadku współczynnik dyfuzyjności jest o około 14,3% wyższy w części obitej niż w nieobitej. Przyjęto gęstość skórki o 21% wyższą niż gęstość miąższu (Opara i in. 1997,

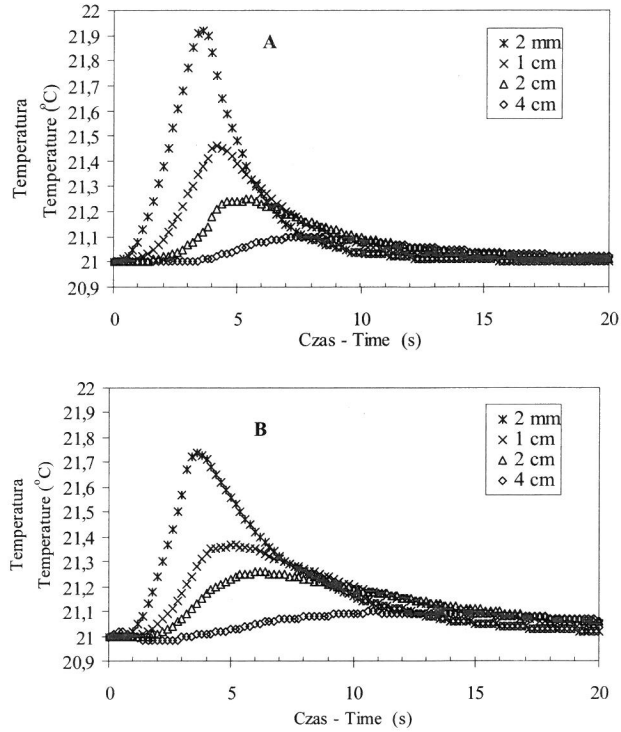
Mavroudis i in. 2004) i pojemność cieplną skórki o 15% wyższą niż miąższu (Mohsenin 1980). Na rysunku 8 przedstawiono rozkład temperatury wewnątrz jabłka o gęstości 890 kg·m^{-3} po trzech sekundach ogrzewania. Z rysunku tego wynika, że wyższa wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego i wyższa dyfuzyjność cieplna części obitej pozwala głębiej wnikać ciepłu do środka owocu, ogrzewając przypowierzchniową warstwę jabłka z defektem szybciej niż w przypadku owocu z tkanką nienaruszoną.



Rys. 8. Rozkład temperatury wewnątrz owocu bez obicia (góra) i z obiciem (dół) po 3 s ogrzewania
Fig. 8. Temperature distribution inside an apple with sound tissue (up) and bruised (down) after 3 s heating

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki zmian temperatury na różnych głębokościach pod powierzchnią jabłka z nienaruszoną tkanką oraz owocu z występującym w nim obiciem, ogrzanego impulsem cieplnym o mocy 1000 W w ciągu

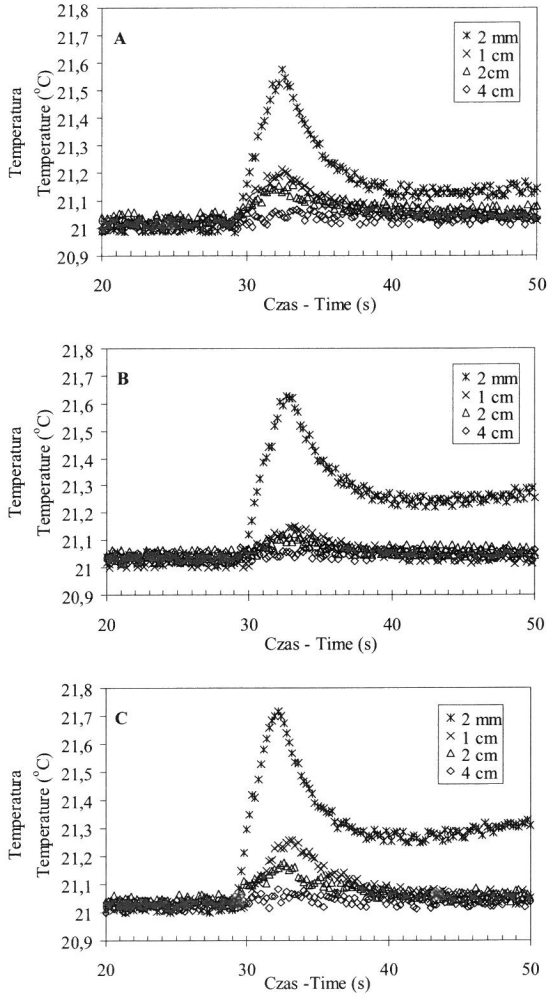
3 s, otrzymane z modelu. Z rysunku tego wynika, że ciepło wnika do wnętrza owocu z obiciem szybciej oraz występuje gwałtowniejszy spadek tej temperatury po wyłączeniu impulsu.



Rys. 9. Przebiegi zmian temperatury wewnątrz owocu na skutek ogrzewania impulsem cieplnym na różnych głębokościach uzyskane z modelu dla jabłka z obiciem (A) oraz bez obicia (B)
Fig. 9. Courses of temperature change in fruit at various depths as result of pulse heating obtained from the model for apple with bruise (A) and sound tissue (B)

Ważną informacją wynikającą z tego rysunku, ułatwiającą przeprowadzenie doświadczenia z termografią aktywną jest to, że maksymalny wzrost temperatury występujący na głębokości 2 mm pod powierzchnią skórki nie przekracza 1°C, natomiast dla głębokości 1 cm pod powierzchnią skórki wynosi niecałe 0,5°C. Świadczy to o tym, że takie warunki eksperymentu nie powinny wpływać niekorzystnie na jakość owocu. Rysunek 9 B pokazuje, że temperatura w jabłku nieobitym wzrasta wolniej na poszczególnych głębokościach i jej maksymalne wartości są niższe niż w jabłku z obiciem. Dla głębokości 2 mm pod powierzchnią

skórki maksymalny wzrost temperatury w jabłku obitym jest o około 0,2°C wyższy niż w nieobitym.



Rys. 10. Zmierzone zmiany temperatury na różnych głębokościach w owocach bez obić trzech odmian: A – 'Jonagold', B – 'Gloster' i C – 'Champion' jako wynik pobudzenia cieplnego
Fig. 10. Measured changes of temperature at various depths inside fruits without bruise of three varieties: A – 'Jonagold', B – 'Gloster' i C – 'Champion' as a result of pulse heating

Ze względu na szybszy spadek temperatury w miejscu z obiciem po wyłączeniu impulsu cieplnego może nastąpić sytuacja, w której temperatura powierzchni

nad częścią obitą będzie niższa niż nad częścią bez obicia. Dlatego oczekiwać można na obrazie termograficznym kontrastu termalnego z niższą temperaturą części nad powierzchnią obitą. Istotną informacją z rysunku 9 jest również tempo rozchodzenia się ciepła w owocu. W ciągu około dziesięciu sekund od zadania impulsu cieplnego temperatura wewnątrz owocu wraca do wartości sprzed ogrzania.

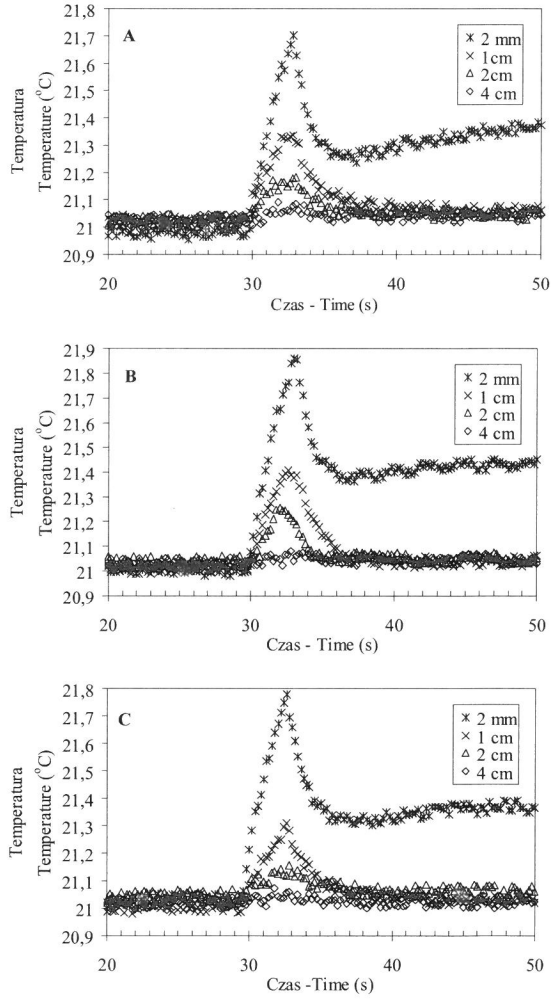
Wyniki uzyskane z modelu zdecydowano się porównać z danymi doświadczalnymi. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki pomiaru temperatury na różnych głębokościach w jabłkach z niezmienioną obiciem tkanką trzech odmian: 'Jonagold', 'Gloster' i 'Champion' przed, w trakcie i po zadaniu impulsu cieplnego lampami o łącznej mocy 1000 W w czasie 3 s. Temperatura otoczenia i temperatura jabłka przed ogrzaniem wynosiła w tym eksperymencie 21°C.

Otrzymane dane pomiarowe potwierdzają, że ciepło w jabłku z obiciem rozchodzi się szybciej niż w jabłku z nienaruszoną tkanką. W przypadku owoców bez obicia maksymalny wzrost temperatury w trakcie 3-sekundowego ogrzewania lampami o mocy 1000 W zarejestrowano dla odmiany 'Champion' i wynosił on 0,7°C na głębokości 2 mm. Dla pozostałych dwóch odmian wynosił on zaledwie o 0,1°C mniej. Na głębokościach od 1 cm do 4 cm wzrost temperatury nie przekroczył dla owoców bez obicia 0,25°C. Większy wzrost temperatury wewnątrz miąższu w czasie ogrzewania zarejestrowano u owoców z obiciem. Największy wzrost stwierdzono u odmiany 'Gloster' i wynosił on około 0,9°C, a najmniejszy u odmiany 'Jonagold' – 0,7°C.

Na podstawie przeprowadzonych badań nad jabłkami tych trzech odmian nie znaleziono statystycznie istotnych korelacji między tempem wzrostu temperatury a gęstością i zawartością ekstraktu. Wynikało to prawdopodobnie z faktu, że gęstość wszystkich przebadanych owoców mieściła się w wąskim zakresie od 820 do 870 $kg \cdot m^{-3}$, przy czym najmniejszą średnią gęstość 835 $kg \cdot m^{-3}$ zanotowano u dmiany 'Gloster'. Największą średnią jędrność miąższu zanotowano u jabłek odmiany 'Jonagold' – 62 N, a dla pozostałych odmian wynosiła ona 57 N – 'Gloster' oraz 59 N – 'Champion'. Również zawartość ekstraktu w owocach nie zmieniała się w zależności od odmiany istotnie, a jej średnie wartości dla poszczególnych odmian wynosiły: 'Jonagold' – 13,2%, 'Gloster' – 14,1% oraz 'Champion' – 13,8%.

Oprócz większego wzrostu temperatury w czasie ogrzewania, w jabłkach z obiciem u wszystkich badanych odmian stwierdzono większy spadek temperatury po ustaniu impulsu cieplnego (rys. 11). Największą intensywność tego spadku zarejestrowano dla jabłek odmiany 'Gloster'. Taka reakcja owoców na wyłączenie impulsu potwierdza większe wartości współczynnika przewodnictwa oraz mniejszą pojemność cieplną tkanki obitej. Ciepło dostając się do wnętrza

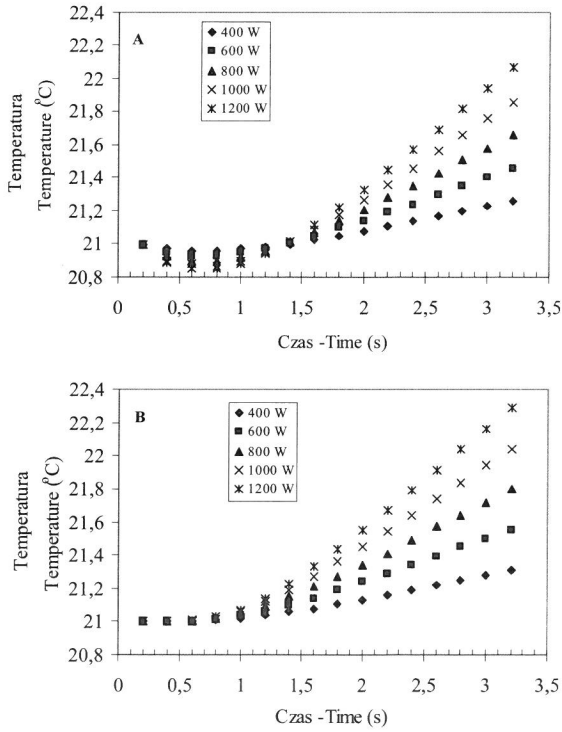
owocu z obiciem szybciej się przemieszcza w głąb, a jednocześnie szybciej go ogrzewa w trakcie impulsu.



Rys. 11. Zmierzone zmiany temperatury na różnych głębokościach w owocach z obiciami dla trzech odmian: A – 'Jonagold', B – 'Gloster' i C – 'Champion' jako wynik pobudzenia cieplnego
Fig. 11. Measured changes of temperature at various depths inside fruits with bruises for three varieties: A – 'Jonagold', B – 'Gloster' i C – 'Champion' as a result of pulse heating

Jest to również przyczyną szybszego spadku temperatury po ustaniu impulsu. Dlatego też po bardzo krótkim czasie krzywe ochładzania owoców z obiciem i bez obicia powinny się przecinać i powierzchnia owocu nad obiciem powinna wykazywać temperaturę nieco niższą niż część nieobita.

Zaskakujący efekt uzyskano podczas pomiaru temperatury wewnątrz owocu w późnej fazie ochładzania, zarówno dla jabłek z obiciem jak i bez niego. Jak widać na rysunkach 10 oraz 11 po spadku temperatury do pewnej wartości następuje zahamowanie, a nawet wzrost temperatury w warstwie 2 mm pod skórką owocu. Wyrównanie temperatury z otoczeniem zachodzi w tej warstwie dopiero po kilku minutach. Dla innych badanych głębokości efekt ten nie występował.



Rys. 12. Tempo ogrzewania jabłka przy różnej mocy impulsu cieplnego: A – jabłko bez defektu, B – jabłko z obiciem.

Fig. 12. Heating rate of apple under various powers of heating pulse: A – apple without defect, B – apple with bruise

Użycie prostego modelu przewodnictwa cieplnego w owocu nie umożliwiło wytłumaczenia tego zjawiska. Wytłumaczeniem może być zaobserwowany niewielki wzrost temperatury powietrza otaczającego owoc bezpośrednio po zadaniu impulsu, a więc efekt emisji cieplnej otoczenia. Jednak bardziej prawdopodobnym wydaje się być specyficzny sposób transportu energii w przypowierzchniowej warstwie jabłka, które jest obiektem silnie porowatym z występującymi skomplikowanymi interakcjami między fazą stałą, ciekłą i gazową. Na skutek impulsu cieplnego może tam zachodzić wtórny przepływ energii zakumulowanej w wyniku impulsu we wnętrzu owocu do jego powierzchni. Wyjaśnienie tego zjawiska wymaga zastosowania bardziej zaawansowanego opisu matematycznego transportu ciepła w owocu, co będzie przedmiotem dalszych badań.

Dla określenia parametrów pobudzania istotnym było przeanalizowanie różnych scenariuszy wzrostu temperatury w jabłku z obiciem i bez obicia przy różnej mocy pobudzenia cieplnego. Na rysunku 12 A przedstawiono krzywe ogrzewania na głębokości 2 mm lampami o mocy od 400 do 1200 W dla modelowego jabłka bez defektu, natomiast na rysunku 12 B z obiciem. Analiza tych krzywych oraz dane z pomiarów termometrem wykazały, że trzysekundowy impuls cieplny o mocy 1000 W jest optymalny, ponieważ nie powoduje zbyt gwałtownego ogrzania wnętrza owocu (maksymalnie 1°C) i jednocześnie umożliwia zarejestrowanie kontrastów termalnych między częścią tkanki obitą i nieobitą. Alternatywną metodą skracającą czas testu może być zastosowanie większej mocy ogrzewania, ale przez krótszy czas.

4.1.4. Analiza wyników zastosowania termografii impulsowo – fazowej (PPT) do wykrywania wczesnej fazy obicia jabłek

Dla trzech badanych odmian jabłek dokonano analizy rozkładu temperatury radiacyjnej po zadaniu impulsu cieplnego. W badaniach tych wykorzystano metodę termografii impulsowo-fazowej PPT. Ilość obrazów w sekwencji dobrano w ten sposób, aby wartość temperatury powierzchni owocu w trakcie stygnięcia osiągnęła wartość zbliżoną do temperatury otoczenia. Każda zarejestrowana sekwencja zawierała około 500 obrazów rejestrowanych z krokiem czasowym 0,07 s. Wykorzystując oprogramowanie IR_View przeanalizowano zarejestrowane sekwencje.

Kolejne rysunki od 13 do 16 przedstawiają wyniki tej analizy. Na rysunkach tych termogramy A są to obrazy owoców przed zadaniem impulsu cieplnego (obraz zimny). Obicia owoców na tych termogramach są niewidoczne, co jest dowodem, że termografia pasywna nie może być stosowana do detekcji obić we wczesnej fazie. Termogramy B na tych samych rysunkach dotyczą pierwszego zarejestrowanego obrazu po wyłączeniu impulsu cieplnego. Aby wyeliminować zakłócenia sygnału termalnego związane z szumem aparaturowym utworzono

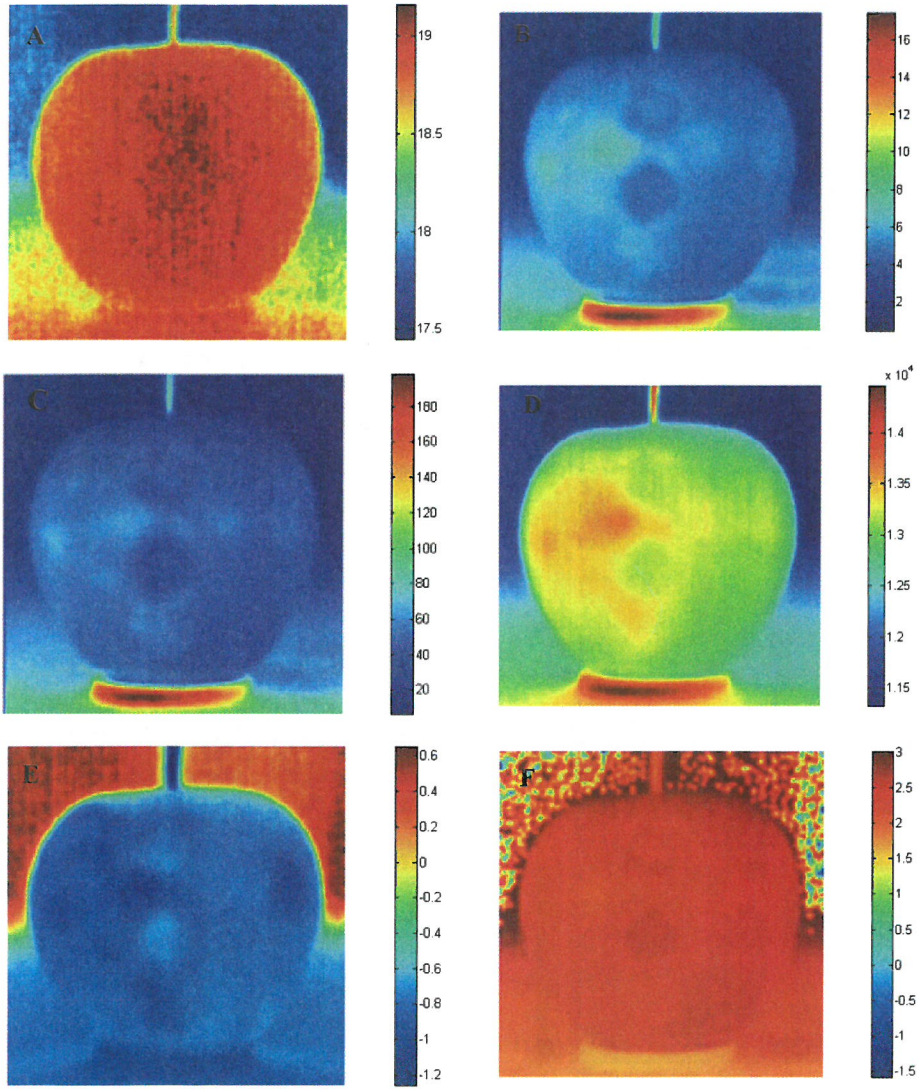
obrazy różnicowe pomiędzy pierwszym zarejestrowanym obrazem po wyłączeniu pobudzenia cieplnego a obrazem zimnym. Termogramy B pozwalają stwierdzić, jak duży wzrost temperatury poszczególnych fragmentów powierzchni owocu nastąpił w trakcie pojawienia się impulsu cieplnego.

Rysunki 13 oraz 14 przedstawiają termogramy powierzchni jabłek odmiany 'Champion' z dwoma defektami: dolny głębszy – 4 mm i górny płytszy – 2 mm, z czasem pobudzenia impulsem o mocy 1000 W, trwającym 3 s dla jabłek na rysunku 13 oraz 1 s dla jabłek na rysunku 14. Obicia na tych termogramach rejestrowane były 2 godz. po obiciu.

Zarówno dla rysunku 13 B jak i 14 B kontrast termalny części obitej jest widoczny, jednak jednosekundowe pobudzenie cieplne powoduje ślad termalny na części z płytszym obiciem trudny do precyzyjnego odróżnienia od tła. Może to mieć niekorzystne konsekwencje przy próbie automatycznej segmentacji tego obrazu w celu wyodrębnienia zarysów obić. Z tego powodu wykorzystanie trzysekundowego impulsu cieplnego jest korzystniejsze. Spośród trzech badanych odmian jabłek największy kontrast termalny między częścią obitą i nie obitą uzyskano dla odmiany 'Gloster' (rys. 15 C).

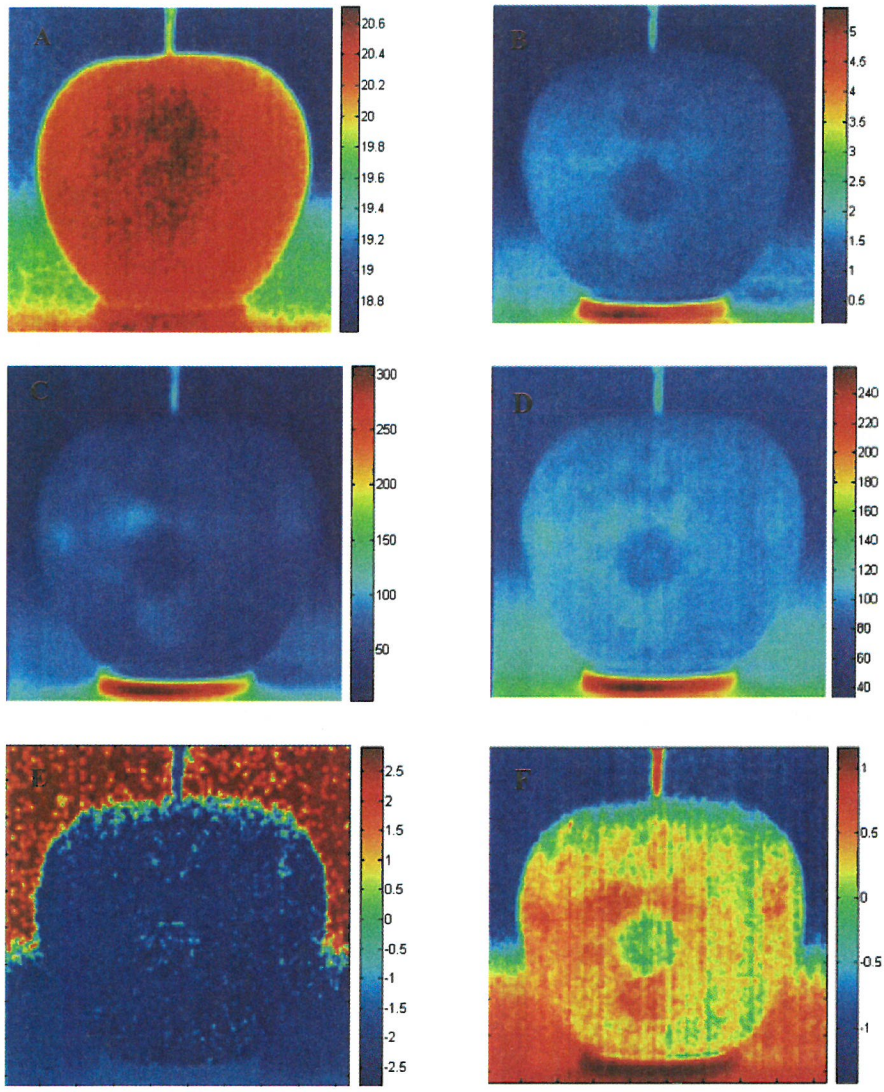
Zobrazowania na rysunkach od 13 do 16 C i D prezentują amplitudogramy, natomiast na częściach E i F fazogramy dla sekwencji obrazów poszczególnych jabłek. Uzyskano je stosując dyskretną transformację Fouriera opisaną równaniem 18. Przedstawione fazogramy i amplitudogramy dotyczą wybranych częstotliwości sygnałów składowych, dla których zaobserwowano najbardziej charakterystyczne odwzorowanie kontrastów na mierzonych powierzchniach. Jak widać analiza amplitudowa i fazowa sekwencji obrazów pozwala wydobyć z termogramów dodatkową informację o rozkładzie defektów. Analiza amplitudowa pozwala w niektórych przypadkach uzyskać lepszy kontrast pomiędzy tkanką obitą i nieobitą (por. obrazy 13 B i 13 C, 14 B 14 C). Szczególnie przydatną do analizy defektów znajdujących się na różnej głębokości jest analiza fazowa sekwencji termogramów. Pozwala ona nie tylko wyeliminować zakłócenia rozkładu temperatury wynikające z niejednorodnego oświetlenia (ogrzania) badanej powierzchni (porównaj rysunki 13 B, 13 E i F oraz rysunki 15 B, 15 E i F), ale również zidentyfikować dla różnych częstotliwości składowych sygnału odpowiedzi cieplnej defekty występujące na różnych głębokościach.

Defekty płytsze uwidaczniają się na fazogramach uzyskanych dla wyższych częstotliwości, natomiast głębsze defekty na fazogramach niższych częstotliwości. Ilustrują to rysunki 15 E i F. Pierwszy z nich uzyskany był dla częstotliwości 0,01 Hz, natomiast drugi 0,37 Hz. Na fazogramie 15 E widoczne są głównie powierzchnie nad głębszymi defektami, natomiast na fazogramie 15 F wyraźniejszy kontrast pochodzi od płytszych defektów brązowiejącej tkanki tuż pod powierzchnią jabłka, co stwierdzono po przekrojeniu jabłka po zakończeniu pomiaru.



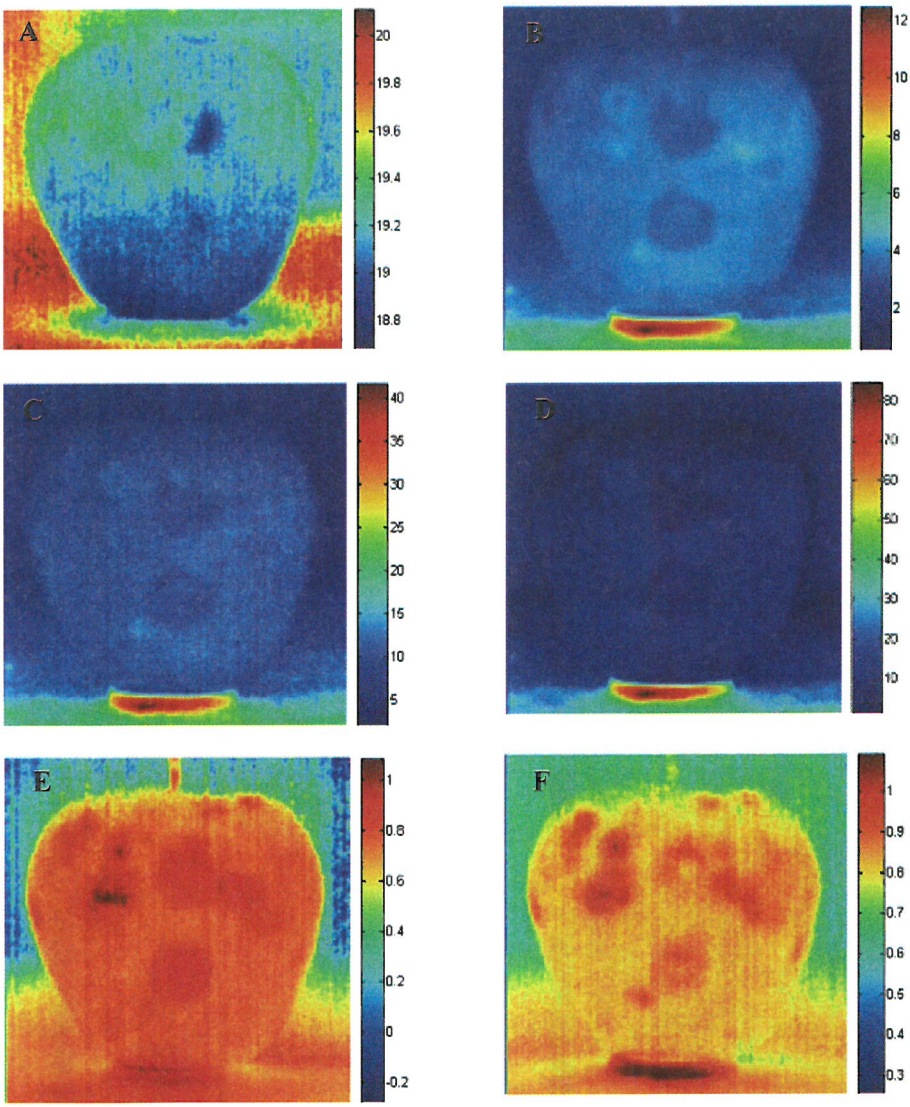
Rys. 13. Termogramy jabłka odmiany 'Champion' z dwiema powierzchniami obitymi uzyskanymi metodą PPT. Kolejne obrazy przedstawiają: A – obraz zimny, B – obraz różnicowy (temperatura pierwszego obrazu po ogrzaniu – temperatura obrazu zimnego), C oraz D – dwa amplitudogramy, E oraz F – dwa fazogramy. Czas impulsu 3 s

Fig. 13. Thermograms of 'Champion' apple with two bruised areas obtained by PPT method. Subsequent images represent: A – cold image, B – differential image (cold minus first after pulse), C and D – ampligrams, E and F – phasegrams. Time of pulse 3 s



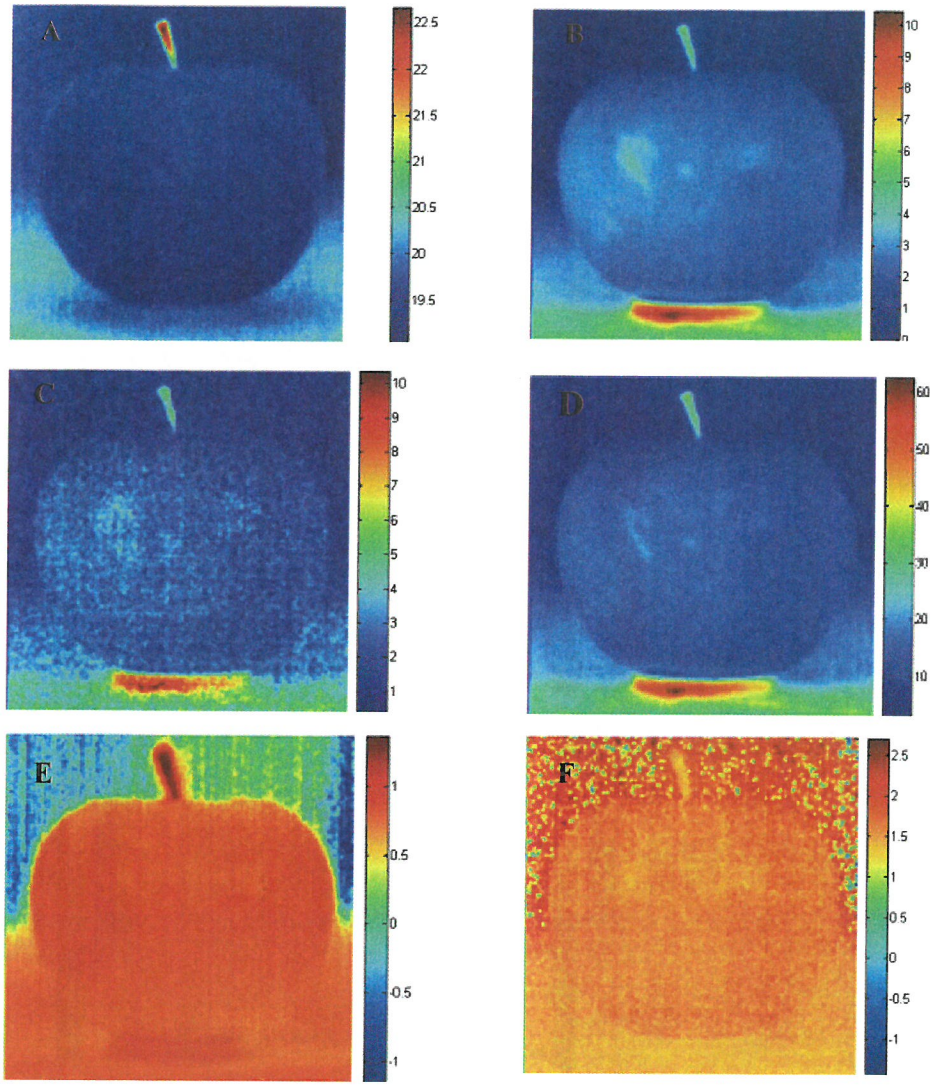
Rys. 14. Termogramy jabłka odmiany 'Champion' z dwiema powierzchniami obitymi uzyskanymi metodą PPT. Kolejne obrazy przedstawiają: A – obraz zimny, B – obraz różnicowy (temperatura pierwszego obrazu po ogrzaniu – temperatura obrazu zimnego), C oraz D – dwa amplitudogramy, E oraz F – dwa fazogramy. Czas impulsu 1 s

Fig. 14. Thermograms of 'Champion' apple with two bruised areas obtained by PPT method. Subsequent images represent: A – cold image, B – differential image (cold minus first after pulse), C and D – ampligrams, E and F – phasegrams. Time of pulse 1 s



Rys. 15. Termogramy jabłka odmiany 'Gloster' z dwiema powierzchniami obitymi uzyskanymi metodą PPT. Kolejne obrazy przedstawiają: A – obraz zimny, B – obraz różnicowy (temperatura pierwszego obrazu po ogrzaniu – temperatura obrazu zimnego), C oraz D – dwa amplitudogramy, E oraz F – dwa fazogramy. Czas impulsu 3 s

Fig. 15. Thermograms of 'Gloster' apple with two bruised areas obtained by PPT method. Subsequent images represent: A – cold image, B – differential image (cold minus first after pulse), C and D– ampligrams, E and F – phasegrams. Time of pulse 3 s



Rys. 16. Termogramy jabłka odmiany 'Jonagold' bez obicia uzyskanymi metodą PPT. Kolejne obrazy przedstawiają: A – obraz zimny, B – obraz różnicowy (temperatura pierwszego obrazu po ogrzaniu – temperatura obrazu zimnego), C oraz D – dwa amplitudogramy, E oraz F – dwa fazogramy. Czas impulsu 3 s

Fig. 16. Thermograms of 'Gloster' apple without bruise obtained by PPT method. Subsequent images represent: A – cold image, B – differential image (cold minus first after pulse), C and D – ampligrams, E and F – phasegrams. Time of pulse 3 s

Przykładem eliminacji zakłóceń na termogramach spowodowanych refleksami na gładkiej skórce jabłka przez zastosowanie metody impulsowo-fazowej są zobrazowania na rysunku 16. Przedstawiają one jabłko odmiany 'Jonagold' bez obicia. Na termogramie A wykonanym przed ogrzaniem jabłka ponownie nie widać kontrastów cieplnych. Jednak bezpośrednio po wyłączeniu źródła ciepła, na termogramie widać refleks pochodzący z otoczenia. Efekt ten eliminuje zastosowanie analizy częstotliwościowej, co widać szczególnie na rysunku 16 E i F.

Nowoczesną metodą analizy sekwencji termogramów uzyskanych metodą aktywną jest metoda termograficznej rekonstrukcji sygnału (thermographic signal reconstruction). Opiera się ona na założeniu, że w przypadku materiału bez defektów wewnętrznych profil spadku temperatury po ustaniu impulsu cieplnego powinien odpowiadać krzywej jednowymiarowego rozwiązania równania Fouriera wyrażonego równaniem (Castanedo 2005):

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}, \tag{22}$$

gdzie: ΔT jest różnicą temperatury wybranego piksela termogramu i jego temperatury przed włączeniem impulsu cieplnego, Q – energia impulsu cieplnego (J), e – efuzyjność cieplna ośrodka.

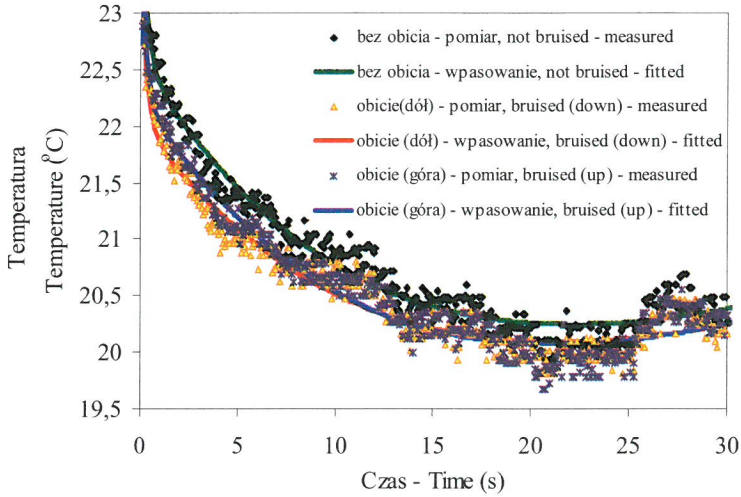
Po zlogarytmowaniu obu stron tego równania otrzymujemy następującą jego postać:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t), \tag{23}$$

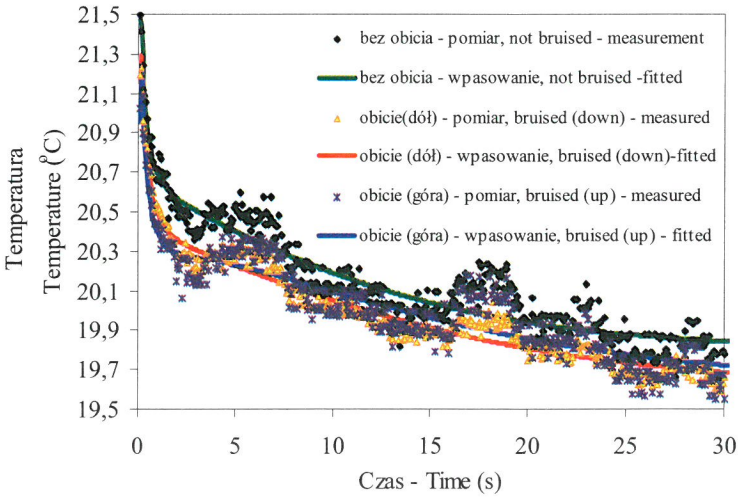
Równanie (23) w skali logarytmicznej jest równaniem liniowym o nachyleniu –0,5. Piksele obrazu nad defektami powinny posiadać przebieg w trakcie stygnięcia odmienny od wyrażonego równaniem 23. Zaproponowano wykorzystanie wielomianu n-tego stopnia (Castanedo 2005) do interpolacji danych pomiarowych zmian temperatury w czasie:

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln^2(t) + \ldots + a_n \ln^n(t). \tag{24}$$

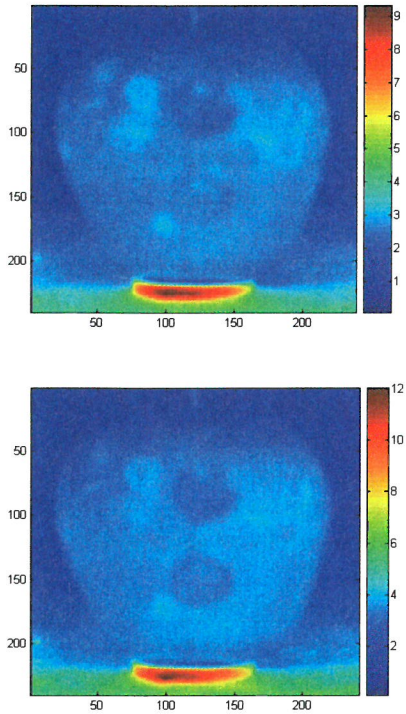
Na rysunkach 17 i 18 przedstawiono przebiegi temperatury zmierzonej urządzeniem termograficznym dla pikseli obrazu z defektem w postaci obicia i bez defektu oraz wpasowane krzywe wielomianowe 5-tego stopnia wpasowane do danych pomiarowych. Krzywe dla pikseli z defektem charakteryzują się większym spadkiem temperatury w pierwszej fazie stygnięcia. Można również stwierdzić niewielkie różnice przebiegu temperatury pomiędzy pikselami obrazu nad obszarami o różnej głębokości występowania defektu.



Rys. 17. Przebieg zmian temperatury radiacyjnej na powierzchni części nie obitej oraz nad dwoma obiciami (obicie górne do głębokości 2 mm, a obicie dolne 4 mm) jabłka odmiany 'Champion'
Fig. 17. Courses of radiation temperature change on the surface of sound and bruised two parts of 'Champion' apple (upper bruise reaches 2 mm under skin and lower bruise up to 4 mm)

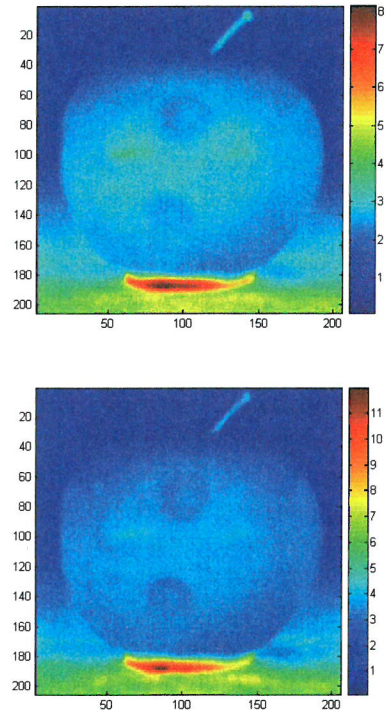


Rys. 18. Przebieg zmian temperatury radiacyjnej na powierzchni części nie obitej oraz nad dwoma obiciami (obicie górne do głębokości 2 mm, a obicie dolne 4 mm) jabłka odmiany 'Gloster'
Fig. 18. Courses of radiation temperature change on the surface of sound and bruised two parts of 'Gloster' apple (upper bruise reaches 2 mm under skin and lower bruise up to 4 mm)



Rys. 19. Termogram uzyskany po wyłączeniu impulsu cieplnego (góra) raz po rekonstrukcji sygnału termograficznego (dół) jabłka odmiany 'Gloster'

Fig. 19. Thermogram obtained after the end of heat pulse (upper) and after thermographic signal reconstruction (lower) of 'Gloster' apple



Rys. 20. Termogram uzyskany po wyłączeniu impulsu cieplnego (góra) raz po rekonstrukcji sygnału termograficznego (dół) jabłka odmiany 'Champion'

Fig. 20. Thermogram obtained after the end of heat pulse (upper) and after thermographic signal reconstruction (lower) of 'Champion' apple

Analizę taką można przeprowadzić dla wszystkich pikseli sekwencji obrazów termograficznych w czasie stygnięcia obiektu, co pozwala uzyskać tak zwany obraz syntetyczny przedstawiony dla jabłek odmian 'Champion' i 'Gloster' na rysunkach 19 i 20.

4.2. Wykrywanie szklistości w jabłkach

4.2.1. Wprowadzenie

Szklistość jest fizjologicznym zaburzeniem, w trakcie którego międzykomórkowe przestrzenie powietrzne wokół linii jądra owocu wypełniają się cieczą i tworzy się charakterystyczna przeźroczysta tkanka. Zaburzenie to jest roz-

powszechnione w odmianach takich, jak: 'Delicious', 'Gloster', 'Paulared', 'Freedom', 'Elisa', 'Champion', a jego charakterystyczna cecha to rozwój w okresie dojrzewania owocu na drzewie. Czasami zaburzenie może zanikać podczas przechowywania (Hung i in. 1994).

Główną przyczyną rozwoju szklistości w jabłkach jest zbyt wysoka lub zbyt niska temperatura w okresie poprzedzającym zbiór, niedobór zaopatrzenia owocu w wapń, stopień dojrzałości w czasie zbioru i urodzajność drzewa (Ferguson i in. 1999, Yamada i Kobayashi 1999, Ching-Cheng i Paull 2001, Yamada i in. 2004).

Niektórzy badacze zasugerowali, że przyczyną szklistości mogą być zmiany spójności membran komórkowych w czasie dojrzewania przed i po zbiorze (Wang i Faust 1992, Bowen i Watkins 1997, Kumpoun i in. 2003). Stwierdzono, że tkanka jabłka ze szklistością posiada większą koncentrację sorbitu i sacharozy oraz niższą koncentrację glukozy niż tkanka owocu bez szklistości (Yamada i Kobayashi 1999). Owoce ze szklistością są podatne na rozwój brązowej szklistości lub na brązowienie miąższu (Argenta i in. 2002). We wcześniejszych badaniach nad wykrywaniem szklistości koncentrowano się nad znalezieniem nieniszczących metod, które nie zaburzałyby istniejących procedur przechowywania, sortowania i pakowania owoców.

Metoda analizy gęstości optycznej wykorzystuje różnice w przepuszczalności światła przez owoc jabłka jako wskaźnika występowania szklistości. Metoda opracowana przez Throopa i in. (1994), którzy wykorzystali szeroki zakres spektrum poprzez światło widzialne i bliską podczerwień do 1,1 μm, dała w warunkach laboratoryjnych bardzo wysoką 99% precyzję selekcji owoców ze szklistością. Metoda analizy gęstości optycznej okazała się również użyteczna w detekcji wewnętrznego brązowienia jabłek, dając 91% wskaźnik dokładności selekcji. Pomimo zalet metoda posiada ograniczenie związane z sztywnymi wymaganiami dotyczącymi orientacji kielicha owocu w czasie testu, co sprawia, że trudnym staje się przeniesienie techniki do warunków linii pakowania owoców.

Kolejną techniką zastosowaną do wykrywania szklistości jest rentgenografia. Badania Schatzkiego i in. (1997) wykazały ponad 50% dokładność detekcji szklistości w jabłkach. Jednakże, w niektórych odmianach szklistość nie była obserwowana na rentgenogramach pomimo silnych wewnętrznych zmian w tkankach spowodowanych tym zaburzeniem. Wynikało to z braku znaczących przy tego typu zobrazowaniach różnic gęstości pomiędzy obszarami owocu o rozwiniętych objawach szklistości i bez nich. Ponadto rozpoznawanie szklistości metodą rentgenograficzną w dużej mierze zależy od indywidualnych umiejętności i doświadczenia operatora urządzenia, a w przypadku owocu poruszającego się podczas wykonywania zobrazowania dokładność metody zmniejsza się. Kim i Schatzki (2000) opracowali algorytmy sortowania jabłek ze szklistością z wykorzystaniem

systemu rentgenograficznego, poprawiając stosowalność metody w warunkach linii sortowania owoców. Nierozwiązany jednak pozostał problem opłacalności tej metody.

Stosowalność metody zobrazowań rezonansu magnetycznego i spektroskopii rezonansu magnetycznego do badania jakości owoców była oceniana przez Clarka i in. (1998) oraz Wanga i in. (1988). Wykazali oni, że metody te mogą być wykorzystane do określenia intensywności, z jaką owoce są dotknięte szklistością i do opisu wewnętrznego rozkładu tkanek z tym zaburzeniem. Zmiany intensywności szklistości jabłek były monitorowane podczas okresu ich przechowywania. Metoda rezonansu magnetycznego jest bardzo obiecującą metodą badania szklistości jednak wymaga prowadzenia dalszych badań przed możliwym komercyjnym jej zastosowaniem.

Metoda gęstości masy zastosowana do sortowania owoców opiera się na fakcie, że w jabłkach ze szklistością następują zmiany ich gęstości w zależności od intensywności tego zaburzenia. Podczas wprowadzania owoców do cieczy o niskiej gęstości, cięższe owoce opadają na dno zbiornika, natomiast lżejsze unoszą się na powierzchni. Metoda ta była testowana dla różnych odmian jabłek i okazała się być bardzo efektywna (90-100% dokładności). Cavalieri (1997), który testował tę metodę do oddzielania owoców z niewielką intensywnością szklistości lub bez niej od owoców silnie dotkniętych tym zaburzeniem, stwierdził, że w przyszłości będzie wskazane połączenie metody gęstości masy z urządzeniami zobrazowania cyfrowego powierzchni owoców w celu automatycznego wyznaczania gęstości owoców i stopnia występowania w nich szklistości.

W niniejszej pracy założono, że lokalne zmiany właściwości cieplnych spowodowane przez międzykomórkowy wyciek wody, prowadzący do efektu szklistości, może być wykryty poprzez pomiar rozkładu temperatury radiacyjnej na powierzchni owocu w procesie jego ogrzewania. Woda zgromadzona w przestrzeniach międzykomórkowych tkanki ze szklistością jest odpowiedzialna nie tylko za wzrost gęstości masy owocu, ale również za wzrost jego pojemności cieplnej i spadek przewodnictwa cieplnego (Dincer 1997, Fikiin i in. 1999, Lurie, 1998, Roos, 2003). Dlatego można się spodziewać, że owoce ze szklistością będą ogrzewały się wolniej niż owoce z nienaruszoną tkanką.

4.2.2. Materiał i metody

Obiekt badań stanowiło 80 jabłek odmiany 'Gloster', spośród których 35 posiadało szklistość, a 35 nie było dotkniętych tym zaburzeniem. Po zakończeniu eksperymentu wyniki dotyczące 10 z badanych jabłek odrzucono z dalszej analizy, ponieważ oprócz symptomów szklistości zawierały inne zaburzenia albo zasięg

występowania szklistości wewnątrz owoców był znacznie mniejszy niż w pozostałych owocach. Występowanie szklistości w badanych owocach stwierdzono poprzez ich rozcięcie wzdłuż osi pionowej po zakończeniu innych analiz.

Jabłka zostały przetransportowane do laboratorium bezpośrednio po zbiorze i przechowywane w temperaturze 1,5°C przez 4 dni przed rozpoczęciem doświadczenia. Obrazy termalne powierzchni jabłek wykonano systemem termograficznym AGEMA 880 LWB, czułym na zakres spektralny 8-13 μm. Detektorem w jednostce skanera tego urządzenia jest tellurek rtęciowo-kadmowy (MCT) chłodzony ciekłym azotem. Czułość systemu (NEDT) wynosi 0,007°C przy temperaturze badanego obiektu 30°C. Pracuje on z częstotliwością pola 25 Hz, częstotliwością liniową 2500 Hz, a każda ramka obrazu składa się z 280 linii. W badaniach wykorzystano obiektyw 7°. Dodatkowo kamera CCD rejestrowała obrazy w świetle widzialnym badanych obiektów. Interfejs systemu i oprogramowanie umożliwiły rejestrację i analizę jednoczesnych sekwencji obrazów w obu zakresach spektrum – osiem obrazów w każdej sekwencji rejestrowanych co 10 minut.

Obie kamery były zamontowane na wysokości 1,4 m nad powierzchnią owocu. Aby umożliwić pionową obserwację badanych owoców, przed obiektywem kamery termowizyjnej ustawiono specjalne zwierciadło pod odpowiednim kątem do osi obiektywu. Liniowe pole widzenia kamery termograficznej na poziomie badanych obiektów wynosiło 0,14 m.

Przyjęto stałą wartość współczynnika emisyjności badanych jabłek równą 0,96. Przed rozpoczęciem pomiaru owoc przenoszony był z komory chłodzenia (1,5°C) do termostatowanego pomieszczenia pomiarowego, w którym utrzymywana była stała wartość temperatury powietrza 20°C oraz wilgotność względna powietrza 60%. Następnie owoc pozostawiano na około 3 min, aby uzyskać stałe warunki pomiaru, który rozpoczynał się, gdy temperatura powierzchni owocu osiągała wartość około 8°C. Po zakończeniu sekwencji obrazów termalnych jabłko było ważone elektroniczną cyfrową wagą mierzącą w zakresie od 0 do 1000 g z rozdzielczością 0,001 g.

Jędrność owoców mierzono penetrometrem firmy Facchini, model FT 327 z końcówką o średnicy 11,3 mm. Trzy pomiary jędrności wykonywano dla każdego owocu w części szypułkowej, środkowej i kielichowej. Jędrność wyrażono w niutonach. Wykorzystany w badaniach penetrometr umożliwia określenie stadium dojrzałości owocu i jego miękkość podczas przechowywania. Jędrność jest powszechnie akceptowanym parametrem szacowania dojrzałości owocu, natomiast stosowany w badaniach tester Facchini FT jest akceptowanym standardowym urządzeniem do pomiaru tego parametru.

Zawartość ekstraktu w owocach mierzono refraktometrem Abbego firmy Zeiss w temperaturze otoczenia 20°C. Dla każdego owocu wykonywano dwa pomiary zawartości ekstraktu po przeciwnych stronach owocu. Uśrednione wartości tych dwóch pomiarów wyrażono w %.

Aby zweryfikować wyniki badań termograficznych, oceniano występowanie szklistości jabłek po ich przecięciu wzdłuż osi podłużnej. Obrazy tkanki przeciętej powierzchni owoców otrzymano kamerą video Panasonic CCTV model WV-BP130/GE. Techniki dwuwymiarowego przetwarzania obrazów wykonano w systemie operacyjnym Windows XP, wykorzystując oprogramowanie ImageJ (dostępne pod adresem internetowym http://rsb.info.nih.gov/ij/). Intensywność szklistości oceniono ilościowo, analizując kontrast skali szarości pomiędzy obszarami powierzchni owocu, gdzie występowały półprzezroczyste obszary szklistej tkanki oraz obszarami bez występowania zaburzenia.

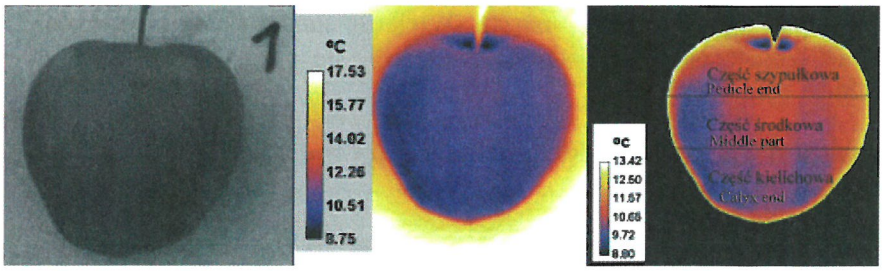
Najpierw wyróżniono w obrazie całą rozciętą powierzchnię jabłka, pozostałą powierzchnię obrazu traktując jako tło, i zmierzono jej całkowitą powierzchnię jako liczbę pikseli. Następnie zastosowano metodę określania dolnej i górnej wartości progowej jaskrawości obrazu (thresholding) w celu wyselekcjonowania rozciętej powierzchni owocu z występującą szklistością. Umożliwiło to policzenie dla kolejnych owoców, jaki procent pikseli obrazu badanej powierzchni należy do tkanek ze szklistością. W 35 owocach stwierdzono występowanie szklistości jako segmentów tkanki pokrywających cały obszar wokół gniazda nasiennego owocu i rozciągających się głęboko w miąższ. Wielkość zmian tkanki badanych 35 owoców ze szklistością była podobna i mieściła się z zakresie 37-42% całej powierzchni.

4.2.3. Analiza statystyczna rozkładu temperatury radiacyjnej powierzchni owoców

Sekwencje obrazów powierzchni owoców w zakresie termalnym i widzialnym, zarejestrowane dla poszczególnych stadiów procesu ogrzewania się, były przetwarzane oprogramowaniem 'Thermal Studio' opracowanym przez Zespół Termografii Komputerowej Politechniki Łódzkiej (Zwolennik i Więcek 2001). Parametry odnoszące się do badanych obiektów (emisyjność, odległość od skanera), otoczenia (temperatura obiektów w sąsiedztwie próbki) oraz atmosfery (temperatura powietrza, korekcja na przepuszczalność atmosfery) są wprowadzane do programu komputerowego. Surowe obrazy termalne otrzymane w formacie firmy AGEMA zostały przetworzone na format obrazu tekstowego, w którym wartości temperatury w skali Celsjusza ze wszystkich pikseli obrazu stanowią elementy macierzy 139 × 138.

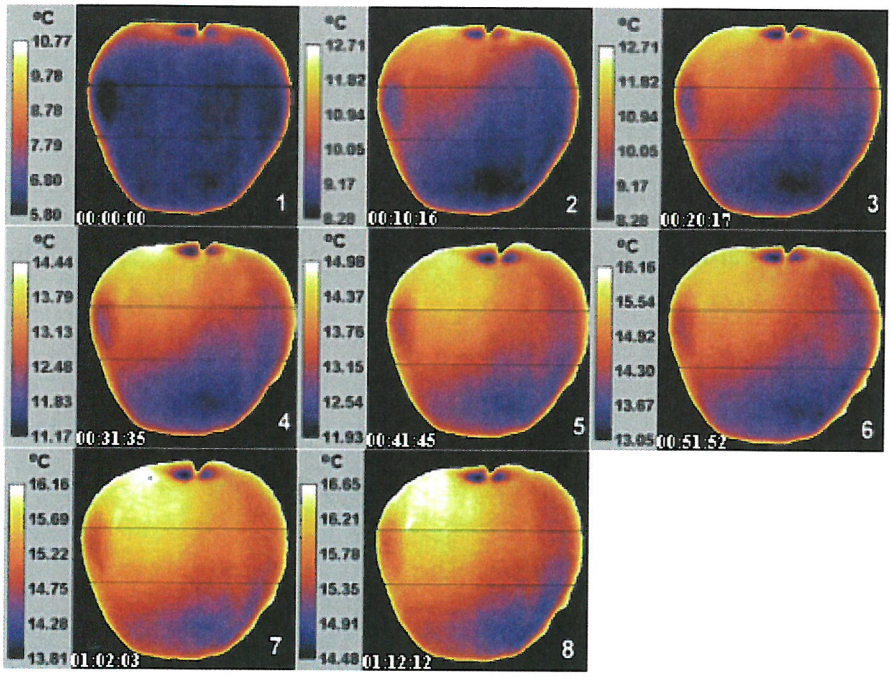
Następnie obrazy w formacie cyfrowym eksportowano do programu ImageJ, gdzie były przetwarzane w celu wyodrębnienia czterech oddzielnych obszarów obejmujących kolejno całą powierzchnię jabłka rejestrowaną na obrazie, oraz części: szypułkową, środkową oraz kielichową.

Wybrano odpowiednią skalę kolorystyczną rozkładu temperatury na obrazie (fire look-up table) i dokonano interpolacji bilinearnej wartości temperatury (środkowy obraz na rys. 21). Następnie wykonując automatyczną procedurę wyboru akceptowalnego progu wartości obrazu (thresholding procedure), wyszczególniono piksele reprezentujące całkowitą powierzchnię owocu na zobrazowaniu. Pozostałe stanowią tło, które nie bierze udziału w dalszych obliczeniach. Procedura ta interaktywnie ustala dolny i górny próg wartości, segmentując obraz w odpowiedni sposób. Piksele o wartościach większych lub równych dolnemu progowi oraz wartości mniejsze lub równe górnemu progowi są wyświetlane w kolorze czerwonym. Piksele tego całkowitego obszaru podzielono w równych proporcjach na trzy inne pola oznaczone jako części: szypułkową, środkową oraz kielichową. Automatycznie wybrane poziome linie stanowiące linię podziału tych trzech obszarów są przedstawione na rysunku 21 (obraz z prawej strony).



Rys. 21. Przykład obrazu owocu w świetle widzialnym (lewa strona), odpowiedni obraz termalny (środek) oraz obraz termalny po wykonaniu procedury progowania (thresholding) z zaznaczonymi trzema obszarami (prawa strona)

Fig. 21. Example of a visible range image (left), a corresponding thermal image (middle) and a thermal image after threshold procedure with selected three areas (right)



Rys. 22. Sekwencja termogramów jabłka odmiany 'Gloster' podczas kolejnych etapów procesu ogrzewania
Fig. 22. Sequence of thermograms of 'Gloster' variety apple during the heating process

Dla wyselekcjonowanych obszarów obliczono podstawowe parametry statystyczne, tzn. liczbę pikseli w każdym obszarze, wartości minimalne i maksymalne temperatury, wartości średnie, odchylenie standardowe (SD), współczynnik zmienności (CV). Obliczenia te wykonano dla wszystkich obrazów w sekwencjach.

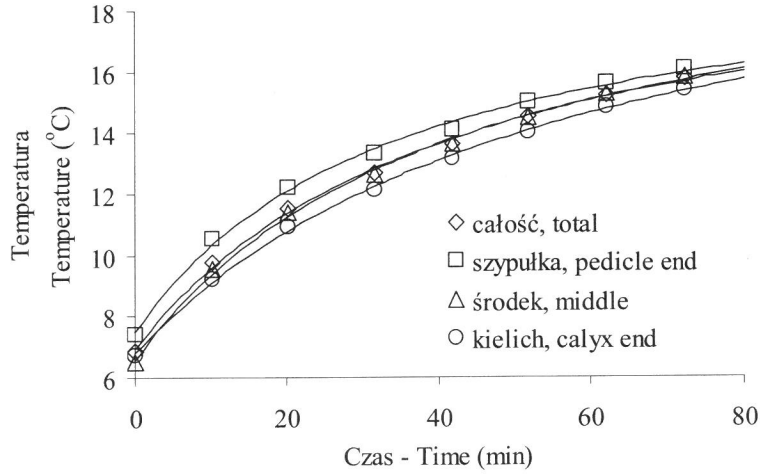
Rejestrowane sekwencje składały się z 8 obrazów zbieranych co 10 min podczas procesu ogrzewania się owocu. Pierwszy obraz sekwencji rejestrowano, gdy temperatura owocu osiągała 8°C. Przykładowa sekwencja obrazów termalnych pokazana jest na rysunku 22.

Aby znaleźć dla wyselekcjonowanych obszarów obrazów sekwencji model regresji dla zależności średniej temperatury powierzchni owocu od czasu, zastosowano procedurę estymacji nieliniowej programu STATISTICA.

Zastosowano model regresji opisany następującym równaniem:

$$T_s(t) = A_0 + \frac{A_1 \cdot t}{A_2 + t}, \tag{25}$$

gdzie: T_s – temperatura radiacyjna powierzchni owocu (°C), t – czas (min), A_0, A_1 i A_2 – współczynniki regresji. Dla wszystkich badanych owoców zastosowany model dawał bardzo dobrą korelację pomiędzy mierzonymi i estymowanymi wartościami.



Rys. 23. Przebiegi wzrostu temperatury poszczególnych części owocu podczas ogrzewania w temp. 20°C z wpasowanymi liniami regresji
Fig. 23. Course of apple temperature increase during heating in 20°C with fitted regression curves

Przykład wpasowanych krzywych regresji oraz zmierzonych wartości temperatury powierzchni jabłka przedstawiono na rysunku 23. Analiza zestawu wszystkich wpasowanych krzywych regresji dla całej powierzchni badanych jabłek wykazała, że krzywe regresji dla jabłek ze szklistością i bez szklistości częściowo się nakładają, chociaż część krzywych dla owoców bez objawów szklistości znajdowała się powyżej pozostałych krzywych.

Tabela 2. Zestawienie statystyczne temperatury radiacyjnej powierzchni owoców dla 35 jabłek bez symptomów szklistości w kolejnych ośmiu etapach ich ogrzewania się
Table 2. Fruit surface radiation temperature for apples without watercore symptoms (n = 35) during subsequent eight stages of their heating

Statystyka temperatury powierzchni owoców Fruit surface temperature statistics T (°C)	Stadium ogrzewania (owoce bez szklistości) Stage of heating (fruit without watercore)							
	I t = 0 min N = 150710	II t =10 min N = 151107	III t = 20 min N = 149643	IV t = 30 min N = 150430	V t = 40 min N = 158533	VI t = 50 min N = 149759	VII t = 60 min N = 152343	VIII t = 70 min N = 153481
Cały owoc – Whole fruit								
Średnia Mean	7,29	10,07	11,61	12,73	13,67	14,40	15,07	15,66
Minimum Minimum	5,15	8,09	9,20	10,90	12,00	12,79	13,58	14,32
Maksimum, Maximum	11,16	13,58	14,01	15,11	15,41	16,09	16,51	17,16
SD	0,48	0,39	0,37	0,35	0,33	0,3	0,28	0,26
CV (%)	6,54	3,86	3,18	2,74	2,41	2,08	1,85	1,66
Skrętność Skewness	1,72	1,32	0,90	0,46	0,61	0,46	1,63	1,78
Kurtoza Kurtosis	3,56	1,84	0,73	-0,6	-0,2	-0,18	3,05	3,43
Część szypułkowa – Pedicle end								
Średnia Mean	7,10	9,74	11,24	12,39	13,36	14,08	14,78	15,42
Minimum Minimum	5,15	8,09	9,20	10,90	12,07	12,79	13,61	14,36
Maksimum Maximum	10,25	12,15	13,45	14,08	14,93	15,49	16,14	16,76
SD	0,31	0,31	0,30	0,27	0,25	0,24	0,21	0,19
CV (%)	4,41	3,22	2,66	2,21	1,88	1,67	1,43	1,24
Skrętność Skewness	1,42	1,29	1,06	0,21	0,47	0,26	0,18	-11,12
Kurtoza Kurtosis	1,88	1,51	1,08	-0,26	0,21	0,87	-0,04	139,33
Część środkowa – Middle part								
Średnia Mean	7,20	10,02	11,57	12,68	13,63	14,39	15,07	15,68
Minimum Minimum	5,2	8,29	9,61	11,14	12,07	12,95	13,58	14,32
Maksimum Maximum	9,8	12,05	13,97	14,23	14,91	15,7	16,51	17,01
SD	0,35	0,33	0,33	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24
CV (%)	4,85	3,30	2,84	2,49	2,21	1,95	1,74	1,56
Skrętność Skewness	1,69	2,85	1,79	1,34	1,74	0,83	1,25	0,27
Kurtoza Kurtosis	5,95	11,03	5,87	3,28	4,2	1,81	2,17	0,17
Część kielichowa – Calyx end								
Średnia Mean	7,58	10,46	12,03	13,11	14,01	14,72	15,35	15,88
Minimum, Minimum	5,57	8,13	9,41	10,96	12,00	12,89	13,93	14,40
Maksimum, Maximum	11,16	13,58	14,01	15,11	15,41	16,09	16,49	17,16
SD	0,42	0,35	0,31	0,28	0,25	0,24	0,22	0,20
CV (%)	5,51	3,33	2,59	2,10	1,78	1,60	1,46	1,23
Skrętność, Skewness	2,31	2,14	1,94	1,76	1,89	1,63	1,78	1,44
Kurtoza, Kurtosis	5,64	4,76	4,16	3,24	3,81	3,05	3,43	2,63

Tabela 3. Zestawienie statystyczne temperatury radiacyjnej powierzchni owoców dla 35 jabłek ze szklistością w kolejnych ośmiu etapach ich ogrzewania się

Table 3. Fruit surface radiation temperature for apples with watercore symptoms (n = 35) during subsequent eight stages of their heating

Statystyka temperatury powierzchni owoców Fruit surface temperature statistics T (°C)	Stadium ogrzewania (owoce ze szklistością) Stage of heating (fruit with watercore)							
	I t = 0 min N = 150710	II t = 10 min N = 151107	III t = 20 min N = 149643	IV t = 30 min N = 150430	V t = 40 min N = 158533	VI t = 50 min N = 149759	VII t = 60 min N = 152343	VIII t = 70 min N = 153481
Cały owoc – Whole fruit								
Średnia, Mean	7,27	9,81	11,26	12,37	13,31	14,09	14,80	15,34
Minimum, Minimum	5,07	7,94	9,40	10,52	11,49	12,51	13,11	13,76
Maksimum, Maximum	11,73	12,34	14,58	14,56	15,36	15,99	16,30	17,03
SD	0,49	0,42	0,39	0,41	0,36	0,35	0,32	0,3
CV (%)	6,74	4,28	3,46	3,32	2,70	2,48	2,16	1,96
Skrętność, Skewness	2,25	0,88	0,56	0,31	0,25	0,3	0,03	0,04
Kurtoza, Kurtosis	4,71	0,1	-0,36	-0,8	-0,81	-0,74	-0,93	-0,98
Część szypułkowa – Pedicle end								
Średnia, Mean	7,10	9,37	10,75	11,87	12,84	13,64	14,40	14,99
Minimum, Minimum	5,08	7,94	9,40	10,52	11,49	12,51	13,11	13,85
Maksimum, Maximum	8,80	10,83	12,27	13,34	14,09	14,98	15,40	16,06
SD	0,29	0,30	0,30	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
CV (%)	4,07	3,22	2,82	2,56	2,17	1,89	1,66	1,51
Skrętność, Skewness	1,40	0,24	0,05	-0,32	-0,60	-0,39	-1,08	-0,69
Kurtoza, Kurtosis	1,28	-0,42	-0,33	0,28	0,22	-0,34	1,64	-0,14
Część środkowa – Middle part								
Średnia, Mean	7,24	9,79	11,25	12,37	13,34	14,13	14,83	15,39
Minimum, Minimum	5,07	7,95	9,40	10,68	11,72	12,60	13,34	13,97
Maksimum, Maximum	9,86	11,15	12,68	13,64	14,67	15,60	16,04	16,54
SD	0,31	0,36	0,37	0,39	0,34	0,33	0,30	0,29
CV (%)	4,34	3,63	3,30	3,13	2,58	2,31	2,02	1,87
Skrętność, Skewness	4,10	-5,39	-6,87	-7,82	-8,18	-8,34	-8,93	-8,67
Kurtoza, Kurtosis	18,38	42,41	55,77	66,16	70,45	73,84	80,53	76,06
Część kielichowa – Calyx end								
Średnia, Mean	7,47	10,27	11,79	12,86	13,75	14,51	15,18	15,65
Minimum, Minimum	5,48	8,29	9,40	11,12	12,24	12,95	13,65	13,76
Maksimum, Maximum	11,73	12,34	14,58	14,56	15,36	15,99	16,30	17,03
SD	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28	0,28	0,25	0,25
CV (%)	5,38	3,61	2,86	2,43	2,05	1,90	1,65	1,57
Skrętność, Skewness	2,86	-3,48	-5,27	-6,72	-7,36	-7,30	-8,69	-8,62
Kurtoza, Kurtosis	7,95	27,83	41,50	54,54	60,22	60,92	77,94	76,43

Aby porównać zmiany temperatury radiacyjnej podczas procesu ogrzewania się owoców, przeanalizowano łącznie wszystkie piksele temperatury powierzchni wszystkich badanych owoców, oddzielnie dla jabłek z objawami szklistości i bez nich. Analizę tę przeprowadzono oddzielnie dla temperatury powierzchni całego owocu oraz części: szypułkowej, środkowej i kielichowej. Statystyczna analiza danych przedstawiona jest w tabelach 2 i 3.

Biorąc pod uwagę poszczególne części owocu, można zauważyć, że średnie wartości temperatury powierzchni owoców są najwyższe dla części kielichowej, a najniższe dla części szypułkowej dla poszczególnych stadiów ogrzewania zarówno dla owoców ze szklistością, jak i bez niej. W tabelach tych N jest całkowitą liczbą pikseli ze wszystkich obrazów termalnych owoców bez szklistości dla poszczególnych etapów ogrzewania. W analizie części szypułkowej, środkowej i kielichowej liczba analizowanych pikseli stanowiła za każdym razem jedną trzecią N. Porównując temperaturę powierzchni owoców z objawami występowania szklistości i owoców bez tego zaburzenia, zauważono, że z wyjątkiem początkowego stadium ogrzewania (czas t = 0 min), kiedy temperatura nie wykazywała znaczących różnic, średnie wartości temperatury radiacyjnej owoców z objawami szklistości były niższe dla poszczególnych stadiów ogrzewania niż odpowiednie temperatury owoców bez szklistości. Tak więc wzrost średnich wartości temperatury pomiędzy dowolnymi etapami był niższy dla owoców ze szklistością.

Jako miarę rozproszenia wartości temperatury powierzchni owoców przeanalizowano ich standardowe odchylenie (SD). Dla owoców jako całości (wszystkie zarejestrowane piksele w obrębie obrazów termalnych ich powierzchni) odchylenie standardowe było nieco wyższe dla owoców z objawami szklistości we wszystkich stadiach ogrzewania. Zarówno dla owoców z objawami szklistości, jak i bez szklistości wartości odchylenia standardowego były coraz mniejsze w kolejnych etapach ogrzewania. Rozpatrując wartości odchylenia standardowego temperatury dla poszczególnych części owocu, stwierdzono, że dla jabłek bez symptomów szklistości wartości SD stają się coraz mniejsze podczas całego procesu ogrzewania dla wszystkich części owocu. W przypadku owoców dotkniętych objawami szklistości dla części szypułkowej wartości SD zmniejszały się od czasu ogrzewania t = 40 min. Dla części środkowej najwyższą wartość współczynnika SD odnotowano dla t = 30 min, a dla części kielichowej SD przyjmowało malejące wartości podczas całego procesu ogrzewania.

Wartości współczynników zmienności (CV) dla poszczególnych etapów ogrzewania były wyższe dla owoców z objawami szklistości (cała obserwowana powierzchnia i poszczególne jej części). Dla owoców traktowanych jako całość wartości współczynnika CV wyrażone w procentach zmieniały się dla owoców z objawami szklistości od 6,74 do 1,95% i odpowiednio od 6,54 to 1,66% dla owoców bez szklistości.

Aby sprawdzić, czy wartości temperatury powierzchni owoców wykazują pik czy też mają rozkład płaski w stosunku do rozkładu normalnego, przeanalizowano ich kurtozę. Dla badanych owoców traktowanych jako całość kurtoza przyjmowała niskie wartości, zmieniając się podczas procesu ogrzewania od 4,71 do – 0,98 dla jabłek ze szklistością oraz od 3,56 do –0,6 dla jabłek bez szklistości. Wysokie wartości kurtozy otrzymano dla części środkowej i kielichowej owocu ze szklistością. Rozkłady wartości temperatury radiacyjnej w tych częściach owocu wykazywały znaczące piki w sąsiedztwie wartości średnich, które gwałtownie opadały, tworząc długie ogony. Również w przypadku ostatniego stadium ogrzewania (t = 70 min) owoców bez symptomów szklistości kurtoza części szypułkowej osiągnęła wysoką wartość równą 139,33.

W celu przeanalizowania symetrii rozkładu temperatury radiacyjnej owoców obliczono wartości skrętności tego parametru. Okazało się, że wartości skrętności dla owoców bez symptomów szklistości były dodatnie, natomiast dla owoców ze szklistością dominowały wartości ujemne. Ujemne wartości skrętności świadczą o tym, że dane wykazują skrętność lewostronną, tzn. że lewy ogon rozkładu temperatury jest większy niż prawy ogon.

4.2.4. Związek tempa ogrzewania się owoców wykazujących szklistość z ich jędrnością, gęstością oraz zawartością ekstraktu

Dla porównania tempa ogrzewania wyodrębnionych obszarów na termogramach owoców ze szklistością i bez szklistości obliczono pochodne temperatury po czasie według formuły:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A_1 \cdot A_2}{(A_2 + t)^2}. \tag{26}$$

W chwili początkowej t = 0 procesu ogrzewania wartość tej pochodnej jest równa:

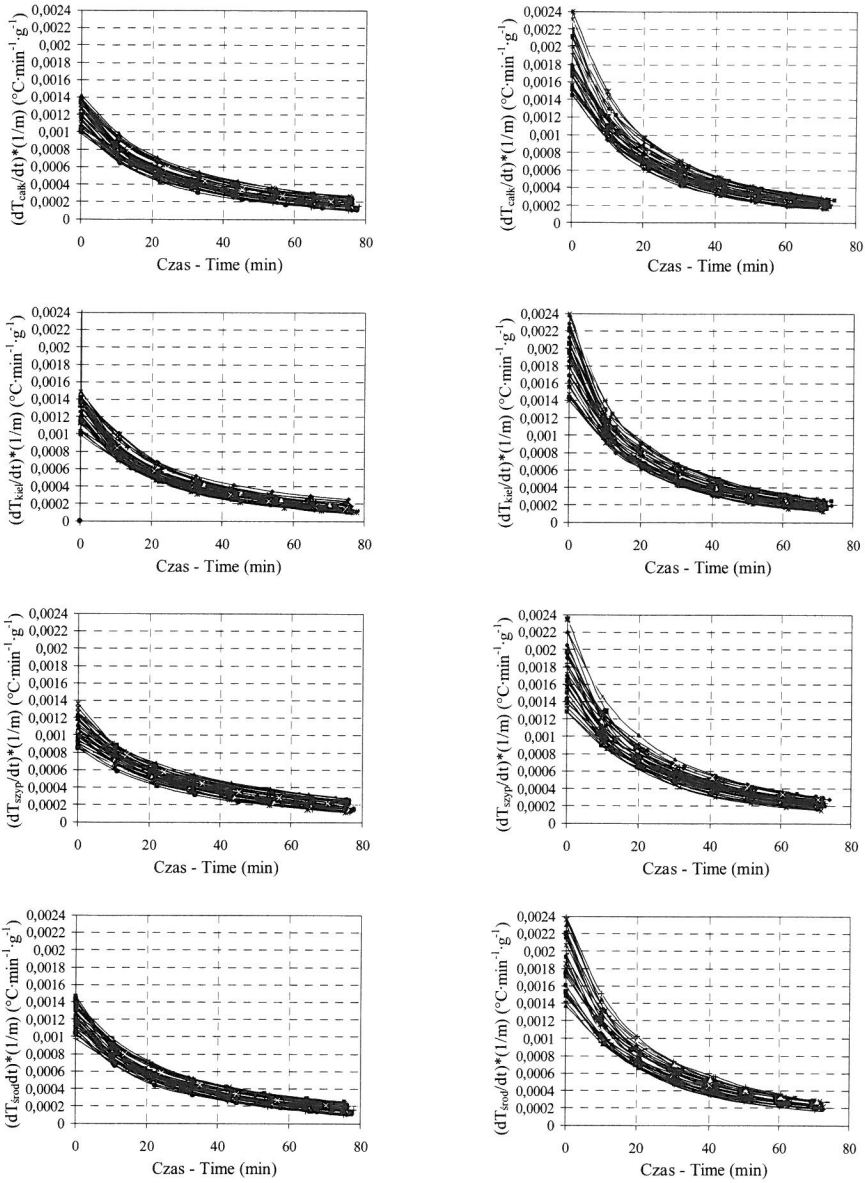
$$\frac{dT}{dt}_{(t=0)} = \frac{A_1}{A_2}. \tag{27}$$

Ponieważ im większa jest masa jabłka tym wolniej przebiega proces ogrzewania, w przeprowadzonych badaniach przyjęto wyrażenie $\frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{m}$ jako miarę tempa zmian temperatury radiacyjnej powierzchni owocu, gdzie m – masa owocu. Na rysunku 24 przedstawiono zmiany pochodnej temperatury radiacyjnej owocu po czasie na jednostkę masy owocu w procesie ogrzewania. Dla jabłek ze szklistością (wykresy po lewej stronie rysunku) tempo wzrostu temperatury po-

wierzchni na jednostkę masy w poszczególnych stadiach procesu ogrzewania było znacznie niższe niż w przypadku jabłek bez symptomów szklistości (prawa strona rysunku), niezależnie od rozpatrywanej części owocu. Poszczególne rzędy wykresów na rysunku 24 dotyczą odpowiednio całej znajdującej się w polu widzenia kamery powierzchni owocu, części kielichowej, szypułkowej i środkowej. W chwili początkowej (t = 0 min) zarejestrowane zakresy parametru $\frac{dT_{calk}}{dt} \cdot \frac{1}{m}$ były inne dla 35 jabłek, w których stwierdzono szklistość (od 0,001 do 0,0014°C·min^{-1}·g^{-1}) niż dla 35 jabłek bez symptomów szklistości (od 0,0015 do 0,0024°C·min^{-1}·g^{-1}). Gdy rozpatrujemy wartości parametru $\frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{m}$ dla poszczególnych części owocu, widać wyraźnie, że dla kolejnych stadiów procesu ogrzewania ich zakresy dla jabłek bez symptomów szklistości są przesunięte powyżej odpowiednich wartości dla jabłek ze szklistością, chociaż w niektórych przypadkach zakresy te nieco na siebie zachodzą. Wynik ten sugeruje, że lepiej jest analizować temperaturę radiacyjną całej powierzchni owocu niż poszczególnych części w celu wykrycia niejednorodności właściwości cieplnych tkanki owoców, spowodowanych występowaniem w nich szklistości.

W badanych owocach segmenty tkanek ze szklistością były rozłożone symetrycznie wzdłuż ich osi podłużnej, jednakże w tkankach ze szklistością rozłożonych nieregularnie w objętości owocu można się spodziewać, że niektóre części powierzchni owocu mogą być preferowane przy przeprowadzaniu testu termograficznego, ponieważ ich lokalne niejednorodności gęstości i właściwości cieplnych mogą być wykrywane poprzez analizę lokalnych zmian temperatury radiacyjnej ich powierzchni. Występowanie szklistości w owocach wpływa na zmiany fizycznych właściwości ich tkanek, dlatego wydawało się interesującym zbadać czy istnieje związek pomiędzy wzrostem temperatury radiacyjnej podczas procesu ogrzewania owoców z objawami szklistości oraz owoców niedotkniętych tym zaburzeniem a ich jędrnością, gęstością i zawartością ekstraktu. Tabela 4 zawiera analizę statystyczną tych wielkości dla 35 jabłek ze szklistością i 35 jabłek bez szklistości.

Wartości parametru $\frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{m}$ uwzględnione w tych badaniach odnoszą się do pierwszego stadium procesu ogrzewania (t = 0 min), kiedy to gradient temperatury pomiędzy powierzchnią owocu otaczającym powietrzem był największy. Wartość średnia, odchylenie standardowe (SD) i współczynnik zmienności (CV) tego parametru są większe dla jabłek bez symptomów szklistości.



Rys. 24. Tempo ogrzewania dla owoców traktowanych jako całość (wskaźnik *całk*) oraz poszczególnych jego części (wskaźniki: *kiel*, *szyp*, *środ*). Jabłka z objawami szklistości w lewej kolumnie

Fig. 24. Heating rate for fruit as a whole (index *total*) and selected parts (indices: *calyx*, *pedicle* and the *middle*). Apples affected with watercore in the left column

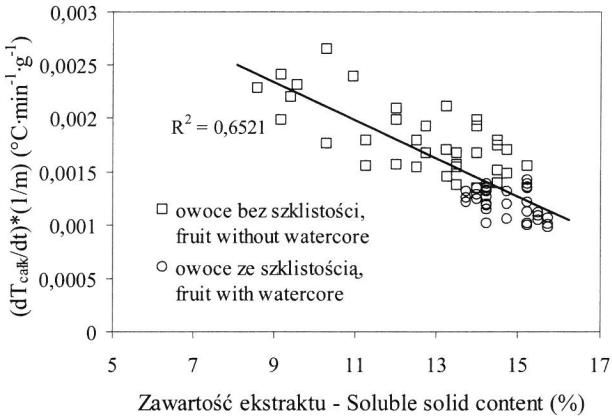
Tabela 4. Zestawienie statystyczne badanych wielkości w owocach ze szklistością i bez szklistości
Table 4. Summary of statistical quantities in fruit with watercore and without watercore

Statystyka Statistics	Parametr, Parameter $\frac{dT_{calk}}{dt} \cdot \frac{1}{m}$ ($°C \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$)	Jędrność, Firmness (N)	Zawartość ekstraktu, Soluble solid content (%)	Gęstość, Density ($kg \cdot m^{-3}$)
Owoce bez szklistości – Fruit without watercore N = 35,				
Średnia, Mean	0,0018	57,5	12,5	868,7
Minimum, Minimum	0,0014	49,0	8,6	846,4
Maksimum, Maximum	0,0024	65,7	15,3	886,3
SD	0,0003	4,2	1,9	10,2
CV (%)	19,0	7,2	15,0	1,2
Skrętność, Skewness	0,56	0,27	–0,65	–0,20
Kurtoza, Kurtosis	–0,05	–0,21	–0,69	–0,38
Owoce ze szklistością – Fruit with watercore N = 35				
Średnia, Mean	0,0012	63,3	14,7	932,0
Minimum, Minimum	0,0010	55,2	13,8	921,5
Maksimum, Maximum	0,0014	72,2	15,8	948,7
SD	0,0001	4,4	0,6	8,9
CV (%)	11,5	7,0	4,4	1,0
Skrętność, Skewness	–0,25	0,02	0,11	0,42
Kurtoza, Kurtosis	–1,40	–0,92	–1,47	–1,32

Średnie wartości jędrności, zawartości ekstraktu i gęstości są wyższe dla owoców z objawami szklistości, jednakże odpowiednie wartości współczynnika zmienności są wyższe dla owoców bez szklistości. Wartości gęstości owoców ze szklistością i bez szklistości zawierają się w innych zakresach.

Związek pomiędzy pochodną temperatury jabłka po czasie liczoną względem jednostki masy owocu oraz procentową zawartością ekstraktu dla badanych owoców przedstawiony jest na rysunku 25. Z wykresu wynika, że wartości parametru szklistości $\frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{m}$ maleją wraz ze wzrostem procentowej zawartości ekstraktu.

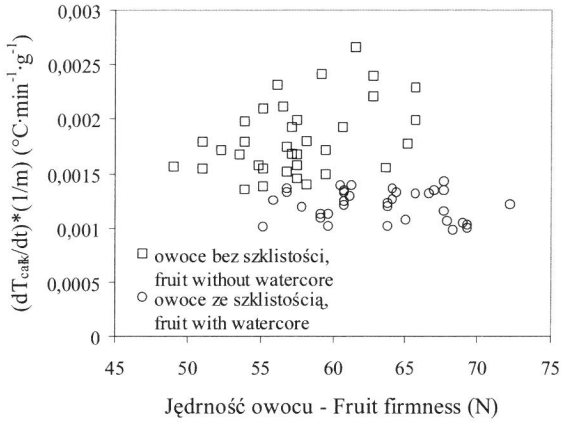
Wpasowana prosta regresji liniowej dotyczy łącznie wartości dla owoców z objawami szklistości i bez nich. Współczynnik determinacji $R^2 = 0,652$ jest w tym przypadku stosunkowo wysoki. Charakterystyczne jest to, że wartości procentowej zawartości ekstraktu w owocach bez szklistości znajdują się w znacznie szerszym zakresie (od 8,5 do 15,4%) niż owoców z objawami szklistości (od 13,4 do 15,9%).



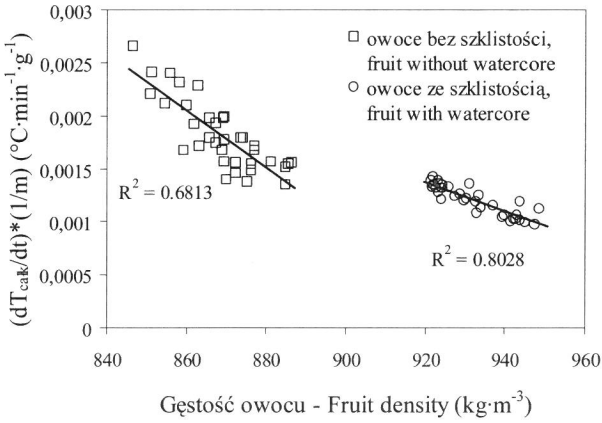
Rys. 25. Zależność parametru szklistości od zawartości ekstraktu dla jabłek z symptomami i bez symptomów szklistości

Fig. 25. Relation between watercore parameter and soluble solid content for watercore affected fruit and for apples with sound tissue with fitted regression line

Przeprowadzone badania wykazały, że nie ma silnej korelacji pomiędzy pochodną temperatury owoców po czasie na jednostkę ich masy a jędrnością jabłek (rys. 26). Rozproszenie punktów pomiarowych w tym przypadku, szczególnie dla owoców bez symptomów szklistości, jest silne i można zauważyć, że wartości jędrności owoców z objawami szklistości zmieniają się w szerokim zakresie, pokrywającym się do pewnego stopnia z zakresem wartości jędrności owoców bez szklistości. Wynik ten wydaje się być w zgodzie z wynikami Bowena i Watkinsa (1997), którzy zaobserwowali, że jędrność miąższu zmienia się silnie w jabłkach z objawami szklistości i rekomendowali, aby odczyty jędrności miąższu nie były używane do określania jakości owoców ze szklistością.



Rys. 26. Zależność parametru szklistości od jędrności w badanych jabłkach
Fig. 26. Relation between watercore parameter and firmness of the investigated apples



Rys. 27. Zmiany parametru szklistości w zależności od gęstości jabłek
Fig. 27. Changes of watercore parameter in relation to bulk density of apples

Stwierdzono silną korelację pomiędzy pochodną temperatury owoców po czasie na jednostkę ich masy a gęstością owoców (rys. 27). Współczynnik determinacji dla owoców z objawami szklistości wynosił w tym przypadku $R^2 = 0,80$, natomiast dla owoców bez szklistości $R^2 = 0,68$. Ten wynik sugeruje, że wzrost gęstości masy w owocach ze szklistością silnie wpływa na ich pojemność cieplną.

Dalsze badania nad tym związkiem są wskazane w celu komercyjnego zastosowania metody selekcji owoców z zaburzeniem szklistości na podstawie pomiaru temperatury radiacyjnej ich powierzchni.

4.3. Określanie zdolności kiełkowania nasion fasoli i grochu na podstawie analizy rozkładu temperatury ich powierzchni

4.3.1. Wprowadzenie

Tradycyjny sposób określania zdolności kiełkowania nasion wymaga długiego czasu wyczekiwania na ich wykiełkowanie, a to niekiedy utrudnia dokonanie właściwej oceny i selekcji materiału siewnego. Oczekuje się więc opracowania metody oceny zdolności kiełkowania, która umożliwiłaby skrócenie czasu testu i nie wymagałaby dużej liczebności próby nasion. Szczególnie w przypadku rzadkich, cennych nasion i przy hodowli nowych odmian, kiedy to często nie dysponuje się wymaganą standardem badań liczebnością nasion tradycyjne metody wydają się niewystarczające.

Nową jakość w określaniu zdolności kiełkowania nasion może wnieść zastosowanie metod „widzenia komputerowego". Metody te na podstawie analizy obrazów w różnych zakresach spektrum pozwalają na uzyskanie obiektywnej informacji o stanie fizycznym i fizjologicznym materiału biologicznego. Są to metody nieniszczące, umożliwiające automatyczną klasyfikację cech obiektów występujących na obrazie. Stosuje się w tym celu zaawansowane techniki przetwarzania obrazu, takie jak: automatyczna segmentacja, progowanie, filtracja obrazu, transformacja Fouriera. Obraz termalny jako macierz wartości temperatury badanego obszaru może być poddawany tym procedurom przetwarzania obrazu. W podjętych w pracy badaniach założono, że bazując na informacjach o rozkładzie temperatury radiacyjnej w różnych fazach kiełkowania nasion uda się stworzyć wskaźniki zdolności i energii kiełkowania.

Wstępne wyniki badań prowadzonych w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie wykazały, że siły hydratacji wykazują zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi częściami nasion (Baranowski i in. 2002). Najwyższe wartości tej siły występują w obrębie zdrowego zalążka. Wykorzystanie w kamerze termograficznej teleobiektywu germanowego o kącie widzenia 7° pozwoliło na obserwację i analizę powierzchni rozkładu temperatury radiacyjnej części zalążkowej nasion. Rozdzielczość przestrzenna systemu umożliwiła rejestrację fragmentów nasion o wielkości 0.4 mm.

Fasola i groch, należące do roślin strączkowych, mają szczególne znaczenie wśród upraw w Polsce (Kęsik 1997, Kęsik i in. 1994). Dostarczają one wysokobiałkowego pokarmu zarówno dla ludzi jak i zwierząt. Wpływają również na

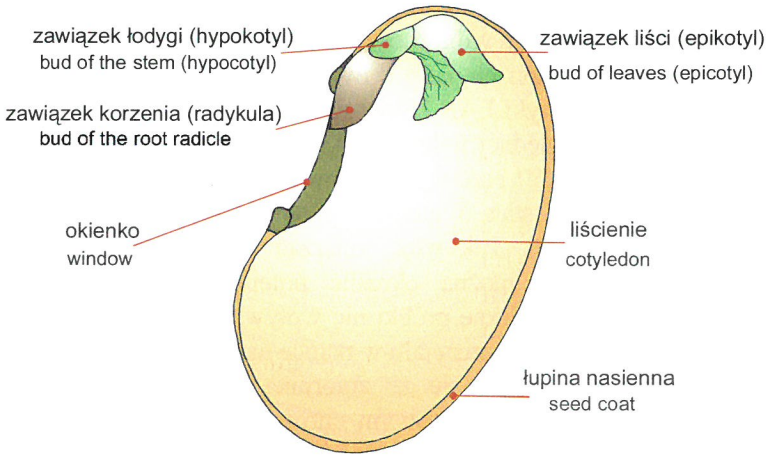
użyźnianie gleb poprzez poprawę bilansu azotu, wzbogacając je jednocześnie w substancje organiczne i składniki pokarmowe. Rośliny strączkowe, poprzez dobrze rozwinięty system korzeniowy, przyczyniają się do poprawy struktury i stosunków wodno-powietrznych gleby. Posiadają zdolność do korzystania ze składników pokarmowych występujących w formach trudno dostępnych.

Celem tej części pracy jest przedstawienie metodologii pomiaru temperatury radiacyjnej wybranych nasion strączkowych oraz sprawdzenie przydatności termografii do badania zdolności kiełkowania nasion fasoli i grochu we wczesnym okresie procesu pęcznienia.

4.3.2. Materiał i metody

Istotą poddanej badaniu metody było określanie zdolności kiełkowania nasion, zwłaszcza nasion roślin strączkowych na podstawie analizy rozkładu temperatury radiacyjnej ich powierzchni. Postanowiono sprawdzić, czy metoda ta umożliwi znaczne czasowe skrócenie procesu oceny materiału siewnego. Dokonywano pomiaru rozkładu temperatury radiacyjnej powierzchni nasienia ułożonego na podłożu, uwzględniając zarówno temperaturę uśrednioną z całej eksponowanej powierzchni, jak i poszczególnych fragmentów nasienia.

Najważniejsze składniki budowy nasienia fasoli przedstawiono na rysunku 28. Oczekiwano największego zróżnicowania temperatury w obrębie części zarodkowej nasienia, gdzie przebiegają najintensywniej procesy biochemiczne związane z produkcją i wymianą energii.



Rys. 28. Budowa nasienia fasoli
Fig. 28. Composition of bean seed

Badania przeprowadzono na nasionach fasoli wielokwiatowej (*Faseolus multiflorus* Lam.) odmiany 'Eureka', fasoli zwyczajnej (*Faseolus vulgaris* L.) odmiany 'Aura', grochu jadalnego (*Pisum sativum* L.) odmiany 'Piast' oraz grochu pastewnego (*Pisum arvense* L.) odmiany 'Grapis'. Nasiona pochodziły z dwóch różnych sezonów zbioru: 2000 i 2003 (rys. 29). Spodziewano się, że nasiona pochodzące z tych dwóch terminów zbioru wykażą różnice żywotności też różne zdolności kiełkowania. Określone zdolności kiełkowania na podstawie pomiaru jak temperatury radiacyjnej nasion porównano z wynikami standardowej metody testu kiełkowania (ISTA, 1999).

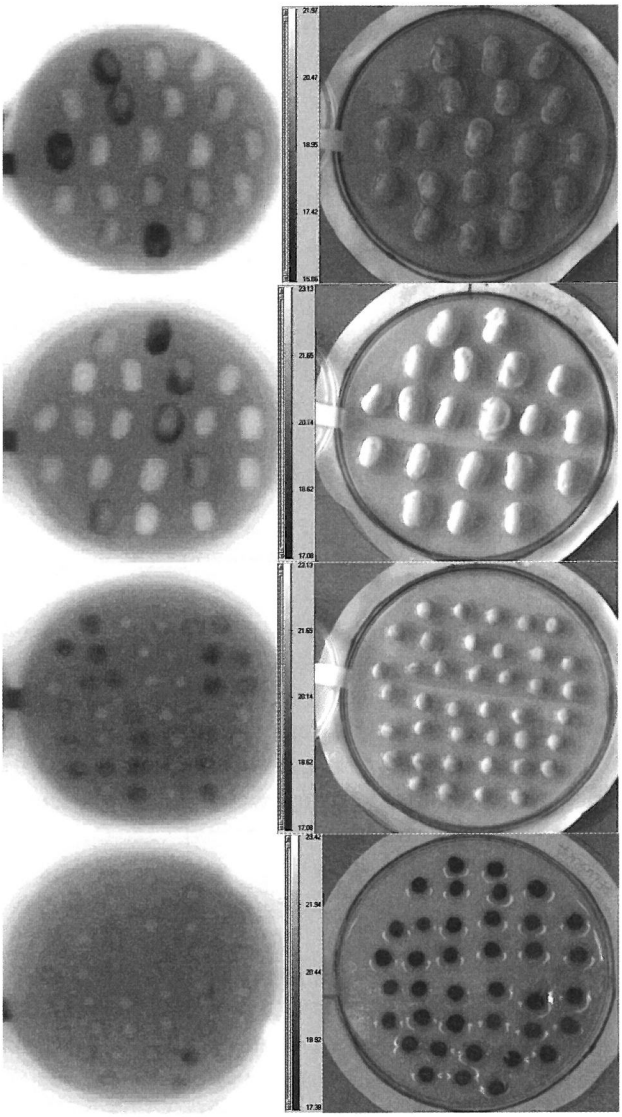
W przypadku roślin strączkowych czas kiełkowania wynosi zazwyczaj od 5 do 9 dni w stałej temperaturze z przedziału 20-30°C. W badaniu tym używa się 400 sztuk nasion odliczonych losowo z dobrze wymieszanych nasion czystych, stosując powtórzenia po 100 sztuk nasion. Jako podłoże używane są bibuła lub piasek. Efektem wielodniowego procesu pęcznienia jest rozwój siewki do etapu, w którym jednoznacznie można określić na podstawie elementów jej budowy, czy możliwy jest jej rozwój w pełną roślinę.

Stosując standardową procedurę oceny zdolności kiełkowania co 5 godz., zliczano liczbę nasion z korzonkiem wyrośniętym na długość co najmniej 2 mm. Na szalkach z nasionami poddanymi badaniom termograficznym zdolność kiełkowania określano po każdej rejestracji termalnej.

W poszczególnych fazach procesu pęcznienia nasion badanych odmian określano ich wilgotność oraz potencjał wody w tkankach. Grupa nasion wykorzystanych do tych testów podlegała identycznej procedurze kiełkowania jak pozostałe nasiona. Co 2 godz. w czasie procesu pęcznienia pobierano z każdej odmiany po 5 nasion do testu wilgotności i 5 nasion do testu potencjału wody.

Potencjał wody w nasionach, jak i w owocach mierzono przyrządem opracowanym w Instytucie Agrofizyki PAN (Skierucha i in. 2001). Metoda pomiaru oparta jest na wyznaczaniu względnej wilgotności pary wodnej w próbce, który to parametr w zakresie od 0 do 50 barów jest liniowo związany z potencjałem. W stanie równowagi między fazą stałą i gazową potencjał wody w próbce jest równy potencjałowi pary wodnej. Tak więc, mierząc względną wilgotność powietrza w otoczeniu termozłącza, można określić potencjał pary wodnej w próbce. Ponieważ własności wewnętrzne próbki nie wpływają na wyniki pomiaru, metodę można stosować do pomiaru potencjału w tkance nasion i owoców.

Zestaw pomiarowy składa się ze zbiornika na próbkę typu Wescor C-52 z wbudowanym złączem termoparowym chromel-konstantan, mikrowoltomierza z elektronicznym obwodem kontrolnym, który automatycznie utrzymuje temperaturę złącza w temperaturze punktu rosy, oraz zasilacza prądu stałego +18 V, –18 V (rys. 30).



Rys. 29. Termogramy (z lewej) oraz obrazy w świetle widzialnym (z prawej) uzyskane po upływie 6 godz. od rozpoczęcia procesu pęcznienia dla wybranych zestawów pomiarowych badanych odmian. Kolejno od góry nasiona: fasoli wielokwiatowej 'Eureka', fasoli zwyczajnej 'Aura', grochu jadalnego 'Piast', grochu pastewnego 'Grapis'

Fig. 29. Thermograms (left) and visible range images (right) obtained after 6 h from the beginning of the swelling process for chosen measuring sets of studied varieties. Successively from the top seeds of : 'Eureka' multiflorous beans, 'Aura' common bean, 'Piast' peas and 'Grapis' peas

Rys. 30. Stanowisko pomiaru potencjału wody w tkankach nasion i owoców
Fig. 30. Setup for measurement of water potential in tissue of seed and fruit

Termopara znajduje się w szczelnie zamkniętym zbiorniku Wescor C-52 bezpośrednio nad próbką gleby lub liścia umieszczonego w specjalnym cylindrycznym naczyniu. W warunkach izotermicznych po około 10-15 min ustala się stan równowagi pomiędzy ciśnieniem pary wodnej w powietrzu i w próbce. Następnie przepuszcza się przez złącze w krótkim czasie prąd rzędu kilku miliamperów w kierunku takim, by następowało jego ochłodzenie (efekt Peltiera).

Czas chłodzenia zależy od rodzaju próbki. W opisanym doświadczeniu stosowano dla wszystkich próbek czas pięciu sekund. Wielkość obniżenia temperatury złącza zależy od wilgotności względnej i temperatury powietrza w zbiorniku z próbką. Siła elektromotoryczna wytworzona w złączu jest funkcją wilgotności względnej, a zatem potencjału w mierzonej próbce.

Możliwość jednoczesnego pomiaru potencjału w wielu komorach (w tym przypadku sześciu) oraz komputerowa analiza krzywych obrazujących generowany skok temperatury powodują, że ta obiecująca metoda pomiaru może stać się standardową w badaniach potencjału wody w tkankach roślinnych. Pomiar potencjału wody w badanym materiale składa się z kilku etapów kontrolowanych przez mikrokontroler. Etapy te różnią się w zależności od zakresu mierzonych wartości potencjału wody, temperatury, wymaganej dokładności oraz czasu trwania pomiaru. Kalibrację przyrządu wykonano, stosując roztwory NaCl o różnych stężeniach, w których zanurzany był czujnik.

Wilgotność nasion określano metodą suszarkową. Nasiona suszono przez 48 godz. w temperaturze 75°C w suszarce z wymuszoną cyrkulacją powietrza. Wilgotność wyrażano jako procent masy wody przypadający na jednostkę świeżej masy nasion ($g \cdot g^{-1}\%$).

Przed rozpoczęciem pomiaru nasiona przechowywano przez 12 dni w stabilizowanych warunkach zewnętrznych tj. przy wilgotności względnej powietrza 33%, temperaturze powietrza 5°C. Z materiału do przeprowadzenia testu zdolności kiełkowania wykluczono nasiona o wyraźnych zewnętrznych uszkodzeniach mechanicznych oraz nasiona przerośnięte. Wybrane nasiona układano na szalce Petriego wyłożonej podwójną warstwą bibuły filtracyjnej w odstępach nie mniejszych niż 1 cm i nie bliżej niż 1 cm od krawędzi szalki. Takie ułożenie jest konieczne, gdyż w trakcie procesu pęcznienia zwiększa się objętość nasion i nie można dopuścić, aby stykały się ich powierzchnie oraz, aby nie miały kontaktu ze ścianką szalki Petriego.

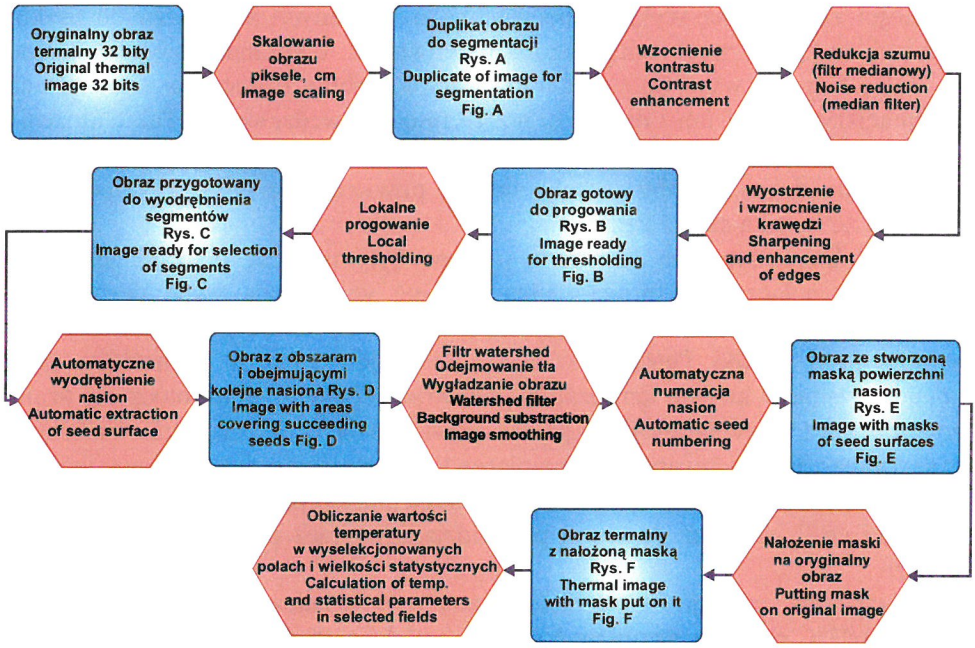
Pod bibułę filtracyjną, na której ułożone były nasiona, podkładano sączek bawełniany połączony z drugą szalką Petriego wypełnioną wodą destylowaną o temperaturze 25°C. Umożliwiło to nawilżanie bibuły filtracyjnej przez cały czas trwania testu. Szalki Petriego z nasionami umieszczano w termostatowanym pomieszczeniu, w którym temperatura powietrza w bezpośrednim otoczeniu szalki wynosiła 25°C, a wilgotność względna powietrza 60%. Każde z tak ułożonych w szalce nasion poddawane było pomiarowi temperatury radiacyjnej powierzchni za pomocą urządzenia termograficznego w ciągu pierwszych 12 godz., co 0,5 godz., a później co 2 godz. aż do czasu przewidzianego przez normę na skiełkowanie nasion.

Urządzenie termograficzne zastosowane w doświadczeniu ma czułość detekcyjną 0,07°C przy temperaturze badanego obiektu 30°C i pracowało w zakresie 8 do 13 μm. Ponadto, równolegle z rejestracją termograficzną rejestrowano obrazy badanych nasion w świetle widzialnym. Ułatwiło to precyzyjne określenie powtarzalnych pól na poszczególnych obrazach termograficznych przy dalszej ich analizie. Obie kamery, termograficzną i rejestrującą w świetle widzialnym, umieszczono na wysokości 1,4 m pionowo nad badanymi nasionami. Przy takim ustawieniu cała powierzchnia szalki Petriego wraz ze wszystkimi znajdującymi się na niej nasionami była w polu widzenia kamery.

4.3.3. Zmiana rozkładu temperatury nasion w poszczególnych etapach procesu pęcznienia

Poszczególne obrazy termalne szalek z nasionami poddane były analizie komputerowej w celu automatycznego wyselekcjonowania na obrazie obszarów obejmujących powierzchnie poszczególnych nasion. W tym celu surowe obrazy

uzyskane z kamery z odpowiednio wprowadzonymi parametrami rejestracji (temperatura otoczenia i temperatura powietrza, emisyjność powierzchni nasion, odległość obiektywu kamery od badanych nasion) wyeksportowano jako pliki tekstowe do programu ImageJ, w którym opracowano skrypt wykonujący procedurę automatycznej segmentacji, przedstawiony schematycznie na rysunku 31.



Rys. 31. Schemat procedury automatycznej segmentacji obrazu
Fig. 31. Scheme of automatic procedure of image segmentation

Pierwszym jej etapem było skalowanie obrazu polegające na określeniu przestrzennej skali obrazu w skalibrowanych jednostkach (centymetrach). Utworzono odcinek przechodzący przez środek szalki Petriego łączący dwa przeciwległe krańce szalki. Na podstawie liczby pikseli wzdłuż tego odcinka i znanej średnicy szalki (15 cm) program automatycznie przeliczał wszystkie odległości w wybranej jednostce (rys. 32 A).

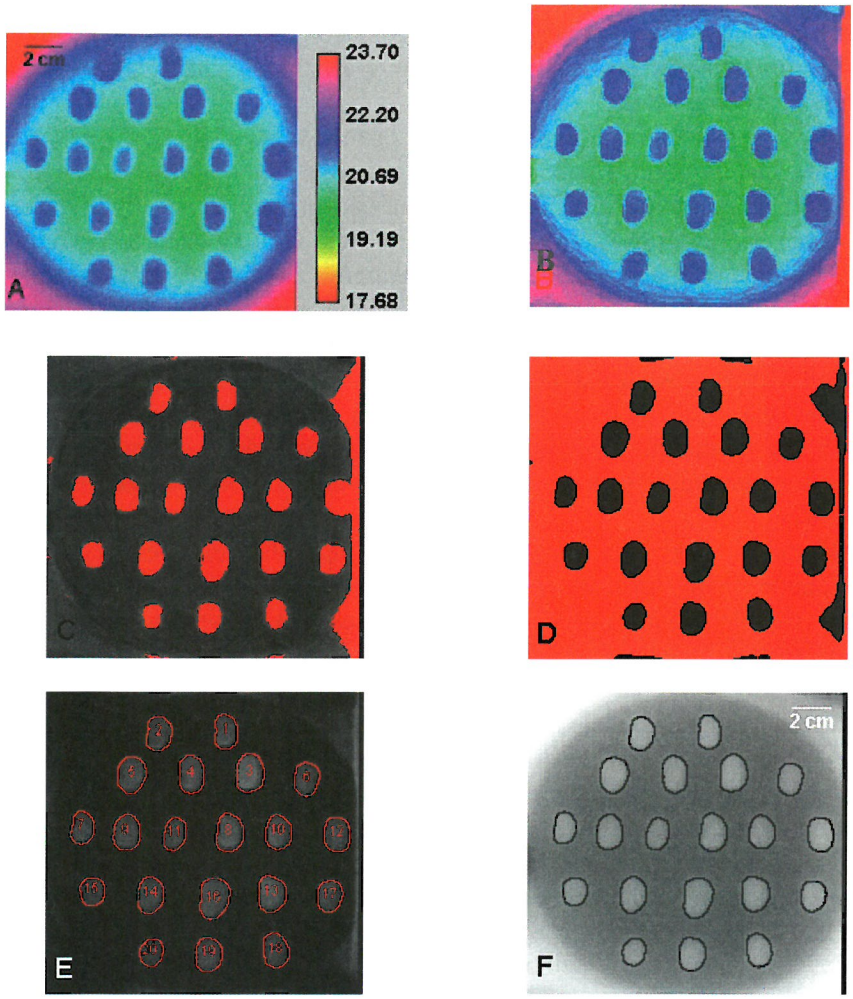
Następnie, w celu przygotowania obrazu do właściwej segmentacji przeprowadzono automatyczną procedurę dopasowania jaskrawości i kontrastu na podstawie analizy histogramu wyselekcjonowanej części obrazu obejmującej szalkę z nasionami. Optymalizacja jaskrawości i kontrastu obrazu polegała na

dopasowaniu zakresu temperatur pikseli badanego obszaru, aby wyeliminować podzakresy nie obejmujące badanego obszaru. Redukcję szumu w obrazie uzyskano, stosując filtr medianowy zamieniający wartość w każdym pikselu obrazu medianą wartości sąsiednich pikseli.

W celu wyostrzenia krawędzi nasion zastosowano dodatkową procedurę wyrównania histogramu. Wynik tej części procedury przygotowawczej przedstawiony jest na rysunku 32 B. Ze względu na złożoną scenę badanych obrazów zdecydowano się zastosować metodę segmentacji rekursywnej polegającą na progowaniu. Polega ona na wyliczaniu histogramów związanych z takimi atrybutami obrazu, jak: odcienie, nasycenie, jasność i inne, a następnie wyborze spośród nich histogramu o najbardziej wyrazistym wierzchołku. Określa on atrybut, według którego przeprowadzana jest segmentacja. Ta procedura powtarzana jest wielokrotnie dla wyselekcjonowanych wcześniej obszarów i pozostałych części obrazu aż do momentu wyizolowania ostatniego obszaru o danych cechach. Otrzymana w rezultacie segmentacja charakteryzuje się dużą szczegółowością i dokładnością.

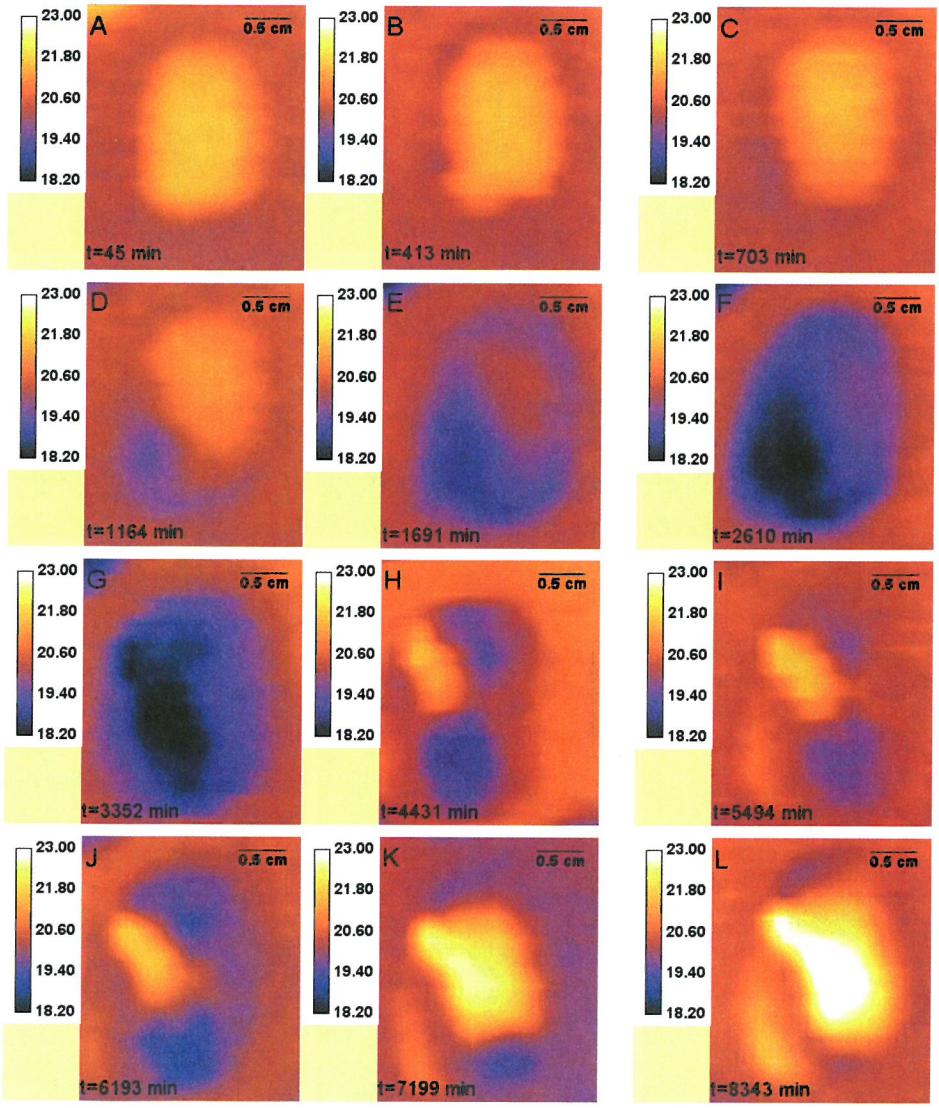
Przykładowy efekt procedury segmentacji przedstawiony jest na rysunku 32 C. Kolejne etapy procedury segmentacyjnej obejmowały stworzenie na podstawie wyselekcjonowanych obszarów masek ich krawędzi. W tym celu wykonana została funkcja usunięcia tła z obrazu (rys. 32 D). Zastosowanie filtru „watershed" pozwoliło na odseparowanie obszarów należących do nasion od ewentualnych stykających się z nimi obszarów krawędzi szalki Petriego lub innych nasion. Następnie zastosowano procedury wyodrębnienia krawędzi wyselekcjonowanych obszarów i automatycznej ich numeracji (rys. 32 E).

Ostatnim etapem zastosowanej procedury było nałożenie stworzonej maski krawędzi nasion na oryginalny obraz termograficzny i dla wyselekcjonowanych obszarów obliczenie podstawowych wielkości statystycznych w obrębie wybranego pola tzn. liczby pikseli, wartości średniej temperatury dla wszystkich pikseli, standardowego odchylenia temperatury dla wszystkich pikseli, najczęściej występujących wartości temperatury, ekstremalnych wartości temperatury, długości zewnętrznej granicy danego pola w jednostkach długości pojedynczego piksela, średnicy Fereta, czyli najdłuższej odległości pomiędzy dwoma dowolnymi punktami wzdłuż granicy wybranego pola, mediany wartości temperatury pikseli, skrętności jako miary symetrii rozkładu danych pomiarowych temperatury, kurtozy określającej, jaki jest rozkład danych pomiarowych względem rozkładu normalnego.



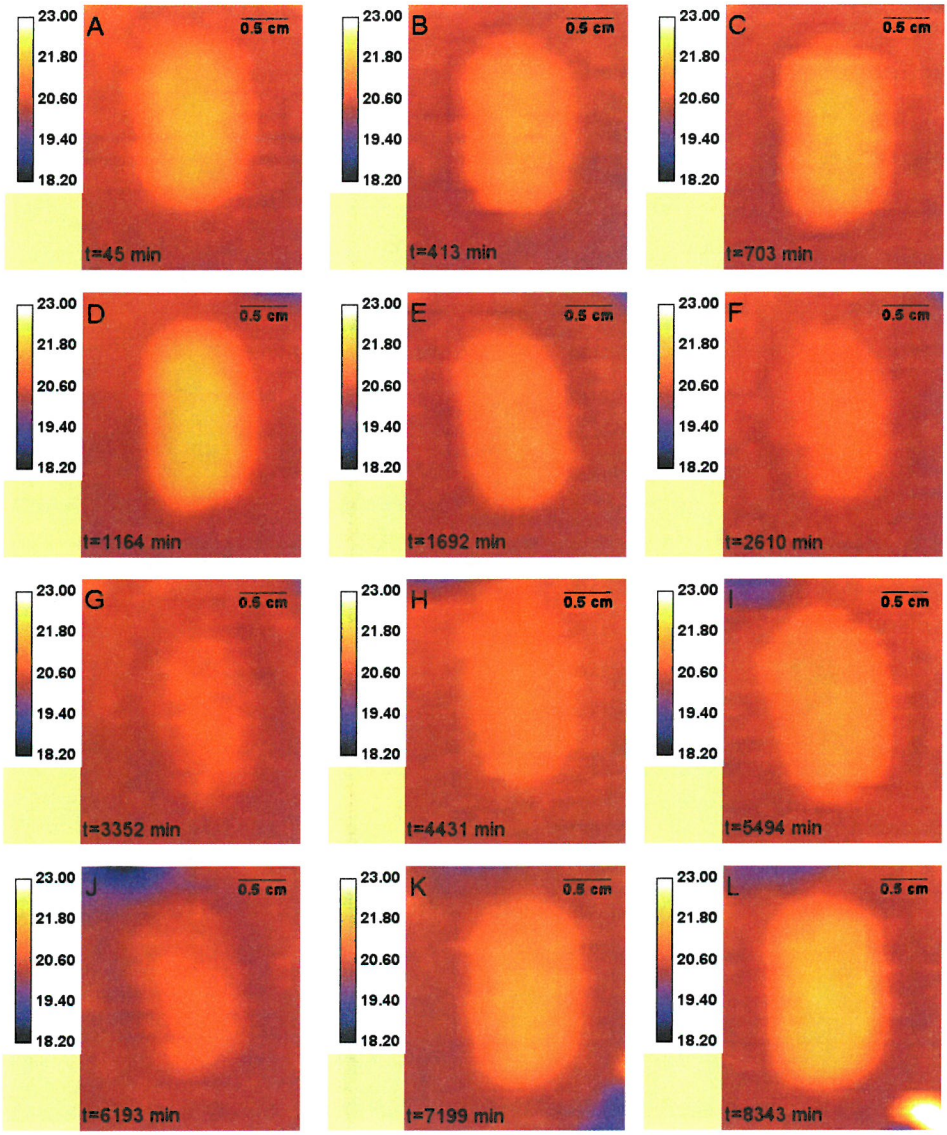
Rys. 32. Przykładowa prezentacja kolejnych etapów procedury segmentacji obrazu termalnego: A – oryginalny obraz po skalowaniu, B – obraz termalny po zastosowaniu korekcji kontrastu i jaskrawości, C – efekt progowania obrazu, D – usuwanie tła, E – obraz z wyodrębnionymi krawędziami powierzchni nasion po automatycznej numeracji, F – oryginalny obraz termalny z nałożoną maską

Fig. 32. Examplary presentation of subsequent stages of segmentation procedure for thermal image: A – original image after scaling, B – thermal image after applying correction of contrast and brightness, C – effect of thresholoding of image, D – removing background, E – image with selected edges of seed surface after automatic numeration, F – original thermal image with mask



Rys. 33. Termogramy powierzchni zdrowego nasienia fasoli wielokwiatowej 'Eureka' w kolejnych stadiach procesu kiełkowania

Fig. 33. Thermograms of the surface of healthy bean seed of 'Eureka' variety in consequent stages of germination process



Rys. 34. Termogramy powierzchni nasienia fasoli wielokwiatowej 'Eureka' niezdolnego do wyprodukowania kiełka w kolejnych stadiach etapach procesu pęcznienia

Fig. 34. Thermograms of the surface of bean seed of 'Eureka' variety which is unable to produce a healthy germ in consequent stages of germination process

Te statystyki wykonywano dla wszystkich obrazów poszczególnych sekwencji zmian temperatury nasion w czasie. Z uzyskanych w trakcie pomiarów temperatury radiacyjnej zobrazowań termalnych sporządzono wykresy zmian temperatury w czasie.

Celem przeprowadzonych badań było określenie zmian w czasie rozkładu temperatury radiacyjnej na powierzchni badanych nasion o zróżnicowanej zdolności kiełkowania. Termogramy na rysunkach 33 oraz 36 przedstawiają przykładowe nasienia fasoli wielokwiatowej odmiany 'Eureka' oraz grochu jadalnego 'Piast', z których wyrosły normalnie rozwinięte siewki. Natomiast termogramy na rysunkach 34 oraz 37 przedstawiają przykładowe nasiona tych samych odmian, które nie wytworzyły w trakcie procesu pęcznienia kiełka. Poszczególne termogramy zawierają w prawym górnym rogu skalę w centymetrach, natomiast w lewym dolnym rogu podany jest czas w minutach od momentu zapoczątkowania procesu pęcznienia. Z boku termogramu w lewym górnym rogu przedstawiono izotermy ze skalą temperatury. Wszystkie termogramy w obrębie każdej sekwencji mają tę samą skalę temperatury. Analiza termogramów wykazuje odmienne rozkłady temperatury radiacyjnej nasion mających i nie mających zdolności do wytworzenia kiełka.

W przypadku nasion, w których występuje normalny przebieg procesu kiełkowania we wstępnym etapie procesu pęcznienia (termogramy A-C na rys. 33 oraz A-E na rys. 36) obserwuje się stopniowe, równomierne dla całego nasienia obniżanie temperatury radiacyjnej. Etap ten dla przedstawionego nasienia fasoli trwał około 12 godz., a dla nasienia grochu około 28 godz.

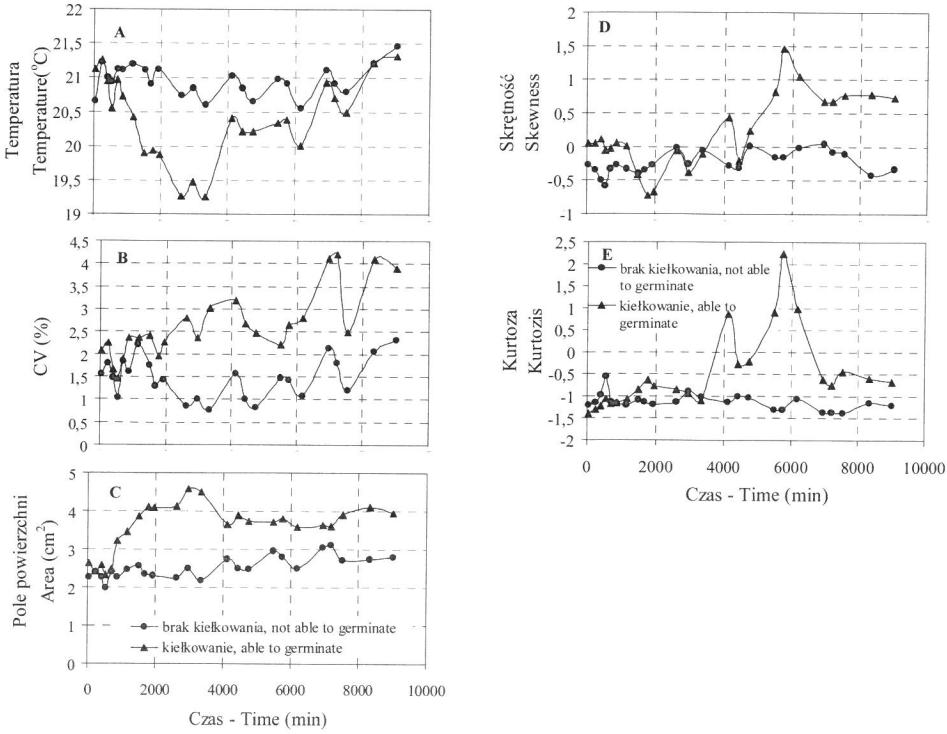
Na kolejnych termogramach pęcznienia (termogramy D-G na rys. 33 oraz F-J na rys. 36) obserwuje się wyraźne zróżnicowanie temperatury w obrębie tych dwóch nasion: na początku gwałtowny spadek temperatury w obszarze okienka i zarodka nasienia, a następnie w obszarze liścienia. Ten etap w przypadku nasienia fasoli trwał do około 56 godz., a w przypadku nasienia grochu do około 103 godz. od rozpoczęcia procesu pęcznienia. Kolejny etap to aktywacja zarodka i pojawienie się kiełka. Ten etap charakteryzował się gwałtownym wzrostem temperatury w obrębie zarodka. Temperatura wyłaniającego się kiełka jest wyższa od pozostałej części nasienia i wzrasta wraz z upływem czasu. Obrazy w przedstawionych sekwencjach rejestrowano do szóstej doby w przypadku nasion fasoli oraz grochu.

Zupełnie odmiennie wyglądały rozkłady temperatury radiacyjnej nasion fasoli i grochu, które w wyniku procesu pęcznienia nie wytworzyły kiełka. W ich przypadku obserwowano również niewielki spadek temperatury w niektórych okresach procesu pęcznienia, na skutek nasiąkania ich tkanek wodą (co widać na termogramach E-J na rys. 34 oraz E-H na rys. 37). Spadki temperatury są jednak znacznie mniejsze niż w przypadku nasion, które w wyniku procesu pęcznienia

wytworzyły kiełek. Jednocześnie obserwowano w przypadku tych nasion mniejsze zróżnicowanie temperatury w ich obrębie. Trudno tu wyróżnić obszary o wyraźnie niższej lub wyższej temperaturze.

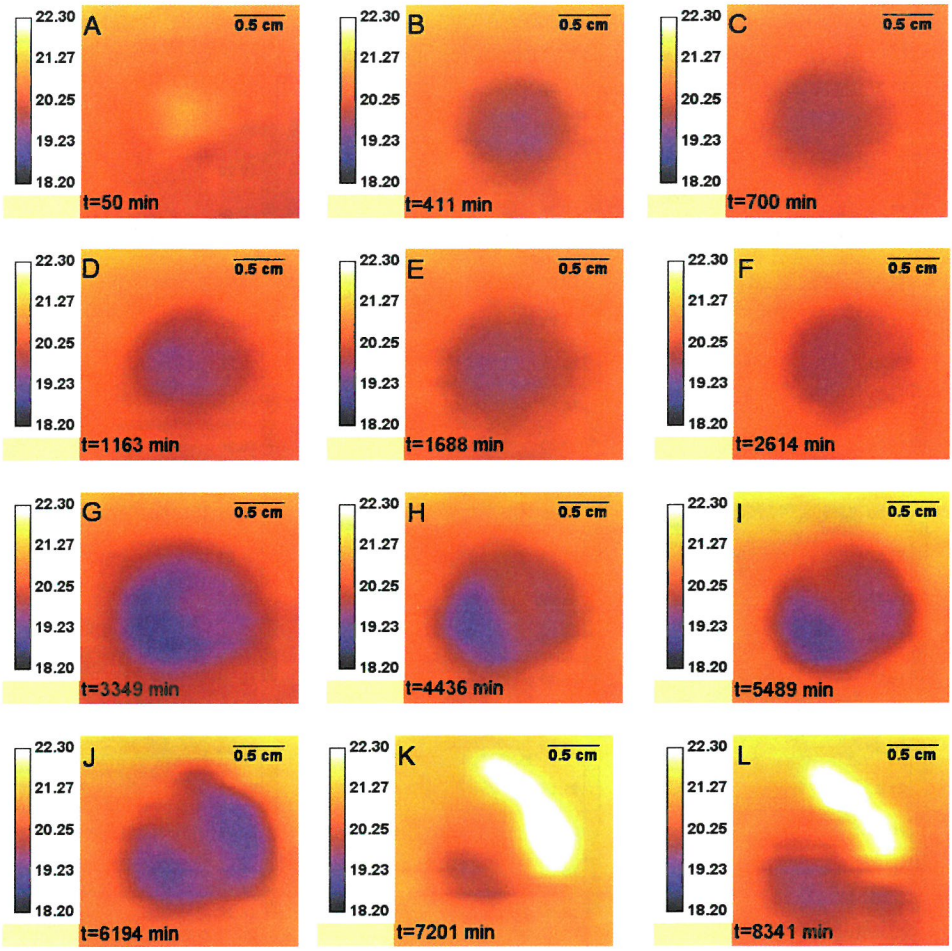
Obserwacje te świadczą o odmiennym mechanizmie pobierania i akumulacji wody przez poszczególne fragmenty nasion o normalnym przebiegu procesu kiełkowania oraz nasion pozbawionych zdolności kiełkowania.

Jednocześnie widać z termogramów nasion zdolnych do wytworzenia kiełka, że w obszarze zarodka występują najintensywniej procesy energetyczne, których tempo można rejestrować urządzeniem termograficznym. Z analizy literatury wynika, że wcześniej nie prowadzono tego typu badań, a mogą one rozszerzyć zakres wiedzy o procesach fizjologicznych i termodynamicznych zachodzących w kiełkujących nasionach.



Rys. 35. Przebiegi temperatury radiacyjnej i wielkości statystycznych dla powierzchni nasion fasoli wielokwiatowej 'Eureka': zdolnego i niezdolnego do wytworzenia kiełka w kolejnych stadiach procesu pęcznienia i kiełkowania

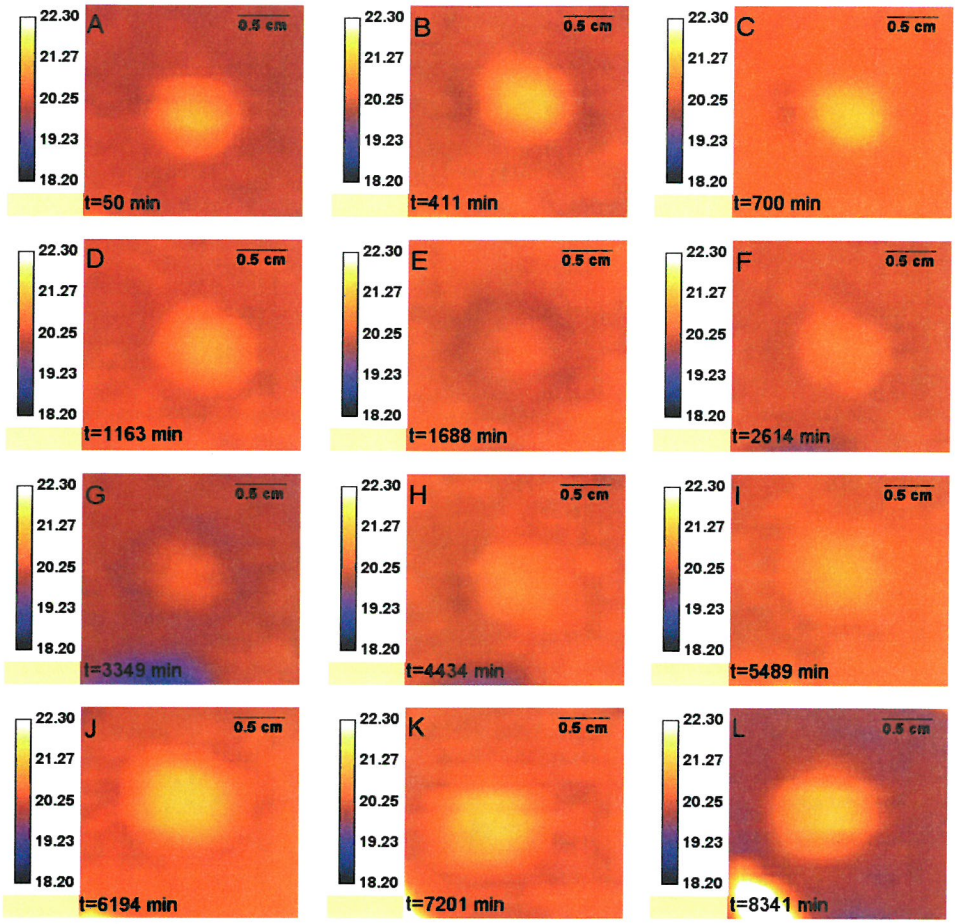
Fig. 35. Courses of radiation temperature and statistical quantities for surface of 'Eureka' bean seeds: able and not able to germinate in subsequent stages of swelling and germination process



Rys. 36. Termogramy powierzchni zdrowego nasienia grochu jadalnego odmiany 'Piast' w kolejnych stadiach procesu kiełkowania

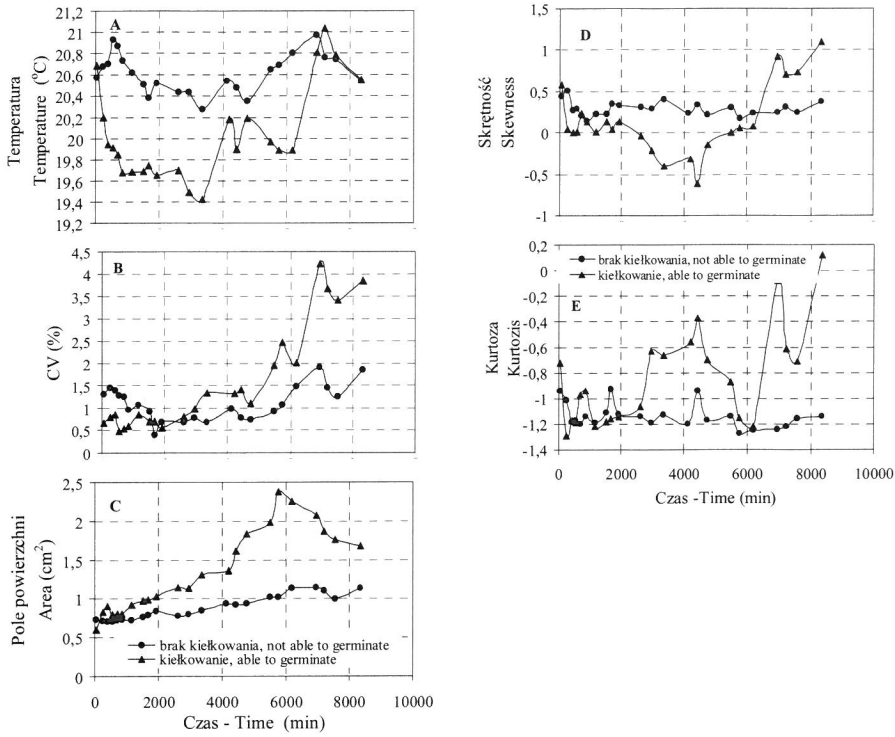
Fig. 36. Thermograms of the surface of healthy pea seed of 'Piast' variety in consequent stages of germination process

Ilościowa analiza zmian średnich wartości temperatury nasion w sekwencjach termogramów omówionych powyżej przedstawiona jest na rysunku 35 dla nasion fasoli wielokwiatowej 'Eureka' oraz na rysunku 38 dla nasion grochu jadalnego odmiany 'Piast'. Zarówno rozkład temperatury radiacyjnej powierzchni, jak i analogiczne przebiegi średnich wartości temperatury dla dwóch pozostałych odmian, tzn. fasoli zwyczajnej 'Aura' i grochu pastewnego 'Grapis', były bardzo zbliżone do zaprezentowanych w niniejszej pracy.



Rys. 37. Termogramy powierzchni nasienia grochu jadalnego odmiany 'Piast' niezdolnego do wyprodukowania kiełka w kolejnych stadiach etapach procesu pęcznienia
Fig. 37. Thermograms of the surface of pea seed of 'Piast' variety which is unable to produce a healthy germ in consequent stages of germination process

W przypadku nasienia fasoli oraz grochu, które wydało normalny kiełek zaobserwowano duży spadek średniej temperatury jego powierzchni w pierwszym okresie procesu pęcznienia. U nasion fasoli po około 30 godz. od momentu rozpoczęcia procesu pęcznienia wystąpiło krótkotrwałe ustabilizowanie się temperatury na poziomie około 19,9°C, a następnie dalszy jej spadek do wartości 19,25°C (rys. 35 A). Całkowity spadek średniej temperatury powierzchni nasienia fasoli w wyniku pęcznienia wyniósł 1,8°C.



Rys. 38. Przebiegi temperatury radiacyjnej i wielkości statystycznych dla powierzchni nasion grochu jadalnego 'Piast': zdolnego i niezdolnego do wytworzenia kiełka w kolejnych stadiach procesu pęcznienia i kiełkowania

Fig. 38. Courses of radiation temperature and statistical quantities for surface of 'Piast' pea seeds: able and not able to germinate in subsequent stages of swelling and germination process

Podobnie dla nasienia grochu w pierwszej fazie procesu pęcznienia (19 godz.) obserwowano spadek temperatury od 20,7 do 19,7°C, następnie krótkotrwałe ustabilizowanie się temperatury na tym poziomie (rodzaj plateau), po którym wystąpił dalszy spadek temperatury do wartości 19,4°C. Całkowity spadek średniej temperatury powierzchni nasienia grochu w wyniku pęcznienia wyniósł 1,2°C.

Po etapie spadku temperatury związanej z pęcznieniem i wydzielaniem ciepła parowania następował dla obu nasion okres wyraźnego wzrostu temperatury związany z aktywacją nasienia, a następnie wytworzeniem kiełka. Ten okres trwał do końca obserwowanych sekwencji.

Zupełnie inne przebiegi średnich wartości temperatury radiacyjnej powierzchni nasion zaobserwowano w przypadku nasion, które w konsekwencji procesu pęcznienia nie wytworzyły kiełka. Maksymalne wartości spadku temperatury nasienia fasoli w trakcie procesu pęcznienia wyniosły 0,5°C, natomiast nasienia grochu 0,7°C. Potwierdza to odmienny mechanizm i tempo pobierania wody przez nasiona mające odmienną zdolność kiełkowania.

Analizując współczynniki zmienności (CV) temperatury nasion na rysunkach 35 B oraz 38 B, można stwierdzić wyższe wartości tego parametru dla nasion, w których proces kiełkowania przebiegał prawidłowo. Istotne różnice wartości współczynnika zmienności (CV) temperatury powierzchni nasion fasoli zanotowano po 30 godz., a nasion grochu po 19 godz. od rozpoczęcia procesu pęcznienia.

Dla wyselekcjonowanych obszarów obejmujących widoczną na termogramach powierzchnię nasion dokonano analizy zmian w czasie pól tych powierzchni. W wyniku procedury skalowania możliwe było przedstawienie wartości tych pól nie tylko za pomocą ilości pikseli w danym polu, ale również w centymetrach kwadratowych. Z rysunku 35 C oraz 38 C wynika, że gwałtowniejszy wzrost pola powierzchni nasion fasoli i grochu występował dla nasion zdolnych do wytworzenia kiełka. Należy zauważyć odmienną dynamikę zmian tego parametru dla nasion fasoli i grochu. W przypadku nasion fasoli najgwałtowniejszy wzrost powierzchni nasienia zdolnego do wytworzenia kiełka występował we wcześniejszym okresie procesu pęcznienia (od 8 do 50 godz. od rozpoczęcia) niż u nasion grochu (od 67 do 100 godz.).

Dla wyselekcjonowanych metodą segmentacji powierzchni nasion przeprowadzono analizę rozkładów temperatury radiacyjnej w obrębach wyodrębnionych metodą segmentacji pól w poszczególnych etapach procesu pęcznienia. Dwie wielkości statystyczne pozwalają na analizę symetrii rozkładu oraz porównanie go z rozkładem normalnym. Są to skrętność (ang. skewness) oraz kurtoza (ang. kurtosis). Skrętność jest miarą symetrii rozkładu danych pomiarowych (w tym przypadku temperatury radiacyjnej) w obrębie pola. Skrętność definiuje się poprzez równanie:

$$skrętność = \frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - \overline{Y})^3}{(N-1)s^3}, \tag{28}$$

gdzie: Y – wartość średnia mierzonej wielkości, s – odchylenie standardowe, N – liczba danych. Rozkład lub zbiór danych jest symetryczny, jeżeli wygląda tak samo po lewej, jak i prawej stronie względem punktu centralnego. Ujemne

wartości skrętności wskazują, że histogram dla analizowanych danych ma dłuższy ogon z lewej strony niż z prawej, natomiast dodatnie wartości wskazują na dłuższy ogon histogramu po prawej stronie.

Kurtoza określa rozkład danych pomiarowych względem rozkładu normalnego. Wielkość nadmiarową kurtozy w stosunku do rozkładu normalnego tę określa wzór:

$$kurtoza = \frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - \bar{Y})^4}{(N-1)s^4} - 3 \qquad (29)$$

W tym ujęciu rozkład normalny ma wartość kurtozy równą zero. Zbiór danych z wysoką wartością kurtozy dąży do tego, aby mieć rozkład z wyraźnym wierzchołkiem blisko wartości średniej i długim ogonem po obu stronach.

Dla analizowanych powierzchni nasion fasoli i grochu o zróżnicowanej zdolności kiełkowania stwierdzono wartości skrętności bliskie zera (rys. 35 D oraz 38 D), co jest charakterystyczne dla rozkładu normalnego. Wyjątek stanowi końcowa faza procesu pęcznienia, gdzie wartości tego parametru dla nasion fasoli i grochu zdolnych do wytworzenia kiełka nieznacznie wzrosły, nie przekraczając wartości 1,5.

Podobnie jak skrętność, kurtoza dla badanych rozkładów temperatury nasion fasoli i grochu wykazywała niewielkie wartości (w tym przypadku ujemne), co również potwierdza niewielkie odstępstwa badanych rozkładów od rozkładu normalnego. Podobnie jak w przypadku skrętności, zanotowano niewielki wzrost wartości kurtozy w późnym etapie kiełkowania nasion o wysokiej zdolności kiełkowania. Dla nasion grochu i fasoli, które nie wytworzyły zdrowego kiełka, wartości kurtozy zmieniały się nieznacznie w trakcie pęcznienia wokół wartości -1 (rys. 35 E oraz 38 E).

4.3.4. Rozkład temperatury radiacyjnej nasion w fazie imbibicyjnej procesu pęcznienia jako wskaźnik zdolności kiełkowania

Jedną z hipotez było to, że nasiona pochodzące z różnych lat zbioru mogą się różnić sposobem pobierania i wiązania przez komórki wody w trakcie procesu pęcznienia, co może mieć również wpływ na różnice w ich zdolności kiełkowania. Liczne wcześniejsze badania potwierdziły, że długość i sposób przechowywania nasion ma istotny wpływ na ich późniejszą zdolność kiełkowania (Dąbrowska i in. 2000, Woyke 1987, Zhou i in. 1999). Zmniejszanie się żywotności nasion wraz z upływem czasu spowodowane jest utlenianiem się materiałów zapasowych, przez co zarodek ma ograniczony dostęp do związków odżywczych.

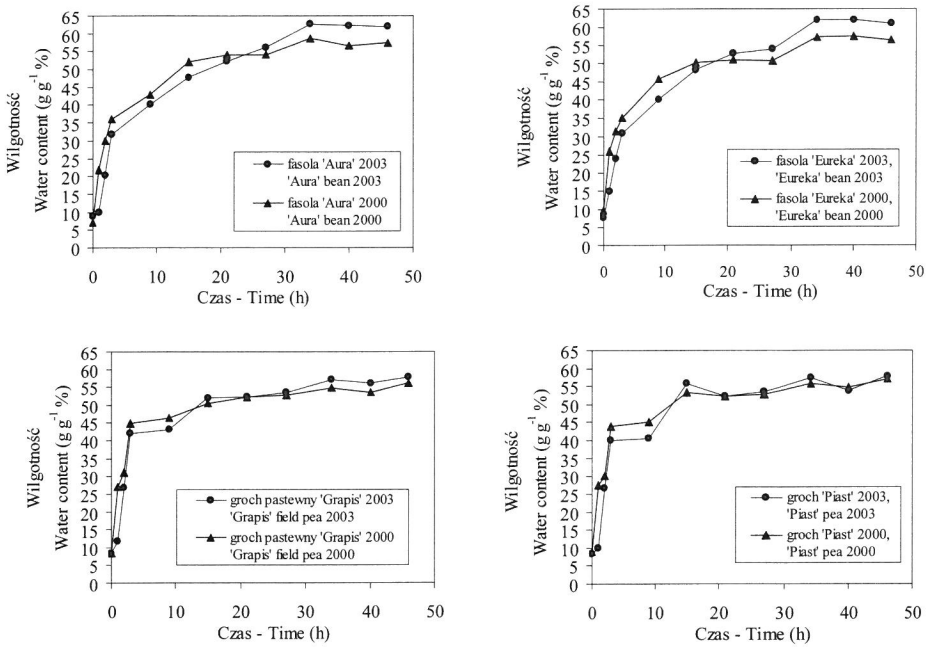
Wykazano, co prawda, że nasiona przechowywane w odpowiednich warunkach utrzymują przez około 3 lata zdolność kiełkowania na poziomie zbliżonym do wartości początkowej, ale niewielkie nawet odstępstwa od optymalnych warunków temperatury i wilgotności powietrza w okresie ich przechowywania mają istotny wpływ na pogorszenie się tej zdolności (Kopcewicz i Lewak 2002).

W badaniach założono również, że metoda termograficzna wykaże swoją przydatność do oceny zdolności kiełkowania nasion przez wykazywanie różnic temperatury radiacyjnej między poszczególnymi nasionami już w fazie imbibicyjnej i aktywacyjnej procesu kiełkowania. Wówczas to spodziewano się zaobserwować na termogramach duże gradienty temperatury powodowane aktywnością enzymatyczną oraz zmianami wilgotności potencjału wody w nasionach. Dlatego dla badanych odmian pochodzących z lat zbioru 2000 i 2003 analizowano zmiany wilgotności i potencjału we wczesnych etapach procesu kiełkowania.

Wyniki przedstawione są na rysunkach 39 i 40. Dotyczą one pierwszych 45 godz. procesu pęcznienia, czyli okresu, w którym próbowano zbadać przydatność analizy termograficznej do oceny zdolności kiełkowania nasion. Wartości wilgotności i potencjału przedstawione na tych wykresach stanowią średnie z trzech pomiarów.

Większe różnice wartości wilgotności i potencjału wody w komórkach nasion z dwóch różnych lat zbioru stwierdzono dla fasoli obu odmian. Maksymalne różnice wilgotności nasion fasoli 'Eureka' i 'Aura' wynosiły ok. 5% w okresie pomiędzy 30. a 40. godz. procesu pęcznienia. Największe różnice wilgotności dla badanych nasion odmian grochu jadalnego 'Piast' i pastewnego 'Grapis' wyniosły ok. 3% pomiędzy 3. i 10. godz. procesu pęcznienia.

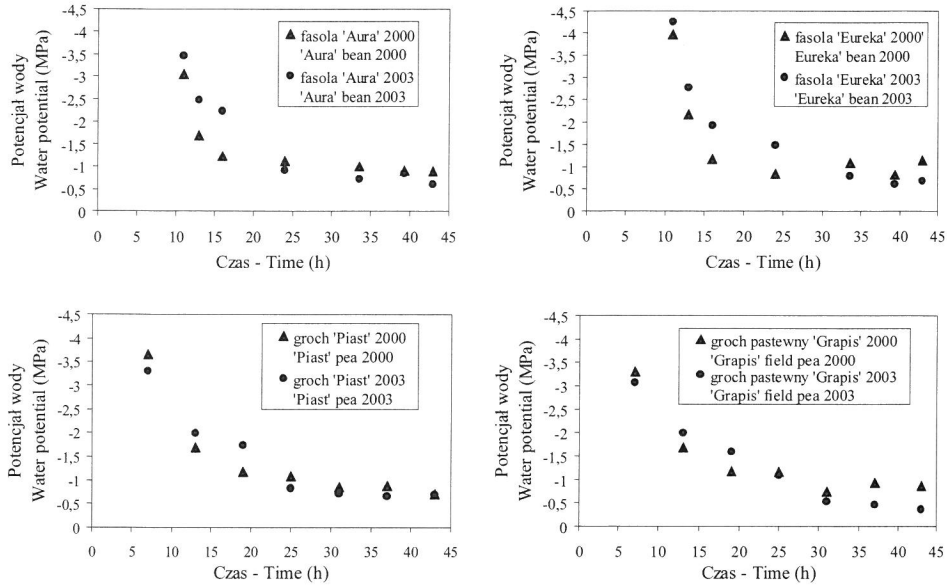
W przebiegu zmian wilgotności nasion wszystkich badanych odmian zaobserwowano najgwałtowniejszy wzrost w pierwszych pięciu godzinach procesu pęcznienia. W przebiegach zmian wilgotności nasion obu odmian fasoli stwierdzono, że w pierwszej fazie pęcznienia nasiona młodsze wykazywały niższe wartości wilgotności (dla nasion fasoli wielokwiatowej 'Eureka' do ok. 18. godz. Procesu pęcznienia, a dla nasion fasoli zwyczajnej 'Aura' do ok. 22 godz.), a w późniejszej fazie tego procesu nasiona te miały wyższe wartości wilgotności w stosunku do nasion starszych. Podobne przebiegi zmian wilgotności zaobserwowano dla nasion obu odmian grochu. Jednak moment, kiedy przebiegi wilgotności starszych i młodszych nasion przecinają się występuje po ok. 13 godz. ('Piast') i 15 ('Grapis').



Rys. 39. Zmiany wilgotności w nasionach badanych odmian pochodzących z dwóch terminów zbioru

Fig. 39. Changes of water content in seeds of investigated varieties coming from two different years of harvest

Przyrząd do pomiaru potencjału wody w nasionach pozwala na pomiar w zakresie od 0 do – 4,5 MPa. W związku z tym we wczesnej fazie procesu pęcznienia nasion przy niskich wartościach zawartości wody w tkankach nasion niemożliwe było prowadzenie pomiarów tej wielkości. Dla nasion fasoli obu odmian zmiany wartości potencjału zarejestrowano od 10 godz. procesu pęcznienia, a dla nasion grochu od 5 godz. Zaobserwowano większe różnice wartości potencjału wody między nasionami z obu terminów zbiorów w przypadku nasion fasoli. Podobnie jak w przypadku przebiegów wilgotności nasion, w pomiarach potencjału stwierdzono momenty przecięcia się przebiegów potencjału wody w nasionach dla nasion z różnych lat zbiorów. Dla nasion zarówno fasoli, jak grochu moment ten wystąpił ok. 25 godz. procesu pęcznienia Dla większości tych przebiegów charakterystyczne jest również to, że w pierwszym etapie procesu pęcznienia potencjał wody w nasionach młodszych przyjmuje mniejsze wartości bezwzględne, a po 25 godz. procesu pęcznienia wyższe wartości bezwzględne potencjału stwierdzono dla nasion starszych (rys. 39).



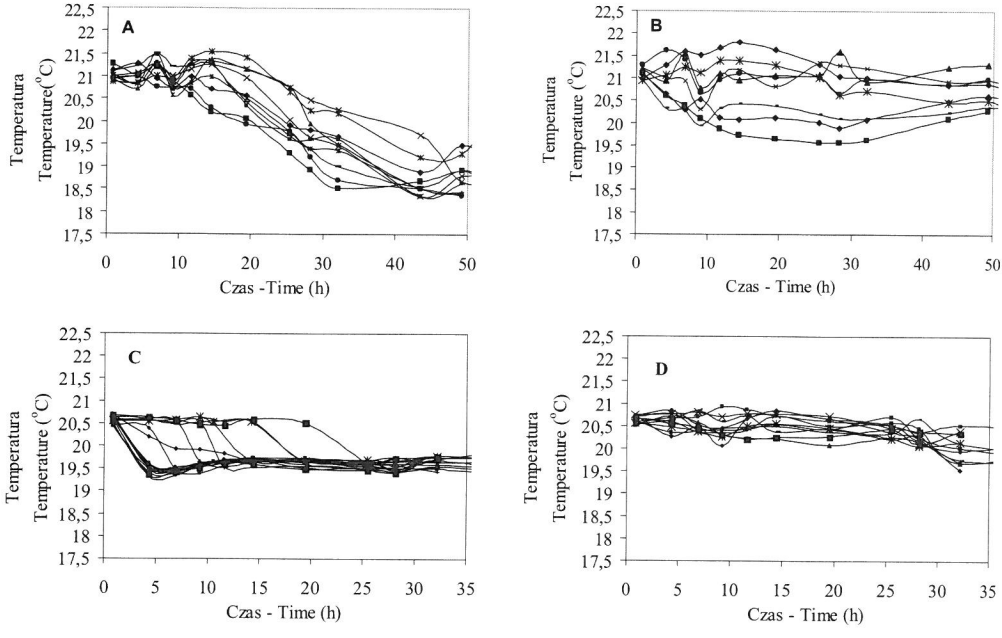
Rys. 40. Zmiany całkowitego potencjału wody w nasionach badanych odmian pochodzących z dwóch terminów zbioru

Fig. 40. Changes of total water potential in seeds of investigated varieties coming from two different years of harvest

Analiza zmian potencjału wody i wilgotności w nasionach potwierdza różnice intensywności imbibicyjnej nasion pochodzących z różnych terminów zbiorów. Wykresy zmian temperatury radiacyjnej wybranych nasion fasoli i grochu zdolnych i pozbawionych możliwości wytworzenia zdrowego kiełka (rys. 35 i 38) wskazywały na zupełnie odmienną reakcję temperaturową nasion o różnej zdolności kiełkowania w tym okresie. Dlatego przeanalizowano szczegółowo przebiegi zmian temperatury radiacyjnej w procesie pęcznienia dla kilkuset nasion zdolnych do kiełkowania oraz nasion niekiełkujących.

Przykład takiej analizy dla jednego zestawu pomiarowego przedstawiono na rysunku 41. Na rysunkach A i C przedstawiono takie przebiegi dla kiełkujących nasion fasoli odmiany 'Eureka' i grochu odmiany 'Piast', a na rysunkach B i D dla nasion odpowiednich odmian, które nie skiełkowały. Dla nasion, które skiełkowały stwierdzono w pierwszych 50 godz. procesu pęcznienia spadek tempera-tury o co najmniej 2°C dla nasion fasoli i 1°C dla nasion grochu. Przedział temperatur, w którym znalazły się nasiona fasoli o zdolności do wykiełkowania, po pierwszych 45 godz. pęcznienia wyniósł od 18,2 do 19,5°C. Natomiast analogiczny przedział temperatur dla nasion grochu zdolnych do

wykiełkowania wynosił od 19,4 do 19,6°C po pierwszych 35 godzinach procesu kiełkowania.



Rys. 41. Zmiany temperatury radiacyjnej nasion we wczesnym etapie kiełkowania dla: A – nasion fasoli o wysokiej zdolności kiełkowania, B – nasion fasoli, które nie wykiełkowały, C – nasion grochu o wysokiej zdolności kiełkowania, D – nasion grochu, które nie wykiełkowały

Fig. 41. Changes of radiation temperature of seed in the initial stage germination for: A – seeds of bean with high germination capacity, B – bean seed incapable to germinate, C – seeds of pea with high germination capacity, D – seeds of pea incapable to germinate

Dla nasion fasoli, które nie wykazały zdolności do wytworzenia kiełka (rys. 41B), maksymalny spadek temperatury w ciągu pierwszych 45 godz. procesu pęcznienia nie przekroczył 1°C, a więc był dwukrotnie mniejszy niż dla nasion, które skiełkowały. Również przedział temperatur po pierwszych 45 godz. procesu pęcznienia był zupełnie inny niż dla nasion, które wydały kiełek i wynosił od 20,3 do 21,3°C.

Nasiona grochu, które nie skiełkowały, wykazywały w ciągu pierwszych 35 godz. procesu pęcznienia spadek temperatury maksymalnie do 0,7°C. Przedział temperatur powierzchni nasion po pierwszych 35 godz. procesu pęcznienia był

dla nasion grochu, które nie skiełkowały również zupełnie inny, niż dla nasion, które wydały kiełek i wynosił od 19,8 do 20,5°C.

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji przyjęto hipotezę, że dwa parametry związane z rejestracją termograficzną w warunkach eksperymentu, a więc minimalny spadek temperatury w ciągu pierwszych 45 godz. dla nasion fasoli i 35 godz. dla nasion grochu oraz przedział temperatur po pierwszych 45 godz. dla nasion fasoli i 35 godz. dla nasion grochu są wystarczające, aby dokonać selekcji nasion na posiadające lub pozbawione zdolności do kiełkowania.

W tabelach 5 oraz 6 przedstawiono wartości tych parametrów, przyjęte dla nasion posiadających zdolność do skiełkowania dla badanych odmian fasoli i grochu oraz wyniki testu predykcji zdolności nasion do kiełkowania przeprowadzone na podstawie pomiaru temperatury radiacyjnej powierzchni nasion w pierwszym etapie procesu pęcznienia.

Niezależnie od wieku nasion (analizowano nasiona przechowywane przez 4 lata i jeden rok) otrzymano stosunkowo wysoką poprawność predykcji zdolności nasion do kiełkowania wynoszącą dla nasion fasoli od 84,5 do 88,4%, a dla nasion grochu od 83,4 do 89,1%. Przyjęty sposób selekcji nasion grochu i fasoli na podstawie analizy zmian temperatury radiacyjnej w pierwszych kilkunastu godzinach procesu pęcznienia nie daje stuprocentowej zdolności predykcyjnej. Tak więc zdarzało się dla mniej niż 20% nasion, że reakcja temperaturowa nasion na procesy początkujące kiełkowanie występowała po czasie przyjętym w teście (45 godz. dla nasion grochu i 35 godz. dla nasion fasoli). Z drugiej strony wydaje się obiecujące to, że bez prowadzenia żadnych innych testów nasion, takich jak testy morfologiczne lub test tetrazolinowy, możliwa jest ponad 80% poprawność predykcji, czy nasienie wytworzy czy też nie wytworzy kiełek już po pierwszych kilkunastu godzinach testu.

Na podstawie przeprowadzonych badań rozkładu temperatury radiacyjnej nasion w procesie kiełkowania dla badanych odmian wydaje się niemożliwe skrócenie czasu tego testu w stosunku do czasów zaproponowanych w tabelach 5 i 6. Wynika to z tego, że we wcześniejszym okresie pęcznienia zarejestrowano duże różnice temperatury radiacyjnej pomiędzy nasionami każdej z badanych odmian i dlatego niemożliwym jest wówczas wyodrębnienie przedziałów temperatury, które mogą być podstawą do ich selekcji pod kątem zdolności kiełkowania.

Tabela 5. Parametry pozwalające określać zdolność kiełkowania nasion fasoli dwóch badanych odmian po pierwszych 45 godz. od rozpoczęcia procesu pęcznienia oraz poprawność predykcji ich zdolności kiełkowania na podstawie danych termograficznych
Table 5. Parameters which enable to determine the germination capacity of seeds of two investigated varieties of bean after first 45 hours from the beginning of the swelling process and correctness of their germination capacity prediction on the base of thermographic data

Odmiana Variety	Min. spadek temp. w ciągu pierwszych 45 godz. procesu pęcznienia Min. temp. decrease in first 45 h of swelling process (°C)	Przedział temperatur po pierwszych 45 godz. procesu pęcznienia Temperature range after 45 h of swelling process (°C)	Poprawność predykcji zdolności nasion do kiełkowania Accuracy of prediction of seed germination capacity (%)	
			nasiona z 2000 seed from 2000 (N = 100)	nasiona z 2003 seed from 2003 (N = 100)
Fasola wielokwiatowa 'Eureka' 'Eureka' bean	2	18,2-19,5	87,2	88,4
Fasola zwykła 'Aura' 'Aura' bean	2	18,2-19,5	84,5	87,9

Zaproponowana metoda termograficzna została przetestowana na nasionach dwóch odmian fasoli i dwóch odmian grochu. Koniecznym wydaje się w kontekście szerszego jej zastosowania zbadanie również dla innych odmian okresu, po którym występuje różnica zakresów temperatur dla nasion o różnej zdolności kiełkowania. Dopiero te szczegółowe badania pozwolą traktować metodę termograficzną jako uzupełniającą, a w niektórych przypadkach nawet zastępującą standardowy test zdolności kiełkowania. Badania takie oraz wdrożenie opatentowanej w Instytucie Agrofizyki metody określania zdolności kiełkowania na podstawie rozkładu temperatury radiacyjnej nasion w procesie pęcznienia powinny być kontynuowane.

Parametrem, który daje informację o zdolności nasion do szybkiego kiełkowania, jest energia kiełkowania. Określa się ją jako procent nasion, które kiełkują wciągu krótkiego czasu (3-10 dni). Energia kiełkowania jest istotnym wskaźnikiem ich żywotności. W przeprowadzonych badaniach zdecydowano się porównać wyniki testu termograficznego ze standardowym testem zdolności kiełkowania wg ISTA.

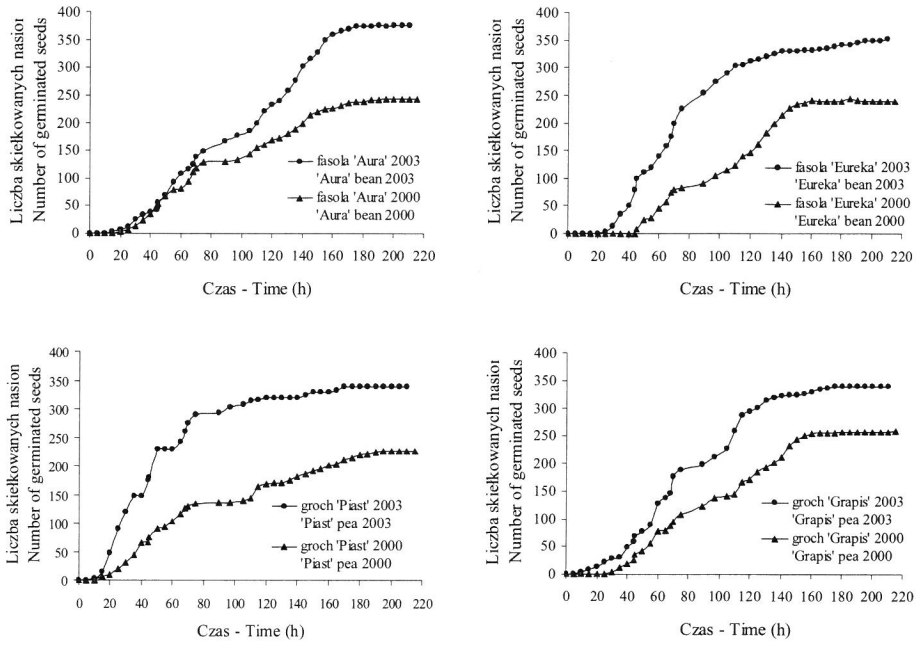
Tabela 6. Parametry pozwalające określać zdolność kiełkowania nasion grochu dwóch badanych odmian po pierwszych 24 godz. od rozpoczęcia procesu pęcznienia oraz poprawność predykcji ich zdolności kiełkowania na podstawie danych termograficznych
Table 6. Parameters which enable to determine the germination capacity of seeds of two investigated varieties of pea after first 24 hours from the beginning of the swelling process and correctness of their germination capacity prediction on the base of thermographic data

Odmiana Variety	Min. spadek temp. w ciągu pierwszych 24 godz. procesu pęcznienia Min. temp. decrease in first 24 h of swelling process (°C)	Przedział temperatur po pierwszych 24 godz. procesu pęcznienia Temperature range after 24 h of swelling process (°C)	Poprawność predykcji zdolności nasion do kiełkowania Accuracy of prediction of seed germination capacity (%)	
			nasiona z 2000 seed from 2000 (N = 100)	nasiona z 2003 seed from 2003 (N = 100)
Groch 'Piast' 'Piast' pea	1	19,4-19,6	87,6	89,1
Groch pastewny 'Grapis' 'Grapis' field pea	1	19,4-19,6	83,4	86,2

Ponieważ zaletą testu termograficznego jest możliwość predykcji zdolności kiełkowania we wczesnych fazach pęcznienia nasion porównano wartość energii kiełkowania jako procent skiełkowanych nasion po 72 godz. trwania obu testów dla nasion pochodzących z dwóch różnych lat zbiorów.

Na rysunku 42 przedstawiono wyniki standardowego testu kiełkowania dla nasion badanych odmian z 2000 i 2003. Stwierdzono w tym teście różnice zarówno zdolności kiełkowania, jak i energii kiełkowania nasion pochodzących z różnych terminów zbiorów.

Zastanawiające jest stosunkowo duże obniżenie zdolności kiełkowania nasion zarówno fasoli, jak i grochu po trzech i pół roku przechowywania. Z jednej strony pozwoliło to na porównanie nasion o zdecydowanie różnej zdolności i energii kiełkowania, z drugiej zaś strony powstaje pytanie na temat pełnej historii zbioru i przechowywania nasion, które powinny utrzymywać prawie stuprocentową zdolność kiełkowania przez znacznie dłuższy okres.



Rys. 42. Doświadczalne dane liczby kiełkowań nasion badanych odmian pochodzących z dwóch różnych lat zbioru uzyskane w temperaturze eksperymentu (25°C)
Fig. 42. Experimental data of germination number of studied varieties coming from two different years of harvesting obtained in the temperature of experiment (25°C)

W tabeli 7 przedstawiono procentowe wartości energii kiełkowania dla nasion badanych odmian w teście standardowym dla 400 nasion oraz w teście termograficznym dla 100 nasion. Porównanie obu testów dla nasion pochodzących z różnych terminów, wykazało wysoką ich zgodność. Różnice wartości energii kiełkowania wyznaczonych przy wykorzystaniu obu metod nie przekraczały kilku procent. Oznacza to, że zaproponowana metoda termograficzna posiada większą zdolność predykcyjną przy określaniu energii kiełkowania niż zdolności kiełkowania nasion. Z tabeli 7 wynika, że dla wszystkich odmian nasion przechowywanych jeden rok po zbiorze, wartości energii kiełkowania uzyskane w teście termograficznym są nieco wyższe niż w teście standardowym. Natomiast dla nasion przechowywanych trzy i pół roku, w przypadku odmiany fasoli 'Aura' oraz grochu 'Piast test termograficzny dał niższe wartości niż metoda standardowa.

Tabela 7. Porównanie energii kiełkowania E_I badanych odmian fasoli i grochu otrzymane w standardowym teście i na podstawie danych termograficznych uzyskanych we wczesnym etapie procesu pęcznienia

Table 7. Comparison of germination energy E_I of investigated varieties of bean and pea obtained in standard test and on the base of thermographic data in early stage of swelling process

Odmiana Variety	Energia kiełkowania – Energy of germination E_I (%)			
	nasiona 2000 seeds from 2000		nasiona 2003 seeds from 2003	
	test standardowy standard test N = 400	test termograficzny thermographic test N = 100	test standardowy standard test N = 400	test termograficzny thermographic test N = 100
Fasola wielokwiatowa 'Eureka' 'Eureka' bean	31	35	76	81
Fasola zwykła 'Aura' 'Aura' bean	39	37	50	54
Groch 'Piast' 'Piast' pea	36	31	79	81
Groch pastewny 'Grapis' 'Grapis' pea	36	38	65	70

Celowym wydaje się kontynuowanie badań termograficznych energii kiełkowania nasion innych odmian według opracowanej procedury, gdyż zaproponowana metoda charakteryzująca się dużą dokładnością predykcji energii kiełkowania, nie wymaga analizy dużej ilości nasion i o połowę skraca czas trwania testu. Może ona okazać się szczególnie przydatna w przypadku nasion rzadkich, gdzie nie dysponuje się odpowiednio licznym materiałem do testów.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały przydatność termografii do określania wybranych cech jakościowych owoców i nasion. Zaprezentowane wyniki badań nad wczesną detekcją obić jabłek, wykrywaniem szklistości miąższu oraz oceną zdolności kiełkowania nasion strączkowych potwierdziły hipotezę, że wewnętrzne defekty i zaburzenia fizjologiczne owoców, jak i procesy biochemiczne powodujące obniżenie żywotności nasion, prowadzą do zmian właściwości cieplnych wewnątrz tych obiektów. Podczas pobudzenia cieplnego, niejednorodności właściwości cieplnych powodują powstawanie na powierzchni tych materiałów kontrastów termicznych, które mogą być skutecznie rejestrowane urządzeniem termograficznym.

Zadowalające rezultaty identyfikacji obić we wczesnej fazie po ich powstaniu (od 1 do 10 godzin) otrzymano stosując jednosekundowy impuls cieplny lampami o łącznej mocy 1000 W, a optymalny czas tego impulsu przy tej mocy lamp to 3 sekundy. W przypadku zastosowania większej mocy impulsu ten czas może być znacznie skrócony. Odrzucona została obawa, że zastosowanie termografii dynamicznej (zadanie impulsu cieplnego) może spowodować znaczy wzrost temperatury wewnątrz owocu, powodując obniżenie jego jakości. Zarówno badania modelowe, jak i przeprowadzone pomiary, wykazały, że impuls o czasie od jednej do trzech sekund powoduje na powierzchni wzrost temperatury zaledwie o 3-4°C, natomiast dzięki dużej pojemności cieplnej skórki owocu temperatura ta nie wzrasta w jego wnętrzu powyżej 1°C. Metoda jest stosunkowo szybka i pozwala odróżnić defekty występujące na różnej głębokości w miąższu.

W przeprowadzonych badaniach opracowano pełną procedurę rejestracji i analizy sekwencji obrazów termograficznych. Pomimo, że defekty w postaci obić obserwowane są w większości przypadków już w czasie zadawania impulsu cieplnego, zastosowanie analizy Fouriera oraz analiza amplitudogramów i fazogramów odpowiedzi cieplnej pozwalają wyeliminować z obrazów termograficznych kontrasty powstałe na skutek niejednorodnego oświetlenia obiektu oraz wyróżnić defekty występujące na różnych głębokościach. Dodatkową poprawę kontrastu termalnego między częścią obitą i nie obitą uzyskano poprzez zastosowanie rekonstrukcji sygnału termograficznego (TSR). Zastosowanie tej metody pozwala również na znaczne zmniejszenie pamięci komputerowej koniecznej do przetwarzania sekwencji termogramów.

Pomiar termograficzny zmian temperatury radiacyjnej na powierzchni jabłek podczas ich krótkotrwałego ogrzewania został z powodzeniem zastosowany do selekcji owoców z zaburzeniem fizjologicznym szklistości. Stosunek pochodnej

temperatury powierzchni owocu po czasie do jego masy jest dobrym parametrem oceny zróżnicowania właściwości cieplnych jabłek z objawami szklistości i bez nich. Gradient temperatury 18,5°C pomiędzy powierzchnią owocu i otaczającym powietrzem jest wystarczający do odróżnienia różnic tempa ogrzewania jabłek z objawami szklistości i bez nich. Rozważne zwiększenie tego gradientu umożliwiłoby znaczne skrócenie czasu testu. Wyniki pomiaru wskazują, że zmiany temperatury radiacyjnej jabłek w pierwszej fazie ogrzewania (w warunkach przeprowadzonego doświadczenia był to czas pomiędzy 0 i 20 minutą ogrzewania) mają decydujące znaczenie dla wyodrębnienia jabłek z objawami szklistości. Tempo wzrostu temperatury w stosunku do masy dla jabłek ze szklistością było w początkowych etapach ogrzewania znacznie mniejsze niż dla jabłek bez symptomów szklistości, niezależnie od tego temperaturę której części owocu analizowano. Zaletą zaproponowanej metody selekcji jabłek ze szklistością jest to, że do testu wymagane są jedynie dane dotyczące masy owocu oraz zmiany rozkładu temperatury radiacyjnej na powierzchni owocu w czasie ogrzewania.

Zaprezentowane w pracy wyniki wskazują na przydatność metody termograficznej do określania zdolności kiełkowania nasion roślin strączkowych. Opracowana metoda umożliwia określanie średniej temperatury nasion i ich części. Zastosowanie automatycznej segmentacji obrazu pozwala na wyodrębnienie w obszarze termogramów pól reprezentujących poszczególne nasiona. Analiza zmian rozkładu temperatury powierzchni nasion wykazuje występowanie znacznych różnic tego parametru w poszczególnych fazach procesu kiełkowania. W warunkach doświadczenia nasiona zdolne do kiełkowania charakteryzują się wyraźnym spadkiem temperatury w pierwszym etapie procesu pęcznienia (dla nasion fasoli 2°C w ciągu pierwszych 45 godzin, a dla nasion grochu 1°C w ciągu pierwszych 24 godzin), co może być wskaźnikiem ich zdolności kiełkowania (energii kiełkowania). Zostało to potwierdzone wysoką zgodnością z klasyczną metodą testu kiełkowania.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. **Temperatura radiacyjna powierzchni nasion i owoców jest dobrym parametrem oceny ich jakości. Opracowana nowatorska metoda pomiaru tego parametru w oparciu o termografię pasywną i aktywną stwarza możliwość uzupełnienia istniejących nieniszczących automatycznych metod selekcji płodów rolnych.**
2. Stwierdzono przydatność metody termografii fazowo-impulsowej (PPT) do identyfikacji obić jabłek. Badania modelowe rozchodzenia się ciepła w owocu pozwoliły na dobranie optymalnych parametrów rejestracji termograficznej przy zastosowaniu tej metody.
3. Analiza związku tempa ogrzewania jabłek z parametrami fizycznymi ich jakości wykazała, że wraz ze wzrostem zawartości ekstraktu i gęstości następuje spadek wartości pochodnej temperatury radiacyjnej powierzchni jabłka po czasie w odniesieniu do jednostki masy, zarówno dla owoców z objawami szklistości, jak i bez nich. Stwierdzono lepszą korelację tego parametru z gęstością. Nie stwierdzono natomiast znaczącej korelacji pomiędzy jędrnością miąższu a wartościami pochodnej temperatury radiacyjnej powierzchni jabłka po czasie w odniesieniu do jednostki masy.
4. Opracowana procedura analizy pojedynczych termogramów i ich sekwencji umożliwia automatyczną selekcję nasion o obniżonej zdolności kiełkowania. Termograficzna metoda oceny zdolności kiełkowania znacznie skraca czas testu w stosunku do metody standardowej ISTA.
5. Wykorzystanie systemu termografii aktywnej opracowanego w trakcie realizacji badań daje nową jakość w aplikacji metod „widzenia komputerowego" do identyfikacji i klasyfikacji zaburzeń i defektów płodów rolnych, co w przypadku wdrożenia tej metody do automatycznych systemów sortowniczych przyniesie znaczące korzyści ekonomiczne.

7. PIŚMIENNICTWO

Abbott J.A., 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biol. Technol., 15, 207-225.

Armstrong P.R., Zapp H.R., Brown G.K., 1990. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples firmness determination. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 33, 1353-1359.

Argenta L., Fan X., Mattheis J., 2002. Impact of watercore on gas permeance and incidence of internal disorders in 'Fuji' apples. Postharvest Biol. Technol., 24, 113-122.

Babicz Zielinska E., 1999. Food preferences among the Polish young adults. Food Qual. Pref., 10 (2), 139-145.

Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T., 2003. The use of thermography for pre-sowing evaluation of seed germination capacity. Acta Hort., 604, 2, 459-465.

Baranowski P., Lipecki J., Mazurek W., Walczak R.T., 2005a. Detekcja uszkodzeń mechanicznych jabłek z wykorzystaniem termografii. Acta Agrophysica, 125, 19-30.

Baranowski P., Lipecki J., Mazurek W., Walczak R.T., 2005b. Laboratoryjne badania nad możliwością wykorzystania temperatury powierzchni owoców do określania intensywności parowania jako istotnego parametru oceny jakości owoców. Acta Agrophysica, 126, 307-318.

Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T., 2002. Obserwacje termograficzne nasion we wstępnej fazie ich pęcznienia. V Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Podczerwieni, Ustroń, 14-16.11.

Baranowski P., Lamorski K., Mazurek W., Walczak R.T., 2004. Determination of energetic status and evaporation from porous bodies on the base of infrared imaging. In: Soil-plant-atmosphere aeration and environmental problems, Eds by J. Gliński, G. Józefaciuk, K. Stahr, Lublin – Stuttgart, 111-117.

Baranowski P., Lipecki J., Mazurek W., Walczak R.T., 2007. Detection of watercore in 'Gloster' apples using thermography. Postharvest Biol. Technol., doi:10.1016/j.postharvbio.2007.07.014.

Baritelle L.A., Hyde M.G., Fellman K.J., Varith J., 2001. Using 1-MCP to inhibit the influence of ripening on impact properties of pear and apple tissue. Postharvest Biol. Technol., 23. 153-160.

Barkai-Golan R., 2001. Postharvest Diseases of Fruits and Vegetables. Elsevier.

Baryłko-Pikielna N., 1975. Zarys analizy sensorycznej żywności. WNT, Warszawa.

Beaudry R.M., Song N.M., Armstrong D.P., Deng W., Timm E., 1997. Chlorophyll fluorescence: a nondestructive tool for quality measurements of stored apple fruit. Proceedings of "Sensors for Nondestructive Testing International Conference", Orlando, FL, 18-21.

Becker R.B., Fricke A.B., 2004. Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. Inter. J. Refriger., 27, 540-551.

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

Białousz S., 1999. Zastosowanie teledetekcji w badaniach pokrywy glebowej. W: Gleboznawstwo, PWRiL, Warszawa, 511-538.

Birth G.S., Dull G.G., Renfroe W.T., Kays S.J., 1985. Nondestructive spectrophotometric determinaton of dry matter in onions. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 110, 297-303.

Bourne M.C., 1979. Fruit texture-an overview of trends and problems. J. Texture Stud., 10, 83-94.

Bowen J.H., Watkins C.B., 1997. Fruit maturity, carbohydrate and mineral content relationships with watercore in 'Fuji' apples. Postharvest Biol.Technol., 11, 31-38.

Brosnan T., Sun W.D., 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision-a review. J. Food Eng., 61, 3-16.

Brown G.K., Sarig Y.J., 1994. Nondestructive Technologies for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. Proceedings International Workshop, US-Israel BARD Fund, Spokane, WA, 15-19 June 1993. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.

Brown G.K., Segerlind L.J., Summitt R., 1974. Near-infrared reflectance of bruised apples. Transactions of the ASAE, 17(1), 17-19.

Cavallieri R., 1997. Detection of watercore in apples. Washington State Univ. Tree Fruit Postharvest J., 8 (4), 3-8.

Chaerle L., Van der Straeten D., 2001. Seeing is believing: imaging techniques to monitor plant health. Biochimica et Biophysica Acta, 1519, 153-166.

Chen P., 1996. Quality evaluation technology for agricultural products. Proceedings International Conference Agricultural Machinery Engineering, Seoul, Korea, vol. 1, 171-204.

Chen H., De Baerdemaeker J., 1995. Optimization of Impact Parameters for Reliable Excitation of Apples During Firmness Monitoring. J. Agric. Eng. Res., 61, 275-285.

Chen P., McCarthy M.J., Kauten R., 1989. NMR for internal quality evaluation of fruits and vegetables. Am. Soc. Agric. Eng., 32(5), 1747-1753.

Chen P., McCarthy M.J., Kim S.M., Zion B., 1996. Development of a high-speed NMR technique for sensing maturity of avocados. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 30, 2205-2209.

Cheng X., Tao Y., Chen Y.R., Luo Y., 2003. NIR/MIR dualsensor machine vision system for online apple stem-end/calyx recognition. Trans. ASAE, 46(2), 551-558.

Ching-Cheng C., Paull R.E., 2001. Fruit temperature and crown removal on the occurrence of pineapple fruit translucency. Sci. Hort., 88, 85-95.

Chuma Y., Nakaji K., Tagawa, A., 1982. Delayed light emission as means of automatic sorting of tomatoes. J. Fac. Agr. Kyushu Univ. Fukuoka, 26(4), 221-234.

Clark C.J., MacFall J.S., Bieleski R.L., 1998. Loss of watercore from 'Fuji' apple observed by magnetic resonance imaging. Sci. Hort., 73, 213-227.

Costa G., Noferini M., Fiori G., Orlandi A., Miserocchi O., 2003. Non-destructive technique to assess internal fruit quality. Acta Hort. (ISHS), 604, 571-576.

Danno A., Miyazato M., Ishiguro E., 1978. Quality evalution of agricultural products by infrared imaging method. I. Grading of fruits for bruise and other surface defects. Memoirs of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 14(23), 123-138.

Dąbrowska B., Pokojska H., Suchorska-Tropiło K., 2000. Metody laboratoryjnej oceny materiału siewnego. Wyd. SGGW, Warszawa.

Delwiche M.J., Sarig Y., 1991. A probe impact sensor for fruit firmness sorter. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 34, 187-192.

Diaz-Perez J.C., 1998. Transpiration rates in eggplant fruit as affected by fruit and calyx size. Postharvest Biol. Technol., 13, 45-49.

Diener R.G., Mitchell J.P., Rhoten M.L., 1970. Using an X-ray image scan to sort bruised apples. Agric. Eng., 51(6), 356-361.

Dincer I., 1997. Heat Transfer in Food Cooling Applications. Taylor & Francis, Washington DC.

Dobrzański B., jr, Rybczyński R., 2002. Color change of apple as a result of storage, shelf-life, and bruising. Int. Agrophysics, 16(4), 261-268.

Dobrzański B., jr, Rybczyński R., Dobrzańska A., Wójcik W., 2001. Some physical and nutritional quality parameters of storage apple. Int. Agrophysics, 15(1), 13-18.

Dobrzański B., jr, Mazurek W., Rybczyński R., Geodecki M., Baranowski P., Walczak R.T., 2003. A new method of the seed viability estimation. New methods, means and technologies for

application of agricultural products. ISBN 9986-732-19-0 proceedings, Institute of Agricultural Engineering LUA Raudondvaris, 105-110.

Drozdowicz M., 1976. Technologia przechowywania i uszlachetniania owoców i warzyw. [Pr. zb. pod red. Drozdowicza]. Zakład Wyd. CRS, Warszawa.

Dull G.G., Birth G.S., Leffler R.G., 1989. Use of near infrared analysis for the nondestructive measurement of fry matter in potatoes. Am. Potato J., 66, 215-225.

Faust M., Wang P.C., Maas J., 1997. The use of magnetic resonance imaging in plant science. Hortic. Rev., 20, 225-266.

Ferguson I., Volz R., Woolf A., 1999. Preharvest factors affecting physiological disorders of fruit. Postharvest Biol. Technol., 15, 255-262.

Fikiin A.G., Fikiin K.A., Triphonov S.D., 1999. Equivalent thermophysical properties and surface heat transfer coefficient of fruit layers in trays during cooling. J. Food Eng., 40, 7-13.

Fito P.J., Ortolá M.D., De los Reyes R., Fito P., De los Reyes E., 2004. Control of citrus surface drying by image analysis of infrared thermography. J. Food Eng., 61, 287-290.

Francis F.J., 1980. Color quality evaluation of horticultural crops. Hort. Sci., 15, 14-15.

Greensill C.V., Newman D.S., 2001. An experimental comparison of simple NIR spectrometers for fruit grading applications. Appl. Eng. Agric., 17(1), 69-76.

Grundas S., Velikanov L., Archipov M., 1999. Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-ray method. Int. Agrophysics, 13, 355-361.

Gunasekaran S., Paulsen M.R., Shove G.C., 1985. Optical methods for nondestructive quality evaulation of agricultural and biological materials. J. Agric. Eng. Res., 32, 209-241.

Hellebrand H.J., Linke M., Beuche H., Herold B., Geyer M., 2000a. Horticular products evaluated by thermography. Ag. Eng. University of Warwick, UK. Abstracts Part 2, Paper No. 00-PH-003, 26-27.

Hellebrand H.J., Linke M., Beuche H., Herold B., Geyer M., 2000b. Horticultural products evaluated by thermography. AgEng, Warwick, 26-26.

Hertog M.L.A.T.M., Ben-Arie R., Roth E., Nicolai B.M., 2004. Humidity and temperature effects on invasive and non-invasive firmness measures. Postharvest Biol. Technol., 33, 79-91.

Hoehn E., Gasser F., Guggenbuehl B., Kuensch U., 2004. Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity expectation. Postharvest Biol. Technol., 33, 79-91.

Hung Y.C., Hao Y.Y., Tollner E.W., Upchurch B.L., 1994. Physical properties and storage stability of apples affected with watercore disorder. Trans. ASAE, 37, 1249-1253.

Ibarra-Castanedo C., 2005. Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with phase. Praca dokt. Univ. Laval, Quebec, Kanada.

Ibarra-Castanedo C., Maldague X.P., 2004. Pulsed Phase Thermography reviewed. QIRT J., 1(1), 47-70.

International Seed Testing Assotiation. 1999: International Rules for Seed Testing. Seed Sci. & Technol. 27 Suplement.

Jacobi K.K., MacRae E.A., Hetherington S.E., 2001. Postharvest heat disinfestations treatment of mango fruit. Sci. Horticulturae, 89, 171-193.

Jordan R. B., Walton E.F., Klages K.U., Seelye R.J., 2000. Postharvest fruit density as an indicator of dry matter and ripened soluble solids of kiwifruit. Postharvest Biol. Technol., 20, 163-173.

Jones H.G., 1999. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. Plant Cell and Environment, 22 (9), 1043-1055.

Kaleta A., 1999.Thermal properties of plant materials. Warsaw Agriculture University Press.

Kavdir I., Guyer D.E., 2007. Evaluation of different pattern recognition techniques for apple sorting. Doi:10,1016/j.biosystemseng.

Kęsik T., Konopiński M., Błażewicz-Woźniak M., 1994. Strączkowe rośliny białkowe: ogólnopolska konferencja naukowa, Lublin 25 listopada. 1, Wyd. AR Lublin.

Kęsik T., 1997. Zarys agrotechniki roślin rolniczych. Wyd. AR Lublin.

Kim S., Schatzki T.F., 2000. Apple watercore sorting system using X-ray imagery – algorithm development. Trans. ASAE 43 (6), 1695-1702.

Kleynen O., Leemans V., Destain M.F., 2003. Selection of the most efficient wavelength bands for 'Jonagold' apple sorting. Postharvest Biol.Technol., 30, 221-232.

Kleynen O., Leemans V., Destain M.F., 2005. Development of a multi-spectral vision system for the detection of defects on apples. J. Food Eng. 69, 41-49.

Kolasińska K., Grzelak K., 1996. Nasionoznawstwo i kwalifikacja laboratoryjna materiału siewnego. Zeszyt 3. Zasady i metody oceny zdolności kiełkowania nasion. Radzików. Druk: IHAR/1/61/300/1996.

Konopacka D., Płocharski W.J., 2001. Effect of raw material storage time on the quality of apple chips. Drying Technology, 19(3-4), 559-570.

Konopacka D., Płocharski W.J., 2004. Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability. Postharv. Biol. Technol., 32 (2), 205-211.

Kopcewicz J., Lewak S., 2002. Fizjologia roślin. PWN, Warszawa.

Kuczyński A.P., 2006. Studia nad dynamiką brązowienia i jej wykorzystaniem w ocenie świeżości miąższu jabłek. Acta Agrophysica, 138, (Rozprawy i monografie).

Kuczyński A.P., Varoquaux P., Souty M., 1993. Reflectance spectra of 'ready-to-use' apple products for determination of enzymatic browning. Int. Agrophysics, 7, 85-92.

Kudra T., Strumiłło C., 1998. Thermal processing of bio-materials. Gordon and Breach Science Publishers, ISSN: 0277-5883.

Kumpoun W., Motomura Y., Harada Y., 2003. Inhibition of Aspergillus rot by sorbitol in apple fruit with watercore symptoms. Postharvest Biol.Technol., 29, 121-127.

Lancaster J.E., Lister C.E., Reay P.F., Triggs C.M., 1997. Influence of pigment composition on skin color in a wide range of fruits and vegetables. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 122, 594-598.

Land D.G., 1988. Negative influences on acceptability and their control. In: Thomson, D.M.H. (Ed.), Food Acceptability. Elsevier, New York, 475-483.

Leemans V., Magin H., Destain M.F., 2002. On-line fruit grading according to their external quality using machine vision. Biosyst. Eng., 83, 397-404.

Leonardi Ch., Guichard S., Bertin N., 2000a. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. Sci. Horticulturae, 84, 285-296.

Leonardi C., Baille A., Guichard S., 2000b. Predicting transpiration of shaded and non-shaded tomato fruits under greenhouse environments. Sci. Horticulturae, 84, 297-307.

Lewicki P.P., Lukaszuk A., 2000. Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. J. Food Eng., 45, 119-126.

Lityński M., 1977. Biologiczne podstawy nasiennictwa. PWN, Warszawa.

Lombardi T., Fochetti T., Bertacchi A., Onnis A., 1997. Germination requirements in a population of Typha latifolia Aquatic Botany, 56, 1-10.

Lu R., Chen Y.R., Park B., 1999. Hyperspectral imaging for detecting bruises in apples. ASAE Annual International Meeting. Paper No. 99-3120. Toronto, Canada, 18-21 July.

Lurie S., 1998. Postharvest heat treatments. Postharvest Biol. Technol., 14, 257-269.

Maguire K.M., Banks N.H., Lang A.,1999. Sources of variation in water vapour permeance of apple fruit. Postharvest Biol. Technol., 17, 11-17.

Maldague X.P., 2001. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley & Sons, New York.

Matuszak R., Baranowski P., Walczak R.T., Brzóstowicz A., 2004. Ocena wpływu zasolenia na wzrost, fotosyntezę, potencjał wody i temperaturę liści siewek pszenicy odmiany Almari. Acta Agrophysica, 110, 97-104.

Mavroudis N.E., Dejmek P., Sjoeholm I., 2004. Studies on some raw material characteristics in different Swedish apple varieties. J. Food Eng., 62,121-129

Meola C., Carlomagno G.M., 2004. Recent advances in the use of infrared thermography. Meas. Sci. Technol., 15, R27-R58.

Mohsenin N.N., 1978. Physical properties of plant and animal materials – structure, physical characteristics and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers, Inc., New York.

Mohsenin N.N., 1980. Thermal Properties of Foods and other Agricultural Materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.

Mohsenin N.N., 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon Breach.

Nedeva D., Nikolova A., 1999. Fresh and dry weight changes and germination capacity of natural or premature desiccated developing wheat seeds. Bulg. J. Plant Physiol., 25, 1-15.

Newman G.M., Price W.E., Woolf L.A., 1996. Factors influencing the drying of prunes. 1. Effects of temperature upon the kinetics of moisture loss during drying. Food Chemistry, 57(2), 241-244.

Nicolai B.M., Baerdemaeker D.J., 1995. Sensitivity analysis with respect to the surface heat transfer coefficient as applied to thermal process calculations. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, KU Leuven, Kardinaal Mercierlaan, 92, B-3001 Heverlee, Belgium.

Nosecka B., 2004. Produkcja owoców i warzyw. Publikacja wydana w ramach programu Agro-Info przez Fundację Funduszu Współpracy na zlecenie Urzędu Komitetu Integracji Europejskiej. Warszawa.

Nowak A.J., Wawrzynek A., 2006. Promieniowanie termiczne i jego rola w modelowaniu przepływu ciepła. VII Krajowa Konferencja „Termografia i termometria w podczerwieni", Ustroń-Jaszowiec, 16-18 listopada.

Opara U.L., 2007. Bruise susceptibilities of 'Gala' apples as affected by orchard management practices and harvest date. Postharvest Biol. Technol., 43, 47-54.

Opara U.L., Studman C. J., Banks N. H., 1997. Physico-mechanical Properties of 'Gala' apples and Stem-end Splitting as Influenced by Orchard Management Practices and Harvest Date. J. Agric. Eng. Res., 68, 139-146.

Pabis S., 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL, Warszawa.

Pen C.L., Bilanski W.K., Fuzzen D.R., 1985. Classification analysis of good and bruised peeled apple tissue using optical reflectance. Trans. ASAE, 18(1), 326-330.

Peng Y., Lu R., 2005. Modelling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness. Trans. ASAE, 48, 235-242.

Peng Y., Lu R., 2006. An LCTF-based multispectral imaging system for estimation of apple fruit firmness. Part II. Selection of optimal wavelengths and development of prediction models. Trans. ASAE, 49, 269-275.

Paull R.E., 1999. Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. Postharvest Biol. Technol., 15, 263-277.

Pieris K.H.S., Dull G.G., Leffler R.G., Kays S.J., 1998. Near-infrared sepctrometric method for nondestructive determination of soluble solids contnet of peaches. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 123, 898-905.

Ramaswamy H.S., Tung M.A., 1981. Thermophysical properties of applesin relation to freezing. J. Food Sci., 46(3), 724-728.

Roos Y.H., 2003. Thermal analysis, state transitions and food quality. J. Therm. Anal. Calorim., 71, 197-203.

Rytko G., Tulo M., 1984. Cold-test. Metodyka laboratoryjnej oceny wigoru nasion kukurydzy. IHAR Radzików, 1/64 – (20).

Samim M., Banks N.H., 1993. Color changes in bruised apple fruit tissue. N.Z. J. Crop Hort. Sci., 21, 367-372.

Schatzki T.F., Haff R.P., Young R., Can I., Le L.C., Toyofuku N., 1997. Defect detection in apples by means of X-ray imaging. Trans. ASAE, 40(5), 1407-1415.

Schote S., Belie D.N., Baerdemaeker D.J., 1999. Acoustic impulse-response technique for evaluation and modelling of firmness of tomato fruit. Postharvest Biol. Technol., 17, 105-115.

Schmilovitch Z., Mizrach A., Hoffman A., Egozi H., Fuchs Y., 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. Postharvest Biol. Technol., 19, 245-252.

Shellie K.C., Mangan R.L., 1996. Tolerance of red fleshed grapefruit to a constant or stepped temperature, forced-air quarantine heat treatment. Postharvest Biol. Technol., 7, 151-159.

Shewfelt R.L., 1999. 'What is quality?' Postharvest Biol. Technol., 15, 197-200.

Sigstad E.E., Garcia C.I., 2001. A microcalorimetric analysis of quinoa seeds with different initial water content during germination at 25°C. Thermochimica Acta, 366:149-155.

Skierucha W., Sobczuk H., Malicki M.A., 2001. Zastosowanie psychrometru Peltiera do pomiaru potencjału wody: prototyp przyrządu pomiarowego. Acta Agrophysica, 53, 125-134.

Slaughter D.C., Barrett D., Boersig M., 1996. Nondestructive determination of soluble solids in tomatoes using near infrared spectroscopy. J. Food Sci., 61, 695-697.

Stajnko D., Lakota M., Hocevar M., 2004. Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. Computers and Electronics in Agric., 42, 31-42.

Studman C.J., 2001. Computers and electronics in postharvest technology – a review. Computers and Electronics in Agric., 30, 109-124.

Sweat V.E., 1992. Thermal properties of foods. [W:] Engineering properties of foods (ed. M.A. Rao i S.S.H. Rizvi), Marcel Dekker, Inc., New York.

Szczepański K., Rejman S., 1987. Metodyka badań sadowniczych. PWRiL, Warszawa.

Dziennik Urzędowy L 013, 20/01/2004 P. 0019 – 0027.

Tabatabaeefar A., Rajabipour A., 2005. Modeling the mass of apples by geometrical attributes. Sci. Hort., 105, 373-382.

Tang J., Sokhansanj S., Yannacopoulos S., Kasap S.O., 1991. Specific heat capacity of lentilseeds by differential scanning calorimetry. Trans. ASAE, 34(2), 517-522.

Thomas P., Kannan A., Degwekar V.H., Ramamurthy M.S., 1995. Non-destructive detection of seed weevil-infested mango fruits by X-ray imaging. Postharvest Biol. Technol., 5, 161-165.

Throop J.A., Aneshansley D.J., Upchurch B.L., 1994. Camera system effects on detecting watercore in 'Red Delicious' apples. Trans. ASAE, 37 (3), 873-877.

Tollner E.W., Brech J.K., Upchurch B.L., 1993. Nondestructive evaluation: detection of external and internal attributes frequently associated with quality or damage. In postharvest handling: A system approach edited by Shewfelt R.L and Prussia S.E Academic Press, Inc. San Diego, CA.

Tollner E.W., Hung Y.C., Upchurch B.L., Prussia S.E., 1992. Relating x-ray absorption to density and water content in apples. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 35, 1921-1928.

Upchurch B.L., Throop J.A., 1994. Effects of storage duration on detecting watercore in apples using machine vision. Trans. ASAE, 37, 483-486.

Upchurch B.L., Affeldt H.A., Hruschka W.R., Norris K.H., Troop J.A., 1990. Spectrophotometric study of bruises on whole 'Red Delicious' apples. Transactions of the ASAE, 33(2), 585-589.

Upchurch B.L., Throop J.A., Aneshansley D.J., 1994. Influence of time, bruise-type, and severity on near-infared reflectance from apple surfaces for automatic bruise detection. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 37 (5), 1571-1575.

Ureña R., Rodríguez F., Berenguel M., 2001. A machine vision system for seeds quality evaluation using fuzzy logic. Computers and Electronics in Agric., 32, 1-20.

Varith J., 2001. Uses of thermal properties for non-destructive assessment of apple quality. PH.D. Dissertation, Washington State University, Pullman, Wa.

Varith J., Hyde G.M., Baritelle L.A., Fellman K.J, Sattabongkot T., 2002. Non-Contact bruise detection in apples by thermal imaging. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 1-46.

Varith J., Hyde G.M., Baritelle A.L., Fellman J.K., Sattabongkot T., 2003. Noncontact bruise detection in apple by thermal imaging. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 211-218.

Veraverbeke E.A., Verboven P., Lammertyn J., Cronje P., De Baerdemaeker J., Nicolaı B.M., 2006. Thermographic surface quality evaluation of apple. J. Food Eng., 77, 162-168.

Voltz R.K., Tustin D.S., Ferguson I.B., 1996. Mineral accumulation in apple fruit as affected by spur leaves. Sci. Hort., 65, 151-161.

Walczak R.T., Mazurek W., Baranowski P., 2003a. Termografia w agrofizyce. Acta Agrophysica, 97, 2(3), 663-675.

Walczak R.T., Baranowski P., Mazurek W., 2003b. Application of thermography in agrophysics. Training Course for Young Research Workers "Physicochemical and Physical Methods of Studies of Soil and Plant Materials. Theory and Practice", IAPAS, Lublin, 27.11-2.12, 111-117.

Walczak R.T., Baranowski P., Mazurek W., 2004. Modelling of actual evapotranspiration with the use of crop cover radiation temperature and soil data. In Plant growth in relation to soil physical conditions. Ed. by J. Lipiec, R. Walczak, G. Józefaciuk, EU 5th Framework Program QLAM-2001-00428, Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture AGROPHYSICS, Lublin, 144-152.

Walczak R.T., Lipecki J., Mazurek W., Baranowski P., 2005. Determination of transpiration rate of fruit on the base of surface radiation temperature measurement. Ed. G. Józefaciuk, C. Sławiński, R.T. Walczak, EU 5th Framework Program QLAM-2001-00428, Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture AGROPHYSICS, Lublin, 231-236.

Wang S.Y., Faust M., 1992. Variation in lipid composition of apples in relation to watercore. J. Am. Soc. Hort. Sci., 117, 829-833.

Wang C.Y., Wang P.C., Faust M., 1988. Non-destructive detection of watercore in apple with nuclear magnetic resonanse imaging. Hortscience, 24, 106-109.

Wang S., Tang J., Cavalieri R.P., 2001. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hotwater treatments. Postharvest Biol.Technol., 22, 257-270.

Wawrzynek A., Nowak J.A., Bartoszek M., Delpak R., Shih C.K.J., Hu C.W., 2003. Application of direct/inverse analysis to evaluate the structure integrity of concrete. Part 1. Formulation for thermo-mechanical properties determination. NDTE International, 36, 101-110.

Welty J.R., Wicks C.E., Wilson R.E., Rorrer G., 2001. Fundamentals of momentum, heat and mass transfer, John Wiley, USA.

Wen Z., Tao Y., 2000. Dual-camera NIR/MIR imaging for stem-end/ calyx identification in apple defect sorting. Transaction of the ASAE, 43(2), 449-452.

Więcek B., Zwolenik S., 1998. Multichannel thermography systems for real-time and transient thermal process application. Quantitative Infrared Thermography QIRT'98, Polit. Łódzka. 322-325.

Wiśniewski S., 1988. Wymiana ciepła. PWN, Warszawa.

Woolf A.B., Ferguson I.B., 2000. Postharvest responses to high fruit temperatures in the field. Postharvest Biol. Technol., 21, 7-20.

Woyke H., 1987. Wpływ zaprawiania nasion grochu zielonego na ich wigor. Hod. Roślin i Nasiennictwo, 5/6, 15-16.

Wójcik P., Cieśliński G., Mika A., 1999. Apple yield and fruit quality as influenced by boron applications. J. Plant Nutr., 9, 1365-1378.

Wójcik P., Wójcik M., Klamkowski K., 2007. Response of apple trees to boron fertilization under conditions of low soil boron availability. Sci. Hortic. doi:10.1016/j.scienta.2007.10.032.

Xing J., Baerdemaeker D.J., 2007. Fresh bruise detection by predicting softening index of apple tissue using VIS/NIR spectroscopy. Postharvest Biol. Technol., 45 176-183.

Xing J., Bravo C., Jancso P.T., Ramon H., Baerdemaeker D.J., 2005. Detecting bruises on 'Golden Delicious'apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. Biosystems Eng., 90(1), 27-36.

Xing J., Bravo C., Moshou D., Ramon H., Baerdemaeker D.J., 2006. Bruise detection on 'Golden delicious' apples by VIS/NIR spectroscopy. Comput. Electron. Agric., 52, 11-20.

Xing J., Jancsok P., Baerdemaeker D.J., 2007. Stem-end/calyx identification on apples using contour analysis in multispectral images. Biosystem Eng., 96(2), 231-237.

Yamada H., Kobayashi S., 1999. Relationship between watercore and maturity or sorbitol in apples affected by preharvest fruit temperature. Sci. Hort., 80, 189-202.

Yamada H., Takechi K., Hoshi A., Amano S., 2004. Comparison of water relations in watercored and non-watercored apples induced by fruit temperature treatment. Sci. Hort., 99, 309-319.

Zdunek A., 2008. Instrumentalna metoda oceny wybranych cech tekstury jabłek na podstawie emisji akustycznej. Acta Agrophysica, Rozprawy i monografie, 155.

Zeebroeck V.M., Linden V.V., Darius P., Ketelaere D.B., Ramon H., Tijskens E., 2007. The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of appels. Postharvest Biol. Technol., 46, 10-19.

Zhou P.J., Hu Y.C., Wang C.X., Song Z.H., Wang T.Z., Qu S.S., Zhou H.T., Zhu Y.G., 1999. Determination of the thermogenesis curves and studies of the thermodynamics and thermokinetics of seed germination. J. Biochem. Biophys. Methods, 38, 171-180.

Zion B., Chen P., McCarthy M.J., 1993. Imaging analysis technique for detection of bruises in magnetic resonance images of apples. ASAE Annual International Summer Meeting, Paper No. 93-3084. Spokane, WA, 20-23 June.

Zude M., Herold B., Roger J.M., Bellon-Maurel V., Landahl S., 2006. Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. J. Food Eng., 77, 254-260.

Zwolennik S., Więcek B., 2001. Real-time thermal image processing based on DirectX technology. Quantitative InfraRed Thermography 5, QIRT'2000, Reims, France, Proc. Seminar 64, 18-21 June 2000, 80-83.

8. STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono badania nad zastosowaniem termografii pasywnej i aktywnej do określania jakości nasion i owoców. Postawiono hipotezę, że wewnętrzne defekty i zaburzenia fizjologiczne owoców jak i procesy biochemiczne powodujące obniżenie żywotności nasion prowadzą do zmian właściwości cieplnych wewnątrz tych obiektów.

Stwierdzono, że temperatura radiacyjna powierzchni nasion i owoców jest dobrym parametrem oceny ich jakości. Podczas pobudzenia cieplnego, niejednorodności właściwości cieplnych powodują powstawanie na powierzchni tych materiałów kontrastów termicznych, które mogą być skutecznie rejestrowane urządzeniem termograficznym.

Opracowano metodę wczesnej identyfikacji obić jabłek z wykorzystaniem termografii fazowo-impulsowej (PPT). Na podstawie modelowych badań rozchodzenia się ciepła w owocu dobrano optymalne parametry rejestracji termograficznej. Zarówno badania modelowe jak i przeprowadzone pomiary wykazały, że impuls o mocy 1000 W i czasie od jednej do trzech sekund powoduje na powierzchni wzrost temperatury o zaledwie 3-4°C, natomiast dzięki dużej pojemności cieplnej skórki owocu temperatura ta nie wzrasta powyżej 1°C w jego wnętrzu. Zastosowanie transformacji Fouriera, analiza amplitudogramów i fazogramów odpowiedzi cieplnej oraz rekonstrukcja sygnału termograficznego (TSR) pozwoliły wyeliminować z obrazów termograficznych kontrasty powstałe na skutek niejednorodnego oświetlenia obiektu oraz wyróżnić defekty występujące na różnych głębokościach.

Przeprowadzono badania nad wykrywaniem szklistości miąższu w jabłkach poprzez analizę zmian temperatury radiacyjnej na powierzchni owoców w trakcie ich krótkotrwałego ogrzewania. Stwierdzono, że stosunek pochodnej temperatury powierzchni owocu po czasie do jego masy jest dobrym parametrem oceny zróżnicowania właściwości cieplnych jabłek z objawami szklistości i bez nich. Zastosowanie gradientu temperatury 18,5°C pomiędzy powierzchnią owocu i otaczającym powietrzem jest wystarczające do odróżnienia różnic tempa ogrzewania jabłek z objawami szklistości i bez nich.

Dokonano analizy związku tempa ogrzewania jabłek z parametrami fizycznymi ich jakości, wykazując, że wraz ze wzrostem zawartości ekstraktu i gęstości następuje spadek wartości pochodnej temperatury radiacyjnej powierzchni jabłka po czasie w odniesieniu do jednostki masy zarówno dla owoców z objawami szklistości jak i bez nich. Nie stwierdzono znaczącej korelacji pomiędzy jędrnością miąższu a wartościami pochodnej temperatury radiacyjnej powierzchni jabłka po czasie w odniesieniu do jednostki masy.

Stwierdzono przydatność metody termograficznej do określania zdolności kiełkowania nasion strączkowych. Opracowana metoda umożliwia określanie średniej temperatury nasion i ich części. Zastosowanie automatycznej segmentacji obrazu pozwala na wyodrębnienie w obszarze termogramów pól reprezentujących poszczególne nasiona. Analiza zmian rozkładu temperatury powierzchni nasion wykazuje występowanie znacznych różnic tego parametru w poszczególnych fazach procesu kiełkowania. W warunkach doświadczenia nasiona zdolne do kiełkowania charakteryzują się wyraźnym spadkiem temperatury w pierwszym etapie procesu pęcznienia (dla nasion fasoli 2°C w ciągu pierwszych 45 godzin a dla nasion grochu 1°C w ciągu pierwszych 24 godzin) co może być wskaźnikiem ich zdolności kiełkowania (energii kiełkowania). Zostało to potwierdzone wysoką zgodnością z klasyczną metodą testu kiełkowania.

Słowa kluczowe: jakość owoców i nasion, termografia pasywna i aktywna, przewodzenie ciepła w owocu, zdolność kiełkowania nasion

9. SUMMARY

RADIATION TEMPERATURE OF CHOSEN FRUIT AND SEED AS A PAREAMETER OF THEIR QUALITY EVALUATION

This dissertation presents the investigation on application of passive and active thermography for evaluation of seed and fruit quality. A hypothesis was formulated, that internal defects and physiological disorders of fruit as well as biochemical processes which cause diminishing of seed viability lead to changes of thermal properties within these objects.

It was stated that radiation temperature of seed and fruit surface is a good parameter of evaluation of their quality. During thermal stimulation, heterogeneities of thermal properties lead to the occurrence of thermal contrasts on the surface of these materials which can be successfully registered with the use of thermographic device.

A method was elaborated of early detection of apple bruises with the use of pulsed phase thermography (PPT). On the base of model investigations of heat transfer in fruit, optimal parameters of thermographic registration were chosen. Both model and experimental studies revealed that heat pulse of 1000 W, ranging from one to three seconds, caused the increase of fruit surface temperature of only 3-4°C, however due to the high heat capacity of apple skin its internal temperature did not increase above 1°C. The use of Fourier transformation, the analysis of ampligrams and phasegrams of fruit heat response as well as thermographic signal reconstruction (TSR) enabled to eliminate from the

thermographic images the contrasts resulting from non-uniform heating of the object and to distinguish defects occurring at different depths.

The studies were performed on detection of flesh watercore in apples through the analysis of radiation temperature change on the surface of fruit during short-time heating. It was stated that the derivative of apple temperature in time per apple mass is a good parameter to evaluate the differences in thermal properties between apples with and without watercore affected tissues. The temperature gradient of 18.5°C between the fruit surface and the ambient temperature is sufficient to distinguish the differences in the rate of heating between watercored and unaffected apples.

The analysis of relation between the rate of apples heating and the physical parameters of their quality indicated that with the increase of both soluble solid content and density of fruit, the derivative of apple temperature in time per apple mass decreases for apples with and without watercore symptoms. There was no significant correlation between the derivative of apple temperature in time per apple mass and fruit firmness.

The usefulness of thermographic method for determination germination capacity of leguminous seeds was stated. Elaborated method enables to determine the average temperature of whole seeds and their parts. By applying automatic segmentation of thermographic images it possible to distinguish within thermograms the fields representing particular seeds. The analysis of radiation temperature changes on the seed surface shows the occurrence of considerable differences of this parameter in particular stages of germination process. In the conditions of the experiment, seeds which have ability to germinate revealed considerable decrease of temperature in the first stage of swelling process (for bean seeds 2°C during first 45 hours and for pea seeds 1°C during first 24 hours) Temperature changes of seed during first hours of swelling can be an indicator of their germination capacity (energy of germination). High agreement of thermographic method with standard germination test was stated.

Keywords: quality of fruit and seed, passive and active thermography, heat conduction in fruit, germination capacity of seed

Adres autora:
Piotr Baranowski
Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin
e-mail: pbaranow@ipan.lublin.pl