Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Wykorzystanie wybranych narzędzi optycznych oraz komputerowej analizy obrazu do wyznaczania wartości indeksu skrobiowego w jabłkach

Tomasz Guz

Kraków 2019

Patronat naukowy: Komitet Inżynierii Rolniczej

Komitet honorowy
Prof. dr hab. Janusz Haman – czł. rzecz. PAN
Prof. dr hab. Rudolf Michałek – czł. rzecz. PAN

Rada Naukowa Wydawnictwa
Prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)
Prof. Andrew Berger (USA)
Prof. Stefan Cenkowski (Kanada)
Prof. Dariusz Dziki (Polska)
Prof. Girma Gebresenbet (Szwecja)
Prof. Van der Goot, Atze Jan (Holandia)
Prof. Dorota Haman (USA)
Prof. Jayson K. Harper (USA)
Doc Ing. Zuzana Hlaváčová, CSc. (Słowacja)
Prof. Ryszard Hołownicki (Polska)
Dr ing. Bruno Huyghebaert (Belgia)
Prof. Leon Kukiełka (Polska)
Prof. Marek Opielak (Polska)
Prof. Jacek Przybył (Polska)
Prof. Michele Rinaldi (Włochy)
Prof. Spiro E Stefanou (USA)
Dr Bernardo Strasbourg (Brazylia)
Prof. Bulgakov Vlodymyr (Ukraina)

Komitet Redakcyjny
Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń – redaktor naczelny
Dr hab. inż. Sławomir Kocira, prof. UP – sekretarz
Prof. dr hab. Pavol Findura
Prof. dr hab. Leon Kukiełka

Wydawca:
Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

Recenzenci:
Dr hab. inż. Monika Janowicz - SGGW Warszawa
Dr hab. inż. Sławomir Obidziński, prof. PB - Politechnika Białostocka

ISBN 978-83-64377-24-2

Druk i oprawa:
NOVA SANDEC
ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz
tel. +48 (18) 547 45 45
e-mail: biuro@novasandec.pl; http://www.novasandec.pl
Ark. wyd. 8,50 ; ark. druk. 7,5
Nakład: 100 egz.

Spis treści:

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ 5
1. WPROWADZENIE 7
2. PRZEGLĄD PIŚMIENNICTWA 9
2.1. Dojrzewanie owoców oraz prawidłowy ich zbiór 9
2.1.1. Czynniki determinujące termin zbioru owoców 9
2.1.2. Zastosowanie obserwacji komputerowej w ocenie rozwoju owoców 11
2.2. Barwa surowców i produktów spożywczych oraz metody jej oceny 13
2.3. Zasada działania systemów komputerowej analizy obrazu 15
2.4. Przykłady zastosowań systemów wizyjnych w analizie obrazu surowców i produktów spożywczych 16
2.5. Współczesne metody oceny dojrzałości owoców 18
2.5.1. Metody oparte na obserwacji zmian stężenia etylenu 18
2.5.2. Pomiar jędrności 19
2.5.3. Pomiar zawartości ekstraktu w owocach 20
2.5.4. Indeksy zbiorcze 20
2.6. Indeks skrobiowy i jego znaczenie w ocenie dojrzałości owoców. 20
2.7. Problemy w interpretacji wyników testu skrobiowego 23
3. CEL I ZAKRES PRACY 25
4. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE 27
4.1. Plan doświadczenia i charakterystyka surowca 27
4.2. Metodyka wykonywania testu skrobiowego 27
4.3. Metodyka wykonywania zdjęć 28
4.4. Metodyka oznaczania indeksów zbiorczych 33
4.5. Metody statystyczne stosowane podczas opracowania wyników badań 35
5. WYNIKI BADAŃ 36
5.1. Zmiany indeksu skrobiowego w jabłkach odmiany Gloster 36
5.2. Zmiany wartości indeksu skrobiowego jabłek odmiany Jonagold 43
5.3. Podsumowanie analizy zmian indeksu skrobiowego w pierwszym etapie badań przeprowadzonym dla odmian jabłek Gloster oraz Jonagold 51
5.4. Analiza zmian wartości indeksu skrobiowego przy zmiennej temperaturze barwy oświetlenia 54
5.4.1. Zmiany indeksu skrobiowego w różnej temperaturze barwowej oświetlenia owoców Gloster 55

5.4.2. Zmiany indeksu skrobiowego w różnej temperaturze barwowej oświetlenia owoców Jonagold ... 64
5.5. Zmiany wartości indeksu skrobiowego po usuwaniu odblasków za pomocą filtra polaryzacyjnego ... 73
5.6. Interpretacja indeksu skrobiowego przy zmiennym progu filtracji ... 79
5.6.1. Zmiany indeksu skrobiowego jabłek Gloster w zależności od progu filtracji ... 80
5.6.2. Zmiany indeksu skrobiowego jabłek Jonagold w zależności od progu filtracji ... 83
5.7. Interpretacja indeksu skrobiowego z obrazów wykonanych w świetle przechodzącym ... 86
5.8. Znaczenie indeksu skrobiowego w obliczeniach indeksów zbiorczych ... 91
5.8.1. Obliczanie indeksu Streifa ... 92
5.8.2. Obliczanie indeksu De Jagera ... 95
5.8.3. Analiza błędów oznaczeń indeksów zbiorczych ... 97
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI ... 101
BIBLIOGRAFIA ... 107
STRESZCZENIE ... 117
SUMMARY ... 119

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

KAO – komputerowa analiza obrazu
AC – analiza obrazu z aparatu cyfrowego
SK – analiza obrazu ze skanera
CB – analiza obrazu z kamery monochromatycznej
OW – ocena wzrokowa wartości indeksu skrobiowego
S – wartość indeksu skrobiowego
IS – indeks Streifa
IJ – indeks De Jagera
S_{P0} – wartość indeksu obliczona z obrazu wykonanego przez filtr polaryzacyjny o kącie skręcenia 0°
S_{P30} – wartość indeksu obliczona z obrazu wykonanego przez filtr polaryzacyjny o kącie skręcenia 30°
S_{P60} – wartość indeksu obliczona z obrazu wykonanego przez filtr polaryzacyjny o kącie skręcenia 60°
S_{P90} – wartość indeksu obliczona z obrazu wykonanego przez filtr polaryzacyjny o kącie skręcenia 90°
S_{T28} – wartość indeksu obliczona z obrazu oświetlonego źródłem o temperaturze barwowej 2800K
S_{T34} – wartość indeksu obliczona z obrazu o temperaturze barwowej 3400K otrzymanego poprzez filtrację filtrem konwersyjnym KB 6
S_{T48} – wartość indeksu obliczona z obrazu o temperaturze barwowej 4800K otrzymanego poprzez filtrację filtrem konwersyjnym KB 15
S_{100} – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 100
$S_{110,}$ – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 110
$S_{115,}$ – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 115
S_{120} – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 120
S_{125} – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 125
S_{130} – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 130
S_{140} – wartość indeksu obliczona po filtracji obrazu progiem 140
t_{100} – próg filtracji obrazu o wartości 100
t_{110} – próg filtracji obrazu o wartości 110
t_{120} – próg filtracji obrazu o wartości 120
t_{125} – próg filtracji obrazu o wartości 125
t_{130} – próg filtracji obrazu o wartości 130
t_{140} – próg filtracji obrazu o wartości 140
p_w – pole zajęte przez kompleks skrobi z jodem (mm^2)
p_c – pole całego plastra (mm^2)
u_c – udział pola powierzchni plastra owocu w obrazie (%)
u_w – udział pola powierzchni zajętej przez kompleks jodu ze skrobią w obrazie (%)
F – jędrność owoców (N)
R – wartość ekstraktu refraktometryczna (Brix)
S_R – indeks skrobiowy obliczony ze składowej R

S_G – indeks skrobiowy obliczony ze składowej G
S_B – indeks skrobiowy obliczony ze składowej B
S_{RGB} – indeks skrobiowy obliczony ze składowej RGB
T_{0K} – temperatura barwy źródła światła (K)
T_{1K} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB6 (K)
T_{2K} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB15 (K)
t_{OM} – temperatura barwy światła (Mired)
t_{1M} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB6 (Mired)
t_{2M} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB15 (Mired)

1. WPROWADZENIE

Tradycyjne metody oceny dojrzałości zbiorczej owoców, stosowane dawniej w przechowalnictwie są obecnie stosowane bardzo rzadko. Opierały się one na obserwacji takich symptomów zmiany stanu owoców jak wybarwienie skórki, barwę nasion, łatwość odchodzenia owoców od krótkopędów, odliczanie liczby dni od pełni kwitnienia, czy też metoda zwaną T (De Jager, 1994; Bulens i in. 2012).

Biorąc pod uwagę fakt, że większość owoców przeznaczonych jest do długotrwałego przechowywania w obiektach o zmienionym składzie atmosfery, precyzja oceny stadium dojrzałości wyznaczonego tymi metodami jest niewystarczająca. Metody te nie uwzględniają warunków klimatycznych panujących podczas dojrzewania owoców przed zbiorem (Łysiak, 1998a). Często też wybarwienie skórki owoców pojawia się wcześnie, zanim osiągną one stan dojrzałości zbiorczej. Największą jednak wadą tradycyjnych metod wyznaczenia terminu zbioru jest to, że przy ich wykorzystaniu nie jest oceniany faktyczny stan rozwoju fizjologicznego owoców (Rutkowski, 1997). Ocena tego stanu jest podstawowym warunkiem prawidłowo wyznaczonego terminu zbioru owoców przeznaczonych do długotrwałego przechowywania, szczególnie, gdy będzie się ono odbywać w warunkach zmienionego stanu atmosfery (Skrzyński, 1996). W takich przypadkach owoce powinny znajdować się w stanie dojrzałości zbiorczej. Gdy owoce nie osiągną tego stanu, są bardziej podatne na szereg chorób przechowalniczych, takich jak oparzelizna powierzchniowa, czy choroby wywołane nadmiarem CO_2, który w dużych stężeniach jest obecny w nowoczesnych komorach przechowalniczych. Przy zbyt zaawansowanym stanie dojrzałości owoce nadają się tylko do krótkotrwałego przechowywania w warunkach chłodni zwykłej. W tym przypadku zwykle następuje szybki ich rozpad wewnętrzny. Można tego uniknąć, stosując metody oznaczania lub też prognozowania dojrzałości zbiorczej z dużą precyzją (Tomala, 1995b). Procedura postępowania zakłada w takich przypadkach zbiór owoców w tak oznaczonym stadium dojrzałości, w którym są one zdolne do procesów życiowych po oddzieleniu ich od organizmu macierzystego. Zakłada się również, że stan dojrzałości zbiorczej umożliwia dalszy rozwój owoców w ściśle kontrolowanych warunkach. Dojrzałość konsumpcyjną osiągają one już po opuszczeniu przechowalni w warunkach wtórnego ich przechowywania w sieci dystrybucyjnej lub u konsumenta. Stan dojrzałości zbiorczej owoców nie może być oceniany metodami, które nie uwzględniają zmian zachodzących w ich strukturze wewnętrznej. Stosowanie w zamian nawet najprostszych, dostępnych metod pomiarowych, pod warunkiem prawidłowego ich przeprowadzenia, zapewnia precyzyjne określenie tego stanu, a tym samym zbiór owoców w optymalnym dla danej odmiany terminie (Łysiak, 1998b).

Wśród metod analitycznych stosowanych w ocenie stadium dojrzałości owoców ziarnkowych jest wyznaczanie stężenia etylenu w gniazdach nasiennych. Inna metodą jest indukowanie etylenu w owocach zamkniętych w hermetycznych naczyniach. Indukcja etylenu pozwala na precyzyjne prognozowanie dojrzałości zbiorczej z wyprzedzeniem 7-10 dni przed osiągnięciem optimum w czasie zbioru. Niestety, należy zaznaczyć, że metody te wymagają specjalistycznej aparatury i wykwalifikowanego personelu. Są kosztowne i niedostępne w praktyce sadowniczej. Istnieją również metody, które są, ze względu na prostotę wykonywanych oznaczeń, możliwe do wykonania w warunkach polowych. Wśród nich

znajdują się takie metody jak pomiar jędrności, który można wykonać za pomocą prostego i taniego jędrnościomierza ręcznego. Inną metodą oceny dojrzałości jest pomiar ekstraktu soku komórkowego, wykonywany refraktometrem optycznym lub elektronicznym. Prostym i niezawodnym sposobem oceny stanu dojrzałości owoców ziarnkowych jest też test skrobiowy, który, ze względu na nieskomplikowaną procedurę, może być przeprowadzony bez użycia nawet najprostszych przyrządów. Oznaczenie polega na naniesieniu roztworu jodu w jodku potasu na pokrojone równoleżnikowo połowy owoców. Otrzymane w wyniku reakcji kompleksy jodu ze skrobią podlegają porównaniu z tablicami (fotografiami) wzorcowymi, i po ich ocenie, nadaje mu się wartość w skali od 1 do 10. Wartość oceny tego testu, wyrażona indeksem skrobiowym, może być stosowana tylko jak jedyny i niezależny wskaźnik informujący o stanie dojrzałości owoców danej odmiany. Indeks skrobiowy może być też, wraz z jednoczesnym pomiarem jędrności oraz ekstraktu, ważnym składnikiem indeksów zbiorczych Streifa i De Jegera. Wskaźniki te mają tę właściwość, że podają informację o trzech równolegle przebiegających zjawiskach: rozpadzie skrobi, mięknięciu miąższu oraz wartości ekstraktu w soku komórkowym. Ze względu na dużą ilość informacji są one uważane za pewne i niezawodne wskaźniki, które mogą być stosowane w praktyce.

Indeks skrobiowy stanowi wskaźnik, który jest stosowany samodzielnie lub jako element składowy indeksów zbiorczych. Do wyznaczenia pozostałych wskaźników są używane przyrządy o ściśle określonym przez producentów dopuszczalnym błędzie pomiarowym. W przypadku indeksu skrobiowego trudno jest oszacować jego wartość, zważywszy, że jest on oceniany subiektywnie przez sadowników w przypadkowych warunkach oświetlenia, jako przybliżoną wartość otrzymaną poprzez porównanie z tablicami wzorcowymi. Dane literaturowe (Peirs i in. 2002) wskazują, że błędy oceny tego wskaźnika w zależności od osoby oceniającej oraz warunków oznaczenia mogą sięgać do 60%.

Mając na uwadze niezawodność i pewność metody skrobiowej, istnieje jednak potrzeba jej udoskonalenia, gdyż podstawowym jej mankamentem jest właściwa interpretacja testu tak, by osiągnąć pewne i jednoznaczne wyniki jego oznaczenia. Ze względu na łatwą dostępność tego testu i prostotę oznaczeń, koniecznym staje się opracowanie metody obiektywnego odczytu jego wartości, by zwiększyć precyzję oznaczenia tego ważnego wskaźnika. Dotychczas nie istnieje procedura normalizacyjna, w której określono warunki rejestracji obrazu ani metodyka wyodrębnienia istotnych dla pomiaru fragmentów obrazu niniejsza praca podejmuje próbę opracowania takiej metodyki.

2. PRZEGLĄD PIŚMIENNICTWA

2.1. Dojrzewanie owoców oraz prawidłowy ich zbiór

Dojrzałość zbiorcza powinna być oceniana na podstawie stanu fizjologicznego owoców (Tomala, 1995b). Stosowanie się do tego stwierdzenia w praktyce jest podstawą prawidłowego postępowania we współczesnym przechowalnictwie. Termin, w którym powinien odbywać się zbiór nie jest dla danej odmiany datą stałą, lecz ulega corocznym zmianom (Reid i in., 1982; Rutkowski i in., 2000; Rutkowski i in., 2003). Rozwój fizjologiczny owoców stymulowany jest wieloma czynnikami. Wśród najważniejszych wymienić należy warunki klimatyczne (Reay, 1999; Opara, 2007; Solovchenko i in. 2011), intensywność zabiegów irygacyjnych w sadzie (Mpelasoka, Behboudian, 2002; Opara, 2007), nasłonecznienie sadu i intensywność przerzedzania (Merzlyak, Solovchenko, 2002; Mika i in., 2007; Solovchenko i in. 2010; Hengari i in. 2014), typ podkładki (Rutkowski i in. 2005; Tomala i in. 2008), wiek drzew (Mika i in. 2007; Treder i in. 2010), stosowanie dodatkowych oprysków przed zbiorem (Tomala, 2002; Mignani, Bassi 2005; Deng i in., 2013).

2.1.1. Czynniki determinujące termin zbioru owoców

Zbiór owoców jabłoni w terminie, który został wyznaczony błędnie prowadzi do poważnych strat ich wartości i przydatności do przechowywania (Łysiak, 1998a). Stopień dojrzałości owoców wpływa na zawartość składników wykrywanych organoleptycznie, takich jak wosk (Ju, Blamlage, 2001), którego zawartość wzrasta wraz z rozwojem owocu, podobnie jak substancji aromatycznych (Vanoli i in. 1995; Girard, Lau, 1995). Obserwuje się ponadto utratę jędrności (Stow i in. 2000; Rutkowski i in. 2003; Vilanova i in. 2014), szybsze brązowienie owoców zbyt wcześnie zebranych (Song, Bangerth, 1996). Opóźnienie zbioru owoców powoduje podczas ich przechowywania wzrost szybkości syntezy etylenu (Bulens i in. 2012), co przyspiesza mięknięcie tkanki owoców. Owoce dojrzewające w sadzie wykazują różne stadia syntezy etylenu w zależności od dostępu światła. Solovchenko i in. (2011) wykazali, że synteza etylenu w owocach zachodzi szybciej w owocach położonych od strony nasłonecznionej niż od strony zacienionej. Jabłka rosnące w zacienionych partiach drzew są ponadto bardziej podatne na oparzenie słoneczne (w temp. 46-49°C) (Hengari i in. 2014), przy czym wielkość tego zjawiska uzależniona była od odmiany badanych owoców. Owoce zebrane zbyt wcześnie są narażone na uszkodzenia wywołane nadmiarem CO_2, które występują w chłodniach z kontrolowaną atmosferą (CA) i ULO (Ultra Low Oxygene) (Watkins i in. 2000; Kruczyńska i in. 2001; Rutkowski i in. 2003). Zapobieganie uszkodzeniom takim jak oparzelizna powierzchniowa może być wykonywane za pomocą środków chemicznych, np. DPA (Whitaker 2000). Villanova i in. (2014) wykazali, że odporność na odkształcenia i okaleczenia owoców jest związana ściśle z ich dojrzałością i warunkami przechowywania. Uszkodzeniom mechanicznym ulegają przede wszystkim owoce bardzo zaawansowane w rozwoju (Ju, Bramlage, 2001; Johnson i in. 2002a; Hrazdina, 2005; Toivonen 2008; Yang i in. 2013). Inną konsekwencją opóźnienia zbioru jest zwiększone ryzyko chorób przechowalniczych (Tomala, 1995a; Tomala, 2002), które jest zależne od odmiany jabłek. Larriguardiere i in. (1997) wykazali, że szyb-

kość syntezy etylenu będące następstwem aktywności ACC-oksydazy było niskie dla odmian późnych (Granny Smith). W pozostałych przypadkach szybko aktywizowała się w tych warunkach ACC oraz następowała synteza etylenu. Śledzenie syntezy etylenu jest wykorzystywane również w celu wyznaczania terminu zbioru owoców metodą indukcji etylenu, którą prowadzi się w warunkach laboratoryjnych (Jobling, Mc Glasson 1995). Metoda ta ocenia stan fizjologiczny owoców i z kilkudniowym wyprzedzeniem pozwala wyznaczyć optymalny termin zbioru owoców, szczególnie tych, które przechowywane są w warunkach kontrolowanej atmosfery.

W ostatnich latach obserwowany jest wzrost zainteresowania opracowaniem metod ingerencji w szybkość syntezy etylenu, a tym samym regulację szybkości dojrzewania owoców przed zbiorem (Yildiz i in. 2012; Deng i in. 2013), jak i podczas przechowywania (Ju, Blamlage, 2001; Raybaudi-Massilia i in. 2007; Wawrzyńczak i in. 2008; Watkins, 2008; Bulens i in. 2012; Zambrano-Zaragoza i in. 2014). Jedną z metod opóźnienia syntezy etylenu jest krótkotrwałe przechowywanie zebranych owoców w komorach o wysokim (17%) stężeniu CO_2 (Gorny, Kader, 1996; Gorny i in. 2002).

Substancjami, które używane są do opóźnienia dojrzewania są przede wszystkim 1-MCP (1- metylocyklopropanol) oraz AVG (aminoetoksyglicyna). Według Lurie (2008) substancje te wykazują odmienny mechanizm działania. 1-MCP znany jako Smart Fresh, nieodwracalnie łączy receptory etylenu w komórkach, co mimo jego obecności powoduje długotrwałe zahamowanie oddziaływania tego gazu (Wawrzyńczak i in 2007). Aktywną formą tego środka jest gaz, (podobnie jak etylen) używany w obróbce pozbiorowej. Z kolei amineotoksyglicyna (AVG) jest inhibitorem ACC. Rzadziej stosuje się inne metody, na przykład zjawisko zmienności sekwencji DNA - SNP (Single Nucleotide Polymorphism), które inaktywuje enzymy ACS (acetylokoenzym) oraz ACO (acylokooksydaza), powodując zahamowanie tempa syntezy etylenu (Deng i in. 2013).

Oprócz oddziaływania chemicznego zainteresowanie wzbudzają alternatywne metody ingerencji w szybkość dojrzewania owoców, takie jak system dynamicznej kontrolowanej atmosfery (DCS) (Veltman i in. 2003; Watkins, 2008), czy też usuwanie etylenu podczas składowania owoców w chłodni, przy czym korzystniejszym rozwiązaniem dla zachowania jędrności owoców, jest jego usuwanie tylko w początkowym okresie przechowywania (12-16 tygodni), niż przez cały czas składowania (28 tygodni) (Stow, 2000).

Kolejną metodą oddziaływania na szybkość dojrzewania owoców po zbiorze jest uprawa roślin zawierających mutacje genowe. Wczesna ingerencja w genotyp umożliwia znaczące opóźnienie syntezy etylenu (Hrazdina i in. 2005). Nowsze badania (Yang, 2013) wykazują niezwykłą złożoność i dynamikę procesów odpowiedzialnych za syntezę tego gazu. Jednakże sterowanie tempem dojrzewania stymulowanego produkcją etylenu może być realizowane na podstawie znajomości genów odpowiedzialnych z jego syntezę. Jest to zaawansowana metoda selekcji genotypowej (QTL mapping) (Costa i in. 2014).

Rozwój owoców jabłoni, które są organizmami klimakterycznymi (Tomala, 1995b; Kruczyńska i in. 2001; Mpelasoka, Behboudian, 2001; Baranowski i in. 2012), skutkuje także, oprócz wytwarzaniem etylenu i mięknięciem owoców także innymi symptomami dojrzewania. Jednym z nich jest emisja lotnych substancji zapachowych, które, w zależności od stopnia dojrzałości powstają w różnym tempie i intensywności (Vanoli i in. 1995; Song, Bangerth 1996; Fellman i in. 2003; Escheveria i in. 2004). Owoce zebrane zbyt wcześnie charakteryzują się opóźnionym syntetyzowaniem aromatów (Girard, Lau, 1995;

Song, Bangerth, 1996). Obecność gazów i aromatów charakterystycznych dla dojrzewających owoców jest wykrywana między innymi przez urządzenia zwane „elektronicznym nosem" (Di Natale i in. 2001; Saevels i in. 2003; Pathange i in. 2006). Owoce zbierane w różnych terminach, w przedziale od 158 do 180 dni od pełnego kwitnienia charakteryzowały się zróżnicowanym poziomem substancji lotnych (Vanoli i in. 1995).

Innym wskaźnikiem stopnia dojrzałości owoców jest wybarwienie skórki (Rutkowski i in. 2008; Merzlyak, Solovchenko, 2002; Bertone i in. 2012). Niektóre substancje, takie jak chlorofil (Rutkowski i in. 2008; Bertone i in. 2012), antocyjany (Reay, 1999) oraz karotenoidy (Merzlyak, Solovchenko, 2002) podczas dojrzewania owoców ulegają przemianom, co skutkuje zmianami barwy. Nie jest ona zawsze dobrym wskaźnikiem ich stanu fizjologicznego, gdyż pełne wybarwienie skórki może pojawić się przed osiągnięciem dojrzałości zbiorczej (Kruczyńska i in. 2002; Rutkowski i in. 2003). Pomiary barwy odbywają się najczęściej na niewielkiej powierzchni skórki, która nie zawsze niesie pełną informację o rozkładzie barw na całej powierzchni owocu np. mango (Kang i in. 2008). Podobnie dzieje się w przypadku jabłek, których liczne odmiany cechują się zróżnicowanym rumieńcem (Leemans i in. 1998; Miranda i in. 2007; Ji i in. 2012; Garrido-Novell i in. 2012). Obecnie trwają prace nad wykorzystaniem tej cechy owoców do szacowania ich plonów poprzez segmentację obrazu owoców w ich naturalnym środowisku (Rakun i in. 2011; Linker i in. 2012; Wang i in. 2012), do klasyfikacji jakościowej przed zbiorem (Moreda i in. 2012) lub do automatycznego ich zbioru (Ji i in. 2012). Barwa i wielkość owoców niektórych odmian to cechy o wysokiej dodatniej korelacji (Stajnko i in. 2004). Producenci owoców często opóźniali ich zbiór, w celu osiągnięcia owoców o większej masie i intensywnym wybarwieniu. Popełniali jednak błąd, polegający na wprowadzenie ich w stan zaawansowanej dojrzałości, co dyskwalifikowało je do długotrwałego przechowywania (Tomala 1995b).

2.1.2. Zastosowanie obserwacji komputerowej w ocenie rozwoju owoców

Wysokie wymagania i oczekiwania konsumentów, dotyczące jakości żywności, wymuszają konieczność obiektywnej i szybkiej kontroli surowców i produktów przemysłu spożywczego. Ocena jakości wykonywana za pomocą zmysłów człowieka jest obarczona subiektywizmem, a także jest podatna na szereg błędów powodowanych znużeniem i monotonią wykonywanych czynności. Dlatego pojawiła się konieczność adaptacji do celów badawczych i aplikacyjnych znanego już od lat 60-tych (Brosnan, Sun, 2004) systemu analizy obrazu. Systemy obserwacji komputerowej (ang. „computer vision") stanowią połączenie komputera, kamery, systemu oświetlenia (opcjonalnie), oprogramowania do przechwytywania, zapisu, archiwizacji oraz przetwarzania obrazów (Du, Sun, 2006).

Systemy komputerowej analizy obrazu są postrzegane jako zintegrowane układy bezkontaktowego wykrywania i oceny przedmiotów, zjawisk, procesów, które często będąc niewidoczne z zewnątrz (Lefcout i in. 2006; Huang i in. 2012; Belin i in. 2013) poprzez zastosowanie zaawansowanych metod obrazowania dostarczają niezbędnych informacji o strukturze wewnętrznej badanego surowca. Ze względu na szerokie możliwości obrazowania zastosowanie systemów wizyjnych w rolnictwie jest znaczące, plasując je oraz przemysł spożywczy w pierwszej dziesiątce gałęzi przemysłu, w których znalazły one zastosowanie (Unay i in. 2011. Komputerowa analiza obrazu jest zespołem czynności, które

prowadzą do otrzymania dokładnych wartości liczbowych na podstawie danych otrzymanych z obliczeń charakterystyki obrazu wcześniej zapisanego w pamięci komputera (Sun, 2006; Moreda i in. 2012). Wśród nich są przykładowo pole powierzchni obiektu, długość linii brzegowej, wymiary maksymalne, średnice rzutowe na oś X, Y, współczynnki kształtu oraz inne charakterystyki obiektów umieszczonych w obrazie (Guz 2009; Dass i in. 2012). Podobnie jak podczas obserwacji wzrokowej, systemy wizyjne potrzebują oświetlenia, które może być dobrane do różnych zastosowań, spełniając przy tym specyficzne wymagania stawiane podczas analizy uzyskanych obrazów. Właściwie zaprojektowane oświetlenie pomaga zredukować niepotrzebne odblaski, cienie oraz szumy obrazu, które powodują błędy w ocenie badanego obiektu oraz znacznie wydłużają czas analizy (Guz i in. 2011; Szczypiński, Zapotoczny, 2012). Oświetlenie używane w systemach wizyjnych może pracować w świetle odbitym (Guz, 2006) lub przechodzącym (Guz, 2010), stosowanym w celu otrzymania obrazu zarysu obiektów, pozbawionego cieni, który wykorzystuje się do dokładnych pomiarów cech geometrycznych.

Systemy oświetleniowe stosowane w analizie obrazu są różnorodne. W powszechnym użyciu jest światło żarówek, świetlówek, oświetlenie fluorescencyjne (De Ell i in. 1996; Belin i in 2013), laserowe (Szymańska-Chargot i in 2012; Kurenda i in. 2012). Rzadziej stosowane są źródła obrazowania spoza zakresu widzialnego: promienie x (Mendoga i in. 2010; Herremans i in. 2013), oraz źródła podczerwieni (Peng, Lu 2008; Mendoza i in 2014). Wśród zaawansowanych technik obrazowania można wymienić obrazy rezonansu magnetycznego (Trybo i in. 2004), rozproszonych obrazów spektralnych (Huang i in. 2012; Munera i in. 2017a) czy też obrazy termowizyjne (Baranowski i in. 2012; Belin i in. 2013) oraz tomografia komputerowa (Jarolmasjed i in. 2016).

Wobec ogromnych możliwości, jakie stwarza obecnie technika zapisu i przetwarzania obrazu wiele cech jakościowych może być rejestrowanych i ocenianych systemami analizy obrazu. Wśród nich znajdują się przede wszystkim: barwa surowców roślinnych i zwierzęcych (Stien i in 2007; Quevedo i in. 2009a, Linker i in. 2012; Wu i Sun 2012; Wang i in. 2012; Matiacevich i in. 2011), wielkość owoców (Paulus, Schrevens, 1999; Sun 2004; Miranda i in. 2007; Rakun i in. 2011; Sampson i in 2014), kształt półproduktów i produktów pochodzenia roślinnego (Fernández i in. 2005; Pedreschi i in. 2006; Moreda i in. 2012; Kelman, Linker, 2014), defekty w surowcach i produktach, takie jak brązowienie (Yoruk i in. 2004; Quevedo i in. 2009b; Pace i in. 2011; Herremans i in. 2013; Lunadei i in. 2011; Laverde i in. 2011), skaleczenia i sińce (Li i in. 2002; Xing i in. 2007b; Baranowski i in. 2012), wykrywanie wad ukrytych, takich jak mączystość (Huang i in. 2012; Arefi i in. 2016), parch jabłoni (Belin i in. 2013), szacowanie masy obiektów (Miranda i in. 2007; Mollah, 2010), identyfikację części anatomicznych (Penman 2001; Xing i in. 2007b) ocena dojrzałości owoców i warzyw (Johnston i in. 2002; Qing, i in. 2007; Peng, Lu 2008; Garrido-Novell i in. 2012; Bertone i in. 2012; Mendoza i in. 2014; Cardenas-Perez i in. 2017; Wan i in. 2018), czy też ocena stanu fizjologicznego (Peirs i in. 2005; Guz, 2005; Peng, Lu, 2006; Rutkowski i in. 2008; Mendoza i in. 2011; Szymańska-Chargot i in. 2012; Santos-Pereira i in. 2018).

Na podstawie analizy danych uzyskanych z komputerowych obrazów wykonywanych w ich naturalnym środowisku podjęto próby szacowania wielkości plonów owoców. Dotyczy to zarówno jabłek (Stajnko i in. 2004; Rakun i in. 2011; Linker i in. 2012; Ji i in. 2012; Kelman, Linker 2014), cytryn (Kurtulmus i in. 2011), czy też wiśni (Wang i in. 2012).

Surowcami, które poddawane są analizie obrazu znajdują się, poza jabłkami oraz ich półproduktami, które są najczęściej poddawane tej procedurze (Sun 2004), również gruszki (Quevedo i in. 2009a), banany (Quevedo i in. 2009b) owoce oraz nasiona winogron podczas dojrzewania (Rodriguez-Pulido i in 2012), nektarynki (Pace i in. 2011), borówki (Matiacevich i in. 2011), ziemniaki (Trybo i in. 2004), a także karczochy (Amodio i in. 2011), kształt i wielkość ziaren zbóż (Zapotoczny 2011; Guz i in. 2011) oraz zawartość tłuszczu w filetach łososia (Stien i in. 2007), i barwa mięsa wieprzowego (Zapotoczny i in. 2014).

Wśród szczególnie unikalnych zastosowań komputerowej analizy obrazu można wymienić rejestrację procesu topienia sera (Wang, Sun, 2001; Wang, Sun, 2003), analiza barwy suszonych krewetek (Hosseinpur i in. 2013), kształt czipsów ziemniaczanych (Pedreschi i in. 2006), czy też analiza obrazu podczas identyfikacji produktów spożywczych o konsystencji piany (Germain, Aquillera, 2012). Nowsze publikacje (Derossi i in. 2019) przedstawiają metodykę rekonstrukcji struktury 3D na podstawie obrazów 2D przedstawiających mikrostrukturę jabłek oraz okruchów pieczywa.

2.2. Barwa surowców i produktów spożywczych oraz metody jej oceny

Barwa surowców i produktów pochodzenia roślinnego a także zwierzęcego jest uznawana za podstawową właściwość fizyczną, za pomocą której wyraża się szereg cech jakościowych (Abdullah i in. 2004). Wśród cech, których zmiany jakościowe mogą być wyrażone zmianą barwy są: dojrzałość owoców (Kang i in. 2008; Matiacevich i in. 2011; Wang i in. 2012; Nguyen i in. 2016), uszkodzenia owoców (Leemans i in. 1998; Quevedo i in. 2009a; Pace i in. 2009), wykrywanie larw owadów (Rady i in. 2017), zmiany barwy surowców w procesach technologicznych (Wang, Sun, 2001; Wang, Sun, 2003; Laverde, 2011), ocena świeżości artykułów pochodzenia zwierzęcego (Jackman i in. 2011) czy też zawartość tłuszczu w produkcie (Stien i in. 2007).

Barwa obiektów różnego pochodzenia może być precyzyjnie analizowana za pomocą technik komputerowych, używanych w systemach analizy obrazu. Zestawy te wyposażone są w specyficzne dla danego zastosowania programy oferujące szerokie możliwości pomiarowe, wśród których można znaleźć: pomiary długości obiektów, pola ich powierzchni, pomiary kątów, obwodu, kształtu, lokalizacji obiektów w polu pomiarowym i wiele innych. Wśród nich często wykorzystuje się te możliwości systemów, które polegają na ocenie różnic w zabarwieniu poszczególnych fragmentów obrazu, co często jest skutkiem zmian zachodzących w produkcie (Sun, 2004; Ji i in. 2012). W pracach, w których narzędziem badawczym jest system wizyjny rzadko spotyka się korzystanie z wszystkich dostępnych, charakterystycznych dla danego oprogramowania możliwości pomiarowych. Wielu badaczy koncentruje się na wykonaniu niektórych oznaczeń, głównie cech geometrycznych, wykorzystując jedynie niektóre instrumenty programu. Tymczasem oznaczenia wykonane zgodnie z obowiązującymi standardami(L*a*b lub RGB) pozwalają przy ocenie barwy osiągnąć wysokie współczynniki korelacji z wynikami uzyskanymi przy ocenie wzrokowej (Stajnko i in. 2004; Miranda i in. 2007; Xing i in. 2007b).

Barwa przedmiotu jest definiowana jako rozkład spektralny trzech składowych biorących udział w zjawisku opisywanym jako wrażenie barwne. Są to: źródło światła, zdolność do odbijania światła, charakterystyczna dla danego przedmiotu (próbki), oraz indywidualne

cechy odbioru przez obserwatora. Wszystkie te składowe zostały zdefiniowane przez CIE (Commision Internationale de l'Eclairage) już w 1931 roku (Mendoza i in. 2006). Definicja barwy jest oparta na symulacji odbioru barwy przez człowieka w polu widzenia wynoszącym zaledwie 2°, określeniu barw podstawowych: czerwonej, zielonej, niebieskiej (RGB – red, green, blue) oraz funkcje dopasowania barwy (CIE 1986). W zjawisku odczuwania barw (human vision) istnieją trzy zestawy sensorów, w których występują maksymalne czułości odbioru barwy przy długości fali wynoszącej 680 nm dla barwy czerwonej, 540 nm dla barwy zielonej oraz 450 nm dla niebieskiej. Światło dowolnej długości w zakresie widzialnym od 400 do 700 nm pobudza jeden lub więcej z tych trzech sensorów. Postrzeganie barwy jest zależne od tego, które sensory oraz w jakiej kombinacji zostają wzbudzone, oraz w jakim stopniu intensywność odbioru barwy oraz jej natężenie zależy od natężenia oświetlenia oraz zdolności odbijania światła przez obserwowaną próbkę (Hunt, 1991). CIE definiuje również właściwości spektralne kilku standardów oświetlenia, które są określone poprzez temperaturę barwy. Najczęściej standardem oświetlenia jest źródło światła o temperaturze 6500 K – D_{65}, które reprezentuje uśrednione światło dzienne. W roku 1976 CIE podaje 2 standardy oceny barwy, które są mniej zależne od oświetlenia: L*a*b* (CIE-LAB) oraz L*u*v* (CIELUV) (Hunter, Harold 1987).

Przy oznaczaniu barwy żywności pojawienie się nowych narzędzi pomiarowych stworzyło w ostatnich latach nowe możliwości oceny właściwości optycznych, które do tej pory były oceniane subiektywnie przez człowieka. Urządzeniami pomiarowymi do oznaczania barwy są kolorymetry i spektrofotometry. Najczęściej podają one odczyty barw w przestrzeni XYZ, RGB lub L*a*b*. Chociaż te urządzenia stosuje się do oznaczeń surowców roślinnych nie dają one informacji o nim jako o całości. Informacje uzyskane za pomocą kolorymetrów i spektrofotometrów pochodzą głównie z małej powierzchni obiektu (zwykle od kilku do kilkudziesięciu mm^2), dlatego też należy wykonywać pomiary w wielu powtórzeniach by uzyskać wiarygodną informację o obiekcie jako o całości (Mendoza i in. 2006).

Dobrymi narzędziami, które rozwiązują ten problem są obecnie coraz lepsze systemy kamer wideo oraz aparatów cyfrowych. Należy wspomnieć, że te urządzenia wymagają odpowiedniej kalibracji do warunków, w których pracują tak, by osiągnąć optymalne warunki pracy i uzyskać obiektywne wyniki analizy barwnej. Większość kamer i aparatów cyfrowych pracuje z elementami światłoczułymi, czyli matrycami typu CCD z filtrem, który umożliwia sąsiadującym ze sobą elementom widzenie barw: czerwonych (R-red), zielonych (G-green), a także niebieskich (B-blue), których wzajemne względne natężenia mogą być automatycznie lub ręcznie regulowane za pomocą funkcji zwanej „równowagą bieli" (WB – ang. white balance). Tego typu matryce mają 50% elementów o maksymalnej czułości na barwę zieloną oraz po 25% elementów czułych na barwę czerwoną i niebieską. W ten sposób otrzymuje się obraz cyfrowy w postaci RGB z trzema składnikami na piksel w zakresie 0-255, dla każdej składowej, R, G oraz B. System taki daje 8-bitowy system archiwizacji i przetwarzania. Kombinacja natężenia trzech składowych obrazu RGB daje w efekcie barwny obraz cyfrowy (Russ, 2005).

Standard RGB (SRGB) jest międzynarodowym standardem barwy zdefiniowanym przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniki (IEC) jako IEC 619662-1 (1999). SRGB został przyjęty w szerokim zakresie zastosowań. Aplikacjami, które stosują standard SRGB są Adobe Photoshop, IASC Paintshop. Jest też podstawową przestrzenią barw dla Microsoft

Windows oraz wielu drukarek. Wiele kamer cyfrowych jest dostosowanych do standardu SRGB.

2.3. Zasada działania systemów komputerowej analizy obrazu

Systemy komputerowej analizy obrazu są dość złożonymi zestawami sprzętu. Typowy analizator obrazu składa się z pięciu głównych komponentów: kamery lub aparatu cyfrowego, zestawu oświetleniowego, karty do przetwarzania obrazów przez komputer, zestawu komputerowego oraz oprogramowania. Bardzo ważnym elementem systemu, który zapewnia obserwację obrazów jest oświetlenie, które może poprzez właściwą regulację i dobór źródła oraz kierunku padania światła pozwala skontrastować próbkę w celu pokazania jej struktury, co ułatwi analizę zapisanych obrazów. Liczni autorzy (Wang, Sun 2001; Brosnan, Sun 2004; Abdullah i in. 2004; Stien i in. 2007; Kang i in. 2008) podkreślają znaczenie prawidłowo dobranego oświetlenia dla poprawnej rejestracji barw i szczegółów, które są przedmiotem analizy. Dotyczy to zarówno pomiarów wykonywanych w warunkach laboratoryjnych (Penman, 2001; Miranda i in. 2007; Quevedo i in. 2009a), jak i analiz obiektów znajdujących się w ich naturalnym środowisku (Mollah i in. 2010; Rakun i in. 2011; Kurtulmus i in. 2011; Wang i in. 2012; Linker i in. 2012). Kierunek, natężenie oświetlenia oraz jego barwa odgrywają kluczową rolę w tworzeniu wysokiej jakości obrazu, wpływając bezpośrednio na efektywność i precyzję jego analizy. Prawidłowe oświetlenie pomaga wygenerować niezbędny do analizy kontrast obrazu (Guz, 2005; Zapotoczny, 2008). Odpowiednie ustawienie świateł powoduje eliminacje niepotrzebnych refleksów, cieni i szumów, co w efekcie pozwala na skrócenie czasu analizy obrazu i zwiększa jej precyzję. Projektując oświetlenie w systemie wizyjnym należy rozważyć różne warianty oświetlenia, włączając w to lokalizację świateł, ich liczbę, dobór typu lamp oświetleniowych i barwę oświetlenia. Oświetlenie może być umiejscowione przed obiektem (obserwacja w świetle odbitym od obiektu) jak i za obiektem (obserwacja w świetle przechodzącym), jeżeli obiekt wykazuje przezroczystość. Możliwe jest też połączenie tych dwóch metod oświetlenia w celu poprawy kontrastu obrazu i eliminację zbędnych cieni (Guz, 2005; Guz, 2009).

W celu rejestracji obrazów powstałych w wyniku oświetlania próbek stosuje się sensory dostosowane do odbioru sygnałów świetlnych, czy też promieniowania niewidzialnego, takie jak kamery termowizyjne, detektory promieni X, czy spektroskopy bliskiej podczerwieni. (Baranowski i in. 2012). Najbardziej rozpowszechnioną metodą zapisu obrazów w świetle widzialnym jest wykorzystanie sensorów CCD (Charge Coupled Device). Kamery CCD są budowane jako urządzenia zapisu matrycowego oraz jako skanery liniowe. Pierwszy typ składa się z wielu (od kilku do kilkudziesięciu milionów) elementów światłoczułych ustawionych w postaci matryc o wymiarach od kilkudziesięciu do kilkuset mm^2. Drugi typ to zestaw elementów światłoczułych ustawionych liniowo, które są skanowane do 2000 razy na minutę w celu uzyskania dokładnych obrazów przedmiotu poruszającego się pod sensorem (Brosnan, Sun, 2004).

Proces przetwarzania obrazu do postaci cyfrowego kodu zwany jest digitalizacją. W tym etapie obraz jest dzielony na dwuwymiarowe, mikroskopijne pola szachownicy zawierające miniaturowe elementy zwane pikselami. Proces ten prowadzony jest z pomocą

przetwornika wizyjnego zwanego digitizerem lub wychwytem obrazu (ang. frame grabber). Przetwarzanie obrazu oraz jego analiza stanowi istotę działania systemu wizyjnego. Analiza obrazu wymaga wstępnej jego korekty polegającej na poprawie kontrastu, usunięcia defektów, artefaktów, korektę dystorsji obrazu, poruszenia obrazu podczas zapisu i inne (Mendoza i In. 2006).

Analiza obrazu jest procesem, który polega na wyodrębnieniu obiektu lub obiektów z próbki za pomocą oddzielenia ich od tła i stworzenia wymiernych wartości liczbowych, określających cechy jakościowe badanego obiektu tak, by uzyskać wiarygodne dane umożliwiające ocenę jego stanu. Analiza obrazu składa się z serii kroków, które można podzielić na trzy etapu: przetwarzanie wstępne obrazu, średni poziom przetwarzania obrazu oraz końcowy etap przetwarzania danych (Sun, 2000). Wstępne przetwarzanie obrazu obejmuje wykonanie cyfrowego obrazu próbki oraz jego wstępną korektę polegającą na usunięciu szumów, korektę geometrii obrazu, korektę odcieni barw lub skali szarości, usunięcie smug i innych artefaktów (Sun, 2004). Średni poziom przetwarzania obrazu obejmuje segmentację obrazu (Dass i in. 2012). Segmentacja obrazu sprowadza się do wyodrębnienia z obrazu zbioru punktów, które spełniają określone kryteria i zwykle należą do obiektu, lub też podziału całości obrazu na części, których poszczególne zbiory spełniają pewne określone przez analizę cechy (jasność, kształt, długość linii brzegowej itp.) (Wu, Sun, 2012). Segmentacja jest wykonywana za pomocą trzech podstawowych technik; progowania, wyodrębnienia obiektu na podstawie przebiegu linii brzegowej oraz wybór i połączenie punktów sąsiadujących o podobnych właściwościach (Lv i in. 2019). Kolejnym zadaniem na tym etapie jest wykonanie pomiarów obiektów powstałych w wyniku segmentacji. Ten etap polega na wyprowadzeniu szeregu użytecznych informacji, które opisują dany obiekt i jego cechy w postaci danych liczbowych.

Ostatni poziom analizy obrazu obejmuje identyfikacje obiektów i interpretację danych z pomocą metod statystyki matematycznej lub sztucznych sieci neuronowych. Te kroki pomagają w podjęciu decyzji o modyfikacji procesu, który wywołuje zmiany charakterystyki badanego obiektu. Implementacja sieci neuronowych i operacji fuzzy-logicznych umożliwia zastosowanie z powodzeniem systemów komputerowej analizy obrazu w praktyce (Rakun i in. 2011; Kurtulmus i in. 2011; Ji i in. 2012).

2.4. Przykłady zastosowań systemów wizyjnych w analizie obrazu surowców i produktów spożywczych

Pierwszym, choć nie jedynym zastosowaniem systemów wizyjnych w ocenie surowców i produktów jest ocena ich jakości (Jackman, Sun, 2013; Munera i in. 2017b). Dotyczy to zarówno przydatności ich do spożycia pod względem dojrzałości (Kang i in. 2008; Matiacevich i in. 2011; Wang i in. 2012), jak również wykrywania niekorzystnych zmian barwy (Miranda i in. 2007; Xing i in. 2007; Quevedo i in. 2009c; Pace i in. 2011; Garrido-Novell i in. 2012), ocenę kształtu owoców (Penman i in. 2001; Fernández i in. 2005; Laverole i in. 2011; Moreda i in. 2012). Systemy wizyjne stają się obecnie ważnym narzędziem do wykrywania wad owoców, takich jak asymetria, nadmierna krzywizna (Moreda i in. 2012), skażenie powierzchni odchodami owadów (Lefcout i in. 2006), parch jabłoni (Balin i in. 2013), czy też mączystość owoców (Huang i in. 2012). Innymi przykładami zastosowań

jest użycie tych systemów jako narzędzi do opisu, metodami pośrednimi, innych cech surowców, takich jak ekstrakt i jędrność (Qing i in. 2007; Mendoza i in. 2011), dojrzałość (Kurenda i in. 2012; Szymańska-Chargot i in. 2012), czy też prognozowanie ich plonowania (Kurtulmus i in. 2011; Rakun i in. 2011; Linker i in. 2012). Rolnictwo i przemysł spożywczy są tymi gałęziami gospodarki, które zaskakująco często korzystają z komputerowej analizy obrazu. Znajdują się one w pierwszej dziesiątce branż, które korzystają z osiągnięć współczesnej techniki komputerowej, w tym zapisu i analizy obrazu (Unay i in. 2011). Konieczność dostarczenia na rynek nowych produktów, które spełniają wysokie oczekiwania konsumentów, stymuluje rozwój tych urządzeń pod kątem zastosowania ich jako szybkich i obiektywnych narzędzi kontroli jakości produktów (Paulus i in. 1997; Blasco i in. 2003; Abdullah i in. 2004; Jarolmasjed i in. 2016). Kształt, wymiar, barwa, przebarwienia oraz choroby owoców i warzyw to obecnie główne kryteria identyfikacji produktów oraz ich odpadu (Kang i in. 2008; Matiacevich i in. 2011; Linker i in. 2012; Jackman, Sun 2013), dlatego ważna jest adaptacja systemów komputerowej analizy obrazu, by w połączeniu z innymi metodami dawały czytelne, łatwe w analizie obrazy z użyteczną dla badacza informacją. Belin i in. (2013) wykorzystywali termografię oraz fluorescencję chlorofilu do wykrywania parcha jabłoni. Metoda ta daje obiecujące perspektywy na szersze jej zastosowanie w ogrodnictwie. Mendoza i in. (2011) ocenili ekstrakt i jędrność jabłek metodą analizy spektralnej rozproszonej wiązki NIR. Podobne badania (Mendoza i in. 2014) przeprowadzono w celu sortowania trzech odmian jabłek według zawartości ekstraktu i jędrności. Wykorzystano w tym celu spektroskop VIS/NIR. Oznaczaniem zawartości cukrów w owocach tą techniką zajmowali się także inni badacze (Peng, Lu, 2006; Peng, Lu, 2008; Ma i in. 2018; Tang i in. 2018). Xing i in. (2007) wykorzystywali multispektralne obrazy do wykrywania sińców i obić w owocach Golden Delicious i Jonagold. Dokładność wykrywania tych wad sięgała 98%. Wczesne stadia sinienia owoców wskutek uszkodzeń są skutecznie wykrywane także poprzez analizę obrazów w szerokim zakresie promieniowania (400nm – 5000 nm) (Baranowski i in. 2012). Innym kierunkiem wykorzystania analizy obrazu jest szacowanie plonów w warunkach naturalnej wegetacji owoców (Stajnko i in. 2004; Rakun i in.2011; Linker i in. 2012) oraz ich klasyfikację w tych warunkach (Wang i in. 2012).

Kolejnym obszarem wykorzystania systemów wizyjnych jest ocena surowców i produktów pod kątem zmian barwy, które obniżają ich przydatność do przetwarzania oraz wartość rynkową. Badania w tym kierunku wykonał Herremans i in. (2013) posługując się źródłem promieniowania X. Ocenie podlegała podatność jabłek odmiany Braeburn na brązowienie miąższu. Lunadei i in. (2011) w ocenie brązowienia owoców posługiwali się trzema kamerami CCD, które zapisywały obrazy w zakresie podczerwieni (800 nm), w świetle czerwonym (680 nm) oraz niebieskim (450 nm). Chandel i in. (2018) wykorzystali analizę obrazów RGB pochodzących z kamery termowizyjnej do precyzyjnej oceny oparzeń słonecznych jabłek podczas ich dojrzewania.

De Ell i in. już w 1996 roku posłużyli się fluorescencją chlorofilu do prognozowania oparzelizny powierzchniowej, która może pojawić się w sprzyjających warunkach u niektórych, podatnych na nią odmian jabłek po kilku miesiącach składowania owoców w chłodni. Rutkowski i in. (2008) dokonali pomiaru zawartości chlorofilu w skórce za pomocą optycznego spektrofotometru odbiciowego. Zawartość chlorofilu była także pewnym wskaźnikiem dojrzałości jabłek, dlatego też Bertone i in. (2012) za pomocą techniki VIS/NIR

oznaczali ten wskaźnik w skórce owocu. Wyniki tych oznaczeń dobrze korelowały z tradycyjnymi metodami oceny dojrzałości owoców (zawartość skrobi, ekstrakt, jędrność). Innym zastosowaniem techniki VIS/NIR było wykrywanie zgnilizny jabłek we wczesnym jej stadium (Li i in. 2019).

2.5. Współczesne metody oceny dojrzałości owoców

2.5.1. Metody oparte na obserwacji zmian stężenia etylenu

Owoce, które zaliczane są do organizmów klimakterycznych wykazują wzrost produkcji etylenu (Vanoli, 1995; Song, Bangerth, 1996) podczas rozwoju, który związany jest ze zwiększoną intensywnością oddychania (Tomala, 2003; Tomala, 2004; Toivonen, 2008). Istnieje ścisła zależność między dojrzałością owoców a szybkością produkcji etylenu (Fan i in. 2011). Owoce niedojrzałe nie produkują etylenu lub wytwarzają go niewielkich ilościach (Bulens i in. 2012). Wzrost szybkości produkcji etylenu, który następuje podczas zbliżania się terminu zbioru informuje o osiągnięciu przez owoce stanu dojrzałości zbiorczej (Larriguardiere i in. 1997; Rutkowski i in. 2003).

Metoda oznaczania dojrzałości jabłek z wykorzystaniem pomiaru stężenia etylenu polega na pobraniu go z gniazda nasiennego, które jest zbiornikiem gazów o składzie odpowiadającym tym, znajdującym się w przestworzach międzykomórkowych. Gaz ten pobiera się za pomocą specjalnej igły oraz strzykawki (Skrzyński, 1997). W celu oznaczenia stężenia etylenu w próbce konieczne jest użycie chromatografu gazowego (Jobling, Mc Glasson, 1995; Tomala, 1999; Tomala, 2002). Dostęp do takiego sprzętu jest, w warunkach produkcji sadowniczej bardzo utrudniony, lub najczęściej niemożliwy. Poziom zawartości etylenu oznaczany tą metodą porównywany jest z krzywą zawartości dla jabłek lub, najlepiej, dla danej odmiany (Jobling, Mc Glasson, 1995; Skrzyński, 1997). W ten sposób na podstawie testu wykonywanego na 10 - 30 owocach ocenia się stopień dojrzałości jabłek i podejmuje decyzję o ich zbiorze. Poszczególne odmiany jabłek mają różny przebieg produkcji etylenu (Stow i in. 2000), dlatego też konieczna jest znajomość przebiegu i szybkości produkcji etylenu dla uprawianych odmian. Ocena stanu dojrzałości ta metodą nie zawsze daje dobre rezultaty, gdyż są odmiany, u których osiągnięcie stanu dojrzałości zbiorczej nie następuje w tym samym czasie, co wzrost produkcji etylenu (Larriguardiere i in. 1997), dlatego też sadownicy bardzo rzadko wykorzystują tę metodę do oceny dojrzałości jabłek (Rutkowski i in. 2001).

Dobrym przykładem wykorzystania zjawiska syntezy etylenu w ocenie dojrzałości jabłek jest metoda indukowanego etylenu (Tomala, 2003; Tomala, 2004). Pozwala ona z pewnym wyprzedzeniem wyznaczyć czas osiągnięcia przez owoce stanu dojrzałości zbiorczej, a tym samym – termin ich zbioru (Łysiak, 1998b). W metodzie tej wykorzystywane jest zjawisko szybszego dojrzewania owoców zerwanych z drzew w porównaniu z tymi, które na nich pozostały. Owoce zerwane zamykane są w hermetycznych naczyniach, a poziom etylenu jest stale kontrolowany. Po zamknięciu 3-10 sztuk owoców mierzy się czas (w godzinach) potrzebny do osiągnięcia stężenia etylenu charakteryzującego owoce dojrzałe (0,5-1,0 µl/l) (Skrzyński, 1997; Tomala, 1999). Po przemnożeniu czasu potrzebnego do osiągnięcia tego stężenia przez współczynnik 0,125 otrzymuje się liczbę dni

do uzyskania dojrzałości zbiorczej na drzewie. Wartość tego współczynnika została ustalona doświadczalnie poprzez porównanie szybkości syntezy etylenu w warunkach jego indukcji oraz szybkości jego wytwarzania dojrzewania w warunkach naturalnych. Dojrzewanie owoców wywołane indukcją etylenu zachodzi w próbkach zamkniętych hermetycznie około 3 razy szybciej niż owoców pozostających na drzewach. Przyspieszenie produkcji etylenu można obserwować w czasie od 2 do 3 tygodni przed wystąpieniem wzrostu produkcji etylenu w owocach dojrzewających w warunkach naturalnych. Autokatalizę etylenu można przyspieszyć o 6-9 dni za pomocą propylenu (Skrzyński, 1997).

Metoda indukowanego etylenu jest jedną z metod prognozowania dojrzałości zbiorczej owoców (Tomala, 1995b; Tomala, 1999). Dokonując pomiaru stężenia etylenu w gniazdach nasiennych można je oznaczyć tylko w czasie rzeczywistym, otrzymując jedynie informację o chwilowym stanie dojrzałości owoców. Wyniki oceny stanu fizjologicznego owoców uzyskane tą metodą nie zawsze są potwierdzone innymi metodami. W celu precyzyjnego i pewnego wyznaczenia terminu zbioru liczni autorzy (Łysiak 1998a; Tomala 2004; Rutkowski i in. 2008) zalecają wykonanie również innych oznaczeń stanu dojrzałości owoców.

2.5.2. Pomiar jędrności

Jednym z głównych kryteriów wyboru najlepszego owocu jest, oprócz wyglądu, aromatu, smaku, soczystości, zwięzłości także parametr zwany jędrnością (Kruczyńska i in. 2001). Jędrność jest definiowana jako parametr tekstury, wyrażający opór materiału podczas deformacji. Pomiar jędrności można wykonać za pomocą prostych przyrządów (Konopacka i in. 1997; Johnson i in. 2002a). Charakteryzuje ona wytrzymałość owoców na uszkodzenia mechaniczne, jak i jest parametrem określającym zmiany jakościowe tkanki owocu podczas dojrzewania (Fan i in. 2011). Pomiar tego parametru jest jedną z metod oceny dojrzałości zbiorczej jabłek. Według wielu autorów (Skrzyński, 1996; Skrzyński, 1997; Peng, Lu, 2006; Rutkowski i in. 2008) owoce przeznaczone do konsumpcji powinny mieć jędrność w przedziale 50-60 N. Takie owoce mają zwykle zwarty miąższ i postrzegane są jako twarde (Konopacka i in. 1997). Pomiar jędrności, ze względu na prostotę i szybkość oznaczenia, cieszy się dużą popularnością (Łysiak, 1998b). Polega on na przebijaniu jabłek na głębokość 8 mm za pomocą znormalizowanego trzpienia o średnicy 11 mm ze stałą prędkością i liniowym przesuwem głowicy. (Skrzyński, 1997; Łysiak, 1998b). Pomiar jędrności dokonywany jest po wcześniejszym usunięciu skórki z miejsca penetracji trzpieniem. Najpewniejsze wyniki uzyskuje się w warunkach laboratoryjnych, stosując specjalistyczne teksturometry, które zapewniają powtarzalność warunków pomiaru. Do tego typu oznaczeń używa się jednak powszechnie jędrnościomierzy, które wykorzystywane są także podczas monitorowania zebranych już owoców. Pojawienie się jędrnościomierzy ręcznych spopularyzowało tę metodę pomiaru wśród sadowników (De Jager, 1994; Skrzyński, 1997). Wyniki pomiarów uzyskanych tego typu przyrządami są, niestety, obarczone dużym błędem, wynikającym z nierównomiernej prędkości wbijania trzpienia w owoc oraz różnego kąta natarcia, pod jakim trzpień trafia w miąższ (Konopacka i in. 1997). Błędy te można zmniejszyć poprzez przymocowanie jędrnościomierza do statywu (De Jager, 1994) lub stosować laboratoryjne maszyny wytrzymałościowe, których cena jest niestety wysoka. Innym rozwiązaniem jest stosowanie jędrnościomierzy elektronicznych, które z kolei wymagają okresowego przeglądu i kalibracji.

2.5.3. Pomiar zawartości ekstraktu w owocach

Ważnym wskaźnikiem dojrzałości owoców jest zawartość ekstraktu, czyli stężenie składników rozpuszczalnych w wodzie, które są składnikami soku komórkowego (Skrzyński, 1997). Ekstrakt oznaczany jest najczęściej za pomocą różnej konstrukcji refraktometrów. Najczęściej spotykany typ refraktometru to refraktometr podręczny, w którym pomiar polega na wyciśnięciu soku na pryzmat i dociśnięciu warstewki cieczy szkiełkiem dociskowym. Warstewkę cieczy obserwuje się w świetle przechodzącym. Dokładność pomiaru tego typu przyrządów wynosi ok. 0,2 Brix. Refraktometry specjalistyczne osiągają dosadność pomiaru do 0,0001 Brix. Wyznaczenie ekstraktu owoców nie jest jednoznaczne z ostateczną oceną stadium dojrzałości owoców. Jest on ważną składową indeksów zbiorczych, które dają pełniejszą informację o stanie rozwoju owoców, poprzez obserwację kilku zjawisk towarzyszących ich dojrzewaniu (De Jager, 1994; Streif, 1996).

2.5.4. Indeksy zbiorcze

Ocena stanu fizjologicznego owoców przed zbiorem za pomocą pomiaru tylko jednego wskaźnika bywa ryzykowna i może skutkować błędną decyzją o zbiorze (Skrzyński 1996; Streif 1996). Aby zwiększyć pewność i obiektywność oceny stanu surowca zaleca się jednoczesne analizowanie 3-6 wskaźników. Popularność zdobyły indeksy zbiorcze oparte na pomiarze jędrności, ekstraktu i stopnia rozkładu skrobi w owocach. W latach 90-tych XX w. rozpoczęto stosowanie takich wskaźników, wśród których najbardziej znane to indeks Strefa (*IS*) oraz indeks De Jagera (*IJ*) (Skrzyński, 1997; Rutkowski, 2001). W metodzie Streifa oblicza się wskaźnik dojrzałości zbiorczej jabłek w postaci liczby będącej wynikiem jednoczesnego pomiaru jędrności, ekstraktu oraz stopnia rozpadu skrobi (Streif, 1996).

Do pomiaru wartości indeksu skrobiowego potrzebne jest wykonanie prostego testu, którego opis będzie przedstawiony w części metodycznej. Oznaczanie indeksu Streifa wymaga pobrania 20-30 owoców, które nie różnią się wielkością i pochodzą z różnych drzew kwatery danej odmiany. Wskaźnik ten jest wiarygodnym, zmniejszającym do minimum ryzyko popełnienia błędów, wynikających z przypadkowego i często nietypowego przebiegu dojrzewania owoców, który może zakłócić przebieg zmian jednej ze składowych tego indeksu, jeżeli będzie ona stosowana jako jedyny wskaźnik w ocenie dojrzałości surowca (Streif, 1996; Skrzyński, 1997).

Drugim znanym wskaźnikiem zbiorczym dojrzałości owoców jest indeks De Jagera (*IJ*) (De Jager, Roelofs, 1996). Sposób obliczeń obliczeń indeksów zbiorczych umieszczono w części metodycznej pracy (wzory 3 i 4).

2.6. Indeks skrobiowy i jego znaczenie w ocenie dojrzałości owoców

Jedną z najważniejszych i najpewniejszych metod oceny dojrzałości owoców ziarnkowych jest obserwacja przemiany skrobi w cukry proste (Reid i in., 1982; Brookfield i in.

1997; Peirs i in. 2002; Guz, 2006; Guz, 2009). Test skrobiowy jako obiecująca metoda oznaczania stanu dojrzałości owoców była znana od dawna. Reid i in. (1982) wskazywali, że naukowe opracowania dotyczące wykorzystania testu skrobiowego w ocenie dojrzałości jabłek powstały już na początku XX wieku, w roku 1905. Po II wojnie światowej nastąpił szybki rozwój technik długotrwałego przechowywania owoców, ze szczególnym uwzględnieniem technik CA (kontrolowanej atmosfery). Aby zapewnić najwyższą jakość owoców podczas składowania w warunkach kontrolowanej atmosfery owoce powinny być dostatecznie dojrzałe, ale nie przejrzałe (De Long i in. 1999). Pod koniec lat 70-tych przeprowadzono próby z najnowszą wersją tej metody przechowywania znaną jako ULO (Ultra Low Oxygene), w której w atmosferze otaczającej surowiec stężenie tlenu wynosi poniżej 2%.

Owoce zebrane zbyt wcześnie są słabo wyrośnięte, a ponadto mają skłonność do występowania oparzelizny powierzchniowej oraz gorzkiej plamistości podskórnej (Tomala, 1995a). Zbyt późny zbiór owoców powoduje, że nie nadają się one do długotrwałego przechowywania, szczególnie w warunkach kontrolowanej atmosfery (Skrzyński, 1996; Streif, 1996). Inną, ważną ze względów obrotu towarowego wadą późno zebranych owoców jest zbytnia miękkość oraz skłonność do mączystości. Wykazują one również skłonność do szybkiego rozpadu wewnętrznego (Rutkowski i in. 2000). Test skrobiowy jest tanią i szybką metodą badania tempa rozpadu skrobi oraz jej przemiany w cukry proste. Zawartość skrobi w jabłkach odmian zimowych zwiększa się do początku sierpnia i może stanowić ok. 15% masy miąższu owocu. Zmagazynowana w owocach skrobia ulega rozpadowi do cukrów prostych mimo tego, że jej zawartość podczas zbioru jest niewielka i wynosi od 1 do 3%. (Brookfield i in.1997). Po pewnym czasie przechowywania prawie całkowicie zanika (Tomala 1999). Istotą testu skrobiowego jest wywołanie barwnej reakcji skrobi z jodem w jodku potasu, czyli tzw. płynie Lugola (Reid i in. 1982; Brookfield i in. 1997; Peirs i in. 2002; Tomala 2002). W wyniku tej reakcji powstaje granatowe zabarwienie pochodzące od kompleksu jodowo-skrobiowego (Skrzyński, 1997; Tomala, 2002; Tomala, 2003).

Wykonanie testu skrobiowego jest bardzo prostą procedurą, której wykonanie jest możliwe zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i sadzie (Tomala, 1995b; Rutkowski, 2001). Polega ono na przecięciu owocu w poprzek, równoleżnikowo, w ten sposób, by płaszczyzna cięcia przechodziła przez gniazdo nasienne. Następnie odciętą połówkę owocu pokrywa się roztworem o składzie 2,5g J_2 oraz 10g KJ rozpuszczonych w 1 litrze wody destylowanej lub przegotowanej. Roztwór ten można przygotować nie wcześniej niż 30 dni przed planowanym badaniem owoców. Reakcję jodu ze skrobią można wywołać w dwojaki sposób. W warunkach laboratoryjnych zanurzamy przez ok. 60 s odciętą połówkę owocu w szalce Petriego wypełnionej roztworem jodu. Po upływie kolejnej minuty pod wpływem działania jodu część powierzchni przekroju zabarwia się na kolor granatowy. Drugim sposobem, stosowanym w sadzie jest użycie opryskiwacza wyposażonego w ręczną pompkę, napełnionego płynem Lugola, który nanosi się na powierzchnię owocu. Otrzymane w ten sposób zabarwione powierzchnie owoców zwane „wzorami skrobiowymi" (Tomala, 2004; Szalay i in. 2013) porównuje się z tablicami wzorcowymi. Zawartość skrobi zmienia się w różnych strefach tkanki owocu. Zwykle u większości odmian jabłek najmniejsza zawartość skrobi występuje w części środkowej, wokół gniazda nasiennego, a największa – w warstwie podskórnej (Reid i in. 1982; Watkins i in. 1982; Peirs i in. 2002). Brookfield i in. (1997) zauważyli, że akumulacja i szybkość rozpadu skrobi są różne w całym przekroju owocu. W części środkowej następuje wcześniej niż w tkance znajdującej się bliżej

skórki. Gdy stężenie skrobi jest niewielkie, reakcja z jodem nie tworzy barwnych, granatowych kompleksów. Zanik zabarwienia zachodzi w tkance owocu, zależnie od odmiany, zarówno kołowo, jak i promieniowo. Barwny wzór, który powstaje w wyniku testu skrobiowego jest oceniany za pomocą tablic porównawczych. W większości państw europejskich (Belgia, Niemcy, Węgry, Włochy, Polska, Słowenia, Szwajcaria i Holandia) obowiązują dwa zestawy porównawcze uszeregowane w skali 1-10. (Tomala, 1995b; Łysiak, 1998b; Rutkowski i in.2000; Szalay i in. 2013). Jedna grupa odmian owoców (Jonagold, Jester, Rubin, Šampion, Elstar) charakteryzuje się promieniowym rozpadem skrobi. Jej rozpad jest obserwowany w rdzeniu i podąża w kształcie promienia w kierunku skórki owocu. Druga grupa odmian jabłek (Royal Gala, Gloster, Melrose, Boskoop) wykazuje kołowy rozpad skrobi, w którym wzór skrobiowy pozostaje w postaci nieregularnego pierścienia zwężającego się w miarę dojrzewania w kierunku skórki, aż do jego całkowitego zaniku. W tablicach barwnych, w których zamieszczono wzorcowe fotografie zabarwionych powierzchni owoców wartość indeksu skrobiowego 1 oznacza, że na całej powierzchni przekroju poprzecznego owocu znajduje się skrobia, a indeks o wartości 10 informuje, że cała powierzchnia przekroju jest wolna od skrobi, lub jej stężenie jest niewielkie, dlatego niemożliwe jest jej wykrycie za pomocą jodu (Brookfield i in. 1997). Taka skala indeksu skrobiowego nie obowiązuje w niektórych państwach. W Stanach Zjednoczonych i Nowej Zelandii stosuje się 6-stopniową skalę rozpadu skrobi, a w Kanadzie i Norwegii obowiązuje skala 9-stopniowa, co stwarza często problemy przy porównaniu wyników w pracach badawczych wykonywanych w tych państwach (Peirs i in. 2002).

Jednym z najważniejszych czynników równomiernego wzrostu oraz dojrzewania owoców są warunki klimatyczne i agrotechniczne podczas ich formowania się i dojrzewania (Brookfield i in. 1997; De Long i in. 1999; Chen i in. 2009; Guz, 2010). Niska temperatura wegetacji powoduje zmniejszenie średniej masy owoców. Wysoka temperatura powoduje powstawanie na powierzchni jabłek odbarwień rumieńca, rozpadu miąższu, a także wpływa na nierównomierny przebieg rozpadu skrobi w tych owocach. Badania wykazały (Whitaker, 1997; Fan i in. 2011), że wysoka temperatura ma niekorzystny wpływ na metabolizm substancji zapasowych w jabłkach. Badane owoce charakteryzowały się połówkowym, asymetrycznym rozpadem skrobi, który polega na całkowitym zaniku skrobi wykrywalnej w reakcji z jodem na dużym obszarze (najczęściej w połowie) przekroju owocu, niesymetrycznym rysunkiem „wzoru skrobiowego" obszarów zabarwionych jodem lub całkowitym brakiem zabarwienia (Rutkowski i in. 2005; Solovchenko i in. 2010).

Ocena dojrzałości owoców jabłoni za pomocą analizy rozpadu skrobi bywa w przypadku niektórych odmian utrudniona. Według Watkinsa i in. (1993), w owocach odmiany Fuji wzór skrobiowy zanika wcześniej, niż znajdą się one w fazie dojrzałości zbiorczej. Może to być spowodowane wzrostem zawartości amylopektyn, które pojawiają się podczas dojrzewania owoców, zmniejszając zabarwienie w bardziej dojrzałych owocach (Fan i in. 1995). Zabarwienie tkanki owocu zanika, gdy zawartość skrobi obniży się do poziomu 2-3 $mg \cdot 1g^{-1}$ tkanki owocu, niezależnie od miejsca pobrania próbki (Brookfield i in. 1997). Dlatego też głównymi czynnikami wpływającymi na wartość indeksu skrobiowego jest całkowita zawartość skrobi w owocach danej odmiany oraz szybkość jej rozpadu. W związku z tym wartość indeksu skrobiowego różni się istotnie między odmianami, warunkami klimatycznymi w danym sezonie oraz nasłonecznieniem sadu (Reid i in., 1982; Watkins i in., 1982). Jeżeli zawartość skrobi w okolicy gniazda nasiennego jest niska, to brak zabarwienia poja-

wi się w tym miejscu szybciej niż w miąższu owocu podczas jego dojrzewania. Podobnie też w przypadku, gdy stężenie skrobi jest wysokie, jej rozpad, wyrażony indeksem skrobiowym, będzie przesunięty w czasie. Praktyczne wykorzystanie tego zjawiska prowadzi do wniosku, że owoce o niskiej ogólnej zawartości węglowodanów, które charakteryzują się szybszym przejściem przez wszystkie stadia rozpadu skrobi, wyrażonej wzrostem indeksu skrobiowego, nie nadają się do długotrwałego przechowywania (Reid i in., 1982; Tomala, 1995b; Brookfield i in., 1997; De Long i in,. 1999).

2.7. Problemy w interpretacji wyników testu skrobiowego

Pomimo prostoty wykonania oznaczenia zawartości skrobi poprzez reakcję barwną z jodem pojawia się jeszcze jeden, istotny problem, polegający na właściwej interpretacji otrzymanych w ten sposób obrazów „wzoru skrobiowego". Według badaczy zajmujących się tym zagadnieniem (Peirs i in. 2002), oznaczenia dojrzałości jabłek przy użyciu tablic porównawczych (wzorcowych), spowodowane subiektywnością postrzegania przez oceniających obarczone są dużym błędem, które, popełniane przez oceniających, dochodzą do 60%. Średnie wartości błędów oszacowania wartości indeksu skrobiowego wynoszą ok. 50% dla odmian o promieniowym typie rozpadu skrobi, oraz ok. 43 % dla odmian o rozpadzie kołowym. Największe rozrzuty wyników zanotowano dla obrazów, gdzie indeks skrobiowy wynosił 5, 6 lub 7 w 10-stopniowej skali. Jest to faza rozpadu skrobi, która dla wielu odmian jabłek występuje w stanie dojrzałości zbiorczej, którego trafne wskazanie jest podstawą do właściwego przechowywania zebranych owoców (Watkins i in. 1993; Brookfield 1997; De Long i in. 1999). Podobne rozbieżności w interpretacji obrazów indeksu skrobiowego zauważył Guz (2005, 2006, 2009, 2010), który porównywał wartości oznaczeń tego wskaźnika metodą tradycyjną wykonywaną przez panel oceniający z wartościami uzyskanymi metodami komputerowej analizy obrazu.

Błędy w oznaczeniach popełniane przez człowieka zdarzają się często przy szacowaniu znacznie prostszych cech jednowymiarowych, takich jak średnica, kształt czy barwa. Znane są przypadki, gdzie nagromadzenie wielokrotnie powtarzających się przedmiotów lub ich specyficzne ułożenie powoduje powstawanie u obserwatora złudzeń optycznych. Prowadzi to do znużenia i obniżenia percepcji oceniającego, co jest szczególnie niepożądane, gdy ocena ilościowa czy jakościowa procesów, w tym dojrzewania owoców, zależy od precyzji obserwatora (Paulus i in. 1997; Jackman, Sun, 2013).

Li i Guo (1995) posługując się prostymi wzorcami iluzji optycznych udowodnili, że w większości warunków symulowanych w eksperymencie (zmienna lub stała luminacja, kontrast barwny lub jego brak) osoby biorące w nim udział ulegały złudzeniom optycznym polegającym na wytworzeniu iluzji istnienia linii konturowych obiektów, które w rzeczywistości nie istniały (iluzja Ponzo). Zakłóceniom postrzegania mogą ponadto ulegać długość, średnica, położenie czy pole powierzchni obiektów. Zaburzeniu może ulec także postrzeganie perspektywy.

Według wyników nowszych badań (De Wit i in. 2015) ważnym czynnikiem postrzegania są nie tylko obrazy optyczne, które rejestrowane są w siatkówce oka, lecz także obrazy zakodowane i przechowywane przez mózg. W przypadku obserwacji obiektów, które odbiegają wymiarami, kształtem, czy barwą od zakodowanych wcześniej w pamięci obrazów

obserwator stara się je sprowadzić do wcześniej zakodowanych informacji. Podobne podejście prezentują Withagen i Chemero (2009), którzy postrzeganie definiują zjawiskiem optyczno-psychologicznym. Podczas obserwacji związanych z szacowaniem pewnych wielkości w czasie oceny wzrokowej trudne jest wyeliminowanie aspektu psychologicznego, jako czynnika zakłócającego obiektywne postrzeganie. Znacznie trudniejszym zadaniem jest oszacowanie, choćby z dużym przybliżeniem wielkości przedmiotów oraz ich pola powierzchni, zwłaszcza wtedy, gdy charakteryzują się one długą i skomplikowaną linią brzegową lub kształtem nieregularnym, zaliczanym do tzw. fraktali.

Analizując prace badaczy zajmujących się zagadnieniami psychologii i fizjologii widzenia (Lennie, 2000; Sugita, 2004; Simmons i in. 2007) należy zauważyć, że postrzeganie barw oraz ich odbiór jest uzależniony od predyspozycji osobniczych, które są zależnie od wieku (Lennie, 2000), płci (Jalil i in. 2013), a nawet doświadczeń wczesnego dzieciństwa (Sugita, 2004). Wykazano, że rodzaj oświetlenia dominujący w otoczeniu we wczesnym dzieciństwie oddziałuje na percepcję barwną w późniejszych latach. Według Jalila i in. (2013) czynnikiem determinującym akceptację i konotacje poszczególnych barw jest płeć. Opierając się na wynikach badań przeprowadzonych na licznej, 800 osobowej grupie studentów w wieku 19-27 lat, zauważył, że postrzeganie różnych barw jest zależne od płci badanej osoby. Różnice w ocenie barw zauważono dla barwy zielonej, białej a przede wszystkim różowej z 11 barw podlegających ocenie. Osobnym zagadnieniem jest postrzeganie barw w zależności od temperatury barwy oświetlenia (Lennie, 2000; Sugita, 2004), jego natężenia (Li, Guo, 1995), czy stopnia jego rozproszenia.

Biorąc pod uwagę wszystkie te czynniki można zauważyć, że człowiek, jako oceniający za pomocą wzroku, jest uzależniony percepcyjnie od wielu czynników związanych z jego predyspozycjami, wiekiem, płcią a nawet stanem emocjonalnym. Drugą grupę czynników stanowią warunki techniczne oceny (jakość oświetlenia). Dlatego też jakość oceny w tym przypadku może odbiegać znacznie od oczekiwanej precyzji, różniąc sie istotnie od stanu rzeczywistego. Potwierdzają to badania Peirs i in. (2002) i Guza (2006, 2009) dotyczące oceny wartości indeksu skrobiowego. Wobec braku standardów wypracowanych przy ocenie tego wskaźnika, który ogranicza się jedynie do opisu metodyki wykonania testu skrobiowego, pozostawiając wyznaczenie jego wartości subiektywnym wskazaniom oceniających, niezwykle ważne jest opracowanie nowej, obiektywnej metody oznaczania tego ważnego wskaźnika. Jest on jednym z niewielu dostępnych dla sadowników testów, który możliwy jest do przeprowadzenia w warunkach produkcji sadowniczej, oraz opiera się na obserwacji rozpadu skrobi, który jest wiarygodnym wskaźnikiem dojrzałości. Ze względu na swoją wagę i użyteczność powinien doczekać się doprecyzowania metodyki jego wyznaczania poprzez odchodzenie od tablic wzorcowych, które nie dają pewności precyzji jego oznaczeń. Spostrzeżenia te stały się podstawą koncepcji badawczej niniejszej pracy.

3. CEL I ZAKRES PRACY

W pracy podjęto próbę opracowania metodyki precyzyjnego i obiektywnego obliczania wartości indeksu skrobiowego *S*. Ten ważny wskaźnik szacowany jest dotychczas metodą wzrokowego porównania próbek owoców z tablicami wzorcowymi, będącymi fotografiami przekrojów owoców zabarwionych kompleksem jodowo-skrobiowym.

Celem pracy było sprawdzenie przydatności metod komputerowej analizy obrazu w obliczaniu wartości indeksu skrobiowego. W ramach badań wykonywano testy skrobiowe owoców jabłoni o kołowym i promieniowym typie rozpadu skrobi na powierzchni ich przekroju w szerokim przedziale terminów zbioru. Obrazy rejestrowano wybranymi metodami cyfrowego zapisu obrazu. W czteroletnim cyklu pierwszej części eksperymentu stosowano trzy narzędzia optyczne, służące rejestracji obrazów zabarwionych plastrów owocow:

– kamerę CCD rejestrującą czarno-białe obrazy plastrów (CB),
– aparat cyfrowy, rejestrujący obrazy barwne (AC),
– skaner (SK).

Wartości indeksu skrobiowego *S,* obliczone po analizie obrazów rejestrowanych tymi narzędziami porównywano z tymi, które uzyskano za pomocą tablic wzorcowych (OW).

Drugi, trzyletni etap pracy dotyczył tylko metody zapisu obrazów barwnych otrzymanych aparatem cyfrowym (AC). Uwzględniono w nim nastepujące warianty zapisu obrazów cyfrowych, które wpływały na zmiany interpretowanych tą metodą wartości indeksu *S*:

– zapis obrazów w różnej temperaturze barwy,
– obliczanie wartości indeksu skrobiowego z obrazów otrzymanych w składowych R, G oraz B, w różnej temperaturze barwy,
– obliczanie wartości indeksu skrobiowego otrzymanych przy różnych progach filtracji obrazu,
– usuwanie odblasków w obrazach podczas ich zapisu z użyciem filtra polaryzacyjnego,
– zapis obrazów z użyciem światła odbitego oraz przechodzącego.

Odrębnym zadaniem tej części eksperymentu było wyznaczenie indeksów zbiorczych Streifa i De Jagera, w których indeks skrobiowy *S* obliczany był przy różnych progach filtracji podczas analizy obrazu cyfrowego.

Hipotezy robocze pierwszej części eksperymentu:

1. Wartości indeksu skrobiowego *S*, obliczone metodami komputerowej analizy obrazu (KAO), będą różnić się istotnie od tych, uzyskanych metodą oceny wzrokowej (OW).
2. Przebiegi zmian indeksu skrobiowego *S*, opisane równaniami regresji, będą istotnie różnić się w obrębie jednej metody jego oceny w 4-letnim etapie badań.

Czynniki, które determinują szybkość rozpadu skrobi w kolejnych latach, związane z różnym przebiegiem warunków dojrzewania owoców, zostały pominięte. Analizowano jedynie przebieg zmian *S* otrzymanych tymi metodami w kolejnych latach eksperymentu, mając świadomość, że niezgodność ta wynikała nie tylko z różnej interpretacji tego wskaźnika przez poszczególne metody, ale również ze zmienności warunków w czasie dojrzewania owoców.

Hipotezy robocze drugiej części eksperymentu:

1. Zmiana temperatury barwowej w zakresie 2800-4800K nie wpływa istotnie na wartości indeksu skrobiowego S uzyskane przy zastosowaniu tego samego progu filtracji.

2. Wartości indeksu skrobiowego uzyskane zostały przy zmiennym progu filtracji w przyjętym zakresie t_{100}-t_{140}, będą istotnie różnić się od siebie.
3. Wygaszanie odblasków na powierzchni za pomocą filtra polaryzacyjnego wpływa istotnie na interpretację wartości indeksu skrobiowego *S*.
4. Precyzja oceny wartości indeksów zbiorczych jest ściśle zależna od błędów popełnianych przy oznaczaniu indeksu skrobiowego

4. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE

4.1. Plan doświadczenia i charakterystyka surowca

W czteroletnim, wstępnym cyklu badawczym (lata 2004-2007) surowcem badawczym były jabłka dwóch odmian: Gloster i Jonagold, pochodzące z Sadu Doświadczalnego Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, zlokalizowanego w dzielnicy Felin. Były one oceniane pod kątem przebiegu rozpadu skrobi metodą tradycyjną (OW) oraz trzema metodami z wykorzystaniem technik optycznych (CB, AC, SK) i komputerowej analizy obrazu (KAO). W tej części eksperymentu sprawdzono przydatność zastosowanych technik zapisu obrazu do obliczania indeksu skrobiowego oraz ich podatność na powstawanie artefaktów, które utrudniają jego prawidłową interpretację.

Druga część eksperymentu (lata 2011-2013) polegała na badaniu wpływu wybranych sposobów modyfikacji sygnału wejściowego z aparatu cyfrowego (AC), takich jak:

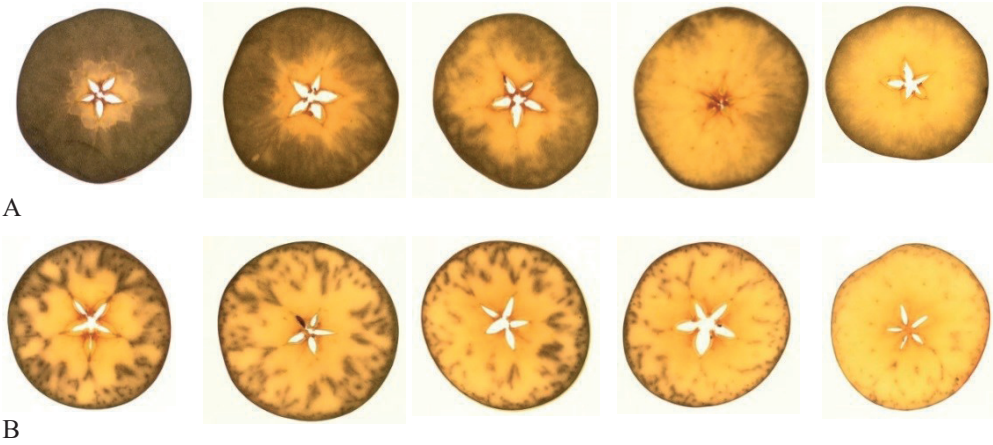
- zmiana temperatury barwowej światła (jabłka odmian Gloster i Jonagold),
- wygaszanie odblasków na powierzchni tworzącej obraz rozmieszczenia skrobi za pomocą filtra polaryzacyjnego (jabłka odmian Gloster, Jonagold),
- analiza zmian wartości indeksu skrobiowego przy zastosowaniu zmiennych progów filtracji obrazu (jabłka odmian Gloster i Jonagold),
- obliczanie indeksu skrobiowego z obrazów plastrów fotografowanych w świetle przechodzącym (jabłka odmian Melrose, Gloster, Jonagold, Rubin),
- obliczanie indeksów zbiorczych Streifa i De Jegera.

Podstawowym kryterium doboru jabłek, prócz ich obecności w Rejestrze Odmian, był przebieg rozpadu skrobi oraz formowanie się specyficznego dla danej odmiany typu rozpadu skrobi. Gloster oraz Melrose to odmiany, które reprezentują centryczny, kołowy typ rozpadu skrobi. Dojrzałość zbiorczą osiągają one, gdy wartość indeksu skrobiowego, zależnie od odmiany, wynosi od 2 do 4. Pozostałe odmiany, Jonagold oraz Rubin Bohema, reprezentują promieniowy typ rozpadu skrobi, osiągając dojrzałość zbiorczą przy indeksie skrobiowym wynoszącym od 5 do 7. Zbioru dokonywano między 253 a 285 dniem roku w odstępach 4-dniowych, w godzinach między 8 a 10 rano. Owoce pobierano z wytypowanych 5 drzew danej odmiany, znajdujących się w tej samej kwaterze. Z każdego drzewa zbierano po 4 owoce, rosnące na wysokości 1,5-2 m nad poziomem gruntu. Testy skrobiowe wykonywane po 285 dniu roku przeprowadzano na owocach przechowywanych, również w odstępach 4 dniowych, aż do zaniku skrobi wykrywanej testem skrobiowym.

4.2. Metodyka wykonywania testu skrobiowego

Roztwór roboczy o składzie 10 g J_2 + 40 g KJ w 1 litrze gorącej wody przegotowanej sporządzano 2 dni przed planowanym terminem pierwszego zbioru (Peirs i in., 2002; Brookfield i in., 1997). Po zbiorze, w razie konieczności przechowywano zebrane owoce w ciepłym pomieszczeniu tak, by temperatura ich miąższu była nie niższa niż 10°C. W tych warunkach zachodzi reakcja jodu ze skrobią. Jabłka krojono w płaszczyźnie prostopadłej do osi owocu przez środek, odsłaniając gniazdo nasienne. Po przekrojeniu połówkę owocu

zanurzano w roztworze jodu w jodku potasu, który wypełniał szalkę Petriego. Czas reakcji wynosił ok. 1 minutę, po czym wyjętą połówkę owocu osuszano bibułą. Po kilku minutach, za pomocą krajalnicy odcinano plastry z wzorem skrobiowym (Rys. 1). Plastry owców miały grubość 5 mm. Wyjątek stanowiły plastry przygotowane do fotografowania ich w świetle przechodzącym. W tym przypadku ich grubość wynosiła 2 mm.



Rys. 1. Przebieg rozpadu skrobi w owocach: A – kołowy rozpad skrobi, B – promieniowy rozpad skrobi

Fig. 1. Breakdown of starch in fruits: A – radial breakdown of starch, B – circular breakdown of starch

4.3. Metodyka wykonywania zdjęć

Zabarwione plastry owoców układano na płycie skanera (Epson 600), a następnie skanowano z rozdzielczością 300 dpi. Otrzymane obrazy zapisywano w pamięci komputera i przekazywano do dalszych analiz. Zabarwione plastry owoców rejestrowano również za pomocą aparatu cyfrowego (metoda AC), który zamocowany był na statywie do reprodukcji umieszczonym w światłoszczelnej, wentylowanej komorze (Rys. 2.).

Komora była wyposażona w dwa źródła światła: zestaw 6 żarówek o mocy 60 W każda, dający światło o temperaturze barwowej 2800 K oraz ekran luminescencyjny o wymiarach 110x140 mm emitujący światło o stałej temperaturze barwowej, wynoszącej 5500 K.

W uchwycie statywu mocowano lustrzany aparat cyfrowy z matrycą CCD o wielkości wynoszącej 10 Mpix, wyposażony w obiektyw makro 2,8/60mm, który wykazywał znikomą dystorsję oraz niewielki poziom aberracji chromatycznej, co zapewniało wierne odwzorowanie barw. Aparat ten był wyposażony w system ręcznej korekty barw dla źródeł światła w zakresie temperatur barwy światła 2500-10000K (400-100 Mired).

Ekspozycję, ze względu na wysoki kontrast fotografowanych obiektów, ustawiano w trybie manualnym, po uprzedniej korekcie barwnej wykonanej za pomocą filtrów konwersyjnych. W tym celu, wykonywano serie zdjęć przy ustalonym poziomie oświetlenia

roboczego, a następnie analizowano barwę tła, która dla prawidłowego oddania barw obiektu powinna mieć barwę białą (w systemie barw RGB: R=255, G=255 i B=255). Jako prawidłową ekspozycję wybierano ten wariant naświetlenia, przy którym tło jako pierwsze w sekwencji zdjęć wykonywanych od najkrótszej do najdłuższej ekspozycji wykazywało 100% pikseli o wartości barwy białej w systemie RGB.

A B

Rys. 2. Obudowa światłoszczelna do wykonywania zdjęć w kontrolowanych warunkach oświetlenia: A – widok zewnętrzny, B – zestaw oświetleniowy z zabarwionym plastrem owocu

Fig. 2. Lightproof housing for taking photographs under controlled lighting conditions: A – external view, B – lighting set with colored patch of fruit

Jedna z sekwencji zdjęć była wykonywana również za pomocą filtra polaryzacyjnego kołowego. Filtr ten, mocowany na obiektywie w obrotowej oprawie umożliwiał eliminowanie odblasków pochodzących z wilgotnych plastrów owoców, które powodowały niepożądane „rozjaśnienie" również w miejscach zabarwionych obecnością skrobi. Po ustaleniu kąta ustawienia, przy którym osiągano maksymalne wygaszanie odblasków, część obrotowa filtra została unieruchomiona w celu osiągnięcia powtarzalnych wyników w następnych seriach zdjęć. Zdjęcia wykonywano przy ustawieniu przetwornika obrazu na temperaturę barwową 5500 K. Miały one rozmiar 2592x3060 pikseli. Czułość matrycy, ze względu na ryzyko pojawienia się niepożądanych szumów, była ustawiona na najniższą wartość, czyli 100 ISO.

Zdjęcia plastrów wykonywano jednocześnie przy użyciu dwóch źródeł światła: światła przechodzącego, które jednocześnie stanowiło białe, jednolite tło dla zabarwionych plastrów oraz światło żarówek, których natężenie ustawiono na poziomie 1000 lx (Rys. 2B). Poziom oświetlenia był mierzony za pomocą światłomierza Seconic Flash Master L358. Barwa oświetlenia była oceniana za pomocą światłomierza z kolorymetrem Seconic Color Meter C500.

Zmianę temperatury barwowej swiatła przeprowadzano za pomocą filtrów konwersyjnych (B+W) o oznaczeniach KB 6 oraz KB 15, które wkręcano w oprawę obiektywu, fotografując przez nie plastry owoców. W ten sposób otrzymywano stały, ustawiony precyzyjnie poziom przesunięcia (podwyższenia) temperatury barwowej fotografowanych

obiektów. Filtry konwersyjne niebieskie z serii KB zmniejszają wartość temperatury światła wyrażonej w skali Mired o 60 M oraz o 150 M (Mired). Biorąc pod uwagę, że zmierzona za pomocą światłomierza temperatura barwowa oświetlenia żarówek wynosiła T_{0K}=2820K, temperatura barwowa w skali Mired wynosiła:

$$t_{0M} = \frac{10^6 K}{T_{0K}} = \frac{10^6 K}{2820K} = 354M,$$

stąd temperatura barwowa światła po filtracji wynosiła:

$$T_{1K} = \frac{10^6 K}{t_{1M}} = \frac{10^6 K}{(t_{0M} - 60M)} = \frac{10^6 K}{(354M - 60M)} \cong 3400K,$$

$$T_{2K} = \frac{10^6 K}{t_{2M}} = \frac{10^6 K}{(t_{0M} - 150M)} = \frac{10^6 K}{(354M - 150M)} \cong 4800K \cdot$$

gdzie:

T_{0K} – temperatura barwy źródła światła, (K)
T_{1K} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB6, (K)
T_{2K} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB15, (K)
t_{OM} – temperatura barwy światła, (Mired)
t_{1M} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB6, (Mired)
t_{2M} – temperatura barwy światła po konwersji filtrem KB15, (Mired)

Podczas sesji, obejmującej jeden termin zbioru, fotografowano i skanowano po 10 owoców obu odmian (o kołowym i promieniowym sposobie rozpadu skrobi). W zależności od planu doświadczenia w danym sezonie, wykonywano dla każdej prbki (tylko w metodzie AC) następujące kombinacje sekwencji zdjęć:

- 1 zdjęcie z filtrem UV (pierwsza faza badań, lata 2004-2007),
- 4 zdjęcia z filtrem CPL (kołowym polaryzacyjnym) w roku 2011, filtr ustawiony był w położeniu 0°, 30°, 60°, 90° względem płaszczyzny drgań promieni spolaryzowanych,
- 2 zdjęcia z filtrami KB6, KB15, dające efekt podwyższenia temperatury barwowej fotografowanego obiektu, oraz zdjecie z filtrem UV w roku 2012,
- 1 zdjęcie w świetle przechodzącym oraz 1 zdjęcie w świetle odbitym w roku 2013.

Obrazy zapisane w pamięci komputera były wyświetlane pięciu osobom oceniającym, które porównywały je z tablicami wzorcowymi, przyporządkowując im wartości od 1 do 10, zgodnie z obowiązującą skalą ocen. Wobec braku kryteriów doboru osób wykonujących tego typu test, rekrutowano je spośród studentów grup seminaryjnych. W celu uniknięcia zmęczenia jednostajną czynnością, jaką była ocena wzrokowa, jednorazowo oceniano w jednej serii 50-60 obrazów, po czym następowała 15 minutowa przerwa w sesji. Podczas jednej sesji przeprowadzano tylko 3 serie ocen.

Zdjęcia wykonane za pomocą skanera oraz aparatu cyfrowego były analizowane w programie Photoshop 7,0 oraz Photoshop CE 4,0. Jako podstawowe narzędzie, służące do wyznaczania pól powierzchni plastrów, pól powierzchni zajętej przez skrobię oraz powierzchni tła obrazów był używana funkcja histogramu.

W tym celu konieczne było ustalenie przedziałów jasności pikseli w obrazie, które tworzyły niezbędne do analizy pola powierzchni. Po obserwacji wybranych fragmentów obrazu, które zawierały granice między granatowym zabarwieniem wywołanym kompleksem skrobi z jodem, a obrazem miąższu owocu pozbawionym zabarwienia, ustalano granice rozdziału między tymi powierzchniami, wyrażoną maksymalną jasnością punktów należących do kompleksu jodowo-skrobiowego. Na tej podstawie ustalano próg rozdziału obiektu na dwie części dla całej serii zdjęć wykonanych podczas jednej sesji. Z histogramu obrazującego rozkład jasności punktów analizowanego obrazu odczytywano udział procentowy powierzchni poszczególnych pól obrazu. Wartość indeksu skrobiowego była obliczana ze wzoru:

$$S = 10 \times (1 - \frac{u_w}{u_c}) \tag{1}$$

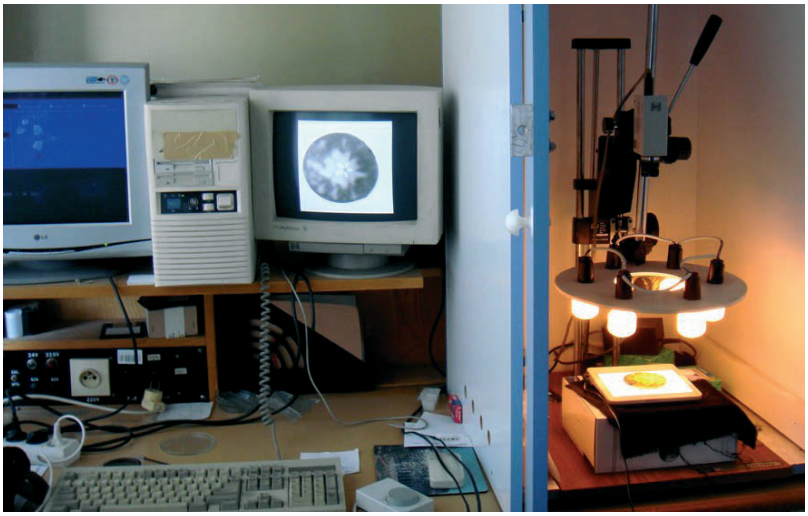
gdzie:

S – wartość indeksu skrobiowego,

u_w – udział powierzchni kompleksu jodowo-skrobiowego w całym obrazie, (%)

u_c – udział powierzchni całego plastra w całym obrazie, (%)

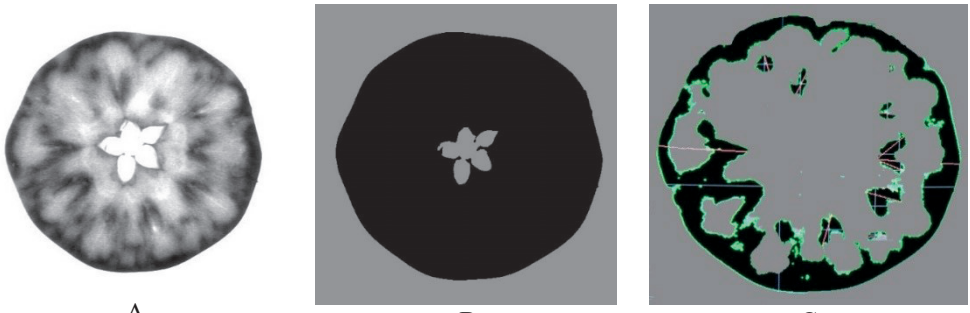
Do analizy danych uzyskanych podczas doświadczeń używano również systemu analizy obrazów czarno-białych SUPERVIST (Rys. 3.), który wykorzystywał zestaw oświetlenia, z którego korzystano również podczas wykonywania obrazów barwnych. Systemu SUPERVIST pracował na karcie obrazowej SVIST oraz był wyposażony w program obliczeniowy SVISTMET, który dostarczał danych niezbędnych do wykonania obliczeń indeksu skrobiowego.



Rys. 3. System wizyjny zapisu i analizy obrazu SUPERVIST
Fig. 3. SUPERVIST recording and image analysis system

Zabarwione plastry układane były, podobnie jak poprzednio, na płycie stanowiącej jednocześnie źródło światła, jak i tło obrazu. Przed wykonaniem zdjęć dokonano kalibracji systemu wizyjnego, polegającej na zdefiniowaniu pola widzenia kamery CCD, która tym razem użyta była zamiast aparatu cyfrowego. W tym celu wykonywano skalowanie pola obrazowego o wielkości 110x110 mm z dokładnością 0,2 $mm \cdot pix^{-1}$.

Drugim etapem kalibracji było ustawienie konwertera przetwornika obrazu w celu prawidłowego odwzorowania barwy białej oraz czarnej w obrazach poddawanych analizie. Jako wzorce odcieni posłużył tu ekran luminescencyjny, jako wzorzec barwy białej oraz czarny zamsz, jako wzorzec barwy czarnej. Kalibracja polegała na ustawieniu kontrastu konwertera obrazu tak, by te dwie podstawowe barwy były wiernie odwzorowane, przyjmując wartość 0 dla barwy czarnej oraz 255 dla barwy białej. Ustawienia te były zapisane w opcjach programu, co umożliwiało automatyczną korektę konwertera w kolejnych sesjach pomiarowych.



A B C

Rys. 4. Etapy oznaczania indeksu skrobiowego w systemie wizyjnym SUPERVIST za pomocą programu SVISTMET: A – obraz plastra z zabarwionym kompleksem jodowo-skrobiowym, B – filtracja całej powierzchni przekroju plastra, C – filtracja powierzchni kompleksu jodowo-skrobiowego z zaznaczonym przebiegiem linii brzegowej obiektów tworzących kompleks

Fig. 4. Stages of determination of the starch index in the SUPERVIST vision system using the SVISTMET program: A – image of a patch with a colored iodine–starch complex, B – filtration of the entire cross–sectional area of the patch, C – filtration of the iodine-starch complex surface with marked course of the shoreline of the objects forming a complex

Analiza obrazu polegała na filtracji zapisanego obrazu filtrem dolnoprzepustowym, którego wartość ustalano doświadczalnie poprzez porównanie pola powierzchni, jakie zajmuje kompleks jodowo-skrobiowy, z polem powierzchni obrysowanym przez linie powstające podczas pomiaru przy danej wartości progu (Rys. 4C). Jeżeli pola te pokrywały się, to ta wartość progu filtracji była używana konsekwentnie podczas następnych sesji pomiarowych. Taką samą procedurę przeprowadzono w celu wyodrębnienia z obrazu całej powierzchni plastra. Przy zachowaniu tych samych, powtarzalnych warunków oświetlenia, filtracja odbywała się automatycznie po wyświetleniu zapisanych wcześniej obrazów. Po wykonaniu filtracji program zliczał pola powierzchni całego plastra, jak również po-

wierzchnię zajętą przez kompleks skrobi z jodem. Indeks skrobiowy wyznaczano korzystając z takiej samej zależności jak przy obliczaniu wskaźnika po analizie obrazów barwnych. Korzystano tym razem z obliczonych w programie pól powierzchni:

$$S = 10 \times (1 - \frac{p_w}{p_c}) \tag{2}$$

gdzie:

S – wartość indeksu skrobiowego
p_w – pole zajęte przez kompleks skrobi z jodem, (mm^2)
p_c – pole całego plastra, (mm^2)

4.4. Metodyka oznaczania indeksów zbiorczych

W eksperymencie wykonywano oznaczanie indeksu De Jegera oraz indeksu Streifa w oparciu o obliczone wartości indeksu skrobiowego. W tym celu, ze względu na konieczność pomiaru kilku wskaźników, w latach 2011 oraz 2012 równolegle z oznaczeniem wartości indeksu skrobiowego wykonywano oznaczenia zawartości ekstraktu w soku komórkowym dojrzewających owoców oraz ich jędrność. W celu oznaczenia ekstraktu pobierano próbki miąższu z 3-5 owoców, które następnie ściskano, a wyciekający sok komórkowy zbierano do zlewki, mieszano i pobierano kilka kropli do refraktometru. Pomiar ekstraktu wykonywano za pomocą refraktometru Atago z dokładnością do 0,1°Brix. Pomiar wykonywano w 5 powtórzeniach.

Oznaczanie jędrności owoców wykonano przy użyciu teksturometru TAXT. Plus, wyposażonego w głowicę pomiarową pracująca w zakresie 0-500 N. Wartość bezwzględna błędu wynosiła w tym zakresie pomiarowym ± 1N. Pomiar polegał na usunięciu skórki z części środkowej owocu w miejscu pomiaru, a następnie wciskanie próbnika cylindrycznego o średnicy 11 mm na głębokość 8 mm. Rejestrowano maksymalny opór w miejscu pomiaru, czyli jędrność miąższu owocu (N).

Indeks Streifa (1996) ma postać:

$$IS = \frac{F}{R \times S} \tag{3}$$

gdzie:

F – jędrność miąższu, (N)
R – ekstrakt, (°Brix)
S – wartość indeksu skrobiowego, (1-10)

Postać indeksu De Jagera (1996) jest następująca:

$$IJ = \frac{F \times (11 - S)}{R} \tag{4}$$

gdzie:

F – jędrność miąższu, (N)
R – ekstrakt, (°Brix)
S – wartość indeksu skrobiowego, (1-10)

Indeksy zbiorcze będąc wskaźnikami wyznaczonymi metodą pośrednią przez pomiar innych wskaźników, obserwowanych podczas dojrzewania owoców, obarczone są błędami, które stanowią pochodną błędów popełnianych podczas ich oznaczania. Dlatego też uwzględniono te błędy podczas szacowania precyzji obliczeń indeksów zbiorczych:

$$\Delta IS = \frac{\partial IS}{\partial F}\Delta F + \frac{\partial IS}{\partial R}\Delta R + \frac{\partial IS}{\partial S}\Delta S \tag{5}$$

oraz:

$$\Delta IJ = \frac{\partial IJ}{\partial F}\Delta F + \frac{\partial IJ}{\partial S}\Delta S + \frac{\partial IS}{\partial R}\Delta R \cdot \tag{6}$$

Po obliczeniu różniczki zupełnej dla obu wyrażeń otrzymujemy:

$$\Delta IS = \frac{1}{RS}\Delta F - \frac{F}{R^2 S}\Delta R + \frac{F}{RS^2}\Delta S \tag{7}$$

oraz

$$\Delta IJ = \frac{11-S}{R}\Delta F + \frac{F}{R}\Delta S - \frac{F \times (11-S)}{R^2}\Delta R \quad . \tag{8}$$

Błędy bezwzględne popełniane podczas oznaczania jędrności oraz ekstraktu podane były w instrukcjach obsługi tych urzadzeń.

Podczas obliczania błedów bezwzględnych oznaczania wartości indeksu skrobiowego posłużono się opracowaną samodzielnie metodą obliczania błędów. Polegała ona na obliczaniu wartości różnic pomiędzy wartościami indeksu S, uzyskiwanych poprzez filtrację obrazu progami od t_{100} do t_{140}, czyli różnicami między wartościami indeksu od S_{100} do S_{140}, i wartości bazowej S_{120}.

W przypadku analizy odchyleń powstałych w wyniku błędnego użycia progu filtracji dla obrazów czarno-białych, czy też błędnego odczytu histogramów podczas analizy obrazów barwnych posłużono się odmienną metodyką obliczeń. Założono, że poszczególni operatorzy mogą popełniać błędy oznaczania progu filtracji z pewnym odchyleniem od wartości prawidłowej. W 8-bitowym kodowaniu kolorów, czy odcieni obrazu czarno-białego, przyjmującego 256 możliwych wartości (0-255), po ustaleniu metodą porównania zarysów konturów obiektów, które zostały odfiltrowane jako właściwy wzór skrobiowy z rzeczywistym obrazem plastra, który nałożono na obwódkę linii krawędziowej rysowaną podczas pomiaru (Rys. 4C), ustalano próg filtracji. Założono, że operatorzy, wykonujący pomiar mogą pomylić się o ±5 lub ±10 wartości odcieni w skali barw w porównaniu do wartości bazowej t_{120}. Na tej podstawie przeprowadzono symulację nowych wartości indeksu skrobiowego, obliczonego według „błędnych" wartości progów filtracji, oraz obliczano błędy względne indeksu skrobiowego oraz indeksów zbiorczych Streifa i De Jagera.

4.5. Metody statystyczne stosowane podczas opracowania wyników badań

Wyniki otrzymane w pracy poddane były dwuczynnikowej analizie wariancji w module ANOVA pakietu STATISTICA 7.1 oraz STATISTICA 10.0. Przedstawiono je w formie graficznej oraz tabelarycznej przy wykorzystaniu w/w pakietów. Istotność różnic między otrzymanymi zbiorami wartości sprawdzono za pomocą testu Tukeya, po uprzednim sprawdzeniu parametryczności rozkładu za pomocą testu Levena. Zmienne o rozkładzie nieparametrycznym były analizowane testem Kruskalla-Wallisa.

Równania regresji indeksu skrobiowego w funkcji czasu były analizowane i porównywane we wstępnym, czteroletnim cyklu badawczym według metodyki Jamishidiana i in. (2005), wyznaczając istotność różnic przebiegu między prostymi.

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. Zmiany indeksu skrobiowego w jabłkach odmiany Gloster

Czteroletni, wstępny cykl badawczy, przeprowadzono z wykorzystaniem wszystkich metod KAO. W celu przeprowadzenia analizy statystycznej, którą wykonano poprzez zestawienie wyników pomiarów metodami KAO, pogrupowano je parami. Analizę statystyczną wykonano w przedziale terminów prawdopodobnego zbioru owoców poprzez utworzenie par metod KAO w układzie SK – AC, CB – AC, CB – SK. (Tab. 1).

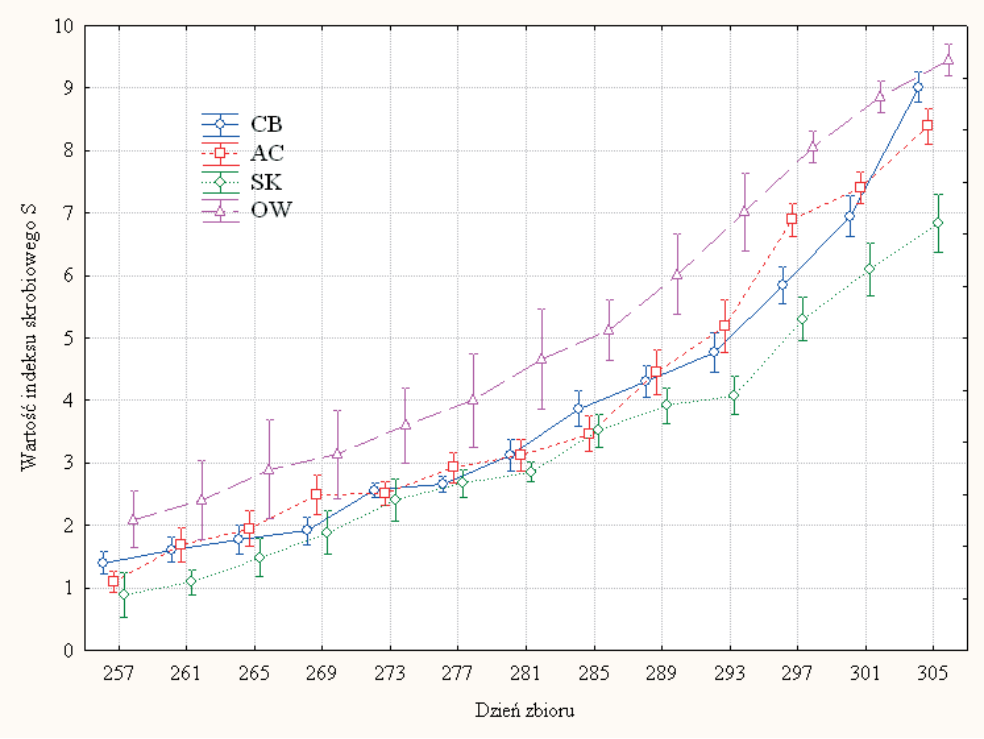
Tabela 1.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Gloster (2004) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 1.
Starch index values S of Gloster apples at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
265	SK	1,48 c	CB	1,77 c	SK	1,48 b
	AC	1,95 c,d,e	AC	1,95 c	CB	1,77 b
269	SK	1,88 c,d	CB	1,91 c	SK	1,88 b
	AC	2,48 a,d	AC	2,48 a	CB	1,91 b
273	SK	2,40 a,d,e	CB	2,56 a	SK	2,40 a,d
	AC	2,51 a	AC	2,51 a	CB	2,56 a
277	SK	2,67 a,b	CB	2,66 a,b	SK	2,67 a,c
	AC	2,92 a,b	AC	2,92 a,b	CB	2,66 a,c
281	SK	2,85 a,b	CB	3,21 b	SK	2,85 a, c
	AC	3,12 b	AC	3,12 b	CB	3,21 c

W analizowanym przedziale nie było statystycznie istotnych (α=0,05) różnic w interpretacji wartości indeksu skrobiowego, która dla tej odmiany (Gloster) powinna wynosić podczas zbioru 2–3. W opisywanym doświadczeniu zbiór owoców powinien odbywać się między 269 a 281 dniem roku. Przedział taki wynika z interpretacji tego wskaźnika za pomocą użytych metod rejestracji obrazu skrobi na przekrojach owoców. Ważnym powodem wyboru takiego przedziału była także obserwacja terminów zbioru owoców w latach poprzedzających eksperyment. Ocena wzrokowa (metoda tradycyjna) oparta na prezentacji obrazów zapisanych za pomocą skanera 5 osobom oceniającym wykazuje istotnie wyższe wartości indeksu skrobiowego (*S)* niż te, uzyskane metodami KAO. Według wskazań tej metody zbiór powinien odbywać się miedzy 261 a 273 dniem roku (Rys. 5).

Przyspieszony termin zbioru skutkował wyższą podatnością owoców na choroby przechowalnicze, głównie oparzeliznę powierzchniową i uszkodzenia wywołane dużym stężeniem CO_2 w komorach przechowalniczych (Tomala, 1995b; Łysiak,1998). Innym, istotnym skutkiem wczesnego zbioru, jest słabe wykształcenie owoców i mniejsza ich masa i wymiary (Rutkowski i in. 2003). Analizę wariancji podczas porównania wartości metody wzrokowej z metodami KAO w badanym przedziale zbioru owoców przeprowadzono, ze

względu na nieparametryczny rozkład wartości indeksu *S,* oznaczonego metodą wzrokową, testem Kruskala-Wallisa. (Tab. 2).



Rys.5. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Gloster (2004) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 5. Starch index changes in Gloster apples (2004) calculated by different methods

Tabela 2.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Gloster (2004) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 2.
P-values of Gloster (2004) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		1,00	0,80	0,00
AC	1,0		0,27	0,00
SK	0,80	0,27		0,00
OW	0,00	0,00	0,00	

Wykazano statystycznie istotną różnicę wartości indeksu skrobiowego (*S*) otrzymanych metodą OW w porównaniu do tych, otrzymanych metodami KAO. Wartości indeksu skrobiowego wyznaczone metodą tradycyjną (OW) oprócz istotnie wyższych wskaźników niż te, obliczone metodami KAO charakteryzowały się ponadto dużym rozrzutem wartości, co związane jest z subiektywizmem ocen przypisywanych wartościom indeksu skrobiowego przez poszczególnych członków panelu. Efekt ten był już wcześniej opisywany w literaturze (Peirs i in. 2002), gdzie wartości *S* szacowane przez oceniających różniły się nawet o 60%. W końcowych terminach zbioru (289-305) wartości *S* były zaniżane przez artefakty nienależące do powierzchni zajmowanej przez „wzór skrobiowy" przy zastosowaniu metody SK. Pojawiały się one tam, gdzie skanowane przedmioty były bryłami a nie powierzchniami płaskimi. Tak było w przypadku oświetlania plastra owocu o grubości 5 mm. Pojawiał się wówczas cień, którego jaskrawość mieści się w zakresie, jaki miał kompleks jodu ze skrobią i był on identyfikowany jako jego „dodatkowa" powierzchnia. Wprowadzało to systematyczny błąd pomiarowy, który ujawniał się gdy powierzchnia zajmowana przez kompleks była mała. Przy wysokich wartościach *S* w końcowej fazie eksperymentu obecność takich artefaktów istotnie zakłócało dokładność pomiaru. Przy niskich wartościach indeksu skrobiowego nie zauważono istotnego wpływu tego czynnika na interpretację wartości tego wskaźnika. (Rys. 5).

Gloster jest odmianą zaliczaną do owoców o wysokiej zawartości skrobi, zawartej podczas ich zbioru. Zbiór owoców powinien odbywać się, gdy wartość indeksu skrobiowego wynosi ok. 3. Taki stan rozpadu skrobi może być osiągnięty późno, dlatego owoce tej odmiany mogą być zbierane nawet do 284 dnia roku, t.j. do 10 października. Analizę zmian indeksu skrobiowego przeprowadzono w przedziale 269-285 dnia roku.

Tabela 3.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Gloster (2005) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 3.
Starch index values S of Gloster apples at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
269	SK	1,71 a	CB	2,57 a,d	CB	2,58 a,b
	AC	2,05 a,b	AC	2,05 d	SK	1,72 d
273	SK	1,98 a,b	CB	2,71 a,b	CB	2,71 a,b,c
	AC	2,40 b,c,e	AC	2,40 a,d	SK	1,98 d
277	SK	2,26 b,c,e	CB	3,20 b,c	CB	3,20 c,e
	AC	2,95 c,d	AC	2,95 a,b	SK	2,26 a,d
281	SK	2,69 c,d,e	CB	3,62 c,e	CB	3,62 e,f
	AC	3,20 c,e	AC	3,20 b,c	SK	2,70 a,b,c
285	SK	3,01 c,d	CB	4,10 e	CB	4,10 f
	AC	3,71 e	AC	3,72 c,e	SK	3,02 b,c

Ze względu na warunki wykonywania obrazu za pomocą skanera (SK), efekt „zaniżania" wartości indeksu skrobiowego poprzez obecność cienia plastra był już widoczny

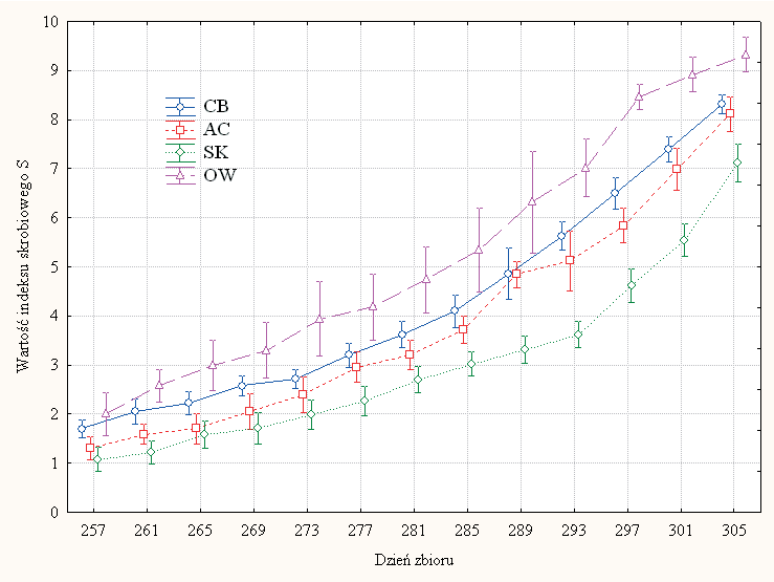
w rozpatrywanym przedziale terminów zbioru. Przebieg zmian wartości *S* obliczonego za pomocą histogramów obrazów ze skanera odbiegał od przebiegu zmian wartości tego wskaźnika, otrzymanych za pomocą pozostałych metod KAO. W analizowanym przedziale indeks skrobiowy wykazywał istotnie niższe wartości w porównaniu z metodą CB (Tab. 3). Zależność ta obserwowana była dla wszystkich terminów zbioru. Wartości średnie indeksu skrobiowego (*S*) interpretowanego za pomocą aparatu cyfrowego (AC) wykazywały wartości wyższe od średniej uzyskanej za pomocą skanera (SK). Tylko wartości otrzymane tymi dwiema metodami (AC oraz SK) w ostatnim terminie zbioru wykazywały istotne statystycznie różnice. Pomimo braku istotności różnic w ocenie *S* terminy zbioru owoców obliczone tymi metodami różniły się o ok. 4 dni. W dalszych terminach zbioru (289 – 305 dzień roku) objętych eksperymentem, różnica w ocenie S była na tyle duża, że powodowałaby przesunięcie zbioru o 8 dni. W praktyce sadowniczej nie ma to znaczenia, gdyż nie wykonuje się zbioru owoców przeznaczonych do długotrwałego przechowywania w tym przedziale czasu.

Tabela 4.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Gloster (2005) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 4.
P-values of Gloster (2005) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

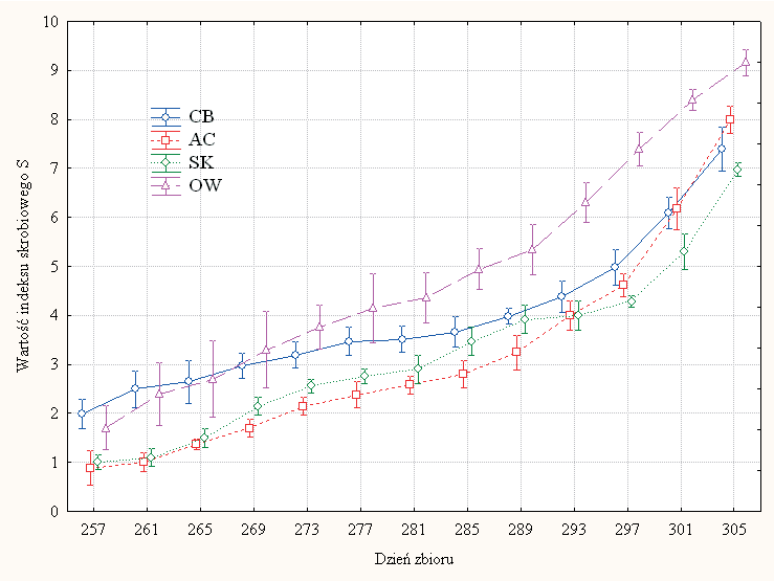
Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		0,63	0,00	0,00
AC	0,63		0,04	0,00
SK	0,00	0,04		0,00
OW	0,00	0,00	0,00	

Rozkład wartości indeksu skrobiowego uzyskanych metodą tradycyjną (OW) pozostał nieparametrycznym, co wykazał test Levena. W celu zbadania istotności różnic wartości *S* uzyskanych ta metodą posłużono się testem Kruskala-Wallisa (Tab. 4). Wyniki tego testu potwierdziły istotność różnic w ocenie indeksu *S* metodą OW w porównaniu wartościami obliczonymi na podstawie KAO. Zaobserwowano duży rozrzut wartości wskaźnika otrzymanych metodą OW, co wyrażało się też szerokimi przedziałami ufności (Rys. 6).

Badania porównawcze przydatności dostępnych metod wyznaczania indeksu skrobiowego kontynuowano w latach 2006 i 2007 używając owoców odmian Gloster oraz Jonagold, gdyż owoce te są przedstawicielami dwóch różnych typów rozpadu skrobi na ich przekrojach poprzecznych. Gloster reprezentuje kołowy, a Jonagold – promieniowy typ zaniku skrobi. Analizę statystyczną wyników wykonano w przedziale terminów, które były ustalone na podstawie wieloletnich obserwacji i najbardziej prawdopodobnych do zbioru tych odmian owoców. W tej części eksperymentu obserwowano znaczne różnice wartości *S* obliczonych za pomocą metod użytych w eksperymencie. W przypadku odmiany Gloster (Rys. 7 i Rys. 8) różnice obliczonych wartości indeksu *S* dla poszczególnych terminów zbioru wynosiły nawet 1,4 wartości jednostki *S*.



Rys.6. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Gloster (2005) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 6. Starch index changes in Gloster apples (2005) calculated by different methods



Rys.7. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Gloster (2006) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 7. Starch index changes in Gloster apples (2006) calculated by different methods

Najniższe wartości indeksu skrobiowego obliczono metodami AC i SK, które w 3 terminach zbiorów wykazywały wzajemne istotnie statystycznie różnice. Analiza wariancji w tym przedziale wykazała istotność różnic w ocenie *S* metodą CB a metodami SK i AC (Tab. 5 i Tab. 7). Biorąc pod uwagę przedział wartości indeksu skrobiowego, przy którym dokonuje się zbioru (*S* w przedziale 2 – 3), wartości *S* obliczone zarówno metodą CB jak i SK osiągały ten przedział prawie jednocześnie, sugerując zbiór owoców w podobnym terminie. Jak można zaobserwować, szybkość zmian wartości *S* w tym przedziale była mała, co powodowało, że wskazania obu tych metod mogły być brane pod uwagę przy podjęciu decyzji o zbiorze owoców. Indeks skrobiowy wyznaczony metodą OW osiągał najwyższe wartości, które były istotnie wyższe od tych, uzyskanych pozostałymi metodami (Test Kruskala-Wallisa - Tab. 6 i 8.).

Tabela 5.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Gloster (2006) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 5.
Starch index values S of Gloster apples at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
269	SK	2,14 a	CB	2,97 d,e,f	CB	2,97 b,c,d
	AC	1,69 d	AC	1,70 g	SK	2,14 e
273	SK	2,55 a,b,c	CB	3,19 a,e,f	CB	3,19 a,c,d
	AC	2,15 a	AC	2,14 b,g	SK	2,56 b,e
277	SK	2,75 b,c	CB	3,46 a,f	CB	3,47 a,d
	AC	2,38 a,b	AC	2,38 b,c	SK	2,76 b,c
281	SK	2,89 c	CB	3,51 a	CB	3,51 a
	AC	2,58 a,b,c	AC	2,58 b,c,d	SK	2,90 b,c
285	SK	3,46 e	CB	3,66 a	CB	3,67 a
	AC	2,80 b,c	AC	2,80 c,d,e	SK	3,47 a,d

Tabela 6.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Gloster (2006) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 6.
P-values of Gloster (2006) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		0,00	0,01	0,03
AC	0,00		1,00	0,00
SK	0,01	1,00		0,00
OW	0,03	0,00	0,00	

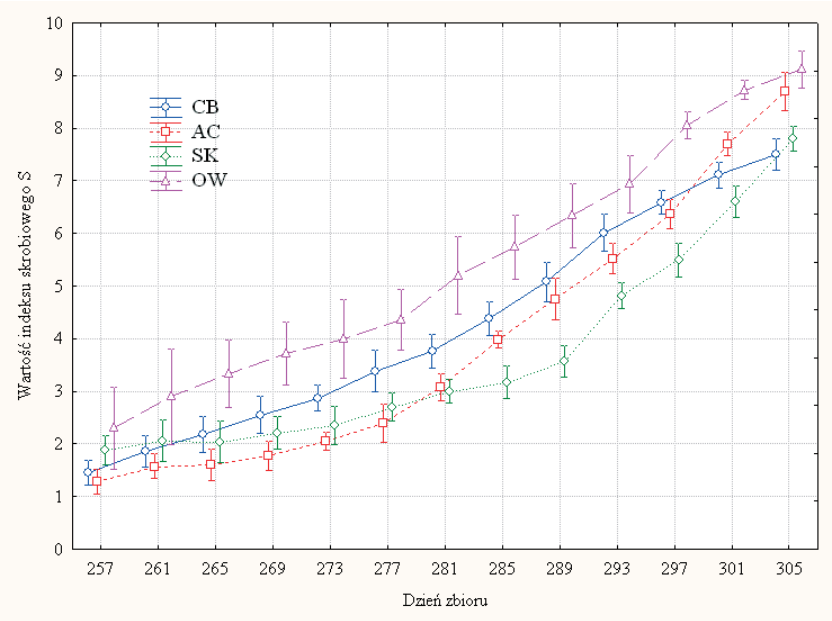
Tabela 7.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Gloster (2007) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 7.
Starch index S values of Gloster apples at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S* *S* value	Metoda Method	*S* *S* value	Metoda Method	*S* *S* value
269	SK	2,21 a,b,d	CB	2,55 a,b,c	CB	2,55 a,b,c
	AC	1,77 d	AC	1,77 e	SK	2,21 b
273	SK	2,34 a,b	CB	2,87 b,c,d	CB	2,87 a,c,d
	AC	2,05 a,d	AC	2,05 a,e	SK	2,35 b,c
277	SK	2,70 b,c	CB	3,38 d,f	CB	3,38 d,e
	AC	2,40 a,b	AC	2,40 a,b	SK	2,70 a,b,c
281	SK	2,99 c	CB	3,76 f,g	CB	3,76 e,f
	AC	3,08 c	AC	3,08 c,d	SK	3,00 a,d
285	SK	3,17 c	CB	4,39 h	CB	4,39 f
	AC	3,98 e	AC	3,98 g,h	SK	3,17 a,d,e

Tabela 8.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Gloster (2007) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 8.
P-values of Gloster (2007) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		0,00	0,00	0,00
AC	0,00		1,00	0,00
SK	0,00	1,00		0,00
OW	0,00	0,00	0,00	

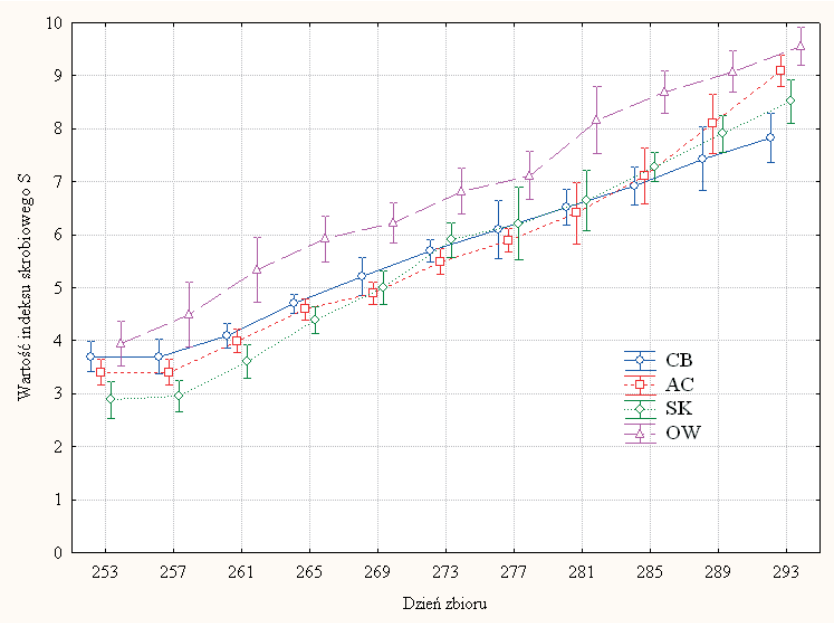
Podobne przebiegi zmian *S* otrzymano w kolejnym roku eksperymentu (Rys. 8). Na podstawie wieloletnich obserwacji sporządzono równania regresji liniowej obrazujące przebiegi zmian *S* w poszczególnych sezonach obserwacji, wyrażone wartościami uzyskanymi za pomocą wszystkich stosowanych metod. Wyniki zestawiono w tabelach 17 i 19. Wyznaczono współczynniki determinacji równań oraz korelacje współczynników kierunkowych prostych regresji.



Rys. 8. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Gloster (2007) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 8. Starch index changes in Gloster apples (2007) calculated by different methods

5.2. Zmiany wartości indeksu skrobiowego jabłek odmiany Jonagold

Owoce odmiany Jonagold reprezentują „promieniowy" zanik skrobi na powierzchni przekroju. Rozpad skrobi obserwowano na całej powierzchni, co objawiało się stopniowym jej zanikiem wzdłuż promienia kołowego przekroju owocu, w postaci jasnych obszarów miąższu, które zajmowały coraz większą powierzchnię. Zbiór owoców tej odmiany, które przeznaczone są do długotrwałego przechowywania, zaleca się wykonywać, gdy wartość indeksu skrobiowego *(S)* znajduje się w przedziale 5 do 7. Oznacza to, że 50 do 70% powierzchni przekroju owoców nie wykazuje już zabarwienia ciemnogranatowym kompleksem jodu ze skrobią. W doświadczeniu analizowano wartości tego wskaźnika interpretowanego poprzez ich obliczenie na podstawie analizy obrazów metodami KAO, które następnie porównywano z wartościami uzyskanymi metodą tradycyjną (OW) (Rys. 9).



Rys.9. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Jonagold (2004) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 9. Starch index changes in Jonagold apples (2004) calculated by different methods

Szczegółowe analizy przeprowadzono dla wyników otrzymanych w przedziale dni zbioru od 265 do 281 dnia roku. Zakres ten ustalono na podstawie wieloletnich obserwacji terminów zbioru owoców tej odmiany (Tab. 9). Ze względu na nieparametryczny rozkład wartości *S* otrzymanych metodą OW posłużono się w tym przypadku testem Kruskala-Wallisa. Z przebiegu zmian wartości *S* w tym przedziale wynika, że osiągał on wyższe wartości od tych, które obliczono metodami KAO. (Tab.10). Różnice te zostały zbadane na poziomie istotności α=0,05. Zestawienie wartości wskaźnika *S* otrzymanych metodami KAO wskazywało, że jego interpretacja w tym przedziale nie wykazywała istotnych różnic dla poszczególnych metod rejestracji obrazu zabarwionych próbek.

Wartości *S* otrzymane metodą OW były wyższe średnio o 1 stopień względem tych, otrzymanych metodami KAO, co oznacza, że udział powierzchni pozbawionej zabarwienia był szacowany według metody OW jako o 10% większy. Uwzględniając skomplikowane rozmieszczenie „wzoru skrobiowego" w owocach Jonagold, które należą do grupy odmian o promieniowym modelu rozpadu skrobi, taki błąd był prawdopodobny (Peirs i in. 2002). Ocena indeksu skrobiowego w metodzie OW, oprócz postrzegania optycznego, posiada także aspekt psychologiczny, którego nie można pominąć. Ocena wzrokowa jest postrzeganiem zmysłowym, które podlega licznym zaburzeniom i subiektywnemu postrzeganiu zjawisk. Wśród błędów popełnianych przez obserwatora można wymienić złudzenia kontrastu i orientacji (Li, Guo 1995) oraz złudzenia postrzegania kształtów przedmiotów (De Witt i in. 2015). Owoce o „promieniowym" zaniku skrobi, wykrywanej w teście skrobiowym, mogą być zbierane, gdy indeks skrobiowy przekroczy wartość 5 (Brookfield i in. 1997;

Peirs i in. 2002). Podczas zbioru niektórych odmian dopuszcza się, że jego wartość zbliża się do 8.

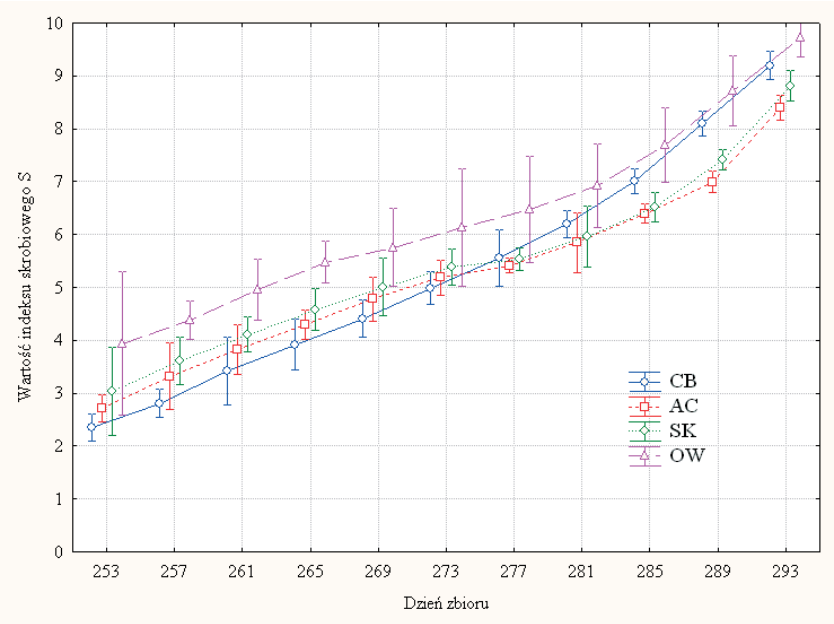
Tabela 9.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Jonagold (2004) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 9.
Jonagold S values at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
265	AC	4,59 b	CB	4,69 a	CB	4,69 c
	SK	4,39 b	AC	4,59 a	SK	4,39 c
269	AC	4,90 b,d	CB	5,21 a,b,e	CB	5,21 c,d,e
	SK	5,00 b,d	AC	4,89 a, e	SK	5,00 c,d
273	AC	5,49 c,d	CB	5,70 b,c	CB	5,70 a,d,e
	SK	5,90 a,c	AC	5,49 b,c	SK	5,90 a,b,e
277	AC	5,89 a,c	CB	6,10 c,d	CB	6,10 a,b
	SK	6,21 a,c	AC	5,89 b,c,d	SK	6,21 a,b
281	AC	6,40 a	CB	6,52 d	CB	6,52 a,b
	SK	6,65 a	AC	6,40 d	SK	6,65 b

Tabela 10.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Jonagold (2004) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 10.
P-values of Jonagold (2004) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		1,00	1,0	0,00
AC	1,0		1,0	0,00
SK	1,0	1,00		0,00
OW	0,00	0,00	0,00	

Tak jest w przypadku owoców odmian Jester i Arlett. Większość odmian, reprezentujących promieniowy typ rozpadu skrobi na przekroju owocu powinna być zbierana, gdy wartości te mieszczą się w przedziale 5-7. W przypadku owoców Jonagold wartością optymalną podczas zbioru jest 6, która została osiągnięta, po uwzględnieniu wyników oznaczeń wszystkich metod stosowanych w doświadczeniu, między 273 a 282 dniem roku (Rys. 10).



Rys. 10. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Jonagold (2005) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 10. Starch index changes in Jonagold apples (2005) calculated by different methods

Uwzględniając możliwość wcześniejszego ich zbioru, gdy wartość *S* przekroczy 5, przedział analizowany w doświadczeniu rozszerzono w zakresie od 265 do 281 dnia roku, co było zgodne z wieloletnimi obserwacjami terminu zbioru tych owoców. Wyniki uzyskane w tym przedziale poddane były analizie wariancji (Tab. 11). Jako narzędzie porównania wartości *S* uzyskanych metodami KAO zastosowano test Tukey'a. Ze względu na nieparametryczny rozkład wartości S uzyskanych metodą OW, posłużono się testem Kruskalla-Wallisa (Tab.12). Wyniki testu dowiodły, że wartości *S* oszacowane przez grupę oceniającą były istotnie różne od tych, uzyskanych metodami KAO. Wyniki testu Tukey'a wykazały też, że między wynikami uzyskanymi na podstawie analizy obrazów cyfrowych nie ma istotnych różnic w oznaczaniu wartości indeksu skrobiowego (Tab.11). Optymalny termin zbioru wyznaczony tymi metodami mieścił się w przedziale między 273 a 281 dniem roku.

Na podstawie wartości *S*, uzyskanych metodą tradycyjną zbiór owoców powinien przypadać między 263 a 273 dniem roku. Przyspieszenie terminu zbioru skutkuje większą ich podatnością na oparzeliznę powierzchniową oraz plamistość podskórną. Zbyt późny zbiór prowadzi do szybszego mięknięcia owoców oraz powoduje „mączystość" miąższu. (Peirs i in. 2000). Błędy popełniane podczas zbioru owoców nie mogą być korygowane nawet podczas bardzo restrykcyjnego przestrzegania i kontroli warunków ich przechowywania w chłodni (Skrzyński, 1997).

Tabela 11.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Jonagold (2005) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 11.
Jonagold S values at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
265	AC	4,29 d	AC	4,29 b,f	CB	3,92 e
	SK	4,58 c,d	CB	3,92 b	SK	4,58 c,d,e
269	AC	4,78 a,c,d	AC	4,78 a,b,c	CB	4,41 c,e
	SK	5,01 a,c,d	CB	4,41 b,c	SK	5,01 a,c,d
273	AC	5,18 a,b,c,	AC	5,18 a,c,d	CB	4,98 a,c,d
	SK	5,38 a,b,c	CB	4,98 a,b,c	SK	5,38 a,b,d
277	AC	5,41 a,b	AC	5,41 a,d,e	CB	5,55 a,b
	SK	5,54 a,b	CB	5,55 a,d,e	SK	5,54 a,b
281	AC	5,85 b	AC	5,85 d,e	CB	6,19 b
	SK	5,95 b	CB	6,19 e	SK	5,95 b

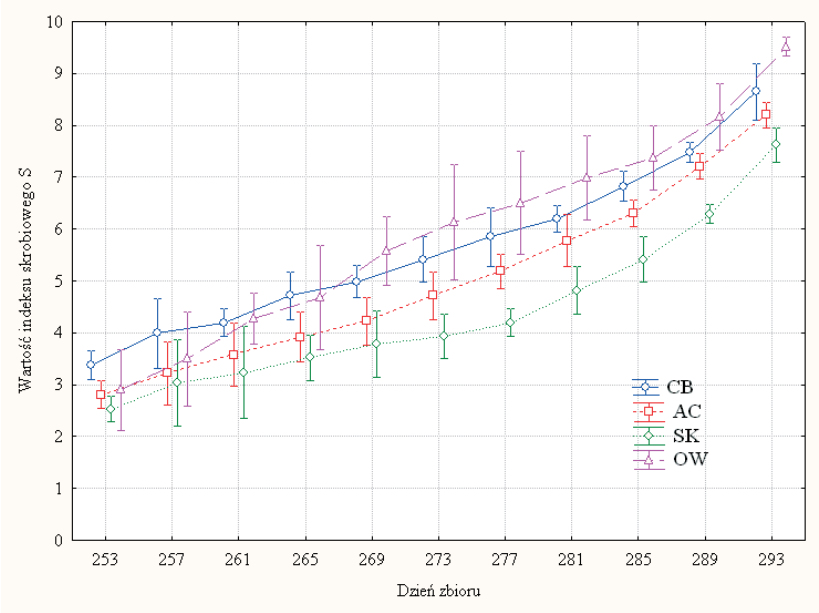
Tabela 12.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Jonagold (2005) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 12.
P-values of Jonagold (2005) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		1,00	1,00	0,00
AC	1,00		1,00	0,00
SK	1,00	1,00		0,01
OW	0,00	0,00	0,01	

W eksperymencie z 2006 roku przebieg zmian indeksu skrobiowego kształtował się odmiennie niż w latach poprzednich (Rys. 11). Na uwagę zasługuje duża zbieżność wyników otrzymanych metodą OW z wynikami metody CB, które w teście Kruskalla-Wallisa wykazują wysoką korelację.

Pozostałe metody oceny wartości indeksu skrobiowego (*S*) różnią się istotnie od wskazań metodą tradycyjną (Tab. 14) W przedziale czasu, w którym przypada najbardziej prawdopodobny termin zbioru (265-281 dzień roku) nie ma istotnych różnic w interpretacji wartości S metodami CB oraz AC (Tab. 13), podczas gdy wartości *S* obliczone metodami CB oraz SK istotnie różnią się w całym tym przedziale. Rozbieżność w ocenie *S* metodami AC i SK w tym przedziale występuje szczególnie w końcowych terminach zbioru analizowanego przedziału czasu. Prawdopodobną przyczyną „zmniejszania się" wartości *S* obliczanych metodą SK było pojawianie się cienia plastra, który powstaje w specyficznych warunkach oświetlenia, występujących podczas zapisu obrazu tą metodą. W wyniku oświe-

tlania próbek silnym, bezpośrednim źródłem światła, część powierzchni tła wokół plastra jest zacieniona.



Rys. 11. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Jonagold (2006) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 11. Starch index changes in Jonagold apples (2006) calculated by different methods

Tabela 13.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Jonagold (2006) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 13.
Jonagold S values at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
265	AC	3,92 a,b	AC	3,92 c	CB	4,72 b,c,d
	SK	3,51 a	CB	4,72 a,c,d	SK	3,51 a
269	AC	4,22 a,b	AC	4,22 c,d	CB	4,98 c,d,e
	SK	3,78 a	CB	4,98 a,b,d	SK	3,78 a
273	AC	4,68 b,c	AC	4,68 a,c,d	CB	5,41 d,e,f
	SK	3,92 a,b	CB	5,41 a,b,e	SK	3,92 a,b
277	AC	5,18 c,d	AC	5,18 a,b	CB	5,85 e,f
	SK	4,19 a,b	CB	5,85 b,e	SK	4,19 a,b,c
281	AC	5,78 d	AC	5,78 b,e	CB	6,19 f
	SK	4,81 b,c	CB	6,19 e	SK	4,81 b,c,d

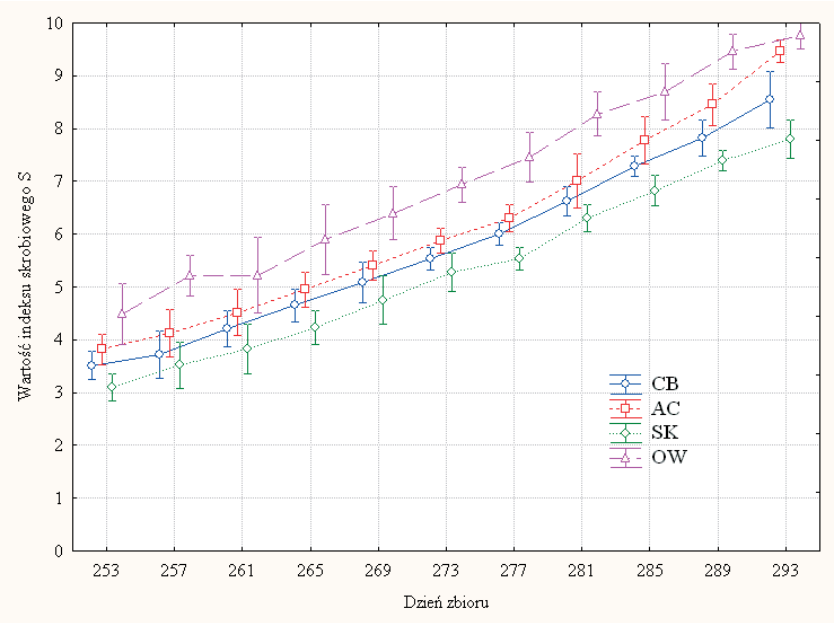
Tabela 14.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Jonagold (2006) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 14.
P-values of Jonagold (2006) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		0,09	0,00	1,00
AC	0,09		0,08	0,01
SK	0,00	0,08		0,00
OW	1,00	0,01	0,00	

Powierzchnia obrazu, którą zajmuje cień, ze względu na ciemne jego zabarwienie, jest błędnie postrzegana przez program graficzny, jako fragment „wzoru skrobiowego", którego powierzchnia jest funkcją indeksu skrobiowego, co powoduje zaniżenie jego wartości. Jest to szczególnie widoczne w końcowych terminach zbioru, gdzie zawartość skrobi wyrażonej granatowym zabarwieniem stopniowo zanika, tworząc coraz mniejszą powierzchnię.

Przyjmując, że powierzchnia powstałego cienia jest w przybliżeniu stała, przy stałej grubości plastrów, wynoszącej 5 mm, obecność tego artefaktu świetlnego oddziaływać będzie różnie przy zmieniającej się zawartości skrobi. W początkowych terminach zbioru, gdy jej zawartość wyrażona powierzchnią zabarwienia jest duża, obecność cienia w niewielkim stopniu wpływa na zakłócenie odczytu indeksu *S.* Wskutek rozpadu skrobi, a co za tym idzie zmniejszeniem się powierzchni zabarwionej, udział powierzchni cienia w powierzchni traktowanej jako kompleks skrobiowy stopniowo wzrasta, co sprawia, że wartości S obliczone tą metodą przyjmują niższe wartości niż te, uzyskane innymi metodami. Podczas oświetlania plastrów owoców zabarwionych jodem występuje jeszcze inny rodzaj artefaktu. W metodzie SK jedynym źródłem światła jest element emitujący światło pod takim kątem, że powstają liczne odbicia światła od wilgotnej powierzchni plastrów, które z kolei charakteryzują się jasnym zabarwieniem zbliżonym do barwy białej, co powoduje z kolei pozorne zmniejszenie powierzchni zajętej przez kompleks skrobi z jodem. W rezultacie tego zjawiska występuje maskowanie optyczne części powierzchni, która jest pokryta ciemnym kompleksem jodu. Udział tej tak „zmniejszonej" powierzchni nie jest stały i zależy od powierzchni zajętej przez skrobię w kolejnych stadiach jej rozpadu obserwowanych w poszczególnych terminach zbioru. Problem ten będzie jeszcze poruszony w dalszej części pracy. Ze względu na duże różnice wartości *S* szacowanych w tym eksperymencie dane uzyskane metodą SK, w odniesieniu do tych, uzyskanych pozostałymi metodami, należy potraktować jako odstające, które nie powinny być brane pod uwagę przy podejmowaniu decyzji o zbiorze owoców

Przebieg zmian *S* w ostatnim eksperymencie wstępnej fazy badań dla owoców Jonagold wykazywał regularność charakterystyczną dla obserwowanych w latach poprzednich. W doświadczeniu z 2007 roku (Rys. 12) owoce tej odmiany oceniano pod względem szybkości rozpadu skrobi, podobnie jak w latach poprzednich, metodą tradycyjną (OW), oraz trzema metodami zapisu obrazów cyfrowych (KAO). Wyniki oceny wartości indeksu *S* metodą OW miały tendencję do zawyżania jego wartości, co w przypadku stosowania tej metody prowadziłoby do przyspieszenia zbioru owoców.



Rys. 12. Zmiany wartości indeksu skrobiowego owoców Jonagold (2007) oznaczanego różnymi metodami
Fig. 12. Starch index changes in Jonagold apples (2007) calculated by different methods

Charakterystyczne dla tej części doświadczenia jest zmniejszenie rozrzutu wartości uzyskanych metodą OW. Było to prawdopodobnie spowodowane zmianą grupy oceniającej, która rekrutowana była, jak co roku, spośród losowo wybranych studentów grupy seminaryjnej. Szacunkowe wartości indeksu *S* uzyskane tą metodą były istotnie wyższe od tych, uzyskanych pozostałymi metodami. Wykazano to stosując test Kruskala-Wallisa (Tab.16), uwzględniając nieparametryczny rozkład wartości OW. Najniższe wartości *S* uzyskano w wyniku analizy obrazów uzyskanych ze skanera (SK). Analizę wariancji w teście Tukey'a przeprowadzono dla tych terminów, w których przypada prawdopodobny zbiór owoców. Podczas porównania wartości *S,* obliczonych metodami KAO nie zauważa się istotnych różnic w interpretacji wartości tego wskaźnika. Jednak biorąc pod uwagę różnice średnich wyników obliczonego indeksu, uzyskanych w tych samych terminach zbioru różnymi metodami, wynoszą one 0,3-0,5 stopnia, co przy małym kącie pochylenia prostej regresji skutkuje już przesunięciem terminu zbioru o 3-4 dni (Rys. 12). Największe różnice obliczonych wartości indeksu *S* zaobserwowano przy zestawieniu metod AC i SK (Tab. 15). Były one istotne przy założonym poziomie (α=0,05). Zaniżone wartości wskaźnika, obliczone z obrazów skanowanych można wytłumaczyć tak, że w tej metodzie obrazy były zapisywane z cieniem pochodzącym ze światła skanera, który tworzył się w okolicy plastra, a był interpretowany jako fragment należący do obszaru zabarwionego, zajętego przez skrobię. W przypadku pozostałych metod KAO posługiwano się specjalnym ekranem podświetlającym, który eliminował tę wadę obrazu.

Tabela 15.
Wartości indeksu skrobiowego S owoców Jonagold (2007) w wybranych terminach zbioru, w zależności od metody zapisu obrazu. Test Tukey'a
Table 15.
Jonagold S values at harvest window by the picture taking acquisition method (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
265	AC	4,95 a,b	CB	4,65 c	CB	4,65 b,c
	SK	4,23 e	AC	4,96 a,c	SK	4,23 b
269	AC	5,41 a,b,c	CB	5,09 a,c	CB	5,09 a,c,d
	SK	4,74 a,e	AC	5,41 a,b	SK	4,74 b,c,d
273	AC	5,87 c,d	CB	5,54 a,b	CB	5,54 a,e
	SK	5,28 a,b,c	AC	5,88 b,d	SK	5,28 a,d
277	AC	6,28 d	CB	6,01 b,d,e	CB	6,01 e,f
	SK	5,54 b,c	AC	6,28 d,e	SK	5,54 a,e
281	AC	7,00 f	CB	6,62 e,f	CB	6,62 f
	SK	6,32 d	AC	7,01 f	SK	6,32 f

Tabela 16.
Wartości prawdopodobieństwa indeksu S odmiany Jonagold (2007) metody OW w porównaniu z metodami KAO, test Kruskala-Wallisa
Table 16.
P-values of Jonagold (2007) OW (visual assessment) method in comparison to KAO methods

Metoda Method	CB	AC	SK	OW
CB		0,72	0,78	0,00
AC	0,72		0,013	0,00
SK	0,78	0,013		0,00
OW	0,00	0,00	0,00	

5.3. Podsumowanie analizy zmian indeksu skrobiowego w pierwszym etapie badań przeprowadzonym dla odmian jabłek Gloster oraz Jonagold

Tabele 17 i 18 przedstawiają powiązania między równaniami regresji prostych obrazujących przebieg zmian *S* w funkcji czasu. Zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Janishidiana i in (2005) wyznaczono wartości prawdopodobieństwa (Tab. 19 i 20) w przebiegu porównywanych par prostych. Współczynniki te, dla prostych obrazujących przebiegi zmian *S* w dwu sezonach zbiorczych, wyznaczonych tą sama metodą wskazują duże zróżnicowanie podobieństw równań prostych regresji.

Tabela 17.
Równania regresji zmian indeksu skrobiowego S podczas dojrzewania owoców Gloster
Table 17.
Regression equations of Starch index during Gloster apples maturation

Rocznik Year	Metoda Method	Równanie regresji Regression equation	R^2
2004	CB	$S = 0{,}140t - 35{,}570$	0,946
	AC	$S = 0{,}144t - 36{,}409$	0,958
	SK	$S = 0{,}119t - 30{,}104$	0,979
	OW	$S = 0{,}158t - 39{,}320$	0,981
2005	CB	$S = 0{,}134t - 33{,}478$	0,970
	AC	$S = 0{,}136t - 34{,}480$	0,971
	SK	$S = 0{,}108t - 27{,}246$	0,942
	OW	$S = 0{,}157t - 38{,}811$	0,984
2006	CB	$S = 0{,}134t - 33{,}024$	0,940
	AC	$S = 0{,}125t - 31{,}983$	0,930
	SK	$S = 0{,}106t - 26{,}568$	0,964
	OW	$S = 0{,}146t - 36{,}231$	0,979
2007	CB	$S = 0{,}132t - 32{,}799$	0,990
	AC	$S = 0{,}154t - 39{,}481$	0,960
	SK	$S = 0{,}114t - 28{,}329$	0,972
	OW	$S = 0{,}144t - 34{,}905$	0,991

Tabela 18.
Równania regresji zmian indeksu skrobiowego S podczas dojrzewania owoców Jonagold
Table 18.
Regression equations of Starch index during Jonagold apples maturation

Rocznik Year	Metoda method	Równanie regresji Regression equation	R^2
2004	CB	$S = 0{,}110t - 24{,}288$	0,996
	AC	$S = 0{,}138t - 32{,}042$	0,984
	SK	$S = 0{,}149t - 35{,}014$	0,988
	OW	$S = 0{,}142t - 31{,}995$	0,996
2005	CB	$S = 0{,}163t - 39{,}223$	0,987
	AC	$S = 0{,}124t - 28{,}748$	0,984
	SK	$S = 0{,}124t - 28{,}493$	0,974
	OW	$S = 0{,}130t - 29{,}179$	0,980
2006	CB	$S = 0{,}117t - 26{,}416$	0,983
	AC	$S = 0{,}127t - 29{,}674$	0,982
	SK	$S = 0{,}109t - 25{,}586$	0,949
	OW	$S = 0{,}151t - 35{,}350$	0,993
2007	CB	$S = 0{,}127t - 28{,}956$	0,994
	AC	$S = 0{,}138t - 31{,}622$	0,987
	SK	$S = 0{,}121t - 27{,}566$	0,991
	OW	$S = 0{,}131t - 28{,}623$	0,993

Tabela 19.
Zestawienie wartości prawdopodobieństwa zgodności przebiegu S otrzymanych wg równań regresji odmiany Gloster
Table 19.
The compatibility comparison of S values obtained from linear regression models (Gloster variety)

Porównywane roczniki Years of comparison	Metoda Method			
	AC	CB	OW	SK
2004/2005	0,82	0,32	0,78	0,39
2004/2006	0,01	0,04	0,20	0,64
2004/2007	0,82	0,33	0,19	0,31
2005/2006	0,04	0,52	0,06	0,74
2005/2007	0,59	0,99	0,42	0,03
2006/2007	0,01	0,49	0,02	0,15
Suma Total	2,31	2,69	1,67	2,26

Tabela 20.
Zestawienie wartości prawdopodobieństwa zgodności przebiegu S otrzymanych wg równań regresji odmiany Jonagold
Table 20.
The compatibility comparison of S values obtained from linear regression models (Jonagold variety)

Porównywane roczniki Years of comparison	Metoda Method			
	AC	CB	OW	SK
2004/2005	0,003	0,00	0,00	0,09
2004/2006	0,0001	0,67	0,00	0,00
2004/2007	0,006	0,103	0,15	0,02
2005/2006	0,43	0,00	0,00	0,00
2005/2007	0,00	0,00	0,00	0,64
2006/2007	0,00	0,29	0,00	0,00
Suma Total	0,44	1,063	0,15	0,75

Jednym z czynników wywołujących te zmiany są czynniki klimatyczne, występujące podczas dojrzewania owoców do zbioru w badanych sezonach. Cechy klimatu są bardzo ważnym czynnikiem, choć nie jedynym, decydującym o terminie zbioru. Autorzy zajmujący się tą problematyką zwracają uwagę, że terminy zbioru tej samej odmiany w sadach oddalonych o zaledwie kilkanaście kilometrów mogą różnić się nawet o 7-10 dni (Reid 1982; Rutkowski i in. 2000; Rutkowski i in. 2003). Ze względu na plan wieloletnich doświadczeń, który zakładał korzystanie ze zbioru owoców pochodzących z tego samego sadu, należy uwzględnić głównie zmiany mikroklimatu występujące podczas poszczególnych lat zbioru owoców.

Analizując dane z tabeli 19 daje się zauważyć, że przebieg prostych otrzymanych za pomocą programu, będącego składową oprogramowania systemu Supervist (Rys. 3) (używanego tylko w metodzie CB), charakteryzował się największą zgodnością. Wykazano to przez sumowanie współczynników prawdopodobieństwa zgodności przebiegu par prostych, przy których porównania prostych dla tej metody wykazywały najwyższe wartości. Niższe niż w metodzie CB wartości współczynników zgodności zaobserwowano dla metod oceny AC oraz SK. Tradycyjna metoda oceny indeksu skrobiowego (OW), ze względu na błędy wynikające z subiektywnej oceny osób wyznaczających jej wartości uzyskała najniższą sumę prawdopodobieństw.

Wśród 6 par porównań przebieg prostych jednej pary różniły się istotnie, gdy obiektami ocenianymi były przekroje owoców Gloster. Gdy oceniano owoce Jonagold tylko równania prostych jednej pary nie różniły się istotnie. Pozostałe były istotnie różne na poziomie α=0,05. Wyniki umieszczone w tabeli 20 wskazują na mniejszą zbieżność przebiegów prostych wyrażających przebieg dojrzewania owoców Jonagold. Można przypuszczać, że owoce tej odmiany są bardziej wrażliwe na zmiany parametrów klimatu podczas dojrzewania lub też, ze względu na sposób rozpadu skrobi w owocach i skomplikowaną postać „wzoru skrobiowego" oznaczanie wartości *S* jest trudniejsze zarówno metodą tradycyjną, jak i metodami KAO. Według tabeli 18, w której umieszczono równania regresji oraz współczynniki dopasowania prostych (determinacji) są wysokie (0,94-0,99). Użycie równań w tej postaci jest w tym przypadku dobrym przybliżeniem rzeczywistego przebiegu doświadczenia. Modele liniowe zmian indeksu skrobiowego były potwierdzone wcześniejszymi badaniami (Reid, 1982; Peirs i in. 2002). Owoce jabłoni odmiany Jonagold są tymi, w których rozpad skrobi przebiega według schematu charakteryzującego się promieniowym zanikiem tego polisacharydu, który jest widoczny w postaci zanikających granatowych plam na przekroju owocu. W tym przypadku długość linii rozgraniczającej pola zajęte przez skrobię od obszarów, w których już nie jest ona wykrywana, jest długa, co może mieć wpływ na dokładność oznaczania wartości *S*, nawet przy precyzyjnym ustaleniu wartości progu filtracji. W takim przypadku identyfikacja obiektu, która polega na obliczaniu jego pola powierzchni, jako udziału procentowego w całym obrazie, jest zależna od błędu, jaki został popełniony podczas ustalania progu filtracji. Gdy wartość tego progu będzie zawyżona, to otrzymane wartości indeksu skrobiowego osiągną niższe wartości. Błąd jest w takim przypadku tym większy, im większa będzie liczba zidentyfikowanych obiektów, które tworzą po zsumowaniu bardzo długą linię brzegową. Pomiarem zostaje objęte wówczas pole znacznie większe niż w rzeczywistości wynosi wartość wskaźnika. To zagadnienie będzie omówione w dalszej części pracy.

5.4. Analiza zmian wartości indeksu skrobiowego przy zmiennej temperaturze barwy oświetlenia

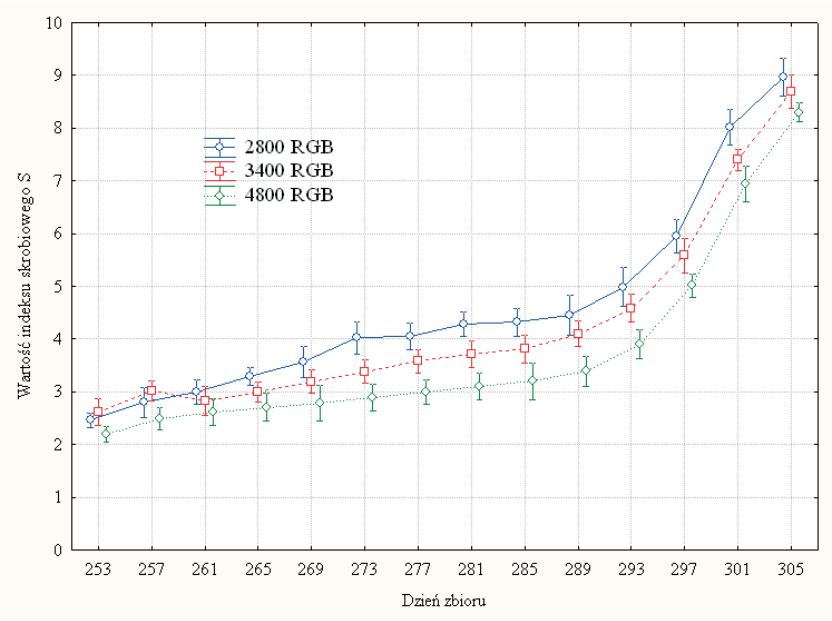
Kolejnym etapem weryfikacji metody AC, jako jednego z wariantów KAO, którego stosowanie jest możliwe do interpretacji wartości indeksu skrobiowego, było zastosowanie oświetlenia o zmiennej temperaturze barwowej. Zmiana temperatury barwy oświetlenia może powodować różnice w ocenie tych samych obiektów poddawanych analizie w różnych warunkach oświetlenia. Skład spektralny światła decyduje o wrażeniu barwy odbiera-

nej przez obserwatora, szczególnie, gdy różnice w składzie widmowym światła są duże. Rozkład jasności poszczególnych obszarów w obrazie może ulec całkowitej zmianie, gdy zostanie oświetlony światłem monochromatycznym o określonej barwie. Występuje wówczas zjawisko pozornego „rozjaśnienia" wszystkich obszarów o barwie takiej, jaką ma monochromatyczne źródło światła. W rezultacie obszary lub obiekty, posiadające barwę taką jak barwa tego monochromatycznego oświetlenia lub barwy pokrewne, są trudne do identyfikacji, bowiem postrzegane są, jako przedmioty o barwie zbliżonej do barwy białej. To zjawisko powoduje, że są one praktycznie trudne do rozdzielenia od pozostałych fragmentów obrazu.

5.4.1.Zmiany indeksu skrobiowego w różnej temperaturze barwowej oświetlenia owoców Gloster

W eksperymencie z zastosowaniem zmiennej temperatury barwowej światła, filtrację obrazów zabarwionych plastrów owoców wykonywano przy zastosowaniu standardowej wartości progu, wynoszącej 120 dla rozkładu jaskrawości punktów w obrazach, obserwowanych w systemie barw RGB. Wartość progu filtracji była ustalona na poziomie 120 również dla obrazów obserwowanych w różnych wariantach temperatury barwy: 2800 K, 3400K oraz 4800 K. Próg filtracji pozostawał niezmieniony również podczas analizy obrazów monochromatycznych powstałych w składowych R, G oraz B. Zmiany barwy oświetlenia żarówek o temperaturze barwy 2800 K, dokonywano za pomocą filtrów konwersyjnych KB 6 oraz KB 15. Schemat obliczeń zmiany temperatury barwowej w wyniku ich stosowania podano w metodyce badań. W wyniku zastosowania filtrów konwersyjnych światło odbite od plastrów owoców ulegało filtracji, przechodząc przez obiektyw jako światło o temperaturze barwowej wyższej, w związku z tym następowała zmiana barwy oświetlenia z ciepłej (2800K) do bardziej neutralnej (3400K oraz 4800K). Taka modyfikacja składu spektralnego światła powodowała zwiększenie udziału promieni niebieskich padających na element światłoczuły w ogólnym spektrum barw rejestrowanych jako obraz. Zmiana składu spektralnego światła powodowała pozorne „zwiększenie się" obszarów, które rejestrowane były jako ciemnogranatowe pola. Przy niezmiennym progu filtracji obrazu zwiększone udziały pól powierzchni powodowały pozorne „zmniejszenie się" wartości indeksu skrobiowego. Zmiany te były szczególnie widoczne w terminach zbioru od 273 do 289 dnia roku (Rys. 13).

Istotne zmniejszenie obliczonej wartości indeksu skrobiowego uzyskanej po zmianie temperatury barwowej następowało po jej wzroście do 4800K. Różnice w ocenie *S,* wynosiły między S_{T28} a S_{T48} nawet 1,5 stopnia (Tab. 21). Zaniżanie wartości tego wskaźnika po zwiększeniu temperatury oświetlenia może spowodować opóźnienie decyzji o zbiorze owoców, gdyż wartości indeksu *S*, przy których powinien nastąpić zbiór, są interpretowane jako prawidłowe z dużym opóźnieniem, co sprzyja decyzji o spóźnionym zbiorze przy zbyt zaawansowanym stanie rozwoju fizjologicznego owoców. Zmiana wartości indeksu skrobiowego spowodowana filtracją światła przez niebieskie filtry konwersyjne KB wiąże się ze zmianą składu spektralnego światła przepuszczanego przez filtr. Skutkuje to pozornym rozszerzeniem się powierzchni zajętej przez granatowe kompleksy jodu ze skrobią, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie wartości *S*. Efekt ten jest podobny do tego przypadku, gdy podczas filtracji obszaru pierwotnego nastąpi przesunięcie progu filtracji o zaledwie kilka poziomów jasności. Zagadnienie to będzie omówione w oddzielnym podrozdziale.



Rys. 13. Wpływ temperatury barwowej oświetlenia na interpretację wartości S owoców Gloster wyrażonej składową RGB

Fig. 13. Effect of light temperature on S values interpretation in Gloster apples by RGB component

Tabela 21.

Wyniki analizy wariancji indeksu skrobiowego owoców Gloster przy zmiennej temperaturze barwy oświetlenia dla składowej RGB

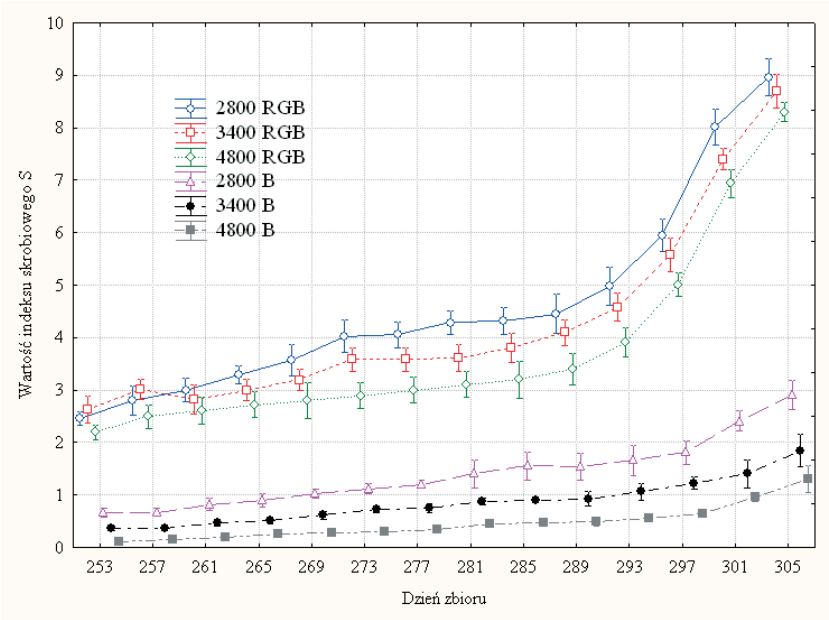
Table 21.

Variance analysis of Gloster apples starch index at different colour light temperature (RGB component)

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwowa (K) Light temp.(K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp.(K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp.(K).	*S*
269	2800	3,56 a,b	2800	3,57 c,d	3400	3,2 a,b,c
	3400	3,2 b	4800	2,79 a	4800	2,79 a
273	2800	4,03 a,c	2800	4,03 b,d	3400	3,6 b,c,d
	3400	3,6 a,b	4800	2,89 a	4800	2,89 a
277	2800	4,05 a,c	2800	4,05 b,d	3400	3,57 b,c,d
	3400	3,57 a,b	4800	3,0 a	4800	3,0 a
281	2800	4,29 c	2800	4,29 b	3400	3,61 c,d
	3400	3,61 a,b	4800	3,1 a,c	4800	3,1 a,b
285	2800	4,32 c	2800	4,32 b	3400	3,81 d
	3400	3,81 a,c	4800	3,2 a,c	4800	3,2 a,b,c

W eksperymencie z zastosowaniem zmiennej barwy światła dokonano również analizy oceny indeksu *S,* gdy źródłem informacji o wskaźniku dojrzałości jest wartość powierzchni pól, analizowanych jako składowe obrazy czarno-białe. Utworzone w oparciu o składową niebieską (B) charakteryzowały się dużą powierzchnią o ciemnym zabarwieniu w obrębie powierzchni plastra. Filtracja takich obrazów przy stałej wartości progu, wynoszącej 120 powodowała uzyskanie niskich wartości *S* w całym cyklu doświadczenia (Rys. 14).
Powodem takiego sposobu interpretacji *S* za pomocą składowej B jest duży jej udział w tworzeniu wypadkowego obrazu plastrów, tworzących obszary zajęte przez indeks skrobiowy, jak i pozostałą część miąższu owocu w obszarach obserwowanych przekrojów. Użycie obrazów, utworzonych przez składową B, było całkowicie bezużyteczne w ocenie zmian indeksu skrobiowego. Wobec powyższego pominięta została analiza statystyczna obrazów wytworzonych za pomocą tej składowej.

Obrazy czarno-białe tworzące pola obszarów indeksu skrobiowego za pomocą składowej G (zielonej) były bardzo podobne do swoich barwnych odpowiedników utworzonych w systemie RGB (Rys. 15, 16 i 17).

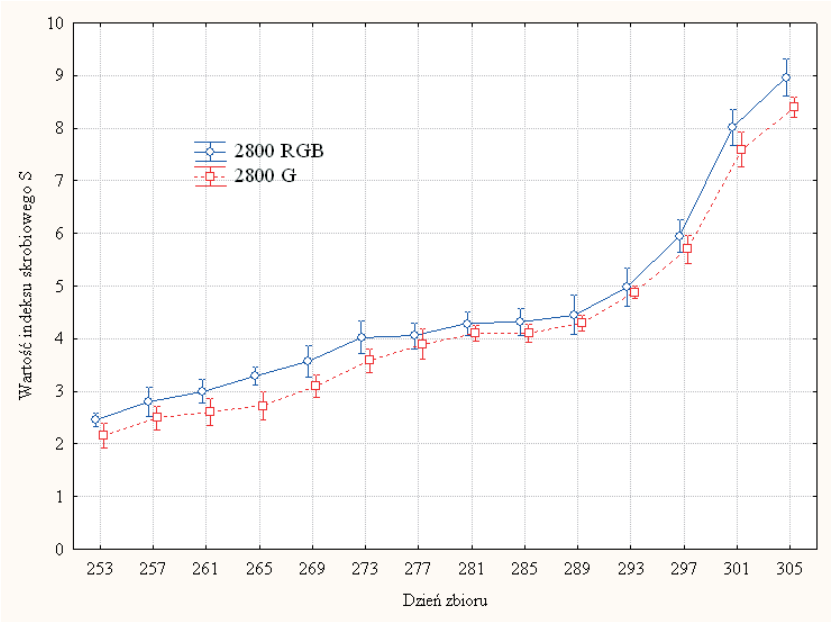


Rys. 14. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy B przy wybranych temperaturach barwowych oświetlenia

Fig. 14. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the B colour component at selected colour light temperature

W obrazach tworzonych z udziałem źródła światła o temperaturze barwowej 2800K różnice w ocenie wartości *S* za pomocą obrazów tej składowej były nieistotnie niższe od

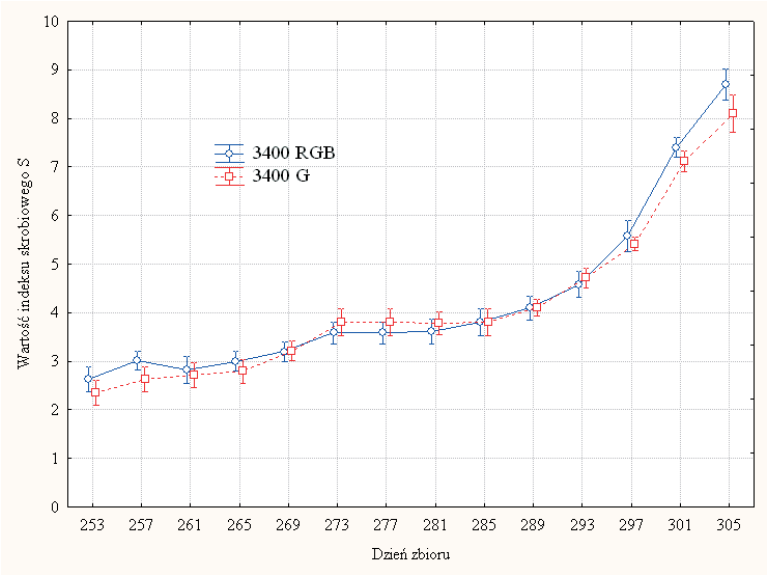
obrazów barwnych (Tab. 22). Różnice wartości średnich wynosiły od 0,2 do 0,5 stopnia w przedziale zbioru miedzy 268-285 dniem roku. Wraz ze zmianą temperatury barwowej obrazów rejestrowanych w doświadczeniu, przebieg zmian indeksu skrobiowego, z obrazów tworzących składową G, zmieniał się względem tych, otrzymanych z obrazów barwnych RGB, rejestrowanych w tych samych warunkach oświetleniowych. Zwiększenie udziału promieni niebieskich tworzących obraz przy użyciu filtrów konwersyjnych powodował wzrost indeksu S_G względem wartości S_{RGB} otrzymanych z obrazów barwnych (Rys. 16 i 17).



Rys. 15. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy G w temperaturze barwowej 2800K

Fig. 15. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the G colour component at 2800K color light temperature

Po konwersji promieni świetlnych do temperatury barwowej 3400K przebieg zmian S_G wyznaczonych za pomocą składowej G był, względem S_{RGB} nieistotnie różny w analizowanym przedziale terminów zbioru (Tab. 22). Różnice obliczone jako średnie arytmetyczne pomiarów wynosiły 0,05 do 0,25 jednostki *S*. Podobny przebieg zmian *S* wyrażony składową G w tych warunkach zanotowano we wszystkich terminach przeprowadzonego doświadczenia. Zwiększanie temperatury barwowej światła do 4800K (Rys. 17), powodowało zmianę przebiegu krzywej S_G względem *S*. Wartości S_G były, z wyjątkiem końcowych terminów zbioru, istotnie wyższe. W rozpatrywanym przedziale terminów zbioru różnica ta wynosi od 0,2 do 0,7 stopnia *S* (Tab. 22 i 23).



Rys. 16. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy G w temperaturze barwowej 3400K

Fig. 16. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the G colour component at 3400K color light temperature

Tabela 22.

Wyniki testu Tukey'a składowej G oraz RGB owoców Gloster w różnych temperaturach barwy oświetlenia

Table 22.

Tukey's test of G component and RGB of Gloster fruits at different colour light temperatures

Dzień zbioru Harvest date	Temp. Barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. Barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*
269	2800 RGB	3,56 b,c	3400 RGB	3,19 b	4800 RGB	2,79 a
	2800 G	3,09 c	3400 G	3,21 b	4800 G	3,40 b,c,d,e
273	2800 RGB	4,03 a,b	3400 RGB	3,57 a,b	4800 RGB	2,89 a
	2800 G	3,58 b,c	3400 G	3,82 a	4800 G	3,61 e
277	2800 RGB	4,05 a,b	3400 RGB	3,6 a,b	4800 RGB	3,0 a,b
	2800 G	3,89 a,b	3400 G	3,81 a	4800 G	3,59 c,d,e
281	2800 RGB	4,28 a	3400 RGB	3,61 a,b	4800 RGB	3,10 a,b,c
	2800 G	4,11 a	3400 G	3,78 a	4800 G	3,41 b,c,d,e
285	2800 RGB	4,31 a	3400 RGB	3,80 a	4800 RGB	3,2 a,b,c,d
	2800 G	4,10 a	3400 G	3,77 a	4800 G	3,70 d,e

Rys. 17. .Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy G w temperaturze barwowej 4800K

Fig. 17. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the G colour component at 4800K color light temperature

Tabela 23.

Wyniki testu Tukey'a składowej G owoców Gloster w różnych temperaturach barwy oświetlenia

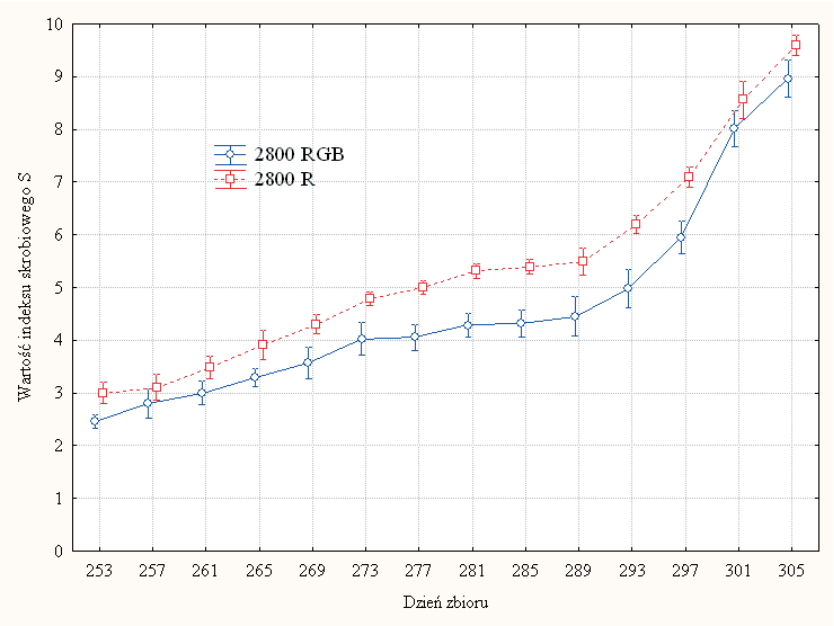
Table 23.

Tukey's test of G component (Gloster)at different colour light temperatures

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*
269	2800	3,09 c	3400	3,21 b,c	2800	3,09 b
	3400	3,21 c,d	4800	3,40 a,b,c	4800	3,40 a,b
273	2800	3,58 b,d	3400	3,79 a	2800	3,58 a,c
	3400	3,79 a,b	4800	3,06 c	4800	3,61 a,c
277	2800	3,89 a,b	3400	3,81 a	2800	3,89 c,d
	3400	3,80 a,b	4800	3,59 a,b	4800	3,59 a,c
281	2800	4,11 a	3400	3,78 a	2800	4,11 d
	3400	3,78 a,b	4800	3,41 a,b,c	4800	3,41 a,b
285	2800	4,10 a	3400	3,77 a	2800	4,10 d
	3400	3,77 a,b	4800	3,70 a,b	4800	3,70 a,c,d

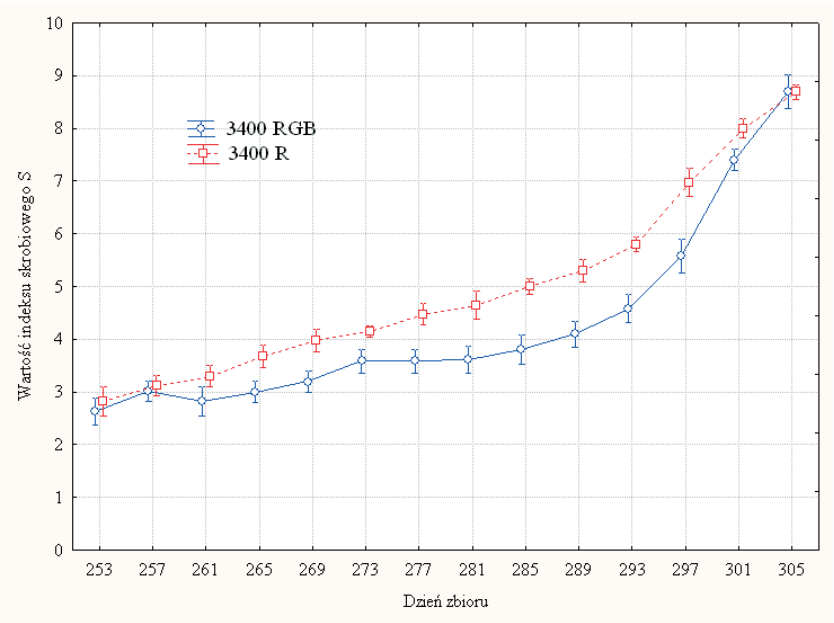
Przebieg zmian wartości S_R otrzymanych z czarno-białych obrazów składowej R miał odmienny przebieg niż dla wartości S_G. W celu zilustrowania charakteru zmian interpretacji S_R względem wartości S_{RGB} otrzymanych jako wypadkowa jaskrawość w systemie RGB przedstawiono je w postaci graficznej (Rys. 18 - 20).

Indeks *S* obliczony na podstawie analizy obrazu w składowej R przyjmuje, w zakresie terminów zbioru między 269 a 285 dniem roku wartości istotnie wyższe przy temperaturze barwowej 2800K, 3400K i 4800K. Można zauważyć przy tym prawidłowość, która polegała na powstawaniu coraz większych różnic między wartością S_{RGB} a S_R wraz ze wzrostem zmierzonej przez sensor temperatury barwy światła. Różnice te wynosiły od 0,7 do 1 stopnia przy temperaturze 2800K aż do 1,4-2 stopnie przy temperaturze barwowej 4800K (Tab. 24 i 25). Wynika z tego, że przy wyższej temperaturze barwowej oświetlenia, udział składowej R, tworzącej obraz kompleksu jodowo-skrobiowego ulega zmniejszeniu na powierzchni obiektów, co skutkuje pozornym zwiększeniem się wartości indeksu skrobiowego, a tym samym – zwiększeniem różnic w ocenie jego wartości. Przy zachowaniu tego samego progu filtracji użycie obrazów składowej R, jako czarno-białych wersji „wzoru skrobiowego" prowadzi do zbyt dużych błędów w ocenie wartości indeksu *S*.



Rys. 18. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy R w temperaturze barwowej 2800K

Fig. 18. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the R colour component at 2800K color light temperature



Rys. 19. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy R w temperaturze barwowej 3400K

Fig. 19. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the R colour component at 3400K color light temperature

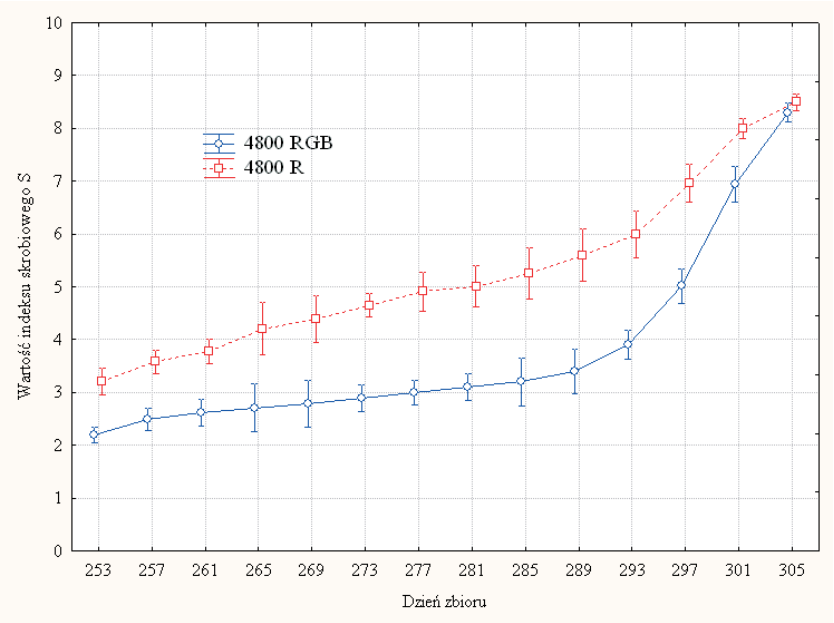
Tabela 24.

Wyniki testu Tukey'a składowej R oraz RGB owoców Gloster w różnych temperaturach barwy oświetlenia

Table 24.

Tukey's test of R component and RGB (Gloster) at different colour light temperatures

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*
269	2800 RGB	3,56 d	3400 RGB	3,2 b	4800 RGB	2,79 a
	2800 R	4,30 a	3400 R	3,97 a,c	4800 R	4,20 b
273	2800 RGB	4,02 a	3400 RGB	3,6 a,b	4800 RGB	2,89 a
	2800 R	4,78 c	3400 R	4,14 c,d	4800 R	4,48 b,c
277	2800 RGB	4,05 a	3400 RGB	3,57 a,b	4800 RGB	3,0 a
	2800 R	4,99 b,c	3400 R	4,47 d,e	4800 R	4,59 b,c
281	2800 RGB	4,28 a	3400 RGB	3,61 a,b	4800 RGB	3,10 a
	2800 R	5,31 b	3400 R	4,64 e,f	4800 R	4,79 c,d
285	2800 RGB	4,31 a	3400 RGB	3,81 a,c	4800 RGB	3,2 a
	2800 R	5,39 b	3400 R	4,99 f	4800 R	5,24 d



Rys. 20. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Gloster, określone według składowych RGB oraz składowej barwy R w temperaturze barwowej 4800K

Fig. 20. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Gloster variety, determined according to the RGB components and the R colour component at 4800K color light temperature

Tabela 25.

Wyniki testu Tukey'a składowej R owoców Gloster w różnych temperaturach barwy oświetlenia

Table 25.

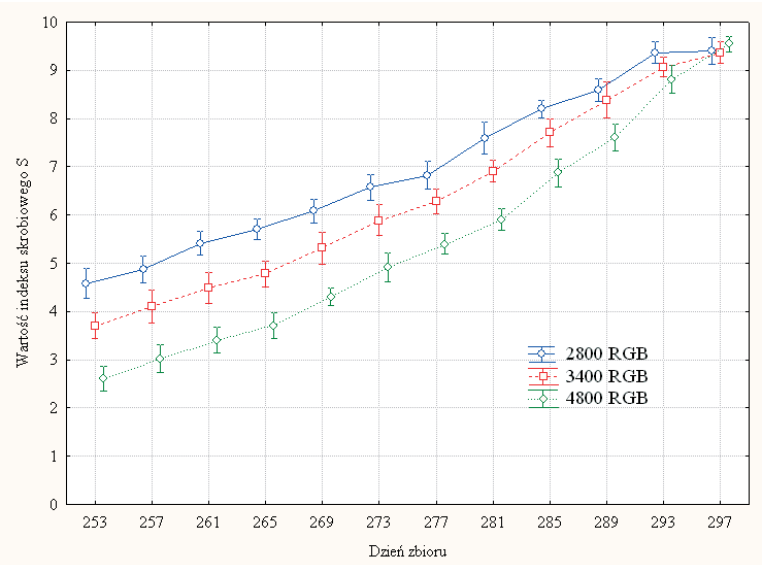
Tukey's test of R component (Gloster) at different colour light temperatures

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwowa (K) Lightmz temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*
269	2800	4,30 a,b	3400	3,97 e	2800	4,30 b,c
	3400	3,97 a	4800	4,20 b,c	4800	4,20 b
273	2800	4,78 c,d	3400	4,14 b,e	2800	4,78 a,d
	3400	4,14 a,b	4800	4,48 a,b,c	4800	4,48 a,b,c
277	2800	4,99 d,e	3400	4,47 a,b,c	2800	4,99 d,e
	3400	4,47 b,c	4800	4,59 a,c,d	4800	4,59 a,c
281	2800	5,31 e,f	3400	4,64 a,d	2800	5,31 e,f
	3400	4,64 c	4800	4,79 a,d	4800	4,79 a,d
285	2800	5,39 f	3400	5,02 d,f	2800	5,39 f
	3400	5,02 d,e	4800	5,24 f	4800	5,24 e,f

W spodziewanym zakresie terminów zbioru różnica między wartościami S_R a S_{RGB} rośnie wraz z przesunięciem czasu zbioru w tym przedziale czasu. Ponieważ różnica miedzy wartościami średnimi jest duża posługiwanie się w praktyce obrazami składowej R, jako materiałem analitycznym prowadzić może do poważnych błędów w ocenie dojrzałości zbiorczej tej odmiany. Przyczyną tak dużych rozbieżności wartości S_R względem wartości bazowej jest fakt, iż składowa ta w systemie addytywnym RGB w ograniczonym stopniu występuje w tworzeniu barw składających się na zabarwienie kompleksu skrobiowego. Filtracja obrazu filtrami niebieskimi o rosnącej gęstości optycznej ogranicza udział składowej R w tworzeniu obrazu po filtracji, stąd mniejszy jej udział, jako składowej w histogramach powstałych obrazów, a co za tym idzie, ograniczenie pola powierzchni, na którym ta składowa tworzy obrazy, co przejawia się pozornym zwiększaniem się wartości *S*.

5.4.2. Zmiany indeksu skrobiowego w różnej temperaturze barwowej oświetlenia owoców Jonagold

Przebieg zmian wartości indeksu skrobiowego dla owoców odmiany Jonagold w systemie RGB (S_{RGB}) (Rys. 21), wskazuje, że zmiana temperatury barwy światła wpływa istotnie na wartość *S*, przy czym jej wzrost od 2800 do 4800 K powoduje zmniejszenie wartości *S*. Różnice te wynoszą w tym przedziale temperatur barwowych 2 stopnie *S* w terminie zbioru od 265 dnia roku, do ok. 1,7 stopnia w 281 dniu roku, by w końcowych terminach, występujących poza „oknem zbioru" przyjmować wartości nieistotnie mniejsze podczas stosowania zwiększonej do 4800 K temperatury barwy oświetlenia.



Rys. 21. Wpływ temperatury barwowej oświetlenia na interpretację wartości S owoców Jonagold wyrażonej składową RGB

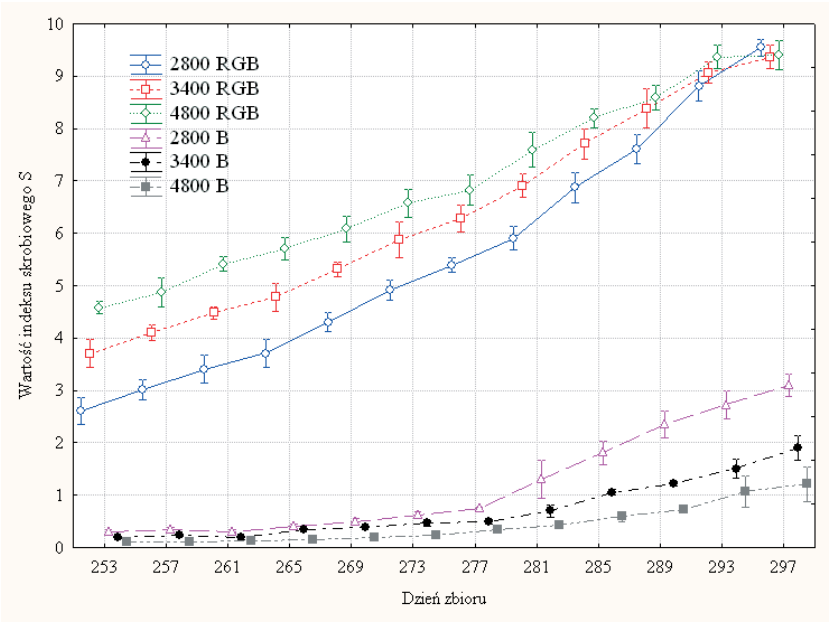
Fig. 21. Effect of light temperature on S values interpretation in Jonagold apples by RGB component

Analiza statystyczna przeprowadzona została w przedziale najbardziej prawdopodobnego terminu zbioru, który dla tej odmiany przypada między 265 a 281 kalendarzowym dniem roku. W przedziale tym różnice w ocenie *S* są istotne (Tab. 26), co oznacza, że błędy popełniane przy ocenie *S* mogą powodować przesunięcie terminu zbioru wynoszące nawet 7 dni (Rys. 21), co może powodować zmianę dojrzałości owoców w takim stopniu, że istotnie wpłynie ona na ich przydatność przechowalniczą. Jonagold należy do grupy owoców, które charakteryzują się „promieniowym" typem rozpadu skrobi na powierzchni przekroju poprzecznego, co przejawia się występowaniem licznych prążków nieregularnie rozmieszczonych na powierzchni obserwowanej podczas analizy. W rezultacie długość linii granicznej między obszarami zajętymi zabarwionym kompleksem skrobiowym a pozostałą powierzchnią jest duża, co przy zmianie zabarwienia kompleksu jodu ze skrobią wywołanego zmianą oświetlenia, czy też filtracją obrazu, powoduje powstawanie dużych różnic w ocenie powierzchni zajętej przez skrobię, a tym samym na wartość indeksu *S*. Efekt ten, zaliczany w technikach przetwarzania obrazu do tzw. efektów krawędziowych lub granicznych występuje zawsze tam, gdzie linia podziału obszarów o jednakowych gęstościach optycznych jest wydłużona, a gradient zmian gęstości między obszarami jest niewielki. (Germain, Aguilera 2012). Wówczas ocena progu filtracji rozdzielającego oba obszary jest utrudniona, a wszelkie błędy wynikające z doboru niewłaściwego progu filtracji stają się duże. To samo dzieje się, gdy zmienia się jakość oświetlenia (sposób rozproszenia, barwa, kierunek promieni oświetlających, itp.). Szczególnie widoczne jest to, gdy jeden ze składników barwy (B) ma dominujący udział w tworzeniu barwy wypadkowej granatowego zabarwienia kompleksu skrobiowego.

Tabela 26.
Wyniki analizy wariancji indeksu skrobiowego owoców Jonagold przy zmiennej temperaturze barwy oświetlenia dla składowej RGB
Table 26.
Variance analysis of Jonagold apples starch index at different colour light temperature (RGB component)

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwowa (K) Light temp. (K).	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K).	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K).	*S*
265	2800	5,70 a	3400	4,78 b	2800	5,70 a,c
	3400	4,78 e	4800	3,70 e	4800	3,70 f
269	2800	6,08 a,b,c	3400	5,31 c,d	2800	6,08 a,d
	3400	5,31 e,f	4800	4,30 f	4800	4,30 g
273	2800	6,57 c,d	3400	5,88 a	2800	6,57 d,e
	3400	5,88 a,b	4800	4,91 b,c	4800	4,91 b
277	2800	6,82 d	3400	6,28 a	2800	6,82 e
	3400	6,28 b,c	4800	5,39 d	4800	5,39 b,c
281	2800	7,59 g	3400	6,91 g	2800	7,59 h
	3400	6,91 d	4800	5,87a	4800	5,87 a

Kontrast obrazu kompleksu skrobiowego na przekrojach zależał w pewnym stopniu również od barwy zasadniczej miąższu. W przypadku owoców Jonagold była to barwa o odcieniu jasnozielonym, co dodatkowo zmniejsza gradient barwny między kompleksem skrobiowym a miąższem. Dominanta barwy niebieskiej jest szczególnie wyraźnie zilustrowana na rys. 22. Udział tej barwy w całej powierzchni przekroju ilustruje wartość S_B interpretowana przez tą składową. W większości terminów objętych eksperymentem wartości indeksu S_B, przy zachowaniu stałej wartości progu, wynoszącej 120 dla tego składnika, niskie. W praktyce obraz składowej B zajmował w polu przekroju owocu niemal całą powierzchnię, bez względu na zmiany wartości *S*, które były rejestrowane za pomocą składowych barw R oraz G. Wartości *S* interpretowane według składowej B, ze względu na duże błędy oznaczania indeksu skrobiowego, nie mogły być brane pod uwagę podczas jego obliczania.

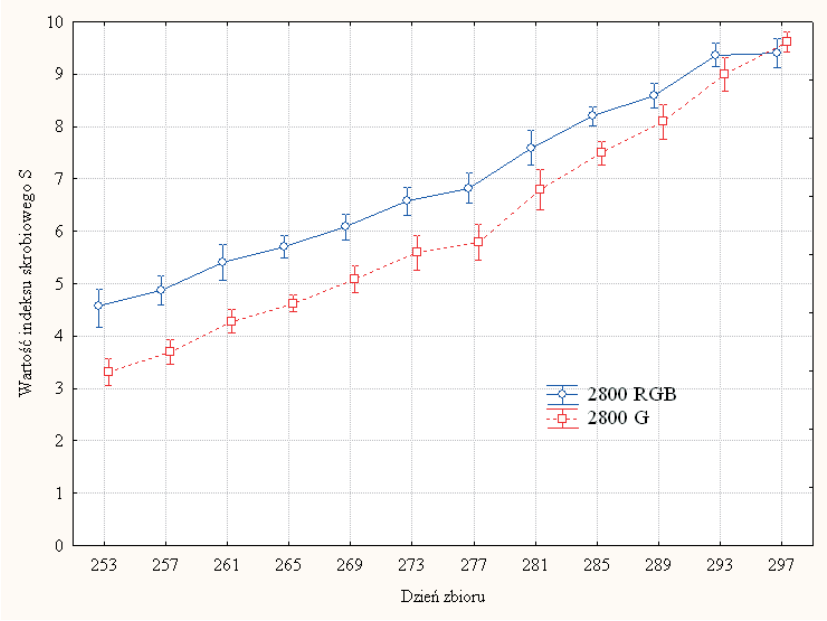


Rys. 22. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy B przy wybranych temperaturach barwowych oświetlenia

Fig. 22. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the B colour component at selected colour light temperature

Zmiana temperatury barwowej wywołana filtrami konwersyjnymi wpływała na różną interpretację wartości indeksu skrobiowego w oparciu o jego obliczanie z obrazów powstałych w składowych R oraz G. Zmiany przebiegu wartości S_G uzyskanych z obliczeń według wskazań składowej G (Rys 23-25) w porównaniu do ich przebiegu dla wypadkowej RGB mają przebieg zróżnicowany i zależny od temperatury barwy światła filtrowanego przed

układem optycznym obiektywu. Obiekty rejestrowane bez filtra (2800K) charakteryzują niższe wartości indeksu skrobiowego obliczone za pomocą obrazów składowej G. W rozpatrywanym przedziale zbioru owoców między 265 a 281 dniem roku wartości *S* są niższe o ok. 1 stopień. Wykorzystując wartości *S* w oparciu o składową G przy 2800K, jako wskaźnika, skłania do opóźnienia zbioru owoców. Przebieg zmian S_G dla temperatury barwy 3400K jest, w porównaniu z *S* (RGB przy 3400K) podobny jak w przypadku S_G (2800K) z tym, że różnice odczytu w obu przypadkach w oparciu o składową G są nieistotnie niższe. W terminach zbioru między 265 a 281 dniem roku wynoszą od 0,3 do 0,55 stopnia wartości *S*. Przebieg zmian wartości S_G (4800K) jest inny niż w niższych temperaturach barwy. W tym przypadku wartości te są wyższe od wartości RGB o ok. 0,3-0,6 wartości jednostki *S*.

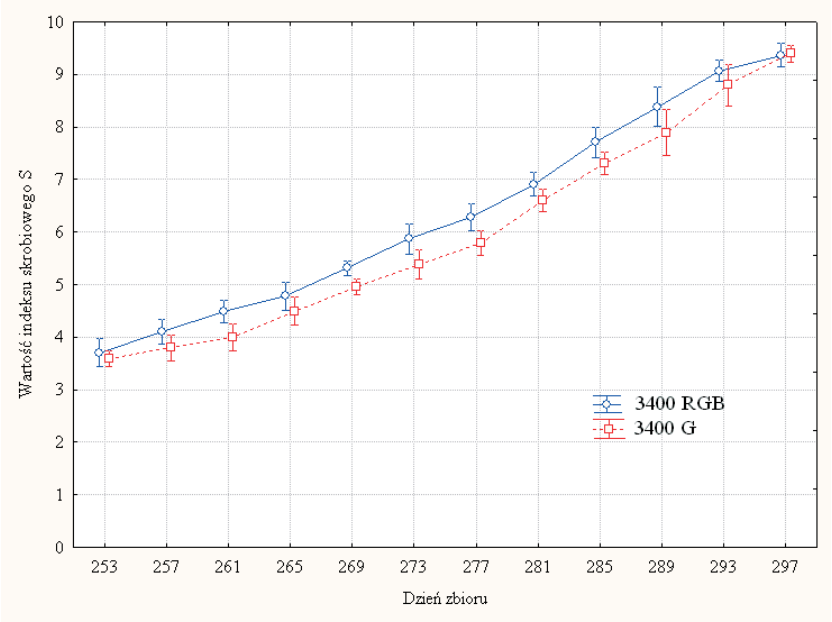


Rys. 23. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy G w temperaturze barwowej 2800K
Fig. 23. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the G colour component at 2800K color light temperature

W porównaniu wartości otrzymanych w analizie obrazów barwnych RGB oraz tych, które otrzymano na podstawie analizy jaskrawości obrazów monochromatycznych w składowej G, można zaobserwować nieistotne zmiany wartości tego wskaźnika, niezależnie od różnic temperatury barwy światła (Tab. 27 i 28).

Tabela 27.
Wyniki testu Tukey'a składowej G oraz RGB owoców Jonagold w różnych temperaturach barwy oświetlenia
Table 27.
Tukey's test of G component and RGB (Jonagold) at different colour light temperatures

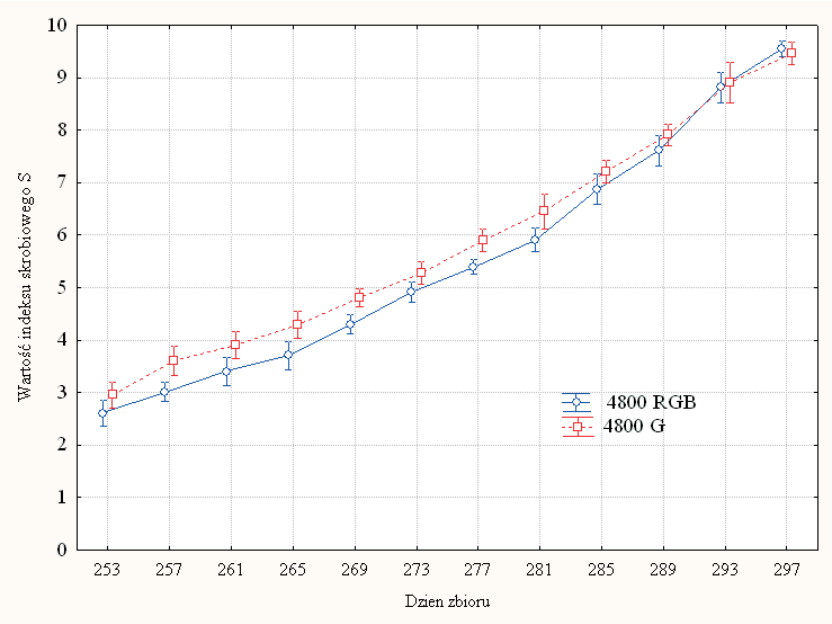
Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*
265	2800 RGB	5,70 a,b	3400 RGB	4,78 a	4800 RGB	3,70 f
	2800 G	4,62 d	3400 G	4,49 a	4800 G	4,29 a
269	2800 RGB	6,08 b	3400 RGB	5,31 b	4800 RGB	4,30 a
	2800 G	5,08 d	3400 G	4,96 a,b	4800 G	4,80 b
273	2800 RGB	6,57 c	3400 RGB	5,88 d,e	4800 RGB	4,91 b,c
	2800 G	5,59 a	3400 G	5,38 b,c	4800 G	5,28 c,d
277	2800 RGB	6,82 c	3400 RGB	6,28 e,f	4800 RGB	5,39 d
	2800 G	5,78 a,b	3400 G	5,81 c,d	4800 G	5,90 e
281	2800 RGB	7,59 e	3400 RGB	6,91 g	4800 RGB	5,87 e
	2800 G	6,79 c	3400 G	6,60 f,g	4800 G	6,45 g



Rys. 24. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy G w temperaturze barwowej 3400K
Fig. 24. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the G colour component at 3400K color light temperature

Tabela 28.
Wyniki testu Tukey'a składowej G owoców Jonagold w różnych temperaturach barwy oświetlenia
Table 28.
Tukey's test of G component (Jonagold) at different colour light temperatures

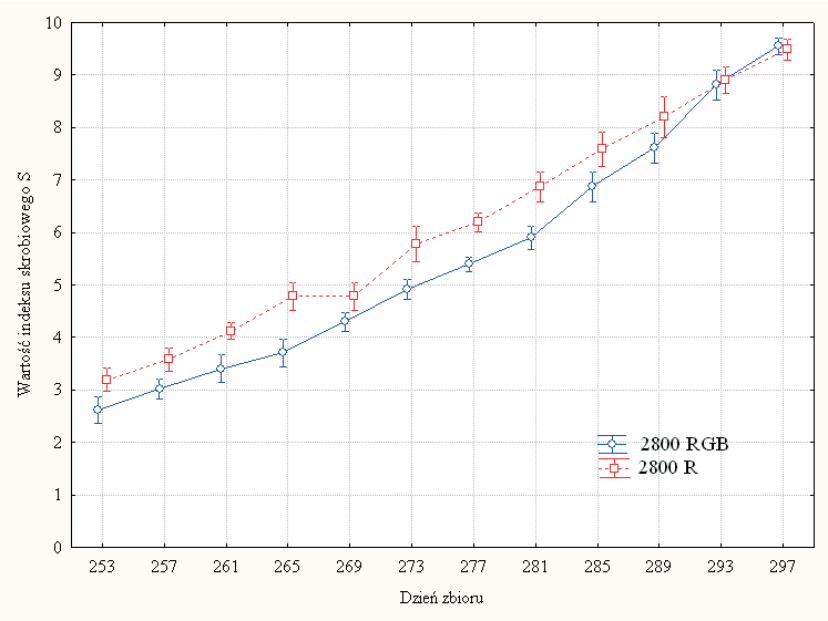
Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*
265	2800	4,62 b,c	3400	4,49 a,c	2800	4,62 b,c
	3400	4,49 b	4800	4,29 c	4800	4,29 b
269	2800	5,08 d,e	3400	4,96 a,b	2800	5,08 d,e
	3400	4,96 c,d	4800	4,80 a	4800	4,80 c,d
273	2800	5,59 a,f	3400	5,38 b,d	2800	5,59 a,f
	3400	5,38 e,f	4800	5,28 b	4800	5,28 e,f
277	2800	5,79 a	3400	5,79 d,e	2800	5,79 a
	3400	5,79 a	4800	5,90 e	4800	5,90 a
281	2800	6,79 f	3400	6,60 f	2800	6,79 g
	3400	6,60 f	4800	6,45 f	4800	6,45 g



Rys. 25. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy G w temperaturze barwowej 4800K
Fig. 25. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the G colour component at 4800K color light temperature

Analiza statystyczna (test Tukey'a) potwierdziła brak istotności różnic między wartościami otrzymanymi za pomocą obrazów otrzymanych tą metodą. Filtracja światła filtrem konwersyjnym zabarwionym na kolor niebieski (filtry typu KB 6, KB 15) spowodowała, że wartości S_G obliczone z obrazów w składowej G były niższe, niż bez filtracji (Rys 25). Różnice te wynosiły 0,1-0,3 stopnia w 10-stopniowej skali wartości *S*, co w praktyce sadowniczej jest błędem mniejszym niż szacowany błąd oznaczenia i nie wpływa na przesunięcie terminu zbioru (Tomala 1995b).

Zmiany w ocenie indeksu *S* wywołane filtracją światła miały inny przebieg w przypadku, gdy wskaźnik ten był wyznaczany według wartości S_R, obliczonych na podstawie filtracji obrazów monochromatycznych składowej R (Rys. 26-28). Rejestracja obrazu przez filtr konwersyjny powodowała tym razem istotny wzrost wartości *S* już po zmianie temperatury barwowej z 2800K do 3400K (Tab. 26). Różnice wskazań indeksu *S* interpretowanego w ten sposób wynosiły ok. 0,7 stopnia. Dalszy wzrost temperatury barwowej (do 4800K) nie powodował istotnego zwiększenia odczytu wartości S_R (Tab. 29) Różnice maksymalne w ocenianym przedziale, w którym zawiera się prawdopodobny termin zbioru wynoszą 1 stopień wartości indeksu *S*, co sprawia, że termin zbioru wyznaczany za pomocą składowej R może ulec już znacznemu przyspieszeniu, rzutując tym samym na jakość owoców podczas ich przechowywania.

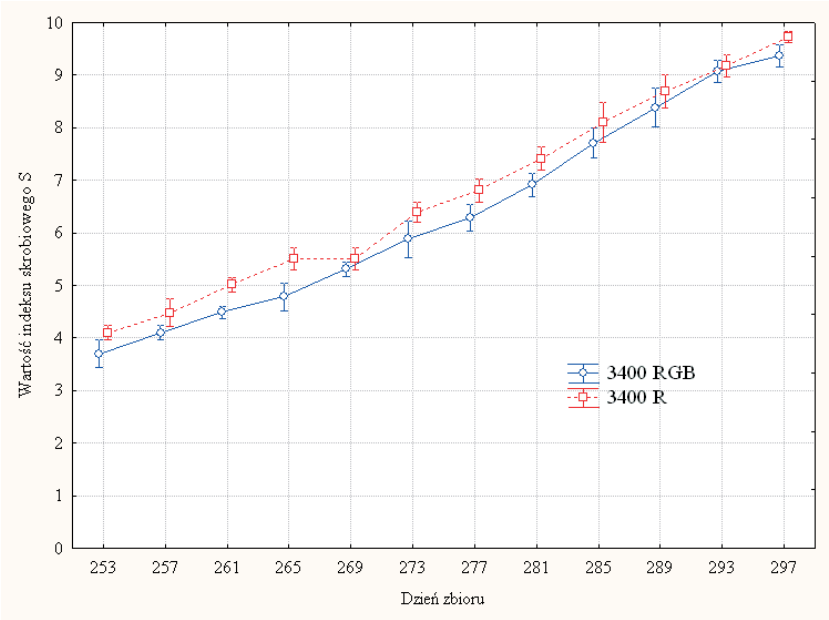


Rys. 26. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy R w temperaturze barwowej 3400K

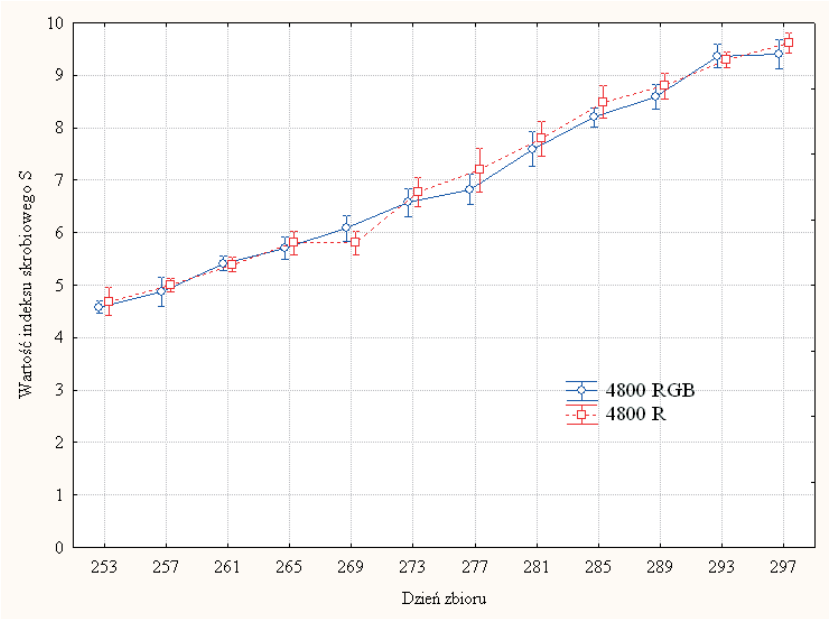
Fig. 26. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the R colour component at 3400K color light temperature

Tabela 29.
Wyniki testu Tukey'a składowej R oraz RGB owoców Jonagold w różnych temperaturach barwy oświetlenia
Table 29.
Tukey's test of R component and RGB (Jonagold) at different colour light temperatures

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*	Temp. barwy (K)/ składowa Colour temp.(K)/ component	*S*
265	2800 RGB	5,70 a	3400 RGB	4,78 g	4800 RGB	3,70 d
	2800 R	4,77 d	3400 R	5,48 a,b	4800 R	5,78 a
269	2800 RGB	6,08 a,b	3400 RGB	5,31 a	4800 RGB	4,30 e
	2800 R	4,81 d	3400 R	5,52 a,b	4800 R	5,83 a
273	2800 RGB	6,57 b,c	3400 RGB	5,88 b,c	4800 RGB	4,91 b
	2800 R	5,78 a	3400 R	6,39 d,e	4800 R	6,77 c
277	2800 RGB	6,82 c	3400 RGB	6,28 c,d	4800 RGB	5,39 a,b
	2800 R	6,19 a,b	3400 R	6,81 e,f	4800 R	7,19 c
281	2800 RGB	7,59 e	3400 RGB	6,91 f	4800 RGB	5,87 a
	2800 R	6,87 c	3400 R	7,41 h	4800 R	7,79 f



Rys. 27. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy R w temperaturze barwowej 3400K
Fig. 27. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the R colour component at 3400K color light temperature



Rys. 28. Zmiany wartości indeksu skrobiowego (S) w jabłkach odmiany Jonagold, określone według składowych RGB oraz składowej barwy R w temperaturze barwowej 4800K
Fig. 28. Changes in the value of the starch index (S) in apples of the Jonagold variety, determined according to the RGB components and the R colour component at 4800K color light temperature

Tabela 30.
Wyniki testu Tukey'a składowej R owoców Jonagold w różnych temperaturach barwy oświetlenia
Table 30.
Tukey's test of R component (Jonagold) at different colour light temperatures

Dzień zbioru Harvest date	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*	Temp. barwowa (K) Light temp. (K)	*S*
265	2800	4,77 c	3400	5,48 a	2800	4,77 c
	3400	5,48 a	4800	5,78 a	4800	5,78 a
269	2800	4,81 c	3400	5,52 a	2800	4,81 c
	3400	5,52 a	4800	5,83 a	4800	5,83 a
273	2800	5,78 a,d	3400	6,39 b	2800	5,78 a
	3400	6,39 b,e	4800	6,77 b,c	4800	6,77 b,d
277	2800	6,19 d,e	3400	6,81 b,c	2800	6,19 a,d
	3400	6,81 b	4800	7,19 c,d	4800	7,19 b
281	2800	6,87 b	3400	7,41 d,e	2800	6,87 b
	3400	7,41 f	4800	7,79 e	4800	7,79 e

W przypadku, gdy analizowane były zmiany *S* poprzez analizę jasności punktów obrazu stworzonych przez wypadkową RGB, której przebieg ilustruje rys. 21, zmiana temperatury barwy światła w przedziale 2800K-4800K istotnie przyczyniła się do zmiany wartości indeksu *S* otrzymanej jako wypadkowa wszystkich składników barwy.

Gdy weźmiemy pod uwagę porównanie wartości poszczególnych składników w odniesieniu do tych, uzyskanych wypadkową RGB, to wskaźniki uzyskane według wskazań składowej R (S_R) przyjmowały wartości, które ilustrują zmiany indeksu skrobiowego podczas dojrzewania owoców z dużym odchyleniem od krzywej wypadkowej (Rys. 26-28). W przebiegu zmian ilustrowanych składową R można zauważyć tendencję do zaniżania wartości S_R przy temperaturze 2800K (Rys. 26). Zmiana temperatury barwowej do 3400K dawała z kolei nieistotnie wyższe wartości indeksu (Tab. 30), lub też wskaźniki, które były istotnie wyższe od wartości wypadkowej jasności RGB przy temperaturze barwy światła 4800K (Rys. 28). W tym przypadku korzystanie z wartości S_R obliczonych z analizy obrazów składowej R skłania do podjęcia decyzji o wcześniejszym zbiorze owoców.

5.5. Zmiany wartości indeksu skrobiowego po usuwaniu odblasków za pomocą filtra polaryzacyjnego

Światło niespolaryzowane padając na powierzchnię niemetalową ulega częściowemu odbiciu oraz załamaniu, pod warunkiem, że jest to struktura przepuszczająca światło. Część światła padającego na taką powierzchnię ulega odbiciu, pozostała część stanowi tzw. odblaski, które są światłem spolaryzowanym.

Taki rozdział promieni świetlnych zachodzi w materiałach nieprzezroczystych.

W przypadku materiałów przezroczystych znaczna część światła ulega załamaniu, a tylko część jest odbita, jako promienie niespolaryzowane. Wyjątkiem jest tylko wiązka światła padająca pod pewnym kątem padania, zwanym kątem Brewstera, który jest takim kątem padania, przy którym kierunek promieni odbitych od powierzchni oraz kierunek promienia załamanego w danym ośrodku tworzą kąt prosty. W takim przypadku promień odbity od powierzchni jest spolaryzowany. Taki przypadek dla powierzchni płaskich zdarza się niezwykle rzadko i wymaga precyzyjnego ustawienia oświetlenia oraz ustawienia obserwatora lub kamery, by obserwowane odblaski były w całości spolaryzowane.

W praktyce mamy do czynienia z licznymi odblaskami, które pojawiają się niezależnie od zmiany kierunku oświetlenia, ponieważ w większości przypadków stosuje się wielopunktowe źródła oświetlenia lub też światło emitowane jest z dużej powierzchni, w związku z tym pada ono pod wieloma kątami. Powstające w związku z tym odblaski zakłócają czytelność odbioru stanu obserwowanej powierzchni (Brown 2011; Li i in. 2018).

Podczas obserwacji zabarwionych jodem, wilgotnych powierzchni owoców występują zarówno odblaski, jak również punkty i obszary, w których pojawia się całkowite wewnętrzne odbicie światła. Oba te zjawiska powodują, ze część obszaru zabarwionego kompleksem jodu ze skrobią stwarza złudzenie jaśniejszego, maskując rzeczywisty stan poszczególnych punktów i obszarów obrazu. Punkty, w których występuje zjawisko całkowitego odbicia są nieusuwalne za pomocą filtra polaryzacyjnego, natomiast odblaski, przy odpowiednim jego ustawieniu mogą być prawie całkowicie usunięte (Chen i in., 2012).

Nawet niewielkie skręcenie filtra (30°) względem położenia wyjściowego powoduje zauważalne, choć nieistotne zmiany odczytu S_{P30} względem S w analizowanym przedziale czasu, w którym nastąpi prawdopodobny zbiór owoców. Dalsze zwiększanie kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji (Rys. 29) powodowało wygaszanie kolejnych obszarów pokrytych odblaskami. Rezultatem tego było zmniejszenie wartości indeksu S interpretowanego w obrazie zapisanym z tak użytym filtrem polaryzacyjnym. Podobnie jak w poprzednim ustawieniu filtra przy dużych wartościach S różnice w jego ocenie w świetle filtrowanym w porównaniu do obrazów, które fotografowano bez filtra były mniejsze w początkowych terminach zbioru. W rozpatrywanym przedziale prawdopodobnego zbioru owoców różnice S_{P60} i S_{P90} oznaczane przy obu ustawieniach filtra, względem S_{P0} były już istotne (Tab. 31).

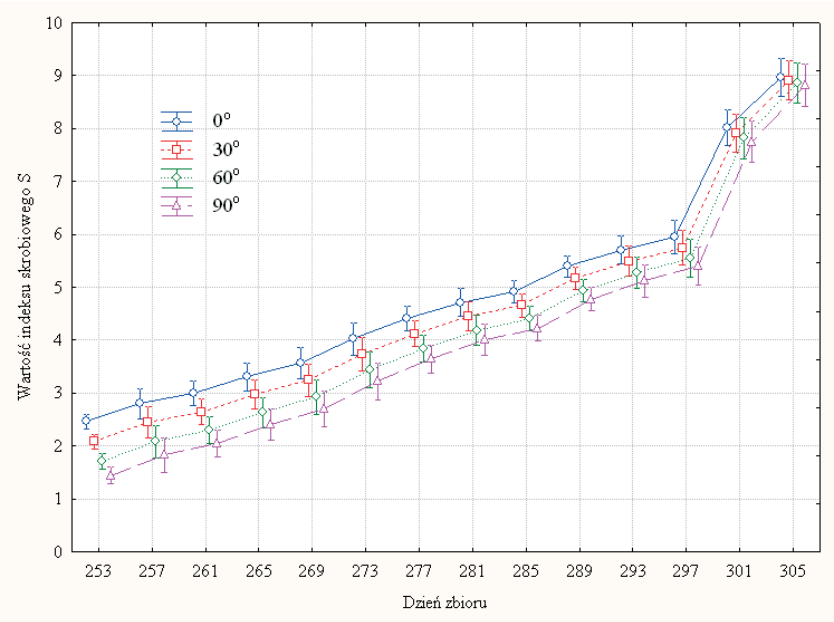
Tabela 31.
Wyniki testu Tukey'a w zależności od kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji (Gloster)
Table 31.
Resuts of Tukey's test on starch index values taken through polarizing filter (Gloster apples)

Dzień zbioru Harvest date	Kąt polaryzacji (°) Polarisation angle (°)	*S*	Kąt polaryzacji (°) Polarisation angle (°)	*S*	Kąt polaryzacji (°) Polarisation angle (°)	*S*
269	0	3,56 d,e	0	3,56 e,f	0	3,56 a,c
	30	3,24 d	60	2,92 g	90	2,69 f
273	0	4,02 b	0	4,02 a,b	0	4,02 a,b
	30	3,72 d,e,f	60	3,43 e,g	90	3,22 c
277	0	4,40 a,b,c	0	4,40 a,b,c,d	0	4,40 b,d,e
	30	4,12 b,c	60	3,84 a,e,f	90	3,64 a,c
281	0	4,71 a	0	4,71 c,d	0	4,71 d,e
	30	4,44 a,b,c	60	4,18 a,b,c	90	3,98 a,b
285	0	4,91 a	0	4,91 d	0	4,91 e
	30	4,65 a,c	60	4,42 b,c,d	90	4,22 b,d

Rysunek 29 ilustruje porównanie wartości indeksu S bez wygaszania odblasków oraz po maksymalnym ich usunięciu (S_{P90}). Gdy stopień rozpadu skrobi był zaawansowany, różnice wartości wskaźnika obliczone na podstawie obrazów uzyskanych przez filtr polaryzacyjny, oraz tych, które obliczono bez jego użycia były mniejsze. Wiąże się to z tym, że w początkowych terminach zbioru kompleks skrobiowy zajmował dużą powierzchnię, na której również pojawiały się odblaski, co przy ich wygaszaniu istotnie wpływało na wartość indeksu S obliczonego przy tej samej wartości progu filtracji obrazu (Tab. 31).

Przy ocenie wartości S przy zastosowaniu filtra polaryzacyjnego duże znaczenie ma, oprócz kąta ustawienia, również dobór próby owoców, co szczególnie widać przy eksperymencie z udziałem owoców odmiany Jonagold. Analiza przebiegu zmian indeksu S dla owoców tej odmiany po użyciu filtra polaryzacyjnego wykazała, że zastosowanie tego przyrządu nie zmienia istotnie S w przedziale, w którym znajduje się prawdopodobny termin zbioru. W analizowanej próbie zanotowano duże rozrzuty wartości indeksu S w poszczególnych terminach zbioru, co rzutowało na wyniki analizy statystycznej. Wykazała

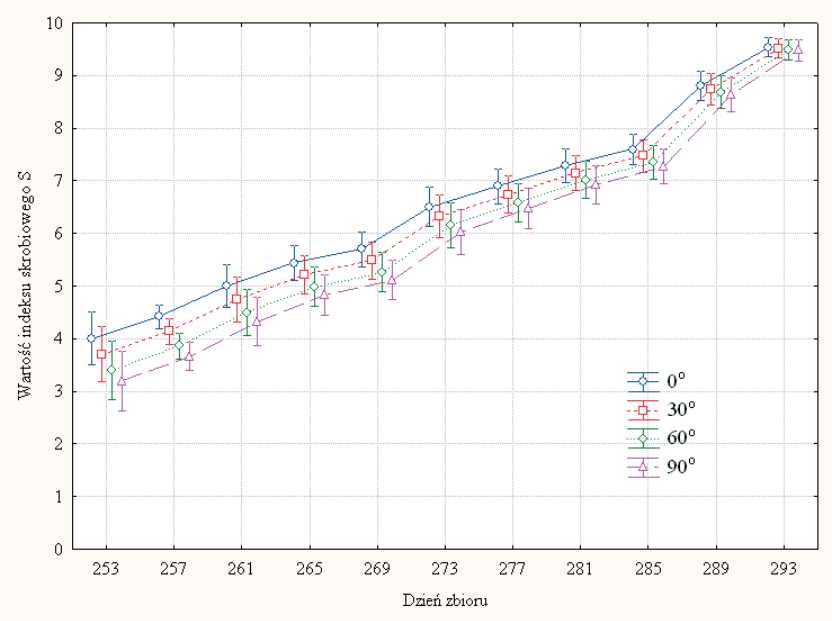
ona brak istotnego wpływu wygaszania odblasków z powierzchni owoców na jego wartość (Tab. 32).



Rys. 29. Zmiany wartości indeksu skrobiowego w jabłkach odmiany Gloster w zależności od kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji
Fig. 29. Changes in the value of the starch index in apples of the Gloster variety depending on the angle of rotation of the polarization plane

Z praktycznego punktu widzenia różnice te jednak występują, ponieważ wartość indeksu *S* jest średnią arytmetyczną z próby 10-20 losowo wybranych owoców. Dotychczasowa procedura oznaczania indeksu *S* nie precyzuje, jaka powinna być wartość rozrzutu w próbie, zalecając jedynie obliczenie średniej arytmetycznej z pojedynczych pomiarów. Użycie filtra polaryzacyjnego powodowało, przy maksymalnym wygaszaniu odblasków, osiąganym skręceniem filtra o 90°, zmniejszenie wartości S_{P0} do S_{P90} o ok. 0,6 stopnia (Rys. 30).

Identyczne ustawienie filtra w przypadku obserwacji owoców odmiany Gloster skutkowało jeszcze większymi różnicami wartości indeksu *S* w „oknie zbioru", wynoszącymi ok. 0,8 stopnia. Wzrost indeksu *S* o taką wartość następował po ok. 4-8 dniach, w zależności od kąta ustawienia filtra oraz sposobu rozpadu skrobi w danej odmianie jabłek. Przesunięcie terminu zbioru może skutkować nadmiernym tempem dojrzewania owoców podczas ich przechowywania, co powoduje konieczność szybszego ich zbytu, ze względu na przyspieszenie dojrzewania. Owoce takie są ponadto narażone na szybszy rozpad wewnętrzny oraz gnicie.



Rys. 30. Zmiany wartości indeksu skrobiowego w jabłkach odmiany Jonagold w zależności od kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji
Fig. 30. Changes in the value of the starch index in apples of the Jonagold variety depending on the angle of rotation of the polarization plane

Tabela 32.
Wyniki testu Tukey'a w zależności od kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji (Jonagold)
Table 32.
Resuts of Tukey's test on starch index values taken through polarizing filter (Jonagold apples)

Dzień zbioru Harvest date	Kąt polaryzacji (°) Polarisation Angle (°)	*S*	Kąt polaryzacji (°) Polarisation Angle (°)	*S*	Kąt polaryzacji (°) Polarisation Angle (°)	*S*
265	0	5,43 a	0	5,43 a,d	0	5,43 b,c,d
	30	5,21 a	60	4,98 a	90	4,82 b
269	0	5,69 a	0	5,69 a,d	0	5,69 c,d
	30	5,48 a	60	5,26 a	90	5,11 b,c
273	0	6,50 a,b	0	6,50 b,e	0	6,50 a,e
	30	6,33 b	60	6,15 d,e	90	6,03 d,e
277	0	6,89 b,c,d	0	6,89 b,c	0	6,89 a
	30	6,73 b,c,d	60	6,58 b,c	90	6,47 a
281	0	7,28 d	0	7,28 c	0	7,28 f
	30	7,14 c,d	60	7,01 b,c	90	6,91 a,f

Ważnym zagadnieniem, które powinno być brane pod uwagę przy analizie ilościowej, opierającej się na wykorzystaniu analizy obrazu, jest poszukiwanie metod eliminacji lub redukcji artefaktów. Zakłócenia te uniemożliwiają uzyskanie wiarygodnych danych, które służą jako podstawa obliczeń wielkości lub wskaźników, mierzonych narzędziami optycznymi. W przypadku pomiaru wartości indeksu skrobiowego, który opiera się na pomiarze pól powierzchni na przekroju owocu ważne jest, by pomiar ten odbywał się w powtarzalnych i optymalnych warunkach oświetleniowych. Powierzchnia plastra oświetlana bezpośrednio odbija większość światła, gdyż jest ciałem nieprzezroczystym. Część światła odbitego ulega spolaryzowaniu, natomiast pozostała ulega jedynie odbiciu. Należy pamiętać, że próbka owocu jest poddawana analizie niezwłocznie po wykonaniu reakcji barwnej i usunięciu nadmiaru cieczy z powierzchni plastra za pomocą bibuły. Próbka taka, oświetlona podczas pomiaru jest nadal wilgotna, co powoduje liczne odblaski i odbicia na jej powierzchni. Ma to swoje konsekwencje w zakłócaniu pomiaru powierzchni zajętej przez skrobię poprzez powstawanie jasnych punktów na powierzchni, zabarwionej w rzeczywistości na granatowo. Artefakty takie powodują, że program graficzny analizujący obraz zabarwionej powierzchni automatycznie zlicza takie punkty dołączając je do zbioru punktów nieobjętych kompleksem jodu i skrobi. Operacja ta daje w efekcie „zmniejszenie się" pola powierzchni zajętego przez skrobię, co ostatecznie powoduje zwiększenie wartości *S* w zarejestrowanym obrazie zabarwionego plastra owocu.

Część takich artefaktów, które są promieniami spolaryzowanymi występującymi w postaci odblasków, mogą zostać wygaszone za pomocą filtra polaryzacyjnego o dowolnym typie polaryzacji (kołowej lub liniowej). Odbicia światła niespolaryzowanego, które pozostają w postaci niezmienionej transmitowane przez filtr, pozostają nadal na powierzchni obrazu próbki. Powstają one wówczas, gdy światło pada pod małym kątem, czyli jest ustawione blisko obiektywu. Gdy kąt padania jest większy, to zjawisko odbicia zanika, tworzą się natomiast liczne odblaski. Na rysunkach 29 i 30 przedstawiono przebieg zmian indeksu *S* w kilku wariantach filtracji. Pierwszy wariant zakłada użycie filtra polaryzacyjnego w kierunku równoległym do kierunku drgań światła spolaryzowanego tworzącego odblaski (kąt 0°). Kolejne warianty filtracji to użycie filtra polaryzacyjnego skręconego o kąt 30°, 60°, lub 90°, czyli prostopadle do kierunku drgań światła spolaryzowanego. Z przebiegu zmian indeksu *S* w całym przedziale obejmującym eksperyment wynika, że działanie filtra poprzez wygaszanie odblasków dawało wymierny efekt, który przejawiał się zróżnicowaną interpretacją wartości indeksu *S* w początkowych terminach zbioru objętych eksperymentem. Wartości różnic średnich wynosiły od 0,4 stopnia w terminach zbioru od 265 do 273 dnia roku przy ustawieniu filtra pod kątem 30°, do ok. 0,1-0,2 stopnia w 281 dniu roku (Tab. 32). Zmniejszenie obliczonej wartości *S* po zastosowaniu filtra polaryzacyjnego wynosiło odpowiednio 0,8 stopnia do 0,2 stopnia dla ustawienia 60° oraz 1,0 do 0,2 stopnia dla ustawienia 90°. Analizę statystyczną przeprowadzono dla przedziału czasu, w którym, na podstawie wieloletnich obserwacji, powinno przypadać osiągnięcie przez owoce stanu dojrzałości zbiorczej. Biorąc pod uwagę fakt, że zbiór owoców danej odmiany przeprowadza się 2 a nawet 3-krotnie, w krótkich odstępach czasu, przyjęto 16-dniowy okres, w którym może nastąpić ich zbiór. Najczęściej owoce odmiany Gloster zbiera się między 269 a 285 dniem roku. Analiza statystyczna (Tab. 31) wykazała, że niewielki kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji nie wpływa istotnie na wynik oznaczenia indeksu *S*. Przy bardziej intensywnym wygaszaniu odblasków (do 60°) różnice w ocenie indeksu *S*. Dotyczy to

głównie niższych wartości *S* w początkowych terminach zbioru owoców. Maksymalne wygaszenie odblasków, przy ustawieniu filtra pod kątem 90° powoduje, że różnice w ocenie indeksu *S* były istotne w całym przedziale prawdopodobnego terminu zbioru.

Tabela 33.
Estymacja przedziału czasowego zbioru owoców Gloster na podstawie równań regresji z wygaszaniem światła spolaryzowanego
Table 33.
Estimation of Gloster apples harvest window by means of linear regression models with polarized light fader

Kąt polaryzacji (°) Polarisation Angle (°)	Równanie regresji Regression equation	R^2	Estymator t, gdy *S*=3 t estimated for *S*=3	Estymator t, gdy *S*=4 t estimated for *S*=4
0	S_{P0} = 0,08475t – 19,15575	0,9893	261,4	273,2
30	S_{P30} = 0,0885t – 20,4805	0,9892	265,3	276,6
60	S_{P60} = 0,09375t – 22,21075	0,991	268,9	279,6
90	S_{P90} = 0,0955t – 22,9035	0,9895	271,2	281,7

W tabeli 33 umieszczono, obok równań regresji oraz współczynnika determinacji wyniki obliczeń terminów zbioru owoców, według dni kalendarzowych, gdy owoce osiągną wartośc indeksu *S* w przedziale 3 do 4. Zbiór, oparty na analizie zdjęć, w których odblaski nie były wygaszane, powinien być przyspieszony o 8 dni, przy *S* = 4, a nawet o 10 dni przy *S* = 3. Termin zbioru oparty na analizie zdjęć bez polaryzacji zawierał się w przedziale 18-30 IX, podczas gdy obrazy spolaryzowane wskazują niższą wartość indeksu, wskazując, by zbiór odbywał się w przedziale 28IX–8X, co jest przedziałem bardziej prawdopodobnym w przypadku odmiany Gloster.

Dla porównania efektów działania wygaszania światła spolaryzowanego przedstawiono wyniki dla próbek owoców odmiany Jonagold, która charakteryzuje się promieniowym typem rozpadu skrobi w przekroju poprzecznym. Optymalnym terminem zbioru Jonagolda jest ten przedział czasu, w którym zawartość skrobi na przekroju poprzecznym wynosi 40-50%, czyli wartość indeksu *S* powinna zawierać się w przedziale 5-6 (Rutkowski, 1997; Rutkowski, 2001). Analizę statystyczną przeprowadzono dla terminów zbioru między 265 a 281 dniem roku. W tym przedziale czasu występuje największe prawdopodobieństwo wystąpienia stanu dojrzałości zbiorczej dla owoców przeznaczonych do przechowywania. Wyniki przedstawione na rysunku 30 wskazują, że wygaszanie części refleksów powodowało, przy skręcaniu filtra o kąt 30°, zauważalne, choć nieistotne (Tab. 32) zmniejszanie się wartości *S*. Redukcja odblasków skutkowała w tym przypadku zmniejszeniem wartości *S* o ok. 0,4 w 265 dniu roku. Różnica wartości indeksu S_{P0} oraz S_{P30} stopniowo zmniejszała się do 0,1-0,2 jednostki *S* w 281 dniu roku. Dalsze zwiększanie kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji powodowało redukcję odblasków w jeszcze większym stopniu. Przy maksymalnym ich wygaszeniu (kąt 90°) różnice te wynoszą od 0,8 jednostki *S* w 265 dniu roku, do około 0,2 jednostki w 281 dniu. Chociaż silniejsza redukcja odblasków przy kątach

skręcenia 60° oraz 90° wpłynęła na zmniejszenie wartości indeksu *S*, rzutujące już na przesunięcie terminu zbioru, to zmiany te nie były istotne statystycznie (Tab. 32).

W przedziale od 265 do 281 dnia roku obliczono równania regresji liniowej, wyznaczono współczynniki korelacji oraz, na podstawie otrzymanych równań wyznaczono przedziały czasu, w których należy wykonać zbiór owoców (Tab. 34).

Tabela 34.
Estymacja przedziału czasowego zbioru owoców Jonagold na podstawie równań regresji z wygaszaniem światła spolaryzowanego
Table 34.
Estimation of Jonagold apples harvest window by means of linear regression models with polarized light fader

Kąt polaryzacji (°) Polarisation Angle (°)	Równanie regresji Regression equation	R^2	Estymator t, gdy *S*=5 t estimated for *S*=5	Estymator t, gdy *S*=6 t estimated for *S*=6
0	S_{P0} = 0,123t – 27,08	0,988	261,9	270,1
30	S_{P30} = 0,128t – 28,7	0,99	263,3	271,1
60	S_{P60} = 0,1345t – 30,72	0,988	265,6	273,0
90	S_{P90} = 0,1385t – 31,94	0,99	266,7	273,9

W przypadku, gdy owoce osiągnęły indeks skrobiowy 5, ich zbiór powinien nastąpić w 262 dniu roku. Taki wynik otrzymano z analizy obrazów fotografowanych przez filtr o kącie 0°. Przy maksymalnym kącie skręcenia płaszczyzny polaryzacji wartość *S* = 5 jest otrzymywana w 267 dniu roku, a więc przesunięcie terminu zbioru wynosi 5 dni. Gdy przyjmiemy wartość graniczną *S* = 6, to owoce tej odmiany osiągały ją w 270 dniu roku, gdy kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji wynosił 0° (S_{P0}), oraz w 274 dniu, gdy wynosił on 90° (S_{P90}). W tym przypadku przesunięcie terminu zbioru wynosiłoby 4 dni. Po wygaszeniu odblasków optymalny termin zbioru zawiera się w przedziale 267-274 dnia roku (23-29 IX), podczas gdy wyniki analizy obrazów otrzymanych bez wygaszania sugerują zbiór wcześniejszy, w 262-270 dniu roku (18-26 IX). Zbiór owoców tej odmiany jest w tym terminie mało prawdopodobny. Analiza wyników skłania do konkluzji, ze użycie filtra polaryzacyjnego zwiększa prawdopodobieństwo trafnego wyznaczenia wartości indeksu *S*, a tym samym prawidłowego terminu zbioru, co jest jednym z czynników sprzyjających prawidłowemu przechowywaniu owoców bez narażania ich na choroby przechowalnicze, które spowodowane są zbiorem w nieodpowiednim terminie.

5.6. Interpretacja indeksu skrobiowego przy zmiennym progu filtracji

Jednym z prawdopodobnych błędów, które popełniane są podczas analizy ilościowej, polegającej na obliczaniu pól powierzchni wybranych fragmentów obrazu, jest nieprecyzyjne ustalenie wartości progów filtracji. Operacja ta polega na wyodrębnieniu tych powierzchni, które zawierają wartościową z punktu widzenia pomiaru informację. Podczas

pracy w programie Svistmet, stanowiącym software do systemu analizy obrazu Supervist (Rys. 3), wartość pierwszego progu filtracji obrazu, którego zadaniem było przedstawienie za pomocą binarnego obrazu całej powierzchni analizowanego plastra owocu (Rys. 4B), przy właściwej „aranżacji" oświetlenia próbki, jest łatwa do ustalenia pod warunkiem prawidłowego doboru tła. Podobną zasadę stosowano podczas oświetlania i analizy histogramów obrazów barwnych. Barwa tła, które należy wyeliminować z analizowanego obrazu nie powinna mieścić się w przedziale barw, które tworzą obraz obiektu, gdyż utrudnia to jego identyfikację poprzez istnienie części wspólnej zbioru barw tworzących obraz obiektu oraz obraz tła. W analizowanych obrazach tłem wypełniającym fotografowaną powierzchnię była płytka z luminoforem emitująca stałe światło białe o temperaturze barwowej 5000 K i natężeniu oświetlenia 1000 lx. Tło stanowiło jednolitą pod względem jasności powierzchnię. Umożliwiło to precyzyjne odseparowanie i obliczenie powierzchni analizowanych plastrów owoców. Drugi próg filtracji wyznaczano po dokładnej obserwacji efektów filtracji obrazów wykonanych w systemie Svistmet, które po filtracji nakładano na oryginalne obrazy zapisane wcześniej na dysku. Analizowano precyzję dopasowania linii brzegowej nakładki powstałej po filtracji obrazu z linią brzegową „wzoru skrobiowego" zapisanego na zdjęciach plastrów. Po wykonaniu filtracji ze zmiennym progiem i analizie dopasowania jej efektów do oryginału wybierano optymalny próg filtracji, którego zastosowanie wiernie zobrazuje powierzchnię zajętą przez skrobię. Następnie wykonywano serie filtracji z odchyleniem ± 5, ± 10 oraz ± 20 jednostek wokół wartości optymalnej, w 8-bitowe skali odcieni jasności. Wartości progów filtracji ustalono po oznaczeniu optymalnego progu filtracji obrazu, która w opisywanym eksperymencie wynosiła t_{120}. W doświadczeniu dokonano symulacji błędów popełnianych przez operatora w szerokim zakresie wartości.

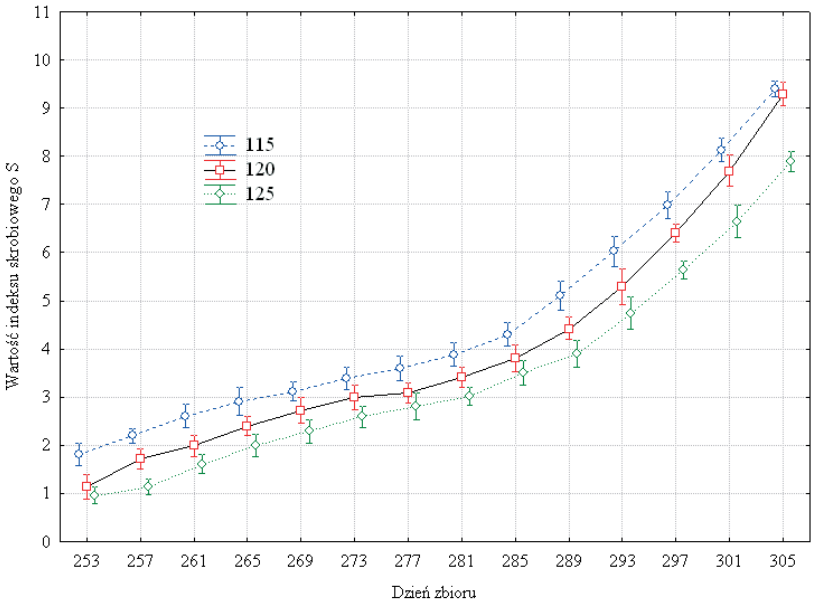
5.6.1. Zmiany indeksu skrobiowego jabłek Gloster w zależności od progu filtracji

Analiza zmian wartości wskaźnika skrobiowego wywołanych zastosowaniem zmiennych progów filtracji prowadzi do stwierdzenia, że niewielka zmiana progu filtracji, wynosząca ±5 jednostek nie skutkuje istotnymi różnicami w interpretacji obliczonej wartości indeksu S (Tab. 35).

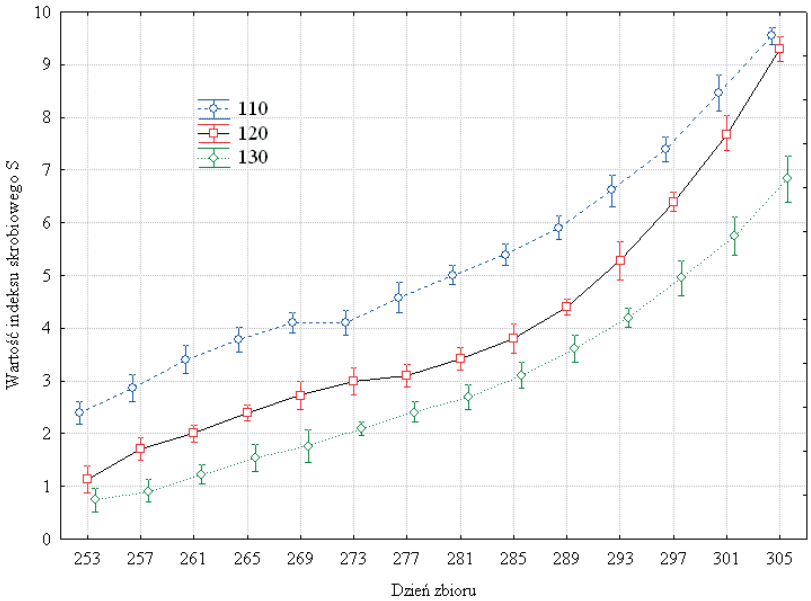
Różnica wartości indeksu S, obliczona z wartości średnich w poszczególnych terminach zbioru wynosiła od 0,3 do 0,4 stopnia, przy zawyżonym o 5 wartości poziomów jasności progu filtracji (t_{125}), oraz wyższe o 0,4-0,5 stopnia, gdy próg filtracji był o 5 jednostek niższy (t_{115}) od wartości bazowej (Rys. 31). Zwiększenie odchylenia progu filtracji o ± 10 lub ± 20 poziomów powodowało już istotne względem S_{120} różnice wartości (S_{100}, S_{110}, S_{130} oraz S_{140}), uzyskanych przy tak dużej rozpiętości progów filtracji. Obniżenie progu filtracji o 10 jednostek w skali jasności powodowało zmniejszenie się filtrowanej powierzchni, co skutkowało zawyżaniem wartości wskaźnika nawet o 1,6 stopnia (Rys. 32 i 33). Wykorzystanie tak obliczonych wartości indeksu S w wersji S_{110} (Rys. 32) wywołuje wrażenie, że optymalna wartośc indeksu została już osiągnięta, co skłonić może do decyzji o zbyt wczesnym zbiorze owoców, które w tym stadium dojrzałości nie nadają się do długotrwałego przechowywania. Jeszcze większe „przyspieszenie" terminu zbioru wywołane było korzystaniem z wartości indeksu obliczonego w wersji S_{100} (Rys. 33).

Tabela 35.
Zmiany wartości S przy zmiennym progu filtracji owoców Gloster, test Tukeya
Table 35.
Changes of Gloster fruits S values caused by variable filtration threshold (Tukey's test)

Dzień zbioru Harvest date	Wartość Progu Threshold value	*S*	Wartość Progu Threshold value	*S*	Wartość progu Threshold value	*S*
269	115	3,11 c,d,e	110	4,10 g	100	5,01 g
	120	2,72 a,b,c	120	2,72 c,d	120	2,72 d
	125	2,29 a	130	1,76 a	140	1,40 a
273	115	3,39 d,e,f	110	4,10 g	100	5,19 g,h
	120	2,99 b,c,d	120	2,99 d,e	120	2,99 d,e
	125	2,59 a,b	130	2,09 a,b	140	1,73 a,b
277	115	3,59 f,g	110	4,58 h	100	5,58 h,i
	120	3,09 c,d,e	120	3,09 d,e	120	3,09 d,e
	125	2,81 b,c	130	2,40 b,c	140	1,94 b
281	115	3,88 g,h	110	5,0 h,i	100	5,98 i,j
	120	3,41 d,e,f,g	120	3,41 e,f	120	3,41 e,f
	125	3,01 b,c,d	130	2,69 c,d	140	2,20 b,c
285	115	4,30 h	110	5,39 i	100	6,19 j
	120	3,80 f,g	120	3,80 f,g	120	3,80 f
	125	3,49 e,f,g	130	3,10 d,e	140	2,62 c,d



Rys. 31. Rozkład wartości S w owocach odmiany Gloster przy odchyleniu progu o ±5 stopni
Fig. 31. Starch index values distribution of Gloster apples cultivar at threshold deviation of ±5 degrees



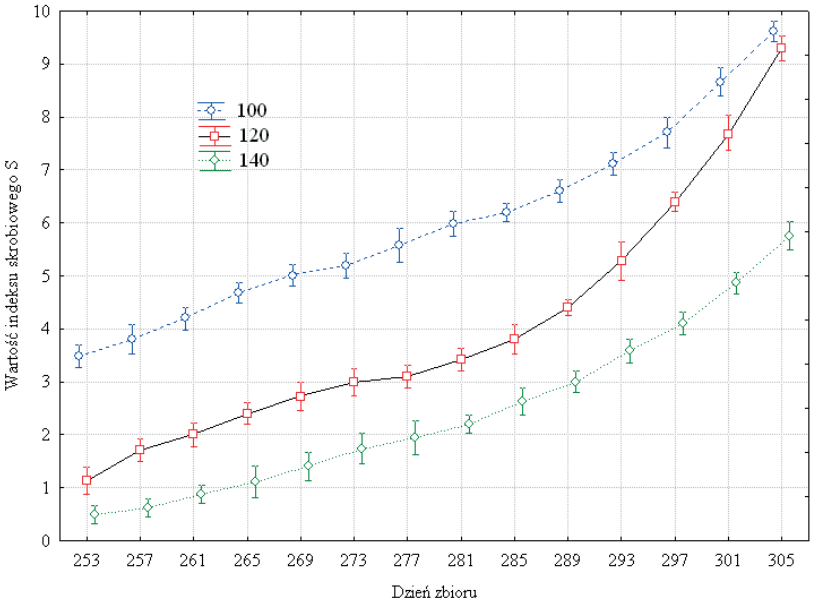
Rys. 32. Rozkład wartości S w owocach odmiany Gloster przy odchyleniu progu o ±10 stopni

Fig. 32. Starch index values distribution of Gloster apples cultivar at threshold deviation of ±10 degrees

Zwiększenie progu filtracji z t_{120} do t_{130} dawało w efekcie rozszerzenie powierzchni obiektów zaliczanych jako „wzór skrobiowy", oraz mniejsze o 0,7-0,8 stopnia wartości indeksu *S*. Dalsze rozszerzanie przedziału filtracji wokół wartości bazowej, powoduje, przy zmniejszeniu progu o 20 poziomów (t_{100}), pozorny wzrost wartości indeksu skrobiowego S_{100} nawet o 2,3 stopnia (Tab. 35). Zwiększanie wartości progu filtracji obrazu dawało w efekcie niższe o ok. 1,2-1,3 stopnia wartości wskaźnika *S*. Przebieg zmian jego wartości w oparciu o ich modyfikację wywołaną przesunięciem progów filtracji miały przebiegi oraz rozrzuty inne niż przebieg krzywej wartości bazowej S_{120} (Rys. 31-33). Wraz ze zmianą zawartości skrobi w owocach oraz zmiany powierzchni zajętej przez skrobię, przekształceniu ulega również granica miedzy obszarami zajętymi przez skrobię oraz obszarami jej pozbawionymi.

Wielkośc pozornego zmniejszenia lub zwiększenia powierzchni „wzoru skrobiowego" była zależna od zawartości skrobi w danym terminie zbioru oraz od sposobu jej rozmieszczenia w przekroju owocu. Sposób jej jej rozpadu (kołowy lub promieniowy) decydował o długości linii rozgraniczającej obszar zajęty przez skrobię od obszaru od niej wolnego. W tym przypadku granica między tymi obszarami nie może być precyzyjnie określona. Spowodowane jest to tym, że obraz skrobi na przekroju, który „ilustrowany" był kompleksem jodowo-skrobiowym, miał wiele odcieni, które przechodziły stopniowo od ciemnogranatowych do jaśniejszych. Stwarza to paletę jasności odcieni wyrażających miejscowe

stężenie wykrywalnej skrobi, co powoduje „płynne" przejście z obszaru o najwyższym stężeniu do tych, pozbawionych skrobi wykrywalnej za pomocą jodu.



Rys. 33. Rozkład wartości S w owocach odmiany Gloster przy odchyleniu progu o ±20 stopni

Fig. 33. Starch index values distribution of Gloster apples cultivar at threshold deviation of ±20 degrees

Stąd wynika podstawowa trudność w ustaleniu jednej i pewnej wartości progu filtracji, przy którym zostaje precyzyjnie oddzielona i obliczona powierzchnia obszaru zajętego przez skrobię,pozwalając na obliczenie wartości wskaźnika *S* z dużą precyzją. Jak wskazują wyniki badań porównawczych, przedstawionych wcześniej w rozdziale 5.1 oraz 5.2, metody KAO przy ocenie tych samych próbek owoców charakteryzowały się mniejszym rozrzutem od tych, ocenianych metodą OW.

5.6.2. Zmiany indeksu skrobiowego jabłek Jonagold w zależności od progu filtracji

Filtracja obrazu rozpadu skrobi w owocach Jonagold przy użyciu zmiennych wartości progu, nie powoduje istotnych zmian różnic w ocenie indeksu *S* wówczas, gdy różnica między progiem bazowym, wynoszącym 120 a pozostałymi progami wynosiła ± 5 wartości poziomów jasności obrazowej (Tab. 36).

Tabela 36.
Zmiany wartości S przy zmiennym progu filtracji owoców Jonagold, test Tukeya
Table 36.
Changes of Jonagold fruits S values caused by variable filtration threshold (Tukey's test)

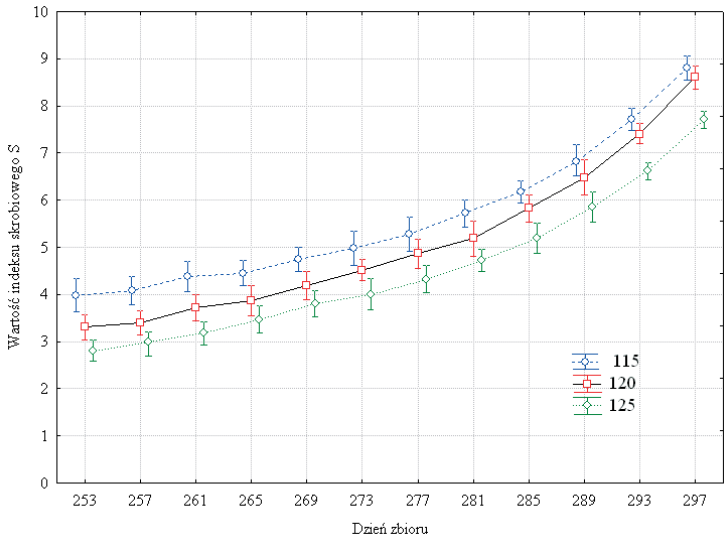
Dzień zbioru Harvest date	Wartość Progu Threshold value	*S*	Wartość Progu Threshold value	*S*	Wartość progu Threshold value	*S*
265	115	4,45 c,d,e,f,g	110	5,10 f,g,h	100	5,52 h,i,j
	120	3,86 a,b,c	120	3,86 a,b,c,d	120	3,86 c,d,e
	125	3,46 a	130	3,16 a	140	2,81 a
269	115	4,74 e,f,g,h	110	5,29 g,h	100	5,75 i,j,k
	120	4,18 b,c,d,e	120	4,18 b,c,d,e	120	4,18 d,e,f
	125	3,80 a,b	130	3,51 a,b	140	3,11 a,b
273	115	4,98 g,h	110	5,60 h,i	100	6,03 j,k,l
	120	4,52 d,e,f,g	120	4,52 d,e,f	120	4,52 e,f,g
	125	4,00 a,b,c,d	130	3,76 a,b,c	140	3,39 a,b,c
277	115	5,28 h,i	110	5,75 h,i	100	6,28 k,l
	120	4,86 f,g,h	120	4,86 e,f,g	120	4,86 f,g,h
	125	4,32 b,c,d,e,f	130	3,97 b,c,d	140	3,65 b,c,d
281	115	5,72 i	110	6,08 i	100	6,51 l
	120	5,18 h,i	120	5,18 f,g,h	120	5,18 g,h,i
	125	4,72 e,f,g,h	130	4,28 c,d,e	140	4,00 c,d,e

Zwiększenie progu filtracji o 5 poziomów jasności skutkowało obniżeniem wartości indeksu *S* średnio o 0,4 – 0,5 stopnia w 10 stopniowej skali wskaźnika *S*. Podobny zakres zmian zanotowano przy obniżaniu progu filtracji o 5 poziomów jasności z tą różnicą, że wartości indeksu S_{115} były wyższe od wartości bazowej S_{120} (Rys. 34). Gdy wartość rozrzutu między filtrowanymi obrazami wynosiła ± 10 poziomów jasności punktów wokół wartości bazowej, różnice wartości indeksu *S* (S_{110} i S_{130}), liczone w oparciu o nowe progi filtracji, były istotnie różne na poziomie istotności α=0,05 od wartości bazowej S_{120} (Rys. 35).

Zmniejszenie granicy progu o 10 wartości powodowało, że w przedziale, w którym zawiera się prawdopodobny termin zbioru obliczone wartości S_{110} były istotnie wyższe, niż te, uzyskane jako S_{120}, czyli wartość indeksu dla progu bazowego. Różnice wartości S_{110} i S_{120} wynosiły w tym przedziale od 0,9 do 1,2 stopnia *S*. Gdy próg filtracji był podwyższony o 10, to wartości S_{130} były niższe średnio o 0,7-0,9 stopnia *S*.

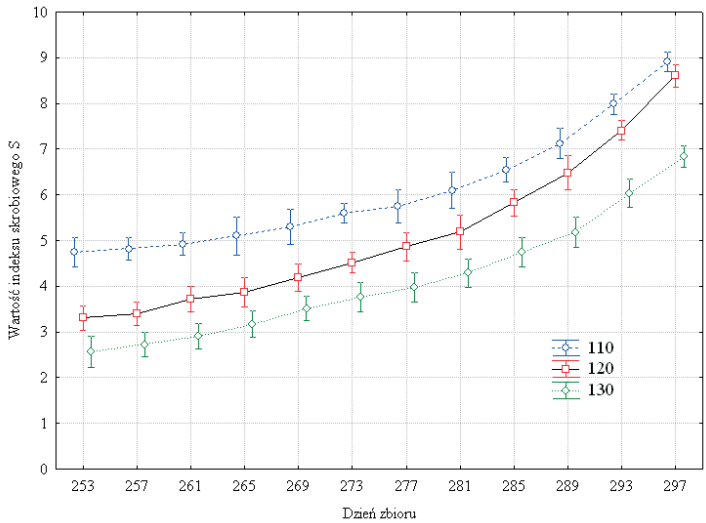
Dalsze zwiększanie rozrzutu progów filtracji wokół wartości progu bazowego, a tym samym hipotetyczne założenie błędów oznaczenia progu filtracji wynoszącym ± 20 stopni jasności wokół wartości bazowej skutkowało już dużymi różnicami wartości S_{100} oraz S_{130}, które wynosiły w badanym przedziale terminów zbioru owoców aż 1,2-1,5 stopnia (Rys. 35).

Analizując wyniki otrzymane dla owoców Jonagold można zauważyć, że bazowy próg filtracji był ustalony na zbyt wysokim poziomie, gdyż wartości indeksu *S*, przy których powinien nastąpić zbiór w optymalnym terminie powinny mieścić się w przedziale 5 do 6.



Rys. 34. Rozkład wartości S w owocach odmiany Jonagold przy odchyleniu progu o ±5 stopni

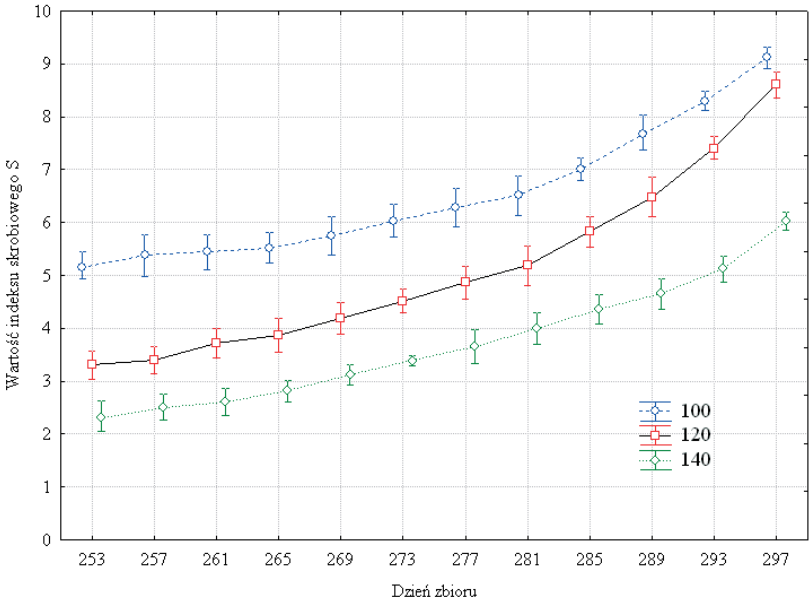
Fig. 34. Starch index values distribution of Jonagold apples cultivar at threshold deviation of ±5 degrees



Rys. 35. Rozkład wartości S w owocach odmiany Jonagold przy odchyleniu progu o ±10 stopni

Fig. 35. Starch index values distribution of Jonagold apples cultivar at threshold deviation of ±10 degrees

W rozpatrywanym przedziale wartość indeksu S=5 była przekroczona dopiero w 281 dniu roku przy wartości bazowej progu t_{120}. W tym przypadku bardziej optymalnym progiem do filtracji obrazów powinien być próg niższy. Zmniejszenie progu filtracji powodowało zwiększenie obliczonej wartości indeksu S, dzieki czemu jego wartość zlecana przy zbiorze tej odmiany osiągnięta została wcześniej. Analizując przebieg krzywych na rys 34 można zuważyć, że optymalnym dla odmiany Jonagold był wybór indeksu S_{115}, obliczonego po filtracji progiem t_{115}. Według jego przebiegu zbiór owoców tej odmiany powinien rozpocząć się w 273 dniu roku, co jest bardziej prawdopodobne niż termin zbioru w dniu 281.



Rys. 36. Rozkład wartości S w owocach odmiany Jonagold przy odchyleniu progu o ±20 stopni

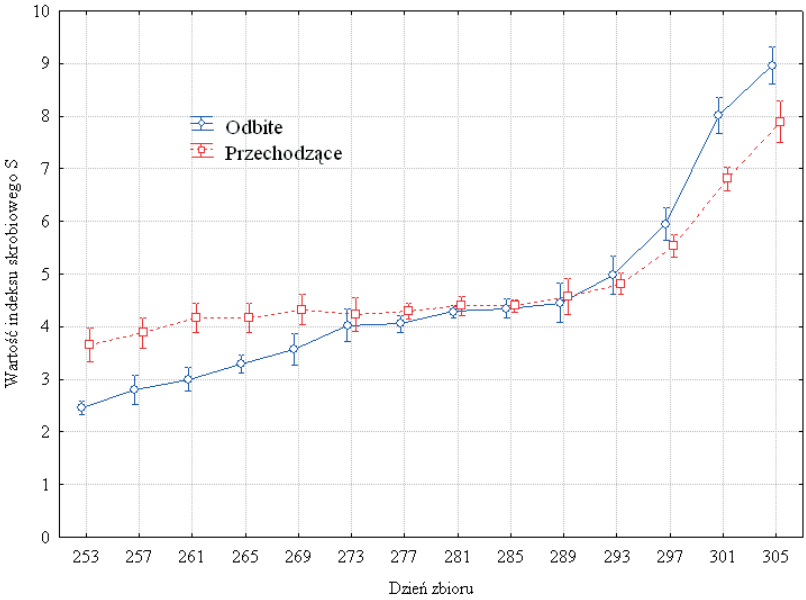
Fig. 36. Starch index values distribution of Jonagold apples cultivar at threshold deviation of ±20 degrees

5.7. Interpretacja indeksu skrobiowego z obrazów wykonanych w świetle przechodzącym

Ważnym czynnikiem wpływającym na postrzeganie rejestrowanych obrazów jest oświetlenie, które, odpowiednio ustawione, umożliwia ujawnienie szczegółów przedmiotów niosących istotne z punku widzenia analizy obrazu informacje.

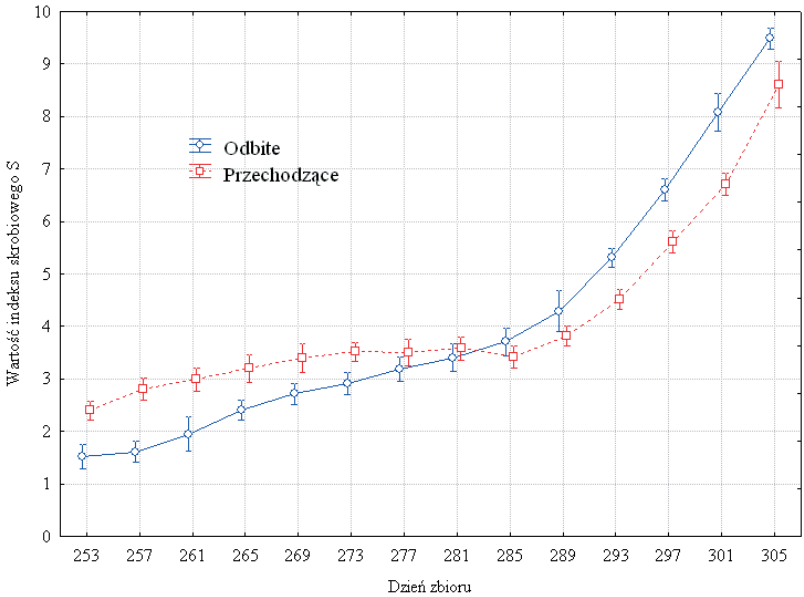
W doświadczeniu z 2013 roku owoce czterech odmian jabłoni o zróżnicowanym rozpadzie skrobi obserwowanym w przekroju poprzecznym, poddane zostały testom skrobiowym a następnie analizie obrazu w świetle odbitym i przechodzącym. Do testów użyto 2 odmiany o kołowym typie rozpadu skrobi – Melrose i Gloster oraz 2 odmiany, reprezentujące

promieniowy typ rozpadu – Jonagold i Rubin. Owoce przeznaczone do testów były krojone na plastry o grubości 5 mm dla analizy w świetle odbitym i 2 mm dla analizy w świetle przechodzącym, w celu ułatwienia transmisji światła przez próbkę. Mniejsza grubość plastrów ograniczyła ilość artefaktów, zawartych w strukturze wewnętrznej, które utrudniają analizę. Przebieg zmian *S* zarejestrowanych w eksperymencie przedstawiono na rys. 37-40. Wyniki analizy statystycznej umieszczono w tabelach 37 i 38.



Rys. 37. Przebieg zmian S w owocach Melrose w zależności od rodzaju oświetlenia próbki
Fig. 37. The course of S in Melrose fruits depending on specimen illumination

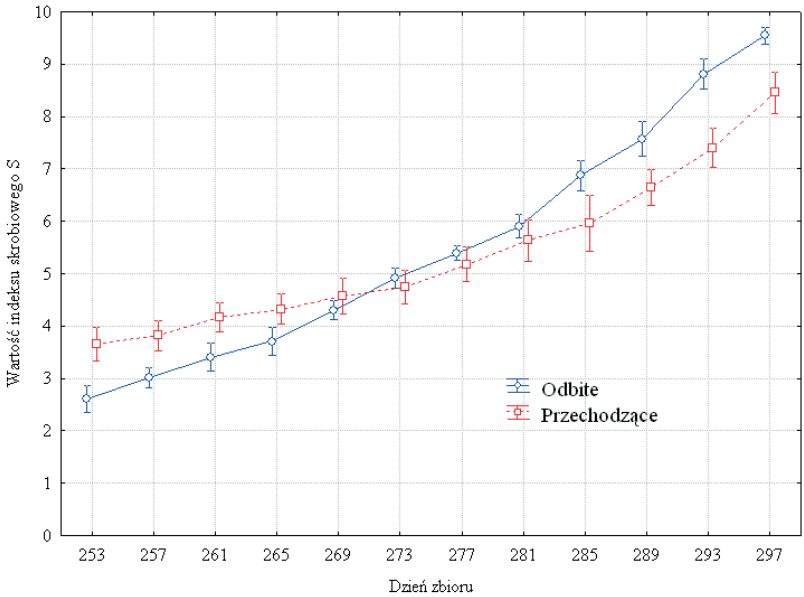
W terminach zbioru od 253 do 269 dnia roku wartości indeksu *S* obliczone po filtracji obrazów wykonanych w świetle przechodzącym są wyższe niż te, uzyskane w świetle odbitym. W terminach zbioru od 285 do 297 lub 305 dnia roku wartości indeksu S uzyskane metodą światła przechodzącego uzyskują niższe wartości. W przedziale terminów zbioru, traktowanych jako prawdopodobne „okno zbioru", czyli między 265 a 281 dniem roku dla odmian Rubin i Jonagold, oraz między 269 a 285 dniem roku dla odmian Melrose i Gloster, przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji. Na podstawie uzyskanych wyników nie stwierdzono istotnych różnic w ocenie *S* proponowanymi metodami dla odmian Melrose i Gloster. Wyjątek stanowią tu dwa terminy zbioru owoców Gloster (269 oraz 271 dzień roku) oraz pierwszy termin (269 dzień roku) w „oknie zbioru" odmiany Melrose (Tab. 37).



Rys. 38. Przebieg zmian S w owocach Gloster w zależności od rodzaju oświetlenia próbki
Fig. 38. The course of S in Gloster fruits depending on specimen illumination

Tabela 37.
Porównanie wartości S owoców Melrose i Gloster obliczonego metodą światła odbitego (O) i przechodzącego (P) test Tukey'a
Table 37.
The comparison of S values in Melrose and Gloster fruits calculated by the use of reflected light (O) and transmitted light (P)

Dzień zbioru Harvest date	Melrose		Gloster	
	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
269	O	3,57 b	O	2,71 c
	P	4,32 a	P	3,4 a,b
273	O	4,03 a	O	2,91 c,d
	P	4,23 a	P	3,51 a,b
277	O	4,05 a	O	3,19 a,d
	P	4,3 a	P	3,49 a,b
281	O	4,28 a	O	3,4 a,b
	P	4,4 a	P	3,58 a,b
285	O	4,34 a	O	3,71 b
	P	4,39 a	P	3,41 a,b



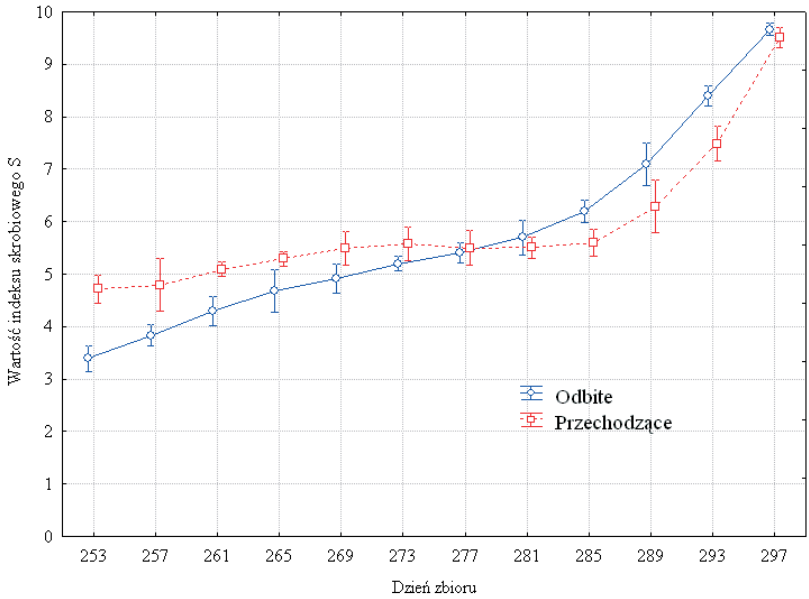
Rys. 39. Przebieg zmian S w owocach Jonagold w zależności od rodzaju oświetlenia próbki
Fig. 39. The course of S in Jonagold fruits depending on specimen illumination

Poza przedziałem terminów należących do „okna zbioru" wartości indeksu *S* interpretowane były w podobny sposób u wszystkich badanych odmian owoców. W terminach wcześniejszych niż ten przedział (od 253 do 269 dnia roku) wartości indeksu *S* obliczone z obrazów rejestrowanych w świetle przechodzącym były istotnie wyższe od tych, liczonych z obrazów próbek owoców zapisanych w świetle odbitym. Prawdopodobna przyczyną takiej interpretacji indeksu *S* było użycie silnego oświetlenia przechodzącego, które rozjaśniało obszary graniczne między „wzorem skrobiowym" a powierzchnią wolną od skrobi. Rozjaśnienie słabo zabarwionych obszarów granicznych powodowało, że przyjmowały one wyższe wartości jaskrawości, niż użyty w analizie obrazu próg filtracji (t_{120}). W rezultacie otrzymano powierzchnię „wzoru skrobiowego" (p_w) mniejszą niż rzeczywiste pole zajęte przez skrobie, co skutkowało obliczeniem zawyżonej wartości indeksu *S*.

W terminach późniejszych od okna zbioru (od 281 do 297 dnia roku) zawartość skrobi, jak i powierzchnia „wzoru skrobiowego" były małe. Obszary zarejestrowane w oświetleniu przechodzącym przez próbkę ujawniły na dużej powierzchni wolnej od skrobi liczne artefakty. Były to przede wszystkim okrywy gniazd nasiennych oraz wiązki przewodzące. Obecność tych artefaktów, które w postaci ciemnych plam i prążków rejestrowane były wraz z obrazem powierzchni zajętej przez skrobię, powodowało powstawanie dodatkowej powierzchni, która po filtracji dodawana była do obszaru „wzoru skrobiowego". Skutkowało to zaniżaniem wartości indeksu *S*. W „oknie zbioru" przypadającym między 269 a 285 dniem roku nie zaobserwowano istotnych różnic między wartościami indeksu *S* obliczonego z fotografii wykonanych z użyciem obu metod oświetlenia próbek.

Tabela 38.
Porównanie wartości S owoców Jonagold i Rubin obliczonego metodą światła odbitego (O) i przechodzącego (P) test Tukey'a
Table 38.
The comparison of S values in Jonagold and Rubin fruits calculated by the use of reflected light (O) and transmitted light (P)

Dzień zbioru Harvest date	Jonagold		Rubin	
	Metoda Method	*S*	Metoda Method	*S*
265	O	3,71 g	O	4,69 c
	P	4,32 a	P	5,29 a,b
269	O	4,3 a	O	4,91 b,c
	P	4,57 a,b	P	5,48 a,b
273	O	4,91 b,c,d	O	5,19 a,b,c
	P	4,74 a,b,c	P	5,58 a
277	O	5,39 d,e,f	O	5,4 a,b
	P	5,18 c,d,e	P	5,49 a,b
281	O	5,9 f	O	5,69 a
	P	5,63 e,f	P	5,5 a,b



Rys. 40. Przebieg zmian S w owocach Rubin w zależności od rodzaju oświetlenia próbki
Fig. 40. The course of S in Rubin fruits depending on specimen illumination

Przypuszcza się, że zmniejszenie powierzchni obszaru zajętego przez skrobię poprzez rozjaśnienie części brzegowych „wzoru skrobiowego" zostało w pewnym stopniu „wyrównane" przez ciemne artefakty obrazu takie jak gniazda nasienne i wiązki przewodzące. Takie swoiste „bilansowanie się" artefaktów powoduje, że wyniki obliczeń indeksu *S* uzyskane ze zdjęć próbek oświetlonych światłem odbitym jak i przechodzącym nie wykazywały istotnych statystycznie różnic. Ze względu na kształt uzyskanych krzywych jedynie dojrzałośc jabłek odmian Jonagold oraz Melrose mogła być oceniana przy użyciu obu metod oświetlenia. Obie krzywe dla tych odmian wykazywały niemal identyczny przebieg w przedziale „okna zbioru" (Rys. 37 i Rys. 39). W przypadku odmian Gloster i Rubin przebieg krzywych zmian indeksu *S*, otrzymanych tymi metodami, był różny w przedziale „okna zbioru". Skutkowało to tym, że te same wartości optymalne indeksu *S*, osiągane były w różnych terminach (Rys. 38 i Rys. 40).

5.8. Znaczenie indeksu skrobiowego w obliczeniach indeksów zbiorczych

Indeksy zbiorcze Streifa (*IS*) oraz De Jagera (*IJ*), opracowane w latach dziewięćdziesiątych (Streif 1992; De Jeger 1994), są wskaźnikami, których wyznaczanie polega na obserwacji zjawisk zachodzących podczas dojrzewania jabłek oraz wykonaniu trzech prostych testów. Pierwszy z nich polega na przebiciu owocu po uprzednim usunięciu skórki penetrometrem o średnicy 11 mm na głębokość 8 mm. Wyniki testu obrazują stopniowe mięknięcie miąższu owoców podczas dojrzewania. Podczas pomiaru rejestrowany jest maksymalny opór stawiany przez miąższ owocu *F* (N). Wykonywany jest on po zbiorze testowanych próbek owoców za pomocą jędrnościomierza ręcznego lub za pomocą maszyny wytrzymałościowej. Błąd pomiaru jest niewielki pod warunkiem, że owoc będzie podczas pomiaru unieruchomiony, co łatwiej jest wykonać w warunkach laboratoryjnych. Drugim pomiarem, wykonywanym podczas dojrzewania owoców jest zawartość ekstraktu *R* (Brix), czyli składników rozpuszczalnych w wodzie, które oznaczane są w soku badanych owoców. Refraktometry stosowane do pomiaru ekstraktu dają dokładność 0,1-0,2 Brix. Pomiar tych dwóch wskaźników dojrzałości nie stwarza obecnie problemu. Przy zachowaniu warunków pomiaru otrzymuje się wyniki, które nie powinny budzić wątpliwości. Trzecim testem jest oznaczanie zawartości skrobi, wyrażonej wartością indeksu skrobiowego *S*. Podstawowym problemem podczas obliczania indeksów zbiorczych jest precyzyjne oznaczenie indeksu *S*. Ze względu na konieczność pomiaru indeksu skrobiowego przy obliczaniu indeksów zbiorczych Streifa i De Jagera, wykonano analizę precyzji ich oznaczenia, w oparciu o rachunek błędów powstałych podczas pomiaru wartości indeksu *S*, ekstraktu *R* oraz jędrności *F*.. Szczegółowa metodyka obliczeń błędów została już podana. Przebieg zmian jego wartości, w zależności od progu filtracji obrazu przedstawiono w tabelach 40 i 42. Wartości, które mieszczą się w optymalnym przedziale podczas zbioru danej odmiany zostały w nich podkreślone. Średnie wskaźników *S*, *F* oraz *R* do obliczeń *IS* oraz *IJ* dla tych odmian owoców umieszczono w tabelach 39 i 41.

5.8.1. Obliczanie indeksu Streifa

Jabłka odmian o zróżnicowanym typie rozpadu skrobi charakteryzują się też różnymi wartościami indeksu zbiorczego *IS*, przy których powinien następować ich zbiór. Dla owoców Gloster wartość ta wynosi od 3 do 4. Odmiany o niskiej zawartości skrobi podczas zbioru osiągają również niższe wartości indeksu Streifa podczas zbioru. Dla odmiany Jonagold jego wartość powinna mieścić się w przedziale od 0,8 do 0,9 (Streif, 1996).

Tabela 39.
Wartości S, F, oraz R odmiany Gloster jako składowe do obliczeń indeksu Streifa i De Jagera
Table 39.
S, F and R values as components of Gloster apples for Streif's and De Jager's indexes calculations

Dzień zbioru Harvest date	S_{100}	S_{110}	S_{115}	S_{120}	S_{125}	S_{130}	S_{140}	*F* (N)	*R*(Brix)
253	3,5	2,4	1,8	1,1	1,0	0,7	0,5	101,3	9,5
257	3,8	2,9	2,2	1,7	1,1	0,9	0,6	95,5	9,8
261	4,2	3,4	2,6	2,0	1,6	1,2	0,9	92,7	10,7
265	4,7	3,8	2,9	2,4	2,0	1,5	1,1	89,3	11,2
269	5,0	4,1	3,1	2,7	2,3	1,8	1,4	85,5	11,7
273	5,2	4,1	3,4	3,0	2,6	2,1	1,7	83,3	12,0
277	5,6	4,6	3,6	3,1	2,8	2,4	1,9	82,9	12,2
281	6,0	5,0	3,9	3,4	3,0	2,7	2,2	79,1	12,5
285	6,2	5,4	4,3	3,8	3,5	3,1	2,6	77,8	12,8
289	6,6	5,9	5,1	4,4	3,9	3,6	3,0	73,1	13,1
293	7,1	6,6	6,0	5,3	4,7	4,2	3,6	71,0	13,4
297	7,7	7,4	7,0	6,4	5,6	5,0	4,1	69,9	13,7

Podstawienie wartości *S*, *F* oraz *R* (Tab. 39), uzyskanych podczas obliczania indeksu zbiorczego według wzoru (3), przy zmiennym progu filtracji obrazu powoduje zmianę wartości obliczonego indeksu *IS*. Obniżenie progu filtracji powoduje pozorne „zwiększenie się" jego wartości. I tak wartości indeksu S_{100}, S_{110} i S_{115} użyte w obliczeniu indeksu Streifa (*IS*), sugerują przyspieszenie zbioru owoców Gloster. Zbiór powinien odbyć się między 253 a 261 dniem roku (Tab. 40), co jest dla tej odmiany terminem zbyt wczesnym. Biorąc pod uwagę, że pozostałe wskaźniki, wchodzące w skład indeksu zbiorczego, zostały obliczone poprawnie, przy użyciu certyfikowanych instrumentów pomiarowych, użycie do analizy obniżonego progu filtracji obrazu powoduje poważne błędy podczas zbioru. Tabela 40 prezentuje też przebieg zmian tych wartości przy różnych wartościach indeksu skrobiowego, którego zmiany wywołane były przesunięciem progu filtracji obrazu. Obserwując zaznaczone w niej wartości indeksu Streifa, które mieszczą się w przedziale zalecanym podczas zbioru jabłek tej odmiany, można stwierdzić, że zmienny próg filtracji w zakresie 100-140 powodował duży rozrzut terminów zbioru w zakresie od 253 do 277 dnia roku.

Zgodnie z wartościami *IS* otrzymanymi w doświadczeniu, optymalnym progiem filtracji była wartość t_{130} oraz t_{140}. Dla tych wartości progu uzyskano *IS* w prawdopodobnym przedziale terminów zbioru, w których nastepuje zbiór owoców tej odmiany, czyli między 273 a 277 dniem roku.

Tabela 40.
Zmiany wartości indeksu Streifa owoców Gloster spowodowane zmiennym progiem filtracji obrazów
Table 40.
Changes of Streif's index values in Gloster apples caused by variable image filtration threshold

Dzień zbioru Harvest date	*IS*100	*IS*110	*IS*115	*IS*120	*IS*125	*IS*130	*IS*140
253	3,06	4,45	5,89	9,37	11,14	14,39	21,60
257	2,57	3,40	4,44	5,70	8,54	10,87	15,70
261	2,06	2,55	3,32	4,32	5,38	7,08	9,87
265	1,70	2,11	2,74	3,33	4,00	5,19	7,18
269	1,46	1,78	2,35	2,68	3,19	4,14	5,20
273	1,34	1,69	2,04	2,32	2,68	3,31	3,99
277	1,22	1,48	1,89	2,19	2,42	2,82	3,49
281	1,06	1,27	1,63	1,85	2,10	2,35	2,87
285	0,98	1,13	1,41	1,60	1,74	1,96	2,32
289	0,84	0,95	1,10	1,27	1,43	1,55	1,86
293	0,75	0,80	0,88	1,00	1,12	1,26	1,48
297	0,66	0,69	0,73	0,80	0,91	1,03	1,25

Jonagold jest z kolei odmianą jabłek, której zbiór powinien przypadać przy znacznie niższych wartościach *IS*. Optymalny przedział indeksu zbiorczego Streifa wynosi dla nich 0,8-0,9. Analizując wyniki w tabeli 42 można zauważyć, że wartość *IS* dla odmiany Jonagold, która umożliwia jej zbiór była osiągana późno. Dla większości wartości otrzymanych po filtracji obrazów indeksu skrobiowego progami o wysokiej wartości, czyli powyżej 120, wartości *IS* obliczone z użyciem wartości *S* uzyskanych przy tym poziomie progu filtracji, przyjmują wartości optymalne za późno. Termin zbioru wyznaczony przy tym poziomie filtracji *S* przypada najwcześniej na 281 dzień roku, a więc ok. 8 X, co dla tej odmiany jest terminem późnym i występuje sporadycznie. W analizowanym sezonie przechowalniczym 2011/12, w którym wykonano pomiary, zbiór owoców rozpoczęto 30 IX.

Owoce odmiany Jonagold wykazywały w tym sezonie dość dużą dynamikę zmian tego wskaźnika, szczególnie w końcowych terminach zbioru. Spowodowane było to szybkim rozpadem skrobi w tym przedziale czasu. W rezultacie, niezależnie od zastosowanego progu filtracji, w doświadczeniu występował tylko jeden uchwycony termin zbioru, w którym wartość *IS* mieściła się w zalecanym przedziale, który powinien być osiągnięty podczas zbioru owoców.

Tabela 41.
Wartości S, F, oraz R odmiany Jonagold jako składowe do obliczeń indeksu Streifa i De Jegera
Table 41.
S, F and R values as components of Jonagold apples for Streif's and De Jeger's indexes calculations

Dzień zbioru Harvest date	S_{100}	S_{110}	S_{115}	S_{120}	S_{125}	S_{130}	S_{140}	*F* (N)	*R* (Brix)
253	5,4	4,9	4,4	3,7	3,2	2,9	2,6	93,1	11,6
257	5,5	5,1	4,5	3,9	3,5	3,2	2,8	90,1	12,1
261	5,8	5,3	4,7	4,2	3,8	3,5	3,1	88,1	12,5
265	6,0	5,6	5,0	4,5	4,0	3,8	3,4	76,5	12,9
269	6,3	5,8	5,3	4,9	4,3	4,0	3,7	73,6	13,2
273	6,5	6,1	5,7	5,2	4,7	4,3	4,0	73,5	12,3
277	7,0	6,5	6,2	5,8	5,2	4,7	4,4	72,5	13,5
281	7,7	7,1	6,8	6,5	5,9	5,2	4,7	72,1	14,1
285	8,3	8,0	7,7	7,4	6,6	6,0	5,1	70,2	14,5
289	9,1	8,9	8,8	8,6	7,7	6,8	6,0	66,8	14,8
293	9,4	9,1	9,0	8,8	8,0	7,2	6,8	65,3	15,1
297	9,6	9,2	9,2	9,0	8,4	8,0	7,5	63,7	15,4

Tabela 42.
Zmiany wartości indeksu Streifa owoców Jonagold spowodowane zmiennym progiem filtracji obrazów
Table 42.
Changes of Streif's index values in Jonagold apples caused by variable image filtration threshold

Dzień zbioru Harvest date	*IS*100	*IS*110	*IS*115	*IS*120	*IS*125	*IS*130	*IS*140
253	1,5	1,6	1,8	2,2	2,5	2,8	3,1
257	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,4	2,6
261	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,3
265	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7
269	0,9	1,0	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5
273	0,9	1,0	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5
277	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2
281	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1
285	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9
289	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7
293	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
297	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6

Według wyników tego eksperymentu najbardziej optymalnym progiem filtracji była wartość t_{100}, dla której uzyskiwano najbardziej prawdopodobny termin zbioru, przy zachowaniu pozostałych wskaźników w normie przewidzianej dla tej odmiany. Ponieważ owoce te należą do grupy odmian o „promieniowym" przebiegu rozpadu skrobi – ze względu na długą linię brzegową między powierzchniami zajętymi kompleksem jodu ze skrobią i pozostałymi obszarami, o wartości *S* decyduje w większym stopniu próg filtracji. Dlatego też bardziej precyzyjne wskazania otrzymano dla niższych progów filtracji, które zmniejszyły błąd oznaczeń indeksu skrobiowego (*S*).

5.8.2.Obliczanie indeksu De Jagera

Indeks De Jagera (*IJ*) opiera się na tych samych wskaźnikach *S*, *F* oraz *R*, na podstawie których obliczany jest indeks Streifa (wzór 4). Ich wartości dla poszczególnych odmian umieszczono w tabelach 43 oraz 44. Ze względu na inną postać wyrażenia, które definiuje ten indeks zbiorczy, inny jest jego przebieg oraz uzyskiwane wartości. Indeks De Jagera przyjmuje też inne przedziały wartości optymalnych, przy których powinno wykonywać się zbiór owoców przeznaczonych do długotrwałego przechowywania. Przedziały wartości indeksu *IJ,* dopuszczalne podczas zbioru wynoszą dla owoców Gloster gdy mieści się on w zakresie od 50 do 60, natomiast Jonagold przy *IJ* osiągającym wartości 25 do 35. Wartości, które należą do optymalnego przedziału podczas zbioru, zostały, podobnie jak w przypadku *IS*, wyróżnione poprzez podkreślenie w tabeli.

Tabela 43.
Wyniki obliczeń indeksu De Jagera odmiany Gloster dla różnych progów filtracji obrazu
Table 43.
Results of De Jager's index calculations in Gloster apples at different image filtration thresholds

Dzień zbioru Harvest date	*IJ*100	*IJ*110	*IJ*115	*IJ*120	*IJ*125	*IJ*130	*IJ*140
253	80	92	98	105	107	109	112
257	70	79	86	91	96	98	101
261	59	66	73	78	81	85	88
265	50	58	64	69	72	75	79
269	44	50	58	60	64	68	70
273	40	48	53	56	58	62	64
277	37	44	50	54	56	58	62
281	32	38	45	48	51	53	56
285	29	34	41	44	46	48	51
289	25	28	33	37	40	41	45
293	21	23	26	30	33	36	39
297	17	18	21	24	27	31	35

Tabela 44.
Wyniki obliczeń indeksu De Jagera odmiany Jonagold dla różnych progów filtracji obrazu
Table 44.
Results of De Jager's index calculations in Jonagold apples at different image filtration thresholds

Dzień zbioru Harvest date	*IJ*100	*IJ*110	*IJ*115	*IJ*120	*IJ*125	*IJ*130	*IJ*140
253	44	49	53	58	63	65	67
257	41	44	49	53	56	58	61
261	37	40	44	48	51	53	56
265	29	32	36	38	41	43	45
269	26	29	32	34	37	39	41
273	27	29	32	35	38	40	42
277	21	24	26	28	31	33	36
281	17	20	21	23	26	30	33
285	13	15	16	17	21	24	27
289	8	9	10	11	15	19	22
293	7	8	9	9	13	16	18
297	6	7	8	8	11	13	15

Wyniki analizy *IJ* dla odmiany Gloster (Tab. 43) wskazują, ze optymalny termin, przy progu filtracji obrazu, mieszczącym się w przedziale od t_{100} do t_{140}, wynosił od 261 do 285 dnia roku. Przedział ten był niemal identyczny z tym, w którym dokonywano analiz statystycznych zmian indeksu *S* we wcześniejszych podrozdziałach pracy. Może to oznaczać, że taki przedział progów filtracji obrazu daje wysokie prawdopodobieństwo prawidłowego ustalenia wartości indeksu skrobiowego, będącego jedynym wskaźnikiem składowym indeksów zbiorczych, który oznacza się bez użycia instrumentów pomiarowych. Ocena wykorzystania narzędzi optycznych do jego obliczania jest jednym z głównych celów niniejszej pracy. Przedział taki ustalano wcześniej na podstawie wieloletnich obserwacji terminów zbioru owoców tej odmiany. To samo dotyczy drugiej odmiany owoców, które były surowcem badawczym w pracy. Wyniki uzyskane dla odmiany Jonagold (Tab. 44) wskazują, że przyjęty przedział czasowy dla wcześniejszych analiz, który opierał się na obserwacji terminu „kalendarzowego" był prawidłowy.

Zwiększanie progu filtracji, powodując wzrost wartości indeksu *S*, jako jednego ze składników *IJ*, skutkowało też zwiększaniem jego wartości, co w rezultacie sprawiało, że wartości optymalne tego indeksu zbiorczego osiągane były w późnych terminach zbioru. Jednakże zmiana progu podczas filtracji obrazu z t_{120} do t_{125} lub t_{130} skutkowała tym, że termin zbioru wyznaczony na podstawie wartości *IJ* zbliżał się do najbardziej prawdopodobnego przedziału czasu dla odmiany Gloster, czyli pierwszą dekadę października, od 273 do 281 dnia roku (Tab. 43). Dla owoców tej odmiany, stosując indeksy zbiorcze (*IS*, *IJ*), by uzyskać bardziej wiarygodny termin zbioru, należałoby podwyższyć do t_{125} próg filtracji obrazu.

W owocach odmiany Jonagold, które charakteryzują się odmiennym typem rozpadu skrobi, występuje inna zależność. Przedział wartości progów filtracji, a tym samym wartości *IJ* otrzymanych na podstawie obliczonego według nich indeksu *S* wskazują, że zastosowanie podczas filtracji progu t_{125} i wyższych, powodowało przesunięcie decyzji o zbiorze do tego stopnia, ze owoce takie nadawałyby się tylko do krótkotrwałego przechowywania. Tutaj korzystniejsze byłoby stosowanie niższych wartości progu filtracji, w celu precyzyjnego zdefiniowania *S*, wchodzącego w skład indeksu zbiorczego (Tab. 44). Z danych w tej tabeli wynika, że obniżenie progu do ok. 110 dałoby bardziej wiarygodne wyniki.

5.8.3.Analiza błędów oznaczeń indeksów zbiorczych

Bardzo ważnym zagadnieniem związanym ze stosowaniem nowej metody pomiaru jest szacunek błędów, które pojawiają się podczas oznaczania indeksu *S*, którego prawidłowa interpretacja decyduje, tak jak w przypadku indeksów zbiorczych, o wyborze optymalnego terminu zbioru. Indeks Streifa (*IS*) oraz De Jagera (*IJ*) są cennymi wskazówkami dla sadowników, gdyż opierają się na jednoczesnym oznaczaniu trzech wskaźników podstawowych: jędrności *F*, ekstraktu *R* oraz zawartości skrobi, wyrażonej indeksem skrobiowym *S*. Oznaczanie indeksów zbiorczych polega na wykonaniu prostych obliczeń z wykorzystaniem wartości uzyskanych z pomiarów tych wskaźników. Wzory użyte do obliczenia indeksów zbiorczych (3 i 4) oraz błędów ich oznaczeń (5, 6, 7 oraz 8) umieszczono w metodyce badań.

Tabela 45.
Wartości błędów względnych indeksu Streifa owoców Gloster obliczanych przy różnych progach filtracji obrazu
Table 45.
Relative deviations of Streif's index values calculated with different filtration threshold – Gloster apples

Dzień zbioru Harvest date	Próg filtracji obrazu Image filtration threshold						
	*IS*100	*IS*110	*IS*115	*IS*120	*IS*125	*IS*130	*IS*140
253	67,4	52,5	38,1	0,1	49,7	90,6	130,6
257	55,0	40,4	23,3	0,0	24,5	63,7	128,4
261	52,2	40,9	24,5	0,1	19,8	55,7	115,3
265	48,7	36,5	19,2	0,2	18,9	54,2	93,4
269	45,3	33,3	14,0	0,3	18,5	53,6	75,4
273	42,1	26,7	13,6	0,4	15,0	42,4	71,5
277	44,1	32,1	15,7	0,4	12,9	28,4	58,8
281	42,5	31,2	13,9	0,5	12,8	28,3	55,5
285	38,0	28,9	13,6	0,5	12,1	26,5	54,4
289	32,8	24,8	16,1	0,6	10,7	25,2	46,8
293	25,0	19,7	15,4	0,7	9,8	22,3	46,4
297	16,3	12,9	12,0	0,7	8,4	21,5	44,6

Tabela 46.
Wartości błędów względnych indeksu Streifa owoców Jonagold obliczanych przy różnych progach filtracji obrazu
Table 46.
Relative deviations of Streif's index values calculated with different filtration threshold – Jonagold apples

Dzień zbioru Harvest date	Próg filtracji obrazu Image filtration threshold						
	*IS*100	*IS*110	*IS*115	*IS*120	*IS*125	*IS*130	*IS*140
253	31,6	24,3	12,5	0,2	16,3	27,5	43,7
257	29,8	24,0	12,4	0,3	12,4	25,1	42,2
261	26,9	20,6	11,6	0,3	12,0	24,5	41,9
265	24,5	18,8	10,8	0,5	11,4	22,1	37,1
269	22,0	14,9	9,4	0,6	11,2	22,1	38,7
273	19,9	14,3	8,2	0,5	11,1	22,0	34,2
277	16,3	10,4	6,5	0,6	10,8	21,8	32,8
281	14,9	8,3	5,3	0,7	10,1	21,3	32,8
285	10,0	6,5	4,9	0,7	9,6	20,4	32,4
289	4,8	2,5	3,2	0,8	9,3	19,5	29,6
293	5,5	2,5	2,6	0,9	8,8	18,8	29,3
297	5,3	1,2	1,3	0,9	6,2	12,4	20,1

W celu wyznaczenia błędów względnych posłużono się wyznaczaniem różniczki zupełnej trzech zmiennych. Wyniki obliczeń błędu względnego wartości indeksów zbiorczych przedstawiono w tabelach . Błędy oszacowań zostały umieszczone w tabelach 45 i 46 dla *IS* oraz tabelach 47 i 48 dla *IJ*.

Wartości bezwzględne błędów oznaczeń jędrności oraz ekstraktu zostały umieszczone w instrukcjach urządzeń pomiarowych i na tej podstawie obliczono, z wykorzystaniem ich wartości, jako elementów składowych błędu całkowitego, również błędy indeksów zbiorczych. Podczas pomiaru indeksu skrobiowego posłużono się wartościami uzyskanymi podczas filtracji obrazów zabarwionych powierzchni za pomocą progu t_{120} (S_{120}) jako wartości wzorcowej do obliczenia błędu tego wskaźnika składowego. Ze względu na niewielkie błędy oznaczania jędrności oraz ekstraktu obliczone wartości względne błędów indeksów zbiorczych dla wartości wzocowych indeksu S_{120} są najmniejsze. Błędy względne indeksu *IS* dla S_{120} stopniowo rosną w kolejnych terminach zbioru i nie przekraczają 1% *IS* (Tab. 45 i 46).

Ważnym składnikiem indeksów Streifa i De Jagera jest indeks skrobiowy, którego precyzyjne oznaczenie jest dość trudne. Dlatego też w celu oznaczenia błędów w funkcji trzech zmiennych, wartości błędów bezwzględnych *S* obliczano jako wartości bezwzględne różnic, obliczanych przy różnych progach filtracji, oraz bazowej wartości S_{120} w każdym terminie zbioru.

Błędy popełniane przy ocenie progu filtracji obrazu rzutują na wielkość błędów oznaczenia indeksów zbiorczych. W przypadku owoców odmian o wysokim poziomie skrobi podczas zbioru zmiany wartości indeksu zbiorczego Streifa (*IS*) są duże przy niskich warto-

ściach *S*, (Tab. 45), przy czym zmiana progu filtracji o ±5 wartości powoduje nawet dwukrotną różnicę w ocenie wartości *IS*. Błędy względne podczas obliczenia tego wskaźnika przyjmowały wartości od 12 do 38% dla S_{115} oraz 8 do 49% dla S_{125} (Tab. 45) w przypadku odmiany Gloster. Błędy względne oznaczania wskaźnika, gdy owoce osiągały stan dojrzałości zbiorczej (277-281 dzień roku) wynosiły od 20% do 29%. Indeksy zbiorcze wykazywały wyższe błędy oznaczeń dla owoców wykazujących kołowy rozpad skrobi (Gloster) niż u Jonagolda (Tab. 46). Wraz z postępem dojrzewania owoców wartości błędów względnych zmniejszały się u wszystkich odmian. Wyjątek stanowił tu przebieg błędów dla t_{120}, który był wyznaczony umownie progiem wzorcowym, przy którym błędy oznaczenia wartości *S* nie występują.

Inne wartości, ze względu na postać formuły definiującej miały błędy względne indeksu De Jagera (*IJ*), (Tab. 47 i 48). W odróżnieniu od *IS* zaobserwowano ich zwiększanie się, szczególnie widoczne, gdy próg filtracji obrazu był wysoki (t_{125}, t_{130} oraz t_{140}). Wartości błędów nie były dla tych progów filtracji wysokie, wynosząc od 8 do 11,5 % oraz 5,5 do 28 % przy skrajnych wartościach progu filtracji dla owoców Jonagold, oraz od 1,7 do 15% i od 4 do 24,5% dla owoców Gloster.

Tabela 47.
Wartości błędów względnych indeksu De Jagera owoców Gloster obliczanych przy różnych progach filtracji obrazu
Table 47.
Relative deviations of De Jager's index values calculated with different filtration thresholds – Gloster apples

Dzień zbioru Harvest date	Próg filtracji obrazu Filtration threshold						
	*IJ*100	*IJ*110	*IJ*115	*IJ*120	*IJ*125	*IJ*130	*IJ*140
253	31,2	14,5	7,2	0,1	1,7	3,8	6,1
257	29,0	14,3	5,5	0,0	5,8	8,1	10,5
261	32,5	18,5	7,3	0,1	4,4	8,1	11,3
265	36,5	19,5	6,6	0,2	4,7	9,3	13,2
269	38,5	20,3	5,2	0,3	5,3	10,7	14,1
273	38,4	16,5	5,7	0,4	5,1	10,4	13,9
277	46,3	23,6	7,2	0,4	3,9	8,4	13,1
281	51,7	26,8	7,0	0,5	5,5	9,2	14,2
285	50,2	28,8	7,9	0,5	4,6	9,5	14,6
289	50,9	30,1	12,3	0,6	7,6	11,4	18,2
293	47,6	31,6	15,6	0,7	9,3	16,7	23,6
297	40,6	28,8	15,1	0,7	14,9	24,5	34,0

Tabela 48.
Wartości błędów względnych indeksu De Jagera owoców Jonagold obliczanych przy różnych progach filtracji obrazu
Table 48.
Relative deviations of De Jager's index values calculated with different filtration thresholds – Jonagold apples

Dzień zbioru Harvest date	Próg filtracji obrazu Filtration threshold						
	*IJ*100	*IJ*110	*IJ*115	*IJ*120	*IJ*125	*IJ*130	*IJ*140
253	31,4	20,0	10,4	0,2	7,0	10,2	13,4
257	30,6	21,2	9,3	0,3	5,5	9,2	13,1
261	30,2	19,7	9,2	0,3	5,6	9,3	14,0
265	30,9	20,7	8,3	0,5	7,9	11,0	15,4
269	30,8	17,6	8,0	0,6	8,8	13,3	17,0
273	30,2	18,9	10,7	0,5	8,0	13,9	17,6
277	30,4	16,9	7,9	0,6	11,4	17,9	22,6
281	36,7	17,2	8,7	0,7	13,0	23,1	29,5
285	33,7	19,9	10,0	0,7	18,7	28,4	39,5
289	28,3	15,2	9,9	0,8	28,0	43,4	52,6
293	38,6	17,4	11,5	0,9	27,1	43,1	49,3
297	44,7	12,2	7,4	0,9	24,3	35,9	45,3

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Próby wykorzystania narzędzi optycznych w celu oceny jakości jabłek były podejmowane w licznych publikacjach (Peirs i in. 2000; Peirs i in. 2002; Peirs i in. 2005; Quing i in. 2007; Solovchenko i in. 2011; Solovchenko i in. 2012; Linker i in. 2012; Hengari i in. 2014; Jarolmasjed i in. 2016; Cardenas-Perez i in. 2017). Wśród nich występują te, w których badacze starali się ustalić związek między zmianami jakości występującymi w miąższu owoców, a stanem ich powierzchni. Wyniki badań Doerflinger i in. (2015) wskazują, że nie ma korelacji między zmianami barwy skórki owocu a stężeniem skrobi w miąższu jabłek oraz szybkością syntezy etylenu. Dojrzałość jabłek jest oceniana od dawna za pomocą nielicznej, lecz wiarygodnej grupy testów, które precyzyjnie opisują przemiany podczas ich dojrzewania. Do najważniejszych wśród nich należą zawartość etylenu w gniazdach nasiennych, zawartość skrobi, jędrność miąższu oraz zawartość ekstraktu. (Łysiak 1998a). Według Brookfielda i in. (1997), zanik zabarwienia skrobi jodem następuje przy stężeniu 2-3 mg/g miąższu owocu. Pozostała jej część mimo obecności w tkance owocu, jest pomijana podczas analizy wyniku testu skrobiowego. Dlatego też głównymi czynnikami, wpływającymi na wartość indeksu *S* jest całkowita zawartość skrobi w jabłkach oraz szybkość jej rozpadu podczas ich dojrzewania (Doerflinger i in. 2015). Oba te czynniki są z kolei zależne od odmiany jabłek, sezonu zbioru, lokalizacji sadu oraz warunków klimatycznych panujących w sadzie (Rutkowski i in. 2005; Mika i in. 2007). Podczas obiektywnej oceny indeksu *S* występowały także trudności wynikające z niezgodności jego wartości, przedstawionej na fotografiach tablic wzorcowych, z wartościami uzyskanymi w wyniku ich weryfikacji za pomocą narzędzi optycznych (Peirs i in. 2002; Doerflinger i in. 2015).

Kolejnym problemem, który pojawiał się podczas oceny indeksu skrobiowego jest zbyt rozbudowana, 10-stopniowa skala jego wartości (Brookfield i in. 1997). Podobne obserwacje poczynili Peirs i in. (2002), określając ocenę zawartości skrobi metodą wzrokową, z użyciem 10-stopniowej, tradycyjnej skali jako „niepewną", natomiast wyniki uzyskane poprzez analizę obrazów cyfrowych jako „obiektywne". Autorzy ci proponują uproszczenie tablic wzorcowych do 5-stopniowej skali. Nawet skala 6-stopniowa używana dawniej przez Reida i in. (1982), ilustrowała większe różnice zawartości skrobi między stopniami indeksu *S*, co ułatwiało prawidłowe przyporządkowanie zabarwionych owoców do obrazów wzorcowych. Takie rozwiązanie mogłoby uprościć oznaczenie tego wskaźnika metodą tradycyjną. Biorąc pod uwagę wyniki, uzyskane w niniejszej pracy, indeks skrobiowy obliczony za pomocą narzędzi optycznych można uznać za bardziej wiarygodny i obiektywny, chociaż obarczony błędami. Peirs i in. (2002) posługiwali się podobną jak w niniejszej pracy metodyką przygotowania próbek, jak również metodą optyczną (skaner) podczas obliczania indeksu *S*. Tymczasem podczas zapisu obrazu ze skanera występują liczne artefakty, które zakłócają prawidłowe obliczenie pól powierzchni zajętych przez skrobię. Powstawanie tych artefaktów oraz ich wpływ na zakłócenie prawidłowej interpretacji indeksu skrobiowego zostało już omówione w poprzednich rozdziałach.

Według Szalaya i in. (2013) zawartość skrobi, wyrażona indeksem skrobiowym, jest najbardziej wiarygodnym wskaźnikiem procesu dojrzewania jabłek. Jednak wyniki obserwacji przebiegu ich dojrzewania, mimo obfitego materiału badawczego (24 odmiany), przeprowadzona tylko w jednym sezonie, należy wg autorów, traktować z ostrożnością.

Szczególnie dotyczy to oznaczania optymalnego terminu zbioru oraz długości przedziału „okna zbioru". Wyniki badań umieszczone w pracy obejmowały 7 sezonów przechowalniczych, w tym 4 sezony traktowane jako pierwszy, wstępny etap badań. Celem tego etapu była wstępna ocena przydatności narzędzi optycznych użytych do obliczeń indeksu skrobiowego.

Należy tu zaznaczyć, że obraz „wzoru skrobiowego", poddawanego analizie w pracy, stanowi struktura składająca się z dużej liczby odcieni zaczynając od ciemnogranatowego, prawie czarnego obrazu kompleksu jodowo-skrobiowego, aż do rozmytych, jasnoszarych obszarów o bardzo niskim stężeniu skrobi, charakterystycznych dla obszarów graniczących z jasnym miąższem, w którym, ze względu na niskie stężenie, skrobia jest niewykrywalna tą metodą. Biorąc pod uwagę powyższy rozkład skrobi o różnym stężeniu w przekroju owocu, problemem jest trudność w wyborze optymalnego progu filtracji, czyli wyborze takiej wartości granicznej, przy której obszary obrazu o jasności wyższej niż próg będą uważane za obszary wolne od skrobi. Wszystkie te problemy były brane pod uwagę w części badawczej niniejszej pracy.

W początkowej fazie doświadczeń dokonano porównania wartości indeksu skrobiowego oznaczonego różnymi metodami, począwszy od tradycyjnej (OW), z wykorzystaniem skanera (SK), kamery czarno-białej CCD (CB) i aparatu cyfrowego w systemie RGB (AC). Wyznaczono równania regresji ilustrujące zmiany S w 4 kolejnych sezonach zbioru z wykorzystaniem analizy istotności różnic tychże równań dla poszczególnych metod. Zgodność przebiegu równań regresji zmian indeksu skrobiowego podczas dojrzewania wyznaczonych metodą CB wskazywała wstępnie na możliwość wyznaczenia tego wskaźnika z największą precyzją spośród zastosowanych metod oceny. Niskie wartości prawdopodobieństw zgodności przebiegu prostych świadczą o innych, niż tylko klimatyczne, czynnikach wpływających na interpretację wartości S w poszczególnych sezonach. Oczywiście nie można zakładać, że wśród rozpatrywanych roczników w co najmniej 2 wartości indeksu skrobiowego będą identyczne w tych samych terminach zbioru. Istotą tej części analizy było ustalenie, jaka była różnica w przebiegu zmian wartości indeksu *S* rejestrowanych metodami stosowanymi w eksperymencie. W podsumowaniu tej części doświadczenia można sformułować następujące wnioski:

- Najwyższe wskaźniki zgodności przebiegu równań regresji, obrazujących zmiany indeksu *S*, osiągnięto metodą analizy zdjęć czarno-białych (CB), niezależnie od sposobu rozpadu skrobi w owocach.
- Dla owoców reprezentujących kołowy typ rozpadu skrobi (Gloster) współczynniki zgodności przebiegu równań regresji przyjmowały wyższe wartości niż dla owoców o promieniowym rozkładzie skrobi (Jonagold).
- Najniższe wartości sumarycznych współczynników zgodności charakteryzujących przebieg zmian indeksu *S* w czterech kolejnych latach zbioru osiągnięto porównując równania regresji otrzymane metodą OW. Przebiegi zmian tego wskaźnika uzyskane za pomoca tablic wzorcowych (OW) były obarczone błędami wynikającymi z indywidualnej percepcji osób oceniających.
- Wartości indeksu skrobiowego uzyskiwane metodą tradycyjną (OW) były istotnie wyższe w porównaniu z tymi, uzyskanymi metodami KAO. Dotyczyło to oceny wartości *S* jabłek odmiany Jonagold oraz Gloster, co sugerowałoby wcześniejszy ich zbiór przy posługiwaniu się tą metodą oceny w porównaniu z metodami KAO.

– Indeks skrobiowy nie zmieniał się istotnie, gdy jego wartości obliczono z wykorzystaniem analizy obrazu zdjęć czarno-białych (CB), wykonanych aparatem cyfrowym (AC) oraz skanerem (SK). Zależność ta obserwowana była w zakresie prawdopodobnego „okna zbioru". Wyjątek stanowił tu wariant oceny metodą SK, przy którym dla niektórych sezonów zbioru (Gloster, 2005, 2007; Jonagold, 2006) wartości *S* obliczone tą metodą były istotnie niższe w rozpatrywanym przedziale zbioru.

W drugim etapie badań zwrócono szczególną uwagę na możliwości, jakie daje metoda zapisu obrazu aparatem (AC). Rejestracja obrazu tą metodą umożliwia szereg modyfikacji sygnału wchodzącego, który pada na element światłoczuły (matryca CCD) aparatu fotograficznego. Istnieje możliwość regulacji barwy, natężenia oraz kierunku oświetlenia. W tej metodzie akwizycji obrazu dystans pomiędzy próbką a urządzeniem rejestrującym jest dość duży. Podczas zapisu obrazu można modyfikować sygnał wejściowy (analogowy) wchodzący w postaci promieni świetlnych wchodzących do kamery lub aparatu. W doświadczeniu używano filtrów konwersyjnych KB „podwyższających" temperaturę barwową światła przez nie przechodzącego oraz filtra polaryzacyjnego, używanego w celu redukcji odblasków na wilgotnej powierzchni plastra.

W tej części doświadczenia zauważono następujące prawidłowości:

– Zmiana temperatury barwowej w przedziale 2800K-4800K powodowała, przy zachowaniu stałego progu filtracji obniżenie wartości indeksu skrobiowego. Zmiany te są nieistotnie niższe przy wartości 4800K w całym przedziale spodziewanych terminów zbioru.
– Podczas analizy zmian indeksu skrobiowego można posłużyć się, zamiennie z obrazami RGB, wersjami obrazów uzyskanych ze składowej G (zielonej). Wartosci S obliczone poprzez analizę obrazów monochromatycznych nieistotnie różnią się od wartości uzyskanych poprzez filtrację obrazów barwnych tym samym progiem w skali jasności. Zależność ta była obserwowana przy analizie obrazów aparatem cyfrowym w temperaturze barwowej 3400K i 4800K dla owoców Jonagold, oraz w temperaturze barwowej światła 2800K, 3400K oraz 4800K dla owoców Gloster.
– Wykorzystanie jako wskaźnika dojrzałości owoców, danych uzyskanych z obrazów składowej R powoduje, że przy zastosowaniu analizy w temperaturze barwowej 2800K, będą one wykazywać istotnie wyższe wartości *S* niż te, uzyskane dla obrazów RGB. Taką prawidłowość zaobserwowano dla owoców Gloster. W przypadku owoców Jonagold wartości indeksu *S* uzyskane ze składowej R były istotnie niższe w całym przedziale uważanym za „okno zbioru". Wraz ze zwiększaniem temperatury barwowej oświetlenia wartości tego wskaźnika były istotnie wyższe od wartości bazowej RGB we wszystkich terminach zbioru. Użycie obrazów monochromatycznych uzyskanych za składowej R dawało zawyżone wartości indeksu *S*, szczególnie po zwiększeniu temperatury barwowej, gdy udział składowej R w składzie widmowym ulegał zmniejszeniu, co wpływało na duży wzrost wartości indeksu *S* obliczanych według tej składowej.
– Wykorzystanie obrazów składowej B jest całkowicie bezużyteczne, gdyż udział tego komponentu obrazu w powierzchni próbek obejmował obszar zajęty przez kompleks jodowo-skrobiowy jak i obszar wolny od skrobi. Skutkowało to tym, że wartości *S* uzyskane według tej składowej są, przy zachowaniu stałego progu filtracji, bardzo zaniżone.

Kolejnym przykładem modyfikacji obrazu cyfrowego było użycie filtra polaryzacyjnego w celu redukcji odblasków, będących światłem spolaryzowanym. Ich usunięcie powodowało uzyskanie klarownych obrazów powierzchni zajętej przez skrobię, co ułatwiło prawidłową ocenę stanu powierzchni plastrów. W tej części badań poczyniono następujące spostrzeżenia:

- Podczas obserwacji owoców Gloster skręcenie płaszczyzny polaryzacji o kąt 60-90° skutkowało redukcją odblasków na powierzchni próbek w takim stopniu, że wartość indeksu *S* obliczona przy takich ustawieniach filtra zmniejszała się istotnie.
- Niższe wartości indeksu skrobiowego uzyskane w wyniku „wygaszenia" odblasków skutkowały tym, że optymalne wartości indeksu *S,* zalecane podczas zbioru osiągane były później. Przesunięcie terminu zbioru wskutek zmniejszania się wartości *S* po wygaszaniu odblasków wynosiło dla owoców Gloster od 3 dni przy skręceniu płaszczyzny polaryzacji o 30° do 8 dni przy skręceniu płaszczyzny polaryzacji o 90°.
- Użycie filtra polaryzacyjnego przy analizie próbek owoców Jonagold nie wykazywało istotnych statystycznie zmian wartości indeksu skrobiowego nawet przy maksymalnym kącie skręcenia płaszczyzny polaryzacji.
- Termin zbioru owoców Jonagold określony zmianą indeksu skrobiowego spowodowanego wygaszaniem refleksów był przesunięty o 2-5 dni, gdy wartość indeksu *S* wynosiła 5, oraz 1-4 dni dla wartości *S*=6. Przesunięcie terminu zbioru o 4 do 5 dni, w przedziale „okna zbioru" powoduje już znaczące zmiany w szybkości dojrzewania owoców.

Częstym błędem podczas obliczeń jest nieprawidłowe wyznaczanie pól powierzchni mierzonych przedmiotów. Jednym z prawdopodobnych błędów oznaczeń wartości indeksu skrobiowego metodami KAO jest użycie niewłaściwego progu filtracji, co skutkuje znaczącymi odchyleniami wartości indeksu *S* obliczonych na podstawie zmienionych progów filtracji. Oto najważniejsze spostrzeżenia dotyczące tej części analizy wyników:

- Filtracja obrazów z odchyleniami ±5 stopni wokół wartości bazowej nie skutkowała istotnymi statystycznie różnicami w interpretacji wartości indeksu skrobiowego. Rozpiętość różnic wartości tego wskaźnika wynosiła w tym przypadku ok. 0,8 stopnia indeksu *S* dla owoców Gloster, oraz 1 stopień indeksu *S* dla Jonagolda. Analiza otrzymanych wyników skłania do stwierdzenia, że przyjęty przedział błędów wynoszący ±5 wartości był maksymalnym dopuszczalnym błędem oznaczenia progu filtracji przy wartości bazowej t_{120}.
- Dla odmiany o kołowym rozpadzie skrobi (Gloster) korzystniejsze było podwyższenie progu filtracji powyżej wartości bazowej (S_{120}), gdyż dla tych wartości (S_{125}) indeks skrobiowy przyjmował optymalne wartości w najbardziej prawdopodobnym przedziale terminów zbioru. Odmiany owoców o promieniowym rozpadzie skrobi osiągały optymalne wartości indeksu *S* po filtracji progiem t_{115}, a więc nieco niższym niż w owocach o kołowym rozpadzie skrobi.

Jednym z możliwych sposobów analizy obrazu indeksu skrobiowego jest obserwacja próbek w świetle przechodzącym przez próbkę owoców zabarwionych kompleksem jodowo-skrobiowym. Wymaga to specjalnego przygotowania próbek poprzez cięcie na dość cienkie plastry. Podczas prześwietlania próbek ujawniają się ponadto elementy struktury owocu, takie jak wiązki przewodzące oraz zarysy gniazd nasiennych.

Wyniki uzyskane z wykorzystaniem tej metody oświetlenia nie są jednoznaczne i skłaniają do następujących wniosków:

- W terminach zbioru, w przedziale od 269 do 285 dnia roku nie zaobserowano istotnych różnic w ocenie wartości indeksu skrobiowego dla owoców odmiany Gloster. Różnice w ocenie wartości S wynosiły 0,1 do 0,7 stopnia dla odmiany Melrose oraz 0,2 do 0,7 dla owoców Gloster.
- Jabłka odmian o promieniowym rozpadzie skrobi (Jonagold, Rubin), wykazywały w terminach zbioru od 265 do 281 dnia roku podobne różnice w interpretacji indeksu skrobiowego, wynoszące 0,2-0,7 stopnia dla Jonagolda i 0,1-0,6 dla Rubina. Potwierdza to też wynik analizy statystycznej, której wyniki wskazują na brak istotnych różnic między wartościami uzyskanymi obiema metodami oświetlenia próbek.

Indeks skrobiowy jest ważnym składnikiem indeksów zbiorczych, które oceniają kompleksowo stan dojrzałości owoców przed zbiorem. Zaletą tych wskaźników jest jednoczesna obserwacja trzech niezależnych wskaźników: jędrności miąższu owoców, zawartości ekstraktu w soku komórkowym oraz stopień rozpadu skrobi, wyrażony indeksem skrobiowym. Do najbardziej znanych indeksów zbiorczych zaliczany jest indeks Streifa (*IS*) oraz indeks De Jagera (*IJ*). Oba te wskaźniki były brane pod uwagę przy oznaczeniu dojrzałości owoców. Oto najważniejsze wnioski, które sformułowano po opracowaniu tej części doświadczenia:

- Optymalne wartości indeksu Streifa (*IS*), dla odmian o kołowym rozpadzie skrobi były osiągane przy nieco wyższych niż bazowa, wartościach progu filtracji, wynoszących t_{125} oraz t_{130}. Dynamika zmian tego zbiorczego wskaźnika dojrzałości w odmianie o promieniowym rozpadzie skrobi (Jonagold), jest mniejsza niż w jabłkach odmiany Gloster. W oparciu o uzyskane wyniki, przedziały optymalnego terminu zbioru są osiągane przy wartości indeksu *S* otrzymanego filtrem o wartości niższej niż 120. Optymalną wartością progu filtracji był próg t_{110}.
- Obserwacja zmian wartości indeksu De Jagera (*IJ*) wskazuje, że ustalanie optymalnej wartości progów filtracji wykazuje podobną prawidłowość jak w przypadku indeksu Streifa (*IS*). Obrazy próbek odmian o kołowym rozpadzie skrobi były, w celu wyznaczenia wartości indeksu *S*, filtrowane progiem o wartości t_{125}, a próbki owoców o rozpadzie promieniowym – progami o wartości mniejszej niż bazowa (t_{120}), czyli t_{110} oraz t_{115}. Taka procedura umożliwiała pewniejszy pomiar wskaźnika *IS* oraz *IJ*, który powiązany jest z innymi wskaźnikami, które wyznaczone były urządzeniami o sprawdzonej dokładności pomiaru.

Błędy oznaczenia wskaźników zbiorczych *IS* oraz *IJ* były zależne w głównej mierze od precyzji oznaczania indeksu skrobiowego. Względne wartości błędów obu wskaźników nie przekraczają 1%, gdy obliczone były dla wartości bazowej S_{120}, dla której błąd oznaczenia wartości S wynosił 0. Wraz ze zwiększaniem się odchylenia progu filtracji, zwiększeniu ulegają błędy względne oznaczeń wskaźników zbiorczych. Wielkość błędów względnych zależna jest od sposobu rozpadu skrobi w owocach. Próbki owoców o kołowym rozpadzie skrobi, wykazywały ponad dwukrotnie wyższą wartość błędów względnych *IS* w początkowych terminach zbioru, w porównaniu z owocami o promieniowym rozpadzie skrobi, przy zachowaniu tych samych odchyleń błędów progów filtracji. W końcowych terminach zbioru różnice te były jeszcze większe. Wielkość błędów oznaczeń indeksu De Jagera w tym samym zakresie progów filtracji kształtowała się dla wszystkich badanych odmian na

podobnym poziomie i nie była zależna od sposobu rozpadu skrobi w badanych owocach. Główną przyczyną błędów obliczonych w doświadczeniu były zmiany wartości indeksu skrobiowego, które były symulowane zmiennym progiem filtracji. Dotyczyło to zarówno indeksu Streifa jak i De Jagera.

BIBLIOGRAFIA

Abdullah, M.Z., Guan, L.C., Lim, K.C., Karim, A.A. (2004). The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. *Journal of Food Engineering 61*, 125-135.

Alegre, S., Molina, D. P., Recasens, I., Casals, M., Bonany, J., Carbó, J., Casero, T., Iglesias, I., (2006). Seasonal trends in harvest indices for 'Golden Smoothee'® apples in Spain. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, Vol. 14* (Suppl. 2).

Amodio M.L, Cabezas-Serrano A.B, Peri G., Colelli G. (2011). Post-cutting quality changes of fresh-cut artichokes treated with different anti-browning agents as evaluated by image analysis. *Postharvest Biology and Technology 62*, 213-220.

Arefi A., Moghaddam P. A., Hassanpour A., Mollazade K., Motlagh M. A. (2016). Non-destructive identification of mealy apples using biospeckle imaging. *Postharvest Biology and Technology 112,* 266-276.

Baranowski P., Mazurek W., Wozniak J., Majewska U. (2012). Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging. *Journal of Food Engineering 110*, 345–355.

Belin É., Rousseau D., Boureau T., Caffier V. (2013). Thermography versus chlorophyll fluorescence imaging for detection and quantification of apple scab. *Computers and Electronics in Agriculture 90,* 159–163.

Bertone E., Venturello A., Leardi R., Geobaldo F. (2012). Prediction of the optimum harvest time of 'Scarlet' apples using DR-UV–Vis and NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology 69,* 15–23.

Bielicki P., Czynczyk A., Chlebowska D. (2000). Effect of a rootstock and tree location on yield and fruit quality of 'King Jonagold' apples. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, Vol. VIII Nº 2.

Blasco J., Aleixos N., Moltó E. (2003). Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit. *Biosystems Engineering 85 (4),* 415–423.

Brookfield P., Murphy P., Harker R., MacRae E. (1997). Starch degradation and starch pattern indices; interpretation and relationship to maturity. *Postharvest Biology and Technology 11*, 23-30.

Brosnan T., Sun D. W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering 61*, 3–16.

Brown T. G., (2011). Unconventional Polarization States: Beam Propagation, Focusing, and Imaging. *Progress in Optics, Vol. 56*, 81-129.

Bryk H., Rutkowski K. P. (2004). Wpływ fugicydu Euparen Multi 50 WG stosowanego przed zbiorem jabłek na ich jakość. *Prog. Plant Protection. Post. Ochr. Roślin, Vol. 44(2),* 622-624.

Bulens I., Van de Poel B.,. Hertog L. M, De Proft M. P., Geeraerd A. H., Nicolai B. M. (2012). Influence of harvest time and 1-MCP application on postharvest ripening and ethylene biosynthesis of 'Jonagold' apple. *Postharvest Biology and Technology 72*, 11-19.

Cardenas-Perez S., Chanona-Perez J., Mendez-Mendez J.V., Calderon-Dominguez G., Lopez-Santiago R., Perea-Flores M. J., Arzate-Vazquez I. (2017). Evaluation of the ripening stages of apple (Golden Delicious) by means of computer vision system. *Biosystems Engineering 159*, 46-58.

Chandel A. K., Khot L. R., Osroosh Y., Peters T.R. (2018). Thermal-RGB imager derived in-field apple surface temperature estimates for sunburn management. *Agricultural and Forest Meteorology*, *253-254*, 132-140.

Chen L. S., Li P., Cheng L. (2009). Comparison of thermotolerance of sun-exposed peel and shaded peel of 'Fuji' apple. *Environmental and Experimental Botany 66*, 110-116.

Chen Z., Hua L., Pu J. (2012). Tight Focusing of Light Beams: Effect of Polarization, *Phase, and Coherence. Progress in Optics, Vol. 57*, 219-260.

Cho J.-S., Lee H. J., Park J.-H., Sung J. H., Choi J.-Y., Moon K.-D. (2016). Image analysis to evaluate the browning degree of banana (Musa spp.) peel. *Food Chemistry 194*, 1028-1033.

Costa F., Cappellin L., Farneti B., Tadiello A., Romano A., Soukoulis C., Sansavini S., Velasco R., Biasioli F. (2014). Advances in QTL mapping for ethylene production in apple (Malus domestica Borkh.). *Postharvest Biology and Technology 87*, 126-132.

Dass R. , Priyanka, Devi S. (2012). Image Segmentation Techniques. *International Journal of Electronics & Communication Technology Vol. 3, Issue 1, ISSN 2230-7109.*

De Ell J. R., Prange R. K. , Murr D. P. (1996). Chlorophyll fluorecscence of Delicious apples at harvest as a potencial predictor of superficial scald development during storage. *Postharvest Biology and Technology, 9,* 1-6.

De Jager A., Roelofs F. P. (1996). Prediction of optimum harvest date of Jonagold. . *In de Jager A., Johnson D., Hohn E. (Eds.) COST 94, 9-10 June 1994. The postharvest treatment of fruit and vegetables: Determination and prediction of optimum harvest date of apple and pears. Lofthus, Norway,* pp. 21-32.

De Jager A. (1994). Jak w Holandii wyznaczamy termin zbioru. *Biuletyn Towarzystwa Rozwoju Sadów Karłowych. Sad Karłowy 3,*14-20.

De Long J. M., Prange R. K., Harrison P., Schofield R. A., De Ell J. R. (1999). Using the Streif Index as a final harvest window for controlled atmosphere storafe of apples. *Hort Science 34(7),* 1251-1255.

De Wit M. M., van der Kamp J., Withagen R. (2015). Visual illusions and direct perception: Elaborating on Gibson's insights. *New Ideas in Psychology, 36*, 1-9.

Deng L., Pan X., Chen L., Shen L., Sheng J. (2013). Effects of preharvest nitric oxide treatment on ethylene biosynthesis and soluble sugars metabolism in 'Golden Delicious' apples. *Postharvest Biology and Technology 84,* 9-15.

Derossi A., Gerke K. M., Karsanina M. V., Nicolai B., Verboven P., Severini C. (2019). Mimicking 3D food microstructure using limited statistical information from 2D cross-sectional image. *Journal of Food Engineering, 241*, 116-126.

Di Natale C., Macagnano A., Martinelli E., Paolesse R., Proietti E., D'Amico A. (2001). The evaluation of quality of post-harvest oranges and apples by means of electronic nose. *Sensors and Acutators B78,* 26-31.

Doerflinger F. C., Miller W. B.,. Nock J. F, Watkins C. B. (2015). Relationships between starch pattern indices and starch concentrations in four apple cultivars. *Postharvest Biology and Technology 110,* 86-95.

Du C. J., Sun D. W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering 72*, 39-55.

Echeverrıa G., Fuentes T., Graell J. , Lara I. , López M. L. (2004). Aroma volatile compounds of 'Fuji' apples in relation to harvest date and cold storage technology A comparison of two seasons. *Postharvest Biology and Technology 32*, 29-44.

Fan L., Song J., Forney C. F., Jordan M. A. (2011). Fruit maturity affects the response of apples to heat stress. *Postharvest Biology and Technology 62*, 35-42.

Fan X., Mattheis J. P., Patterson M. E., Fellman J. K. (1995). Changes in amylase and total content in 'Fuji' apples during maturation. *Hortscience 30*, 104-105.

Fellman J. K., Rudell D. R., Mattinson D. S., Mattheis J. P. (2003). Relationship of harvest maturity to flavor regeneration after CA storage of 'Delidious' apples. *Postharvest Biology and Technology 27,* 39-51.

Fernández L., Castillero C., Aguilera J. M. (2005). An application of image analysis to dehydration of apple discs. *Journal of Food Engineering 67*, 185-193.

Garrido-Novell C., Pérez-Marin D., Amigo J. M., Fernández-Novales J., Guerrero J. E., Garrido-Varo A. (2012). Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras. *Journal of Food Engineering 113*, 281–288.

Germain J. C., Aguilera J. M. (2012). Identifying industrial food foam structures by 2D surface image analysis and pattern recognition. *Journal of Food Engineering 111*, 440-448.

Girard B., Lau O. U. (1995). Effect of maturity and storage on quality and volatile production of 'Jonagold' apples. *Food Research International, vol. 28, No 5*, 465-471.

Gorny J. R., Hess-Pierce B., Cifuentes R. A., Kader A. A. (2002). Quality changes in fresh-cut pear slices as affected by controlled atmospheres and chemical preservatives. *Postharvest Biology and Technology 24,* 271-278.

Gorny J. R., Kader A. A. (1996). Regulation of ethylene biosynthesis in climacteric apple fruit by elevated CO_2 and reduced O_2 atmospheres. *Postharvest Biology and Technology 9*, 311-323.

Guz T. (2005). Oznaczanie indeksu skrobiowego jabłek metodą komputerowej analizy obrazów. *Inżynieria Rolnicza 11(71),* 163-170.

Guz T. (2006). Komputerowa analiza obrazów w ocenie rozkładu skrobi podczas dojrzewania jabłek.*Inżynieria Rolnicza 7(82),* 199-207.

Guz T. (2009). The use of image analysis to estimate harvest ripeness of apples *TEKA Kom. Mpt Energ. Roln OL PAN, Vol 9*, 61-68.

Guz T. (2010). Harvest date determined by different methods of starch index readings and texture changes during apple storage**.** *TEKA Kom. Mpt Energ. Roln OL PAN, Vol 10*,74-81.

Guz T., Kobus Z., Kusińska E., Nadulski R., Oszczak Z. (2011). Wpływ nacisków masy ziarna składowanego w silosie na zmiany cech geometrycznych pszenicy. *Inżynieria Rolnicza. Nr 4 (129),* 59-66.

Hengari S., Theron K. I.,. Midgley S. J. E., Steyn W. J. (2014). The effect of high UV-B dosage on apple fruit photosystems at different fruit maturity stages. *Scientia Horticulturae 170*, 103-114.

Herremans E., Verboven P., Bongaers E., Estrade P., Verlinden B. E., Wevers M.,. Hertog M. L,. Nicolai B. M. (2013). Characterisation of 'Braeburn' browning disorder by means of X-ray micro-CT. *Postharvest Biology and Technology 75*, 114-124.

Hosseinpour S., Rafiee S., Mohtasebi S. S., Aghbashlo M. (2013). Application of computer vision technique for on-line monitoring of shrimp color changes during drying.*Journal of Food Engineering 115,* 99-114.

Hrazdina, G., Hemmat, M., Kiss, E., Galli, Z., Aldwinckle, H. S. and Rosenfield, C. L. (2005). Down regulation of ethylene production and softening in ´Mcintosh´ apples. *Acta Hort. (ISHS) 682,* 383-388.

Huang M., Zhu Q., Wang B., Lu R. (2012). Analysis of hyperspectral scattering images using locally linear embedding algorithm for apple mealiness classification. *Computers and Electronics in Agriculture 89,* 175-181.

Hunt R.W.G. (1991). Measuring of Color. *Ellis Horwood Ltd. New York* p. 313.

Hunter R. S., Harold R. W. (1987). The measurement of Appearance. *John Willey & Sons. New York* 411p.

Jackman P., Sun D. W. (2013). Recent advances in image processing using image texture features for food quality assessment. *Trends in Food Science & Technology 29*, 35-43.

Jackman P., Sun D. W., Allen P. (2011). Recent advances in the use of computer vision technology in the quality assessment of fresh meats. *Trends in Food Science & Technology 22*, 185-197.

Jalil N. A., Yunus M. R., Said N. S. (2013). Students' Colour Perception and Preference: An Empirical Analysis of Its Relationship. *Procedia - Social and Behavioral Sciences 90*, 575-582.

Jamishidian F., Zhang Y., Liu W., Jamishidian M. (2005). A software including some new developments in multiple comparison and simultaneous confidence bands for linear regression models. *Journal of Statistical Software 12, (2),* 1-23.

Jarolmasjed S., Espinoza C. Z., Sankaran S., Khot L. R. (2016). Postharvest bitter pit detection and progression evaluation in Honeycrisp apples using computer tomography analysis. *Postharvest Biology and Technology 118*, 35-42.

Ji W., Zhao D., Cheng F., Xu B., Zhang Y., Wang J. (2012). Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot. *Computers and Electrical Engineering 38*, 1186-1195.

Jobling J.J., McGlasson W. B. (1995). A comparison of ethylene production, maturity and controlled atmosphere storage life of Gala, Fuji and Lady Williams apples (Malus domestica, Borkh.). *Postharvest Biology and Technology 6*, 209-218.

Johnston J. W., Hewett E. W., Hertog L. M., Harker F. R. (2002a). Harvest date and fruit size affect postharvest softening of apple fruit. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology 77 (3),* 355-360.

Johnston J. W., Hewett E. W., Hertog L. M., Harker F. R. (2002b). Temperature and ethylene affect induction of rapid softening in 'Granny Smith' and 'Pacific Rose™' apple cultivars. *Postharvest Biology and Technology 25,* 257-264.

Ju Z., Bramlage W. J. (2001). Developmental changes of cuticular constituents and their association with ethylene during fruit ripening in 'Delicious'apples. *Postharvest Biology and Technology 21,* 257-263.

Kang S. P., East A. R., Trujillo F. J. (2008). Colour vision system evaluation of bicolour fruit: A case study with 'B74' mango. *Postharvest Biology and Technology 49*, 77-85.

Kelman E., Linker R. (2014). Vision-based localisation of mature apples in tree images using convexity. *Biosystems Engineering 118*, 174-185.

Konopacka. D., Płocharski W., Rutkowski K. P., Szymczak J. (1997). Wpływ jędrności jabłek i gruszek na ocenę sensoryczną ich tekstury i możliwości przewidywania optymalnej jakości. *Seminarium pracowników Katedry Sadownictwa i Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa. Lublin, Wydawnictwo AR Lublin s*. 134-137.

Kruczyńska D., Rutkowski K. P., Czynczyk A. (2001). Comparison of fruit quality, maturity and storability of ""Gala"" and red-coloured ""Gala"" mutants (Malus domestica Borkh.). *Folia Hort. 13/2*, 83-88.

Kurenda A., Adamiak A., Zdunek A. (2012). Temperature effect on apple biospeckle activity evaluated with different indices. *Postharvest Biology and Technology 67*, 118-123.

Kurtulmus F., Lee W. S., Vardar A. (2011). Green citrus detection using 'eigenfruit', color and circular Gabor texture features under natural outdoor conditions. *Computers and Electronics in Agriculture 78,* 140-149.

Larriguardiere G., Graell J., Salas J., Vendell M. (1997). Cultivar differences in the influence of a short period of cold on ethylene biosynthesis in apples. *Postharvest Biology and Technology 10*, 21-27.

Laverde A. L. M., Acevedo N. C., Schebor C., Del Pilar Buera M. (2011). Integrated approach for interpreting browning rate dependence with relative humidity in dehydrated fruits. *LWT - Food Science and Technology 44*, 963-968.

Leemans V., Magein H., Destain M. F. (1998). Defects segmentation on 'Golden Delicious' apples by using colour machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture 20*, 117-130.

Lefcout A. M., Kim M. S., Chen Y.-R., Kang S. (2006). Systematic approach for using hyperspectral imaging data to develop multispectral imagining systems: Detection of feces on apples. *Computers and Electronics in Agriculture 54*, 22-35.

Lennie P. (2000). Color vision: Putting it together. *Current Biology Vol 10, No 16*, R589–R591.

Li Ch. Y., Guo K. (1995). Measurements of geometric illusions, illusory contours and stero-depth at luminance and colour contrast. *Vision Res. Vol. 35, No 12,* pp. 1713-1720.

Li Q., Wang M., Gu W. (2002). Computer vision based system for apple surface defect detection. *Computers and Electronics in Agriculture 36*, 215-223.

Li J., Luo W., Wang Z., Fan S. (2019). Early detection of decay on apples using hyperspectral reflectance imaging combining both principal component analysis and improved watershed segmentation method. *Postharvest Biology and Technology, 149*, 235-246.

Li Y., Zhang H., Liu W., Yan C. (2018). Polarization radiometric calibration method for multichannel polarization camera. *Optic-International Journal for Light and Electron Optics, 172*, 980-987.

Linker R., Cohen O., Naor A. (2012). Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards. *Computers and Electronics in Agriculture 81*, 45-57.

Lötze E., Bergh O. (2004). Early prediction of harvest fruit size distribution of an apple and pear cultivar. *Scientia Horticulturae 101*, 281-290.

Lunadei L., Galleguillos P., Diezma B., Lleó L., Ruiz-Garcia L. (2011). A multispectral vision system to evaluate enzymatic browning in fresh-cut apple slices. *Postharvest Biology and Technology 60,* 225-234.

Lurie S. (2008). Regulation of ethylene biosynthesis in fruits by aminoethoxyvinyl- glycine and 1-methylcyclopropene. *Acta Hort. (ISHS) 796*, 31-41.

Luton M. T., Hamer P. J. Rusing C. (1983). Predicting the optimum harvest dates for apples temperature and full-bloom records. *J. Hort. Science 58*, 37-44.

Lv J., Wang F., Xu L., Ma Z., Yang B. (2019). A segmentation method of bagged green apple image. *Scientia Horticulturae 246*, 411-417.

Łysiak G. (1998a). Ocena metod określania dojrzałosci zbiorczej jabłek. *Zeszyty naukowe AR w Krakowie. Sesja Naukowa z. 57,* 509-513.

Łysiak G. (1998b). Wstępna ocena pięciu metod określania dojrzałości zbiorczej jabłek. *XXXVII Ogólnopolska Konferencja Sadownicza. Skierniewice. Wydawnictwo ISiK,* 296-299.

Łysiak G. (2011). The determination of harvest index of 'Šampion' apples intended for long storage Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus 10(3), 273-282

Ma T., Li X., Inagaki T., Yang H., Tsuchikawa S. (2018). Noncontact evaluation of soluble solids content in apples by near-infrared hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering 224*, 53-61.

Matiacevich S., Silva P., Enrione J., Osorio F. (2011). Quality assessment of blueberries by computer vision. *Procedia Food Science 1*, 421-425.

Mendoza F., Dejmek P., Aguilera J. M. (2006). Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology 41*, 285-295.

Mendoza F., Lu R., Ariana D., Cen H., Bailey B. (2011). Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology 62*, 149-160.

Mendoza F., Lu R., Cen H. (2014). Grading of apples based on firmness and soluble solids content using Vis/SWNIR spectroscopy and spectral scattering techniques. *Journal of Food Engineering 125,* 59-68.

Mendoza F., Verboven P., Tri Ho Q., Kerckhofs G., Wevers M., Nicolai B. (2010). Multifractal properties of pore-size distribution in apple tissue using X-ray imaging. *Journal of Food Engineering 99,* 206-215.

Merzlyak M. N., Solovchenko A. E. (2002). Photostability of pigments in ripening apple fruit: a possible photoprotective role of carotenoids during plant senescence. *Plant Science 163*, 881-888.

Mignani, I., Bassi, D. (2005). The effect of calcium treatments on aspects of cell wall metabolism in apple cv. ´Braeburn´. *Acta Hort. (ISHS) 682*, 191-198.

Mika A., Treder W., Buler Z., Rutkowski K., Michalska B. (2007). Effects of orchard mulching with reflective mulch on apple tree canopy irradiation and fruit quality. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research Vol. 15*, 41-53.

Miranda C., Girard T., Lauri P.E. (2007). Random sample estimates of tree mean for fruit size and colour in apple. *Scientia Horticulturae 112*, 33-41.

Mizushima A., Lu R. (2013). An image segmentation method for apple sorting and grading using support vector machine and Otsu's method. *Computers and Electronics in Agriculture 94*, 29-37.

Mollah B. R., Hasan A.,. Salam A., Ali A. (2010). Digital image analysis to estimate the live weight of broiler. *Computers and Electronics in Agriculture 72,* 48-52.

Moreda G.P., Muńoz M.A., Ruiz-Altisent M., Perdigones A. (2012). Shape determination of horticultural produce using two-dimensional computer vision – A review. *Journal of Food Engineering 108,* 245-261.

Mpelasoka B. S., Behboudian M. H. (2002). Production of aroma volatiles in response to deficit irrigation and to crop load in relation to fruit maturity for 'Braeburn' apple. *Postharvest Biology and Technology, 24,* 1-11.

Munera S., Besada C., Blasco J., Cubero S., Salvador A., Talens P., Aleixos N. (2017a). Astringency assessment of persimmon by hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology, 125,* 35-41.

Munera S., Besada C., Aleixos N., Talens P., Salvador A., Sun D. W., Cubero S., Blasco J. (2017b). Non-destructive assessment of the internal quality of intact persimmon using colour and VIS/NIR hyperspectral imaging. *LWT – Food Science and Technology, 77*, 241-248.

Nabiałek A., Ben J. (2004). Określenie optymalnego terminu zbioru jabłek odmiany Gala Must. *Folia Universitatis Agriculture Stientinesis*, 125-129.

Nguyen T. T., Vandevoorde K., Wouters N., Kayacan E., De Baerdemaeker J. G., Saeys W. (2016). Detection of red and bicoloured apples on tree with an RGB-D camera. *Biosystems Engineering, 146,* 33-44.

Opara L. U. (2007). Bruise susceptibilities of 'Gala' apples as affected by orchard management practices and harvest date. *Postharvest Biology and Technology 43*, 47-54.

Pace B., Cefola M., Renna F., Attolico G. (2011). Relationship between visual appearance and browning as evaluated by image analysis and chemical traits in fresh-cut nectarines. *Postharvest Biology and Technology 61,* 178-183.

Pathange L. P., Mallikarjunan P., Marini R. P., O'Keefe S., Vaughan D. (2006). Non-destructive evaluation of apple maturity using an electronic nose system. *Journal of Food Engineering 77*, 1018-1023.

Paulus I., De Busscher R., Schrevens E. (1997). Use of image analysis to investigate human quality classification of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research 68*, 341-353.

Paulus I., Schrevens E. (1999). Evaluatng and modeling the size classification of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research 74,* 411-419.

Pedreschi F., Leo´n J., Mery D., Moyano P. (2006). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International 39*, 1092-1098.

Peirs A., Lammertyn J., Ooms K., Nicolaı B. M. (2000). Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS:NIR-spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology 21,* 189-199.

Peirs A., Scheerlinck N., Perez A. B., Jancsók P., Nicolai B. M. (2002). Uncertainty analysis and modelling of the starch index during apple fruit maturation. *Postharvest Biology and Technology 26,* 199-207.

Peirs A., Schenk A., Nicolaı B. M. (2005). Effect of natural variability among apples on the accuracy of VIS-NIR calibration models for optimal harvest date predictions. *Postharvest Biology and Technology 35,* 1-13.

Peng Y., Lu R. (2006). Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. *Postharvest Biology and Technology 41*, 266-274.

Peng Y., Lu R. (2008). Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology 48*, 52-62.

Penman D. W. (2001). Determination of stem and calyx location on apples using automatic visual inspection. *Computers and Electronics in Agriculture 33*, 7-18.

Qing Z., Ji B., Zude M. (2007). Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering 82*, 58-67.

Quevedo R., Diaz O., Caqueo A., Ronceros B., Aguilera J. M. (2009a). Quantification of enzymatic browning kinetics in pear slices using non-homogenous L* color information from digital images. *LWT - Food Science and Technology 42*, 1367-1373.

Quevedo R., Diaz O., Ronceros B., Pedreschi F., Aguilera J. M. (2009b). Description of the kinetic enzymatic browning in banana (Musa cavendish) slices using non-uniform color information from digital images. *Food Research International 42*, 1309-1314.

Quevedo R., Jaramillo M., Díaz O., Pedreschi F., Aguilera J. M. (2009c). Quantification of enzymatic browning in apple slices applying the fractal texture Fourier image. *Journal of Food Engineering 95,* 285-290.

Rady A., Ekramirad N., Adedeji A. A., Li M., Alimardani R. (2017). Hyperspectral imaging for detection of codling moth infestation in Gold Rush apples. *Postharvest Biology and Technology 129,* 37-44

Rakun J., Stajnko D., Zazula D. (2011). Detecting fruits in natural scenes by using spatial-frequency based texture analysis and multiview geometry. *Computers and Electronics in Agriculture 76,* 80-88.

Raybaudi-Massilia R. M., Mosqueda-Melgar J., Sobrino-L´opez A., Soliva-Fortuny R., Mart´ın-Belloso O. (2007). Shelf-life extension of fresh-cut "Fuji" apples at different ripeness stages using natural substances. *Postharvest Biology and Technology 45*, 265-275.

Reay P. F. (1999). The role of low temperatures in the development of the red blush on apple fruit ('Granny Smith'). *Scientia Horticulture 79* ,113-119.

Reid M.S., Padfield C.A.S., Watkins C.B., Harman J.E. (1982). Starch iodine pattern as a maturity index for Granny Smith apples. *NZ Journal of Agricultural Research 25*, 229-237.

Rodríguez-Pulido F. J., Gómez-Robledo L., Melgosa M., Gordillo B.,Lourdes González-Miret M., Heredia F. J. (2012). Ripeness estimation of grape berries and seeds by image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture 82,* 128-133.

Russ J.C. (2005). Image Analysis of Food Microstructure. *CRC Press LLC New York* 369 pp.

Rutkowski K. P., Kruczyńska D. E., Czynczyk A., Płocharski W. (2005). The influence of rootstocks M9 and P60 on quality and storability in 'Gala' and 'Gala Must' apples. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research. Vol. 13*, 71-78.

Rutkowski K. P., Michalczuk B. Konopacki P. (2008). Nondestructive determination of 'Golden Delicious' apple quality and harvest maturity. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research Vol. 16,* 39-52.

Rutkowski K. P. (2001). Jak określić optymalny termin zbioru jabłek w 2001 roku. *XL Ogólnopolski Zjazd Sadowników. Skierniewice. Wydawnictwo ISiK,* 65-69.

Rutkowski K. P. (1997). Czynniki decydujące o terminie zbioru jabłek i zalety jego ustalania. *XXXVI Ogólnopolski Zjazd Sadowników. Skierniewice, Wydawnictwo ISiK*, 72-75.

Rutkowski K. P., Kruczyńska D. (2000). Wpływ podkładki na jakość i zdolność przechowalniczą jabłek odmiany Redkroft. *Zesz.Nauk. AR Kraków, Sesja Naukowa 71*, 399-402.

Rutkowski K. P., Miszczak A., Płocharski W. (2003). The influence of storage conditions and harvest date on quality of 'Elstar' apples. *Acta Horticulturae 600*, 809-812.

Rutkowski K. P., Miszczak A., Szymczak J. A. (2000). Wpływ terminu zbioru na zdolność przechowalniczą jabłek odmiany Elstar. *Zesz.Nauk. AR Kraków, Sesja Naukowa 71*, 403-414.

Saevels S., Lammertyn J., Berna A. Z., Veraverbeke E., Di Natale C., Nicolaï B. M. (2003). Electronic nose as a non-destructive tool to evaluate the optimal harvest date of apples. *Postharvest Biology and Technology 30,* 3-14.

Sampson D. J., Chang Y. K., Rupasinghe H.P.V., Zaman Q. (2014). A dual-view computer-vision system for volume and image texture analysis in multiple apple slices drying. *Journal of Food Engineering 127,* 49-57.

Santos Pereira L. F., Barbon S. Jr., Valous N. A., Barbin D. F. (2018). Predicting the ripening of papaya fruit with digital imaging and random forests. *Computers and Electronics in Agriculture 145,* 76-82.

Simmons K. W., Ramjee V., Beauchamp M. S., McRae K., Martin A., Barsalou L. W. (2007). A common neural substrate for perceiving and knowing about color. *Neuropsychologia 45,* 2802-2810.

Skrzyński J. (1997). Możliwości określenia optymalnego terminu zbioru jabłek. *II Ogólnopolskie Spotkanie Sadowników w Grójcu. Grójec, Skierniewice. Wydawnictwo ISiK,* 12-21.

Skrzyński J. (1996). Optimum harvest date study of 4 apple cultivars in southern Poland. In de Jager A., Johnson D., Hohn E. (Eds.) COST 94, 9-10 June 1994. *The postharvest treatment of fruit and vegetables: Determination and prediction of optimum harvest date of apple and pears. Lofthus, Norway,* pp. 61-66.

Solovchenko A. E. , Merzlyak M. N., Pogosyan S. I. (2010). Light-induced decrease of reflectance provides an insight in the photoprotective mechanisms of ripening apple fruit. *Plant Science 178*, 281-288.

Solovchenko A., Kozhina L., Nazarov Y., Gudkovsky V. (2011). Relationships between internal ethylene and optical reflectance in ripening Antonovka apples grown under sunlit and shaded conditions. *Postharvest Biology and Technology 59*, 206-209.

Song J., Bangerth F. (1996). The effect of harvest date on aroma compound production from'Golden Delicious' apple fruit and relationship to respiration and ethylene production. *Postharvest Biology and Technology 8,* 259-269.

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

Stien L. H., Kiessling A., Manne F. (2007). Rapid estimation of fat content in salmon fillets by colour image analysis. *Journal of Food Composition and Analysis 20*, 73-79.

Stow J.R., Dover C.J., Genge P. M. (2000). Control of ethylene biosynthesis and softening in 'Cox's Orange Pippin' apples during low-ethylene, low-oxygen storage. *Postharvest Biology and Technology 18,* 215-225.

Streif J. (1996). Optimum harvest date for different apple cultivars in the 'Bodensee' area. In De Jager A., Johnson D., Hohn E. (Eds.) COST 94, 9-10 June 1994. *The postharvest treatment of fruit and vegetables: Determination and prediction of optimum harvest date of apple and pears. Lofthus, Norway,* pp. 15-20.

Sugita Y. (2004). Experience in Early Infancy Is Indispensable for Color Perception. *Current Biology, Vol. 14*, 1267-1271.

Sun D. W. (2004). Computer vision - an objective, rapid and non-contact quality evaluation tool for the food industry. *Journal of Food Engineering 61*, 1-2.

Sun D. W. (2000). Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method. *Journal of Food Engineering 44*, 245-249.

Szczypiński P. M. , Zapotoczny P. (2012). Computer vision algorithm for barley kernel identification, orientation estimation and surface structure assessment. *Computers and Electronics in Agriculture 87,* 32-38.

Szalay L., Ordidge M., Ficzek G., Hadley P., Tóth M., Battey N. H. (2013). Grouping of 24 apple cultivars on the basis of starch degradation rate and their fruit pattern. *Hort. Sci. Prague Vol. 40, No. 3*, 93-101.

Szymanska-Chargot M., Adamiak A., Zdunek A. (2012). Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. *Scientia Horticulturae 145*, 23-28.

Tang Ch., He H., Li E., Li H. (2018) Multispectral imaging for predicting sugar content of 'Fuji' apples. *Optics and Laser Technology 106*, 280-285.

Thybo A. K., Szczypiński P. M., Karlsson A. H., Donstrup S., Stodkilde-Jorgensen H. S., Andersen H. J. (2004). Prediction of sensory texture quality attributes of cooked potatoes by NMR-imaging (MRI) of raw potatoes in combination with different image analysis methods. *Journal of Food Engineering 61,* 91–100.

Toivonen P. M. A. (2008). Influence of harvest maturity on cut-edge browning of 'Granny Smith'fresh apple slices treated with anti-browning solution after cutting. *LWT - Food Science and Technology 41,* 1607-1609.

Tomala K. (1995a). Choroby i uszkodzenia owoców. *IV Spotkanie Sadownicze Sandomierz. Wydawnictwo Agrosan* .

Tomala K. (1995b). Prognozowanie zdolności przechowalniczej i określenie terminu zbioru jabłek. *Fundacja Rozwój SGGW*. *Maszynopis*.

Tomala K. (1999) Co wpływa na jakość przechowalniczą jabłek. Cz. 4. Termin zbioru. *Sad Nowoczesny 8*.

Tomala K. (2002). Przygotować jabłka do przechowywania. *Hasło Ogrodnicze 09*.

Tomala K. (2003). Zanim zaczniesz zbiór owoców oceń stan fizjologiczny jabłek. *Sad Nowoczesny 9*.

Tomala K. (2004). Jabłka zbieramy na podstawie oceny stanu fizjologicznego. *Owoce, Warzywa, Kwiaty 16.*

Tomala K., Andziak J., Jeziorek K., Dziuban R. (2008). Influence of rootstock on the quality of 'Jonagold' apples at harvest and after storage. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research Vol. 16,* 31-38.

Treder W., Mika A. Krzewińska D. (2010). Relations between tree age, fruit load and ean fruit weight. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research Vol. 18(2),* 139-149.

Unay D., Gosselin B., Kleynen O., Leemans V., Destain M. F., Debeir O. (2011). Automatic grading of Bi-colored apples by multispectral machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture 75,* 204-212.

Vanoli M., Visai C. Rizzolo A. (1995). The influence of harvest date on the volatile composition of'Starkspur Golden' apples. *Postharvest Biology and Technology 6*, 225-234.

Veltman R. H., Verschoor J. A., Ruijsch van Dugteren J. H. (2003). Dynamic control system (DCS) for apples (Malus domestica Borkh. cv. 'Elstar'): optimal quality through storage based on product response. *Postharvest Biology and Technology 27*, 79-86.

Vilanova L., Vinas I., Torres R., Usall J., Buron-Moles G., Teixidó N. (2014). Increasing maturity reduces wound response and lignification processes against Penicillium expansum (pathogen) and Penicillium digitatum (non-host pathogen) infection in apples. *Postharvest Biology and Technology 88,* 54-60.

Wan P., Toudeshki A., Tan H., Ehsani R. (2018). A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture 146*, 43-50.

Wang H. H, Sun D. W. (2001). Evaluation of the functional properties of Cheddar Cheese using a computer vision method. *Journal of food Engineering 49*, 49-53.

Wang H. H., Sun D. W. (2003). Assessment of cheese browning affected by baking conditions using computer vision. *Journal of Food Engineering 56*, 339-345.

Wang Q., Wang H., Xie L., Zhang Q. (2012). Outdoor color rating of sweet cherries using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture 87*, 113-120.

Watkins C. B. (2008). Postharvest ripening regulation and innovation in storage technology. *Acta Hort. (ISHS) 796,* 51-58.

Watkins C. B., Blamlage W. J., Brookfield P. L., Reid S. J., Weis S. A., Alwan T.F. (2000). Cultivar and growing region influence efficacy of warming treatments for amelioration of superficial scald development on apples after storage. *Postharvest Biology and Technology 19*, 33-45.

Watkins C. B., Brookfield P. L., Harker F. R. (1993). Development of maturity indices for the 'Fuji' apple cultivar in relation to watercore incidence. *Acta Hort. 326*, 267-275.

Watkins C. B., Reid M. S., Harman J. E., Padfield C. A. S (1982). Starch iodine pattern 2. Differences between districts and relationship to storage disorders and yield. *N Z Journal Agric. Research 25,* 587-592.

Wawrzyńczak A., Jóźwiak Z. B., Rutkowski K. P. (2007). The influence of storage conditions and 1-MCP treatment on ethylene evolution and fruit quality in 'Gala' apples. *Veg. Crops Res. Bull. 66,* 187-196.

Wawrzyńczak A., Jóźwiak Z.B., Rutkowski K.P. (2008). Fruit quality and ACC oxidase activity in 'Rubinstar' apples treated with 1-MCP. Proc. IC on Ripening Reg. and Postharv. Fruit Quality. *Acta Hort. 796*, 147-153.

Whitaker B. D. (2000). DPA treatment alters a-farnesene metabolism in peel of'Empire' apples stored in air or 1.5% O_2 atmosphere. *Postharvest Biology and Technology 18*, 91-97.

Whitaker B. D., Conway W. S., Sams C. E. (1997). Influence of prestorage heat and calcium treatments on lipid metabolism in 'Golden Delicious' aples. *Phytochemistry, 45, Nº 3*, 465-472.

Withagen R., Chemero A. (2009). Naturalizing perception developing the Gibsonian approach along evolutionary lines. *Theory and Psychology 19*, 363-389.

Wu D., Sun D. W. (2012). Colour measurements by computer vision for food quality control - a review. *Trends in Food Science & Technology 25*, 1-16.

Xing J., Jancso P.; De Baerdemaeker J. (2007a). Stem-end/calyx identification on apples using contour analysis in multispectral images. *Biosystems Engineering 96 (2),* 231-237.

Xing J., Saeys W., De Baerdemaeker J. (2007b). Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples. *Computers and Electronics in Agriculture 56*, 1-13.

Yang X., Song J., Campbell-Palmer L., Fillmore S., Zhang Z. (2013). Effect of ethylene and 1-MCP on expression of genes involved in ethylene biosynthesis and perception during ripening of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology 78*, 55-66.

Yildiz K., Ozturk B., Ozkan Y. (2012). Effects of aminoethoxyvinylglycine (AVG) on preharvest fruit drop, fruit maturity, and quality of 'Red Chief' apple. *Scientia Horticulturae 144*, 121–124.

Yoruk R., Yoruk S., Balaban M. O., Marshall M. R. (2004). Machine Vision Analysis of Antibrowning Potency for Oxalic Acid: A Comparative Investigation on Banana and Apple. *Journal of Food Science Vol. 69, Nr. 6,* 281-289.

Zambrano-Zaragoza M. L., Mercado-Silva E., Del Real L. A., Gutiérrez-Cortez E.,Cornejo-Villegas M. A., Quintanar-Guerrero D. (2014). The effect of nano-coatings with α-tocopherol and xanthan gum on shelf-life and browning index of fresh-cut "Red Delicious" apples. *Innovative Food Science and Emerging Technologies 22,* 188-196.

Zapotoczny P. (2011). Discrimination of wheat grain varieties using image analysis and neural networks. Part I. Single kernel texture. *Journal of Cereal Science 54*, 60-68.

Zapotoczny P., Kozera W., Karpiesiuk K., Pawłowski R. (2014). The use of computer-assisted image analysis in the evaluation of the effect of management systems on changes in the color, chemical composition and texture of m. longissimus dorsi in pigs. *Meat Science 97*, 518-528.

Zapotoczny P., Zielinska M., Nita Z. (2008). Application of image analysis for the varietal classification of barley: Morphological features. *Journal of Cereal Science 48*, 104-110.

STRESZCZENIE

We współczesnym przechowalnictwie owoców można zaobserwować duży postęp technologiczny. Przejawia się on wykorzystaniem na dużą skalę nowoczesnych obiektów, wyposażonych w zaawansowane technologicznie instalacje do utrzymania stanu kontrolowanej atmosfery (KA) lub bardzo niskiego stężenia tlenu (ULO). Aby w pełni wykorzystać możliwości, jakie stwarzają te technologie przechowywania, a także uniknąć kosztownych i przykrych niespodzianek, wynikających z użycia nieprecyzyjnej metody oceny dojrzałości owoców przeznaczonych do długotrwałego przechowywania, należy doskonalić również metody oceny stanu fizjologicznego surowca przeznaczonego do przechowywania w tego typu obiektach. Jedną z pewnych metod wyznaczania dojrzałości owoców, bazujących na obserwacji wymiernego wskaźnika stanu fizjologicznego jest test skrobiowy. Przeprowadzenie tego testu jest możliwe w warunkach zbioru owoców w sadzie, gdyż nie wymaga on kosztownej aparatury ani skomplikowanych analiz. Problemem jest nadal jego precyzyjne oznaczenie, gdyż w praktyce wykorzystywane są tablice wzorcowe, które umożliwiają wskazanie tylko przybliżonej jego wartości. Oznaczenie takie jest ponadto obarczone dużym błędem wynikającym z subiektywnej oceny osób wykonujących ocenę. Metoda nie precyzuje, w jakich warunkach oświetlenia powinna być wykonywana ocena, jakie jest dopuszczalne rozproszenie wyników w całej próbie poddawanej ocenie. Istnieje wobec tego potrzeba poszukiwania obiektywnych metod obliczania tego ważnego wskaźnika. Jedną z nich jest rejestracja próbek i następnie analiza otrzymanych obrazów w celu obliczenia wartości indeksu skrobiowego z możliwie małym błędem.

Celem pracy była próba opracowania metodyki obliczania indeksu skrobiowego na podstawie analizy obrazów zapisanych dostępnymi metodami cyfrowej rejestracji. W pierwszej części pracy wykonano porównania interpretacji przebiegu zmian wartości indeksu skrobiowego za pomocą oceny tradycyjnej oraz dostępnych powszechnie metod cyfrowego zapisu obrazu.

W pierwszym, 4-letnim cyklu badawczym, obiektami były owoce dwu odmian jabłoni. Podczas zapisu obrazu posługiwano się czarno-białą kamerą CCD w metodzie CB, aparatem cyfrowym w systemie RGB i matrycą CCD oraz skanerem do kopiowania obiektów płaskich. W metodzie tradycyjnej oceny (OW) posłużono się 5 osobową grupą oceniającą, którym prezentowano zarejestrowane obrazy. W dalszej części pracy skoncentrowano się głównie na warunkach, w jakich zapisywany jest obraz cyfrowy. Wśród nich uwzględniono takie czynniki jak temperatura barwowa oświetlenia próbek, użycie filtra polaryzacyjnego, stosowanie złożonej metody oświetlenia przy świetle przechodzącym oraz świetle odbitym. Analizowano także błędy popełnione w ustalaniu miejsca (progu) filtracji fragmentów obrazu zajętego przez kompleks jodowo-skrobiowy.

Wynikiem pierwszego etapu badań było wyznaczenie równań regresji liniowej, według których wyznaczono zgodność przebiegu zmian indeksu skrobiowego w poszczególnych latach i w obrębie jednej metody oznaczania. Największą zgodność przebiegu wskaźnika zanotowano na podstawie analizy zdjęć cyfrowych wykonanych w technice czarno-białej oraz, nieco mniejsze wskaźniki uzyskano dla przebiegów uzyskanych aparatem cyfrowym w technice RGB. Najmniejszą zgodność przebiegu zmian wartości S zaobserwowano dla metody tradycyjnej za pomocą tablic wzorcowych. Możliwości modyfikacji obrazu, zastosowanych w drugim etapie badań, jakie daje metoda AC powodowały, że zmiana temperatury barwowej zmniejszała wartości S przy zachowaniu tych samych progów filtracji. Dotyczyło to zarówno obrazów RGB oraz obrazów otrzymanych za pomocą składowej G. Posługiwanie się obrazami składowej R dawało zawyżone wartości S, szczególnie, gdy temperatura barwowa oświetlenia była wyższa. Obrazy otrzymane ze składowej B okazały się bezużyteczne do obliczeń indeksu skrobiowego, gdyż wartości S były we wszystkich terminach zbioru bardzo zaniżone. Analiza obrazów owoców Gloster otrzymanych za pomocą filtra polaryzacyjnego dla kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji o 60° i 90° wykazała, że wartości S były istotnie niższe niż te, otrzymane z obrazów o kącie skręcenia polaryzacji 0°. Redukcja odblasków na dużej powierzchni tych owoców powodowało, ze ich termin zbioru powinien być opóźniony o 3 dni przy 30° oraz

o 8 dni przy 90°. W przypadku owoców Jonagold wygaszanie odblasków nie powodowało istotnych statystycznie różnic w ocenie wartości S. Zmiana progu filtracji względem wartości bazowej t_{120} z odchyleniem ±5 wartości nie powodowało istotnych statystycznie różnic w ocenie wartości *S*. Wartość tego odchylenia należy uznać za maksymalny dopuszczalny błąd wyznaczania progu filtracji, gdyż użycie progów o większym odchyleniu od wartości bazowej powodowało już istotne różnice w ocenie wartości wskaźnika. Dla owoców o kołowym rozpadzie skrobi (Gloster) bardziej korzystne jest użycie wyższego progu filtracji niż bazowy. Obrazy owoców o promieniowym rozpadzie skrobi powinny być filtrowane niższymi wartościami progów w celu osiągnięcia wiarygodnych wyników. Spostrzeżenia te znalazły potwierdzenie podczas analizy indeksów zbiorczych Streifa i De Jagera.

Słowa kluczowe: jabłka, indeks skrobiowy, analiza obrazu, indeks zbiorczy

THE USE OF SELECTED OPTICAL TOOLS AND COMPUTER IMAGE ANALYSIS TO THE EVALUATION OF STARCH INDEX VALUES IN APPLES

Summary

Large technological progress can be observed in modern fruit storage. It manifests itself in the large-scale use of modern facilities equipped with technologically advanced installations to maintain the controlled atmosphere (CA) or ultra-low oxygen concentration (ULO). In order to take full advantage of the opportunities offered by these storage technologies, as well as avoid costly and unpleasant confusion resulting from the use of imprecise methods of fruit maturity assessment for long-term storage, new methods for assessing the physiological status of raw material for storage in this type of facilities should also be improved.

One of the reliable methods for determining fruit maturity, based on the observation of a measurable physiological status indicator, is the starch test. Execution of this test is possible under the conditions of fruit harvesting in the orchard, because it does not require expensive equipment or complicated analyzes. The problem is still its precise marking, because in practice reference tables are used, which allow to indicate only its approximate value. In addition, such a designation is burdened with a large error resulting from the subjective evaluation of persons performing the assessment. The method does not specify in which lighting conditions an assessment should be made, what is the acceptable dispersion of the results in the entire sample being evaluated. There is therefore a need to look for objective methods to calculate this important indicator. One of them is the registration of samples and then analysis of the images obtained in order to calculate the starch index value with the smallest possible error.

The aim of the work was an attempt to develop a methodology for calculating the starch index based on image analysis recorded with available digital registration methods. In the first part of the work, comparisons were made of the interpretation of changes in the starch index value by means of traditional evaluation and commonly available methods of digital image recording.

In the 4-year research cycle, the objects were fruits of two apple varieties. During the image recording, a black and white CCD camera was used in the CB (black and white) method, a digital camera in the sRGB system and a CCD matrix (AC method), and a scanner for copying flat objects (SK). In the Traditional Assessment (OW) method, a 5-person control panel was used to judge the recorded images.

The rest of the work focuses mainly on the conditions in which the digital image is recorded. These include factors such as the color temperature of the sample illumination, the use of a polarizing filter, the use of a complex lighting method in transmitted light and reflected light. Also analyzed were mistakes made in determining the image threshold (s) of filtration of fragments of the image occupied by the iodine-starch complex.

The result of the first stage of the research was the determination of linear regression equations, according to which the course of changes in the starch index was determined in individual years and within one determination method. The highest compliance of the indicator's course was recorded on the basis of the analysis of digital photographs made in black and white technique, and slightly smaller ratios were obtained for the courses obtained with a digital camera in the RGB technique. The smallest correspondence of the course of changes in the S-value was observed for the traditional method using reference tables.

The possibilities of image modification provided by the AC method caused that the change in the color temperature decreased the S values while maintaining the same filtration thresholds. This applies to both RGB images and images obtained with the G component. Using images of the R component gave higher S values, especially when the color temperature of the lighting was higher. The images obtained from the B component turned out to be useless, because the S values were very low in all harvest times. Analysis of the Gloster fruits images obtained with a polarizing filter for $\alpha = 60°$ and 90° showed that S values were significantly lower than those obtained from images with polarization twisting angle $\alpha = 0°$. The reduction of reflections on the large surface of these fruits caused that their harvest time should be delayed by 3 days at $\alpha = 30°$ and by 8 days at $\alpha = 90°$. In the case of Jonagold fruits, the quenching of reflections did not cause statistically significant differences in the assessment of the starch index. A change in the filtration threshold in relation to the base value $t = 120$ with a deviation of ± 5 values did not cause statistically significant differences in the assessment of the value of S. The value of this deviation should be considered as the maximum permissible error of determining the filtration threshold, because the use of thresholds with a greater deviation from the base value, resulted in significant differences in the assessment of the indicator value. For variety with circular starch disintegration (Gloster) it is more preferable to use a higher filtration threshold than the base one. Fruit samples with radial starch decay should be filtered with lower threshold values in order to achieve reliable results. These observations were also confirmed by the analysis of the aggregate indices of Streif 's and De Jager's.

Key words: apples, starch index, image analysis, aggregate index