Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

w Warszawie

Instytut Nauk Ogrodniczych

Mgr inż. Andrii Kistechok

Wpływ odmian jabłoni oraz technologii przechowywania na zapewnienie surowca o wysokiej zawartości związków bioaktywnych

The influence of apple cultivars and storage technology on providing raw materials with a high content of bioactive compounds

WPŁYNĘŁO
2025 -10- 30
SEKRETARIAT INO

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

Praca wykonana pod kierunkiem:

dr hab. Dariusz Wrona, prof. SGGW

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa, Instytut Nauk Ogrodniczych

Promotor pomocniczy:

dr hab inż. Tomasz Krupa

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa, Instytut Nauk Ogrodniczych

Warszawa 2025

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam,
że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

Data 27.10.2025 r. Podpis promotora

.....

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

Data 27.10.2025 r. Podpis autora pracy Andrii Kistachok

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania wszystkim,

którzy przyczynili się do powstania niniejszej pracy,
a w szczególności:

Panu dr. hab. Dariuszowi Wronie, prof. SGGW
za wszelką pomoc, za wiarę w naukę, cierpliwość, empatię, wskazówki, za nieustanne podtrzymywanie motywacji w trakcie tworzenia niniejszej pracy i poświęcony czas.
Panu dr. hab. Tomaszowi Krupie
za wszelką pomoc, za wsparcie merytoryczne i wspólnie tworzone publikacje, za wprowadzenie do metod analizy badanych parametrów, analizy statystycznej oraz wsparcie w tworzeniu niniejszej pracy, cierpliwość, empatię, wskazówki i poświęcony czas.
Panu dr. hab. Emilianowi Piterze, prof. SGGW
za udostępnienie nowej Polskiej odmiany 'Chopin' do badań w niniejszej pracy doktorskiej.
Panu prof. dr. hab. Andrzejowi Przybyle
za udostępnienie czerwonomiąszowego klonu 'JB' do niniejszej pracy doktorskiej.

Wszytkim Kolegom i Koleżankom z Katedry Sadownictwa i Ogrodnictwa za wszelką pomoc, wsparcie i życzliwość.

Valerii, Romanowi i Rodzicom

SPIS TREŚCI

1. STRESZCZENIE 7

2. OPIS PRACY DOKTORSKIEJ 10

3. WYKAZ PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ 11

4. PRZEGLĄD LITERATURY 12

4.1. Owoce w diecie człowieka i ich wpływ na zdrowie 12

4.2. Związki bioaktywne jabłek 13

4.3. Czynniki genetyczne warunkujące jakość i wartość odżywczą jabłek 16

4.4. Fizjologiczny stan dojrzałości owoców a ich jakość i wartość odżywcza 19

4.5. Technologie przechowywania jabłek 21

4.6. Stabilność związków bioaktywnych w trakcie przechowywania owoców 24

4.7. Kierunki badań – luki poznawcze i potrzeba innowacyjnych odmian 25

5. CEL BADAŃ I HIPOTEZY BADAWCZE 27

Część I 28

WPŁYW ODMIANY I WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA JAKOŚĆ I WŁAŚCIWOŚCI PROZDROWOTNE JABŁEK 28

I.1. Materiały i metody 29

I.2. Wyniki i dyskusja 31

I.2.1. Charakterystyka jakościowa owoców w momencie zbioru 31

I.2.2. Wpływ cech odmianowych na parametry fizykochemiczne jabłek 31

I.2.3. Wpływ cech odmianowych na właściwości prozdrowotne jabłek 33

I.2.4. Podsumowanie wyników 34

Część II 36

ZMIANY WARTOŚCI ODŻYWCZEJ JABŁEK W TRAKCIE ICH DOJRZEWANIA 36

II.1. Materiały i metody 37

II.1.1. Materiał badawczy 37

II.1.2. Warunki pogodowe 37

II.1.3. Układ doświadczenia 40

II.1.4. Badane parametry 40

II.1.5. Analiza statystyczna 42

II.2. Wyniki 42

II.3. Dyskusja 60

II.2.3. Wnioski 64

Część III 65

WPŁYW WARUNKÓW PRZECHOWYWANIA NA JAKOŚĆ I WŁAŚCIWOŚCI PROZDROWOTNE JABŁEK 65
III.1. Materiały i metody 66
III.2. Wyniki i dyskusja 68
III.2.1. Wpływ warunków przechowywania na utrzymanie jakości owoców 68
III.2.2. Wpływ warunków przechowywania na właściwości odżywcze jabłek 69
III.2.3. Podsumowanie wyników 71
6 . JEDNOTEMATYCZNY CYKL PUBLIKACJI 73
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 116
8. LITERATURA 118

1. STRESZCZENIE

Celem pracy była ocena wpływu odmian jabłoni oraz zastosowanej technologii przechowywania na jakość fizykochemiczną i właściwości prozdrowotne owoców, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości związków bioaktywnych. Praca obejmowała analizę różnic odmianowych, oraz warunków przechowywania na wartość odżywczą jabłek. W badaniach wykorzystano odmiany ‘Chopin’, ‘Jonagold’, ‘Šampion’ ‘Idared’ i ‘Ligol’, a także czerwonomiąższowy klon ‘JB’.

Badania wykonano w trzech etapach. W części pierwszej określono wpływ odmiany na jakość owoców w momencie zbioru, analizując cechy fizykochemiczne takie jak zawartość ekstraktu, kwasowość i jędrność. Część druga miała charakter opisowy, obejmujący analizę składu fitochemicznego owoców różnych odmian w zależności od stopnia dojrzałości, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości polifenoli i flawonoidów oraz ich aktywności antyoksydacyjnej. W części trzeciej przeanalizowano wpływ technologii przechowywania (chłodnictwo konwencjonalne, atmosfera kontrolowana oraz DKA na jakość, trwałość i zawartość związków bioaktywnych w owocach przechowywanych przez 9 miesięcy. Całość pracy ma charakter hybrydowy – łączy badania eksperymentalne z analizą opisową, co pozwala kompleksowo ocenić wpływ czynników odmianowych i technologicznych na jakość prozdrowotną jabłek.

Stwierdzono, że odmiana jabłoni wpływa na zawartość związków prozdrowotnych, w tym polifenoli i flawonoidów. Odmiana ‘Chopin’ i klon ‘JB’ wyróżniały się wyższą aktywnością antyoksydacyjną w porównaniu z odmianami powszechnie uprawianymi w Polsce. Wykazano również, że technologia przechowywania wpływa na utrzymanie jakości owoców – przechowywanie w warunkach kontrolowanej atmosfery a zwłaszcza DKA (Dynamicznie kontrolowana atmosfera) pozwalało na znaczące ograniczenie degradacji polifenoli i utrzymanie wyższej jędrności oraz kwasowości owoców w porównaniu z metodami tradycyjnymi.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zarówno właściwy dobór odmiany, jak i zastosowanie nowoczesnych technologii przechowywania umożliwiają pozyskanie surowca o wyższej wartości odżywczej i stabilności bioaktywnych składników, co ma istotne znaczenie w rozwoju kierunku żywności funkcjonalnej oraz innowacyjnych przetworów z jabłek o udokumentowanych właściwościach prozdrowotnych.

Słowa kluczowe: jabłko, odmiana, przechowywanie, polifenole, antocyjany, jakość owoców.

SUMMARY

The aim of the study was to evaluate the effect of apple cultivars and applied storage technologies on the physicochemical quality and health-promoting properties of the fruit, with particular emphasis on the content of bioactive compounds. The work included an analysis of varietal differences and storage conditions on the nutritional value of apples.The study used the cultivars ‘Chopin’, ‘Jonagold’, ‘Šampion’, ‘Idared’, and ‘Ligol’, as well as the red-fleshed clone ‘JB’.

The research was carried out in three stages. In the first part, the effect of cultivar on fruit quality at harvest was determined by analyzing physicochemical characteristics such as extract content, acidity, and firmness. The second part was descriptive in nature and involved an analysis of the phytochemical composition of fruits of different cultivars depending on the degree of ripeness, with particular attention to the content of polyphenols and flavonoids and their antioxidant activity. In the third part, the effect of storage technology (conventional refrigeration, controlled atmosphere, and DKA—Dynamic Controlled Atmosphere) on the quality, shelf life, and content of bioactive compounds in fruits stored for nine months was analyzed.

The overall work is of a hybrid nature—it combines experimental research with descriptive analysis, allowing a comprehensive assessment of the impact of varietal and technological factors on the health-promoting quality of apples.

It was found that the apple cultivar influences the content of health-promoting compounds, including polyphenols and flavonoids. The ‘Chopin’ cultivar and the ‘JB’ clone were distinguished by higher antioxidant activity compared to cultivars commonly grown in Poland. It was also shown that the storage technology affects the maintenance of fruit quality—storage under controlled atmosphere conditions, and especially under DKA (Dynamic Controlled Atmosphere), significantly limited polyphenol degradation and maintained higher firmness and acidity of fruits compared to traditional methods.

The results confirm that both the proper selection of cultivar and the use of modern storage technologies make it possible to obtain raw material with higher nutritional value and greater stability of bioactive components, which is of significant importance for the development of functional foods and innovative apple-based products with documented health-promoting properties.

Keywords: apple, cultivar, storage, polyphenols, anthocyanins, fruit quality.

2. OPIS PRACY DOKTORSKIEJ

Celem pracy doktorskiej jest zwiększenie współpracy między środowiskiem naukowym a społeczno-gospodarczym poprzez identyfikację i ocenę surowców o wysokiej wartości odżywczej, mogących stanowić podstawę do opracowania produktów żywnościowych o właściwościach funkcjonalnych i ponadstandardowych efektach odżywczych.

Praca ma charakter hybrydowy, oparty na dwóch artykułach naukowych oraz części opisowej, stanowiącej uzupełnienie i omówienie wyników badań.

Opis sekcji badawczej rozprawy doktorskiej składa się z trzech części:

Część I – Wpływ odmiany i warunków środowiskowych na jakość i właściwości prozdrowotne jabłek.
Wyniki opisano w publikacji:
Kistechok, A., Wrona, D., Krupa, T. 2022. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture, 12(11), 1876.

Część II – Zmiany wartości odżywczej jabłek w trakcie ich dojrzewania

Część III – Wpływ warunków przechowywania na jakość i właściwości prozdrowotne jabłek.
Wyniki opisano w publikacji:
Kistechok, A., Wrona, D., Krupa, T. 2024. Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. Agriculture, 14(1), 59.

3. WYKAZ PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Lp.	Publikacja	IF[a])	Punktacja MNiSW
A	Kistechok, A., Wrona, D., Krupa, T. (2022). Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture, 12(11), 1876.	3.6	100
B	Kistechok, A., Wrona, D., Krupa, T. (2024). Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. Agriculture, 14(1), 59.	3.6	100

a – sumaryczny Impact Factor według bazy Journal Citation Reports, zgodny z rokiem ukazania się publikacji.

4. PRZEGLĄD LITERATURY

4.1. Owoce w diecie człowieka i ich wpływ na zdrowie

Owoce stanowią podstawowy element zbilansowanej diety, dostarczając naturalnych witamin, związków bioaktywnych i błonnika niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmu. Ich regularne, zróżnicowane spożycie wspiera ogólną kondycję zdrowotną i jest szeroko rekomendowane w krajowych oraz międzynarodowych wytycznych żywieniowych (Harris i in. 2023). Bogactwo przeciwutleniaczy zawartych w owocach pomaga neutralizować wolne rodniki i ograniczać ryzyko rozwoju chorób cywilizacyjnych. Naturalne cukry proste, występujące wraz z błonnikiem i wodą, czynią owoce zdrową alternatywą dla przetworzonych słodyczy, wspierając utrzymanie prawidłowej masy ciała oraz równowagi energetycznej organizmu (Agudo 2004).

Od początku XXI wieku w Polsce obserwuje się spadek spożycia tradycyjnych produktów roślinnych przy jednoczesnym wzroście konsumpcji tłuszczów, cukrów i żywności wysokoprzetworzonej, co skutkuje obniżeniem wartości odżywczej diety. Zwiększenie udziału owoców i warzyw w codziennym jadłospisie mogłoby przeciwdziałać negatywnym skutkom tych zmian, sprzyjając zachowaniu równowagi żywieniowej oraz poprawie zdrowia populacji (Agudo 2004).

Światowa Organizacja Zdrowia zaleca, aby osoby dorosłe spożywały co najmniej 400 g owoców i warzyw dziennie, co zmniejsza ryzyko chorób przewlekłych i zapewnia odpowiedni poziom składników odżywczych (WHO 2018). Zbyt niskie spożycie produktów roślinnych wiąże się ze wzrostem ryzyka wystąpienia chorób sercowo-naczyniowych, cukrzycy typu 2 i nowotworów (WHO 2006), przyczyniając się do milionów zgonów rocznie na świecie. Regularne jedzenie owoców działa przeciwzapalnie, przeciwutleniająco, ograniczając rozwój chorób cywilizacyjnych (Pomerleau i in. 2005). Badania McColl (2016) wykazały, że u osób spożywających wyższą niż zalecana ilość owoców śmiertelność z powodu chorób sercowo-naczyniowych, udaru mózgu oraz cukrzycy typu 2 jest znacznie niższa. Związki bioaktywne obecne w owocach – m.in. flawonoidy, polifenole i witamina C – wspomagają prawidłowe funkcjonowanie układu krążenia i metabolizmu, co ma znaczenie profilaktyczne w kontekście wielu schorzeń przewlekłych.

W Europie jabłka należą do najczęściej spożywanych owoców, a Polska jest jednym

z czołowych producentów tych owoców na świecie (Pereira-Lorenzo i in. 2009). Jabłka uznaje się za cenny składnik codziennego jadłospisu, ze względu na wysoką zawartość polifenoli, błonnika i witamin, wspierających układ krążenia, pokarmowy i odpornościowy (Starzec i in. 2020). Jabłka zajmują szczególne miejsce w diecie Europejczyków – są drugim najczęściej spożywanym owocem po bananach. Jak podaje raport ICI Business (2021), 'popyt na jabłka pozostanie wysoki a przewidywany poziom spożycia świeżych jabłek wyniesie 15,4 kg na osobę, co stanowi o 11% więcej niż średnia z ostatnich pięciu lat'. W Polsce, jednym z największych producentów jabłek w Europie, owoce te są powszechnie dostępne przez cały rok dzięki zaawansowanym technologiom przechowywania i konkurencyjnym cenom (ICI Business 2021).

W ostatnich latach coraz więcej badań koncentruje się na poznaniu wpływu spożycia jabłek na zdrowie człowieka, ze względu na obecność w tych owocach licznych związków bioaktywnych, który mogą zapobiegać chorobom przewlekłym (Lee 2012). Z badań De Oliveira i in. (2003) wynika, że regularne spożywanie jabłek wiąże się z mniejszym ryzykiem wystąpienia otyłości, cukrzycy, astmy oraz chorób układu sercowo-naczyniowego. Eberhardt i in. (2000) wykazali, że owoce te odznaczają się silnym działaniem przeciwutleniającym, co sprzyja ochronie komórek przed uszkodzeniami wywołanymi stresem oksydacyjnym. Natomiast z badań Yoon i Liu (2007) wynika, że zawarte w jabłkach związki fenolowe mogą łagodzić procesy zapalne i wspierać ochronę komórek piersi przed zmianami nowotworowymi.

4.2. Związki bioaktywne jabłek

Związki bioaktywne w jabłkach należą głównie do grupy polifenoli, obejmujące:

- kwasy fenolowe,
- flawonole,
- dihydrochalkony,
- antocyjany.

Wykazują one silne działanie antyoksydacyjne, co wpływa korzystnie na zdrowie człowieka, m.in. poprzez ochronę komórek przed stresem oksydacyjnym i wspomaganie profilaktyki chorób układu krążenia oraz nowotworów (Petkova i in. 2019). Kwasy fenolowe, flawonole, dihydrochalkony i antocyjany w jabłkach występują głównie w skórce, w której ich stężenie jest najwyższe, podczas gdy w miąższu obecne są w znacznie mniejszych ilościach, a w nasionach ich zawartość jest śladowa lub nieistotna (Bizjak i inn. 2013).

Kwasy fenolowe w jabłkach należą do głównych związków fenolowych o właściwościach przeciwutleniających. Występują przede wszystkim w postaci kwasów hydroksycynamonowych, takich jak kwas chlorogenowy (estryfikowana forma kwasu kawowego), a także kwas p-kumarowy, ferulowy i kawowy. W mniejszych ilościach obecne są również kwasy hydroksybenzoesowe, np. kwas galusowy i protokatechowy. Związki te znajdują się głównie w skórce owocu, gdzie stanowią znaczną część całkowitej zawartości polifenoli, wspierając właściwości prozdrowotne i antyoksydacyjne tych owoców (Acquavia i in. 2021; Alonso-Salces i in. 2001). Związki z grupy flawonoli również wykazują silne właściwości przeciwutleniające, pomagają neutralizować wolne rodniki i chronić komórki przed uszkodzeniami oksydacyjnymi (Zalega i Szostak-Węgierek 2013). Do najczęściej występujących w jabłkach flawonoli należą głównie kwercetyna i jej glikozydy.

Dihydrochalkony to jedna z głównych grup związków fenolowych występujących w jabłkach, obok flawonoli i antocyjanin (Jakobek i in. 2013). Do najważniejszych przedstawicieli należą florydzyna i jej pochodne. Związki z tej grupy wykazują silne działanie przeciwutleniające oraz mogą wpływać korzystnie na metabolizm węglowodanów poprzez hamowanie aktywności α-glukozydazy. Związki te występują głównie w skórce jabłek i liściach jabłoni, a ich zawartość zależy od odmiany i warunków uprawy (Starowicz i in. 2020).

Antocyjany w jabłkach należą do grupy polifenoli o silnych właściwościach przeciwutleniających. Chronią komórki organizmu przed uszkodzeniami oksydacyjnymi, przeciwdziałają degradacji DNA oraz wspierają profilaktykę chorób układu sercowo-naczyniowego i nowotworów (Ambrożewicz i Skrzydlewska 2009). Najwięcej antocyjanów występuje w czerwonych odmianach jabłek, głównie w skórce, jednak w przypadku czerwonomiąższowych odmian, takich jak ‘Redlove’, ‘Red Moon’ czy ‘Baya Marisa’, antocyjany obecne są również w miąższu owocu, co zwiększa ich wartość prozdrowotną (Słupski i in. 2018; Espley i in. 2019). Antocyjany wpływają na ograniczenie stresu oksydacyjnego, obniżenie poziomu cholesterolu LDL oraz hamowanie procesów zapalnych, co korzystnie oddziałuje na funkcjonowanie układu krążenia. Wykazano również ich zdolność do modulowania aktywności enzymów detoksykacyjnych i regulacji ekspresji genów związanych z mechanizmami obronnymi komórek (He i Giusti 2010; Tsao 2010). Działanie prozdrowotne antocyjanów jest wynikiem współdziałania z innymi fitozwiązkami i składnikami odżywczymi obecnymi w owocach, takimi jak flawonole, kwasy fenolowe czy witamina C. Wspólne

występowanie tych związków wzmacnia całkowitą zdolność antyoksydacyjną jabłek i sprzyja ochronie komórek przed stresem oksydacyjnym (Wojdyło i in. 2008; Boyer i Liu 2004).

Mechanizmy działania przeciwutleniającego i przeciwzapalnego opierają się na obecności w jabłkach licznych związków fitochemicznych, w tym flawonoidów (takich jak pochodne kwercetyny, katechina, epikatechina), kwasu chlorogenowego oraz florydzyny (Boyer i Liu 2004). Substancje te wykazują silne właściwości antyoksydacyjne, polegające na neutralizowaniu reaktywnych form tlenu (wolnych rodników), które w nadmiarze prowadzą do stresu oksydacyjnego, uszkodzeń DNA, lipidów i białek (Eberhardt i in. 2000). Działając jako donory elektronów, związki aktywnie stabilizują wolne rodniki, zapobiegając ich szkodliwym reakcjom łańcuchowym (Wolfe i in. 2003). W efekcie zmniejszają proces utleniania lipidów (np. cholesterolu LDL), co chroni układ sercowo-naczyniowy przed rozwojem miażdżycy. Mechanizm przeciwzapalny natomiast wiąże się z hamowaniem ekspresji mediatorów zapalnych i enzymów prozapalnych (np. cyklooksygenazy i lipooksygenazy), modulacją odpowiedzi immunologicznej oraz redukcją stresu oksydacyjnego, który stanowi jeden z kluczowych czynników aktywujących proces zapalny. Dzięki synergicznemu działaniu związków aktywnych chronią one komórki, tkanki i narządy człowieka przed degeneracją oraz wspierają utrzymanie homeostazy organizmu (Boyer i Liu 2004).

Zawartość związków bioaktywnych w jabłkach zależy od wielu czynników, zarówno genetycznych, jak i środowiskowych oraz technologicznych. Znaczenie ma przede wszystkim odmiana jabłoni, której cechy genetyczne determinują poziom cukrów redukujących, witaminy C (kwasu L-askorbinowego) oraz innych substancji chemicznie czynnych w owocach. Owoce odmian ‘Idared’i ‘Red Elstar’ cechują się wysoką zawartością kwasu askorbinowego, podczas gdy ‘Gloster’ i ‘Jonagold’ zawierają znacznie mniejsze ilości tego związku (Dobrzański i in. 2000).

Na poziom związków bioaktywnych wpływają również czynniki środowiskowe, takie jak nasłonecznienie, temperatura i wilgotność powietrza w okresie wegetacyjnym. Wyższa ekspozycja na promieniowanie słoneczne sprzyja akumulacji antocyjanów i flawonoli w skórce jabłek, co nadaje im intensywniejsze zabarwienie oraz zwiększa ich potencjał przeciwutleniający (Jakobek 2015). Z kolei nadmierna wilgotność i niskie temperatury mogą ograniczać syntezę polifenoli oraz prowadzić do pogorszenia jakości sensorycznej owoców.

Nadmierne stosowanie nawozów azotowych może obniżać zawartość witaminy C i związków fenolowych, podczas gdy nawożenie potasowe i wapniowe sprzyja ich utrzymaniu na wyższym poziomie (Kviklys i in. 2012). Wpływ na skład bioaktywny owoców ma także stopień dojrzałości fizjologicznej w okresie zbioru – jabłka zebrane zbyt wcześnie charakteryzują się mniejszą zawartością fenoli i antocyjanów, natomiast zebrane zbyt późno wykazują większe straty witamin w wyniku przemian metabolicznych (Kader 1983).

Na zawartość związków bioaktywnych oddziałują również czynniki technologiczne, takie jak sposób i długość przechowywania oraz uszkodzenia mechaniczne owoców powstałe podczas zbioru lub sortowania, które mogą przyspieszać utratę witamin i fenoli (Dobrzański i in. 2000).

4.3. Czynniki genetyczne warunkujące jakość i wartość odżywczą jabłek

Różnice w jakości i zawartości związków bioaktywnych w owocach jabłoni wynikają z uwarunkowań genetycznych poszczególnych odmian. Cechy genetyczne determinują jakość, profil sensoryczny, skład chemiczny, oraz zdolność przechowalniczą owoców. Genotyp decyduje między innymi o zawartości cukrów, kwasów organicznych, fenoli i flawonoidów w owocach, a także o odporności drzew na czynniki stresowe i chorobotwórcze. Odmiany tradycyjne, takie jak ‘Alwa’ czy ‘Šampion’, cechują się wysoką wytrzymałością drzew na mróz oraz dobrą jakością jabłek, które znajdują zastosowanie zarówno w spożyciu deserowym, jak i w przetwórstwie. Z kolei odmiany, np. ‘Ligol’, ‘Ligolina’ czy ‘Gala Natali’, charakteryzują się regularnym owocowaniem, dużą plennością oraz atrakcyjnym wyglądem owoców, odpowiadającym wymaganiom współczesnego rynku konsumenckiego. Wśród odmian wyróżnia się także formy odporne na choroby, takie jak ‘Melfree’ czy ‘Free Redstar’, wykazujące wysoką odporność na parcha jabłoni i mączniaka prawdziwego, co pozwala ograniczyć stosowanie chemicznej ochrony roślin. W obrębie gatunku spotyka się również duże zróżnicowanie w zakresie barwy i smaku owoców – od jasnozielonych (‘Chopin’), przez żółte (‘Golden Dream’), po intensywnie czerwone (‘Czerwony Lampert’, ‘Rubinstar’) – oferujących szerokie spektrum walorów smakowych od słodkich po winno-kwaskowate (Kruczyńska, 2013).

Jabłka są produktem o umiarkowanej wartości energetycznej i dużej wartości dietetycznej. Zawierają przeciętnie 83–89% wody, 10–17% węglowodanów (głównie fruktozę, glukozę i sacharozę), niewielkie ilości białka (ok. 0,2–0,3%) i tłuszczu (<0,4%) (Lee 2012). Są źródłem błonnika pokarmowego (ok. 0,5–0,8%), pektyn, witaminy C

(zwykle 1–15 mg/100 g, zależnie od odmiany i pochodzenia) oraz związków mineralnych – zwłaszcza potasu, wapnia, magnezu i sodu (Kiczorowska 2009). Skład chemiczny i zawartość nutraceutyków zależy od odmiany, warunków uprawy i fragmentu owocu: skórka gromadzi zwykle 2–3 razy więcej minerałów i polifenoli niż miąższ. Szczególnie dużo polifenoli, w tym flawonoidów (np. kwercetyna, epikatechina, procyjanidyny), występuje w odmianach o intensywnym zabarwieniu skórki. Odmiany 'Šampion', 'Jonagold' czy 'Cortland' cechują się wysoką zawartością ekstraktu refraktometrycznego i cukrów, natomiast 'Rajka' i 'Rubinola' – wysoką zawartością potasu i magnezu, a 'Šampion'– wysoką zawartością witaminy C (Pyryt i Wrześniak 2011). Wartości przedstawione w tabeli 1 odnoszą się do zawartości składników w 100 g świeżej masy owocu.

Tabela 1. Orientacyjny skład odżywczy wybranych odmian jabłek (na 100 g świeżej masy)

Odmiana	Woda [%]	Węglowodany [g]	Wit. C [mg]	K [mg]	Ca [mg]	Mg [mg]	Na [mg]
Gala	84.6	9.8	1.2	~90	4	2.7	0.9
Ligol	89.5	9.4	1.3	~73	5	2.4	0.9
Jonagold	86.4	9.2	1.2	~104	2	3.2	0.9
Rubin	85.1	8.8	0.9	~91	3	2.9	1.0
Šampion	85.9	8.9	6.6	~117	2	2.7	0.9
Cortland	88.3	7.2	0.7	~91	3	2.9	0.9
Rajka	–	–	–	~ 103	15	3.8	6.3
Rubinola	–	–	–	~ 103	12	5.1	10

Źródło: opracowanie własne na podstawie Pyryt i Wrześniak 2011; Kiczorowska 2009; Lee 2012.

Genotyp jabłoni warunkuje zawartość składników odżywczych w owocach, tj. fenoli, flawonoidów, cukrów i kwasów organicznych. Zawartość nutraceutyków determinuje zarówno jakość sensoryczną owoców, jak i ich odporność fizjologiczną oraz podatność na czynniki stresowe (Ahmadi-Afzadi 2012). Odmiany o wyższej zawartości fenoli i pochodnych kwercetyny wykazują wyższą odporność na infekcje powodowane przez patogeny, zwłaszcza przez grzyb *Penicillium expansum*, co potwierdza związek między składem chemicznym a odpornością genetyczną roślin (Sanzani i in. 2009). Zawartość witaminy C i kwasu glutaminowego, jest regulowana przez geny odpowiedzialne za syntezę etylenu i dojrzewanie owoców, co wpływa na stabilność tych związków po zbiorze (Davey i in. 2007). Odmianowo uwarunkowana struktura skórki,

bogata w kwas ursolowy i inne związki fenolowe, wzmacnia naturalną barierę ochronną jabłka i ogranicza przenikanie patogenów i degradację chemiczną miąższu (McGhie i in. 2005).

Porównując zawartość związków bioaktywnych i podstawowe parametry jakościowe owoców, zauważono wyraźne zróżnicowanie w ich zawartości między odmianami jabłoni, co powiązane jest z ich pochodzeniem (Brown i Harvey 1971). Odmiany typu azjatyckiego, takie jak ‘Fuji’, charakteryzują się wysoką zawartością cukrów i niską kwasowością przy jednocześnie dużej jędrności oraz wysokiej trwałości przechowalniczej (Guyot i in. 2002). Z kolei odmiany europejskie, np. ‘Elstar’ czy ‘Jonagold’, wykazują większą kwasowość i umiarkowaną zawartość cukrów, co przekłada się na bardziej orzeźwiający smak oraz mniejszą twardość owoców (Janick i Sansavini, 1997). W odmianach ‘Braeburn’ i ‘Pink Lady’, charakteryzujących się korzystnym stosunkiem cukrów do kwasów, stwierdzono wyrazisty, zrównoważony smak jabłek. Dodatkowo odmiany te cechują się dużą jędrnością i chrupkością, co odpowiada współczesnym wymaganiom konsumentów z rynku europejskiego (Costa i in. 2004). Poza podstawowym składem odżywczym różnice pomiędzy odmianami dotyczą także zawartości wtórnych metabolitów, tj. polifenoli, flawonoidów czy antocyjanów, które warunkują właściwości prozdrowotne owoców i mogą stanowić kryterium selekcji w nowych programach hodowlanych (Treutter, 2001).

Celem hodowli jabłoni jest poprawa jakości owoców, nie tylko pod względem ich trwałości a także cech prozdrowotnych. Rezultatem prac jest otrzymanie odmian o owocach z podwyższoną zawartością związków bioaktywnych i składników odżywczych. Dzięki wieloletnim badaniom hodowlanym udało się wyselekcjonować genotypy charakteryzujące się podwyższoną zawartością cukrów, korzystną z punktu widzenia walorów smakowych, a także wyższą zawartością witaminy C oraz związków fenolowych. Na przykład odmiany ‘Orpheus’ i ‘Šampion’ wyróżniają się umiarkowanie wysoką zawartością ekstraktu refraktometrycznego (10,5–10,8%), a odmiany ‘Vasilisa’ oraz ‘Fortuna’ charakteryzują się zwiększoną ilością witaminy C (powyżej 10 mg/100 g ś.m.), co czyni je cennym materiałem wyjściowym do dalszej hodowli (Prichko 2020). Selekcja odmian o podwyższonej zawartości związków polifenolowych, takich jak ‘Margo’ czy ‘Vasilisa’, wpływa na wzrost ich potencjału antyoksydacyjnej, dzięki czemu nowe odmiany łączą atrakcyjny wygląd z wysoką wartością odżywczą (Prichko 2020).

4.4. Fizjologiczny stan dojrzałości owoców a ich jakość i wartość odżywcza

Fizjologiczna dojrzałość w okresie zbioru jabłek określana jest terminem ‘dojrzałości zbiorczej’. To etap, w którym owoce klimakteryczne (jabłka, gruszki, banany itp.) osiągają zdolność do dojrzewania po zbiorze. Oznacza to, że na skutek wzrostu aktywności syntezy etylenu nastąpiła inicjacja procesów biochemicznych odpowiedzialnych za dojrzewanie owoców, czego efekty widoczne są w trakcie przechowywania jabłek. Z kolei ‘dojrzałość konsumpcyjna’ oznacza okres, gdy owoce osiągną już odpowiedni wygląd, smak i teksturę, czyli uzyskają pełnię walorów konsumpcyjnych jakie oczekują konsumenci (Mattheis 2016). W każdej fazie dojrzewania owoców zachodzą intensywne zmiany fizjologiczne i biochemiczne, które decydują o ich jakości i wartości odżywczej. W trakcie dojrzewania po zbiorze zwiększające się tempo oddychania owoców, osiąga tzw. maksimum klimakteryczne, po którym następuje stopniowe starzenie się tkanek i dalszy spadek jędrności. Rozkład skrobi do cukrów prostych powoduje wzrost zawartości ekstraktu i słodkości jabłek. Jednocześnie dochodzi do degradacji chlorofilu i uwidocznienia się karotenoidów odpowiadających za żółtą barwę skórki. Autokatalityczna synteza etylenu i wzrost jego zawartości przyspiesza procesy dojrzewania, wpływając na mięknięcie miąższu oraz intensyfikację charakterystycznego aromatu i smaku jabłek (Rusnak 2013).

Termin zbioru jabłek ma wpływ na ich jędrność, kwasowość, barwę zasadniczą skórki oraz barwę rumieńca, skład i zawartość cukrów oraz związków fenolowych (Shewa i in. 2022). Zbyt wczesny zbiór skutkuje mniejszą jędrnością w trakcie przechowywania, ponieważ w miarę dojrzewania następuje aktywacja enzymów hydrolitycznych, w tym poligalakturonazy, która rozkłada łańcuchy pektynowe w ścianach komórkowych, prowadząc do degradacji struktury pektyn i utraty spoistości tkanki (Gwanpua i in. 2016). Wraz z dojrzewaniem owoce wykazują stopniowy spadek kwasowości, co skutkuje łagodniejszym, mniej kwaśnym smakiem jabłek (Kvikliene i in. 2006). Dodatkowo, wraz z postępem dojrzewania, w wyniku hydrolizy skrobi, wzrasta zawartość cukrów prostych, co wpływa na wyczuwalny przez konsumentów wzrost słodkości owoców. Wzrost zawartości cukrów prostych i sacharozy w połączeniu ze spadkiem kwasowości, są odzwierciedlone w stosunku cukrów do kwasów, który stanowi jeden z głównych wskaźników optymalnej dojrzałości konsumpcyjnej jabłek, poza ich jędrnością (Kingston 1992). Barwa zasadnicza skórki jabłka ulega zmianie w wyniku degradacji chlorofilu, która zachodzi w trakcie dojrzewania owoców, prowadząc do

uwidocznienia żółtego odcienia skórki (barwniki karotenoidowe). Z kolei synteza antocyjanów, odpowiadających za zabarwienie rumieńca, zachodzi głównie przed zbiorem i zależy od stadium dojrzałości owoców oraz warunków świetlnych i temperaturowych (Lang i Hübert 2012). Ponadto zawartość związków fenolowych, takich jak flawonole, flawan-3-ole (katechiny, epikatechiny) oraz — w przypadku odmian o czerwonym miąższu — antocyjany, wpływa zarówno na właściwości przeciwutleniające, jak i na zabarwienie miąższu. Ich ilość maleje wraz z wydłużaniem okresu dojrzewania i przechowywania, co prowadzi do obniżenia wartości prozdrowotnej owoców (Mehinagić i in. 2006).

Według Mohebi i in. (2017) jabłka zebrane przed osiągnięciem dojrzałości zbiorczej mają niską zawartość związków fenolowych i niższy potencjał antyoksydacyjny, efektem czego ich wartość prozdrowotna oraz jakość ulega szybkiemu pogorszeniu w okresie przechowywania. Również Mosel i Hermann (1974) dowodzą, że owoce zebrane zbyt wcześnie, pomimo że charakteryzują się wyższą jędrnością, wykazują szybszy spadek zawartości związków bioaktywnych w trakcie przechowywania. Z kolei Begić-Akagić i in. (2011) stwierdzili, że całkowita zawartość związków fenolowych w jabłkach podczas przechowywania w temperaturze 1°C utrzymuje się na względnie stałym poziomie, z wyjątkiem odmian ‘Pink Lady’ i ‘Paradija’, u których odnotowano spadek zawartości tych związków. Natomiast zbyt późny zbiór owoców skutkuje szybszą utratą masy oraz jędrności, co pogarsza ich jakość sensoryczną. Owoce takie cechują się początkowo wysoką zawartością polifenoli i wyższą aktywnością antyoksydacyjną (Farooq i Khan 2012). Optymalny termin zbioru pozwala zachować równowagę między jakością a zdolnością przechowalniczą jabłek, gwarantując utrzymanie zarówno parametrów sensorycznych, jak i wysoką zawartość związków bioaktywnych podczas długiego przechowywania (Mohebi i in. 2017).

Jednym z parametrów oceny dojrzałości jabłek jest pomiar jędrności miąższu, który stanowi wiarygodny wskaźnik zmian fizjologicznych zachodzących w owocach (Abbott, 1999). Pomiar ten tradycyjnie wykonuje się przy użyciu testera Magness-Taylor’a, określającego maksymalną siłę potrzebną do przebicia miąższu trzpieniem o średnicy 11 mm (Dobrzański i in. 2000). Obecnie coraz częściej stosuje się nowoczesne urządzenia pomiarowe, takie jak testery Instron czy Fruit Texture Analyzer, które pozwalają na bardziej precyzyjną ocenę właściwości mechanicznych owoców. Wyniki pomiarów jędrności wyrażane jako moduł sprężystości (MPa) odzwierciedlają stan fizjologicznej dojrzałości owocu — jabłka o wysokich wartościach modułu (powyżej 5

MPa) są typowe dla owoców zebranych w stadium dojrzałości zbiorczej, natomiast wartości niższe (1–2 MPa) świadczą o postępującym dojrzewaniu i utracie jędrności miąższu podczas przechowywania (Dobrzański i in., 2000). Dobrzański i in. (2000) wykazali, że po okresie chłodniczego przechowywania jędrność jabłek spada średnio o połowę w porównaniu z wartością uzyskaną w momencie zbioru, przy czym różnice te są zależne od odmiany oraz warunków przechowywania.

Dodatkowym kryterium oceny dojrzałości jest zróżnicowanie jędrności między klasami wybarwienia owoców, które ustala się w momencie zbioru. Zależność ta wynika z faktu, że owoce o intensywniejszym wybarwieniu są zazwyczaj bardziej dojrzałe, a tym samym mniej jędrne (Rutkowski i Konopacka 2001).

Spadek jędrności jest wynikiem zmian w strukturze komórek miąższu, degradacji pektyn oraz utraty turgoru komórek, co powoduje zmniejszenie modułu sprężystości tkanek. Dobrzański i in. (2006) wykazali, że w miarę dojrzewania jabłek moduł sprężystości obniża się z poziomu około 5,5–6,0 MPa do 3,5–4,0 MPa, co odpowiada obserwowanym zmianom wartości siły przebicia w testach penetrometrycznych. W praktyce przyjmuje się, że spadek jędrności poniżej 50 N oznacza osiągnięcie dojrzałości konsumpcyjnej, po której owoce nie nadają się do długotrwałego przechowywania (Lange i Ostrowski 1992). Różnice te są wykorzystywane do klasyfikacji owoców według stopnia dojrzałości oraz do prognozowania ich trwałości w obrocie handlowym i podczas transportu (Dobrzański i in. 2006).

4.5. Technologie przechowywania jabłek

Podstawowym celem przechowywania jabłek jest utrzymanie ich w stanie możliwie najmniej zmienionym przez jak najdłuższy okres po zbiorze. Jabłka są organizmami żywymi, które po zerwaniu nadal oddychają, zużywając tlen i uwalniając dwutlenek węgla, wodę oraz energię cieplną (Lange i Ostrowski 1992). Dlatego proces przechowywania ma za zadanie spowolnić zachodzące w jabłkach przemiany metaboliczne poprzez zapewnienie odpowiednich warunków przechowalniczych – przede wszystkim niskiej temperatury (zazwyczaj 0–4°C) oraz wysokiej wilgotności względnej (85–90%) (Ircha 2005). Takie warunki ograniczają utratę masy owoców, zmniejszają ryzyko wystąpienia chorób grzybowych oraz zaburzeń fizjologicznych, dzięki czemu owoce zachowują walory smakowe i jakość handlową. Efektywne przechowywanie wymaga również właściwej izolacji cieplnej budynku, aby

zminimalizować straty i zyski ciepła oraz utrzymać stabilne parametry powietrza, co jest kluczowe dla jakości i trwałości przechowywanych jabłek (Drozdowicz 1969).

Tradycyjne metody przechowywania obejmują chłodnictwo konwencjonalne oraz przechowywanie w atmosferze kontrolowanej (KA). W chłodnictwie konwencjonalnym podstawowym czynnikiem przedłużającym trwałość owoców jest utrzymanie niskiej temperatury i odpowiedniej wilgotności (0–4°C, 85–90%) (Kupferman 1997). Jeszcze lepsze efekty daje przechowywanie w atmosferze kontrolowanej, które polega na regulacji składu gazowego powietrza w komorze – głównie poprzez obniżenie stężenia tlenu (O_2) do 1–3% oraz podwyższenie zawartości dwutlenku węgla (CO_2) do 1–3%. Takie warunki znacząco spowalniają dojrzewanie jabłek, ograniczają rozwój chorób fizjologicznych i grzybowych oraz pozwalają wydłużyć okres przechowywania w porównaniu z chłodnictwem konwencjonalnym.

Technologia ULO (Ultra Low Oxygen) stanowi nowoczesne rozwiązanie w przechowywaniu jabłek, które pozwala znacząco wydłużyć ich trwałość i zachować wysoką jakość po zbiorach (Koricanac i in. 2020). Zawartość tlenu w komorach chłodniczych obniżana jest do około 0,8–1%, przy jednoczesnym utrzymaniu temperatury na poziomie 1–1,5°C i wilgotności względnej około 90% (Awad i De Jager 2000). Tak ograniczony dostęp tlenu spowalnia procesy oddychania owoców i aktywność enzymatyczną, co skutkuje zahamowaniem rozkładu związków biologicznie czynnych, takich jak kwas ascorbinowy czy polifenole (Kader 2002). Koricanac i in. (2020) wykazali, że jabłka odmiany ‘Golden Delicious’ przechowywane w atmosferze ULO zachowują wyższą zawartość związków fenolowych, flawonoidów oraz większą aktywność antyoksydacyjną w porównaniu z owocami przechowywanymi w atmosferze normalnej (NA). Jednocześnie, zdaniem De Smedt i in. (1998), owoce tak przechowywane charakteryzują się mniejszą utratą masy i wyższą jędrnością, co wynika z wolniejszej degradacji pektyn w ścianach komórkowych. Technologia ULO stanowi kluczowe narzędzie w nowoczesnym sadownictwie, umożliwiające utrzymanie wartości odżywczych, struktury i walorów sensorycznych jabłek przez wiele miesięcy po zbiorze (Leja i in. 2001).

Dynamicznie kontrolowana atmosfera (DKA) to najnowsza technologia przechowywania jabłek, która opiera się na aktywnym regulowaniu poziomu tlenu w komorze chłodniczej w oparciu o fizjologiczne reakcje owoców. W odróżnieniu od tradycyjnej kontrolowanej atmosfery (KA), w której stężenie O_2 utrzymuje się na ‘bezpiecznym’ poziomie 2–3%, w DKA poziom tlenu obniżony jest do wartości

minimalnych – tuż przed momentem rozpoczęcia beztlenowej fermentacji w komórkach – co skutecznie hamuje procesy oddychania, aktywację enzymów syntezy etylenu i rozkład pektyn czy wtórnych metabolitów (DeLong i in. 2004). Monitorowanie reakcji owoców na obniżone stężenie tlenu odbywa się za pomocą różnych metod. W technologii HarvestWatch kluczowy jest pomiar fluorescencji chlorofilu, który w czasie rzeczywistym sygnalizuje stres tlenowy, umożliwiając precyzyjne dostosowanie poziomu tlenu do bezpiecznego zakresu dla jabłek.

W tradycyjnych technologiach przechowalniczych w celu ograniczenia rozwoju chorób przechowalniczych często stosowano preparaty chemiczne, np. środki hamujące produkcję etylenu lub rozwój pleśni. Zastosowanie DKA pozwala jednak uzyskać podobny efekt fizjologiczny – utrzymać wysoką jędrność i jakość jabłek – bez konieczności stosowania dodatkowych środków chemicznych, co czyni tę metodę atrakcyjną również dla producentów ekologicznych (Watkins 2008).

Podwyższenie temperatury powietrza powyżej 4–5°C podczas przechowywania powoduje intensyfikację oddychania i przyspiesza dojrzewanie, co prowadzi do szybszej utraty kwasów organicznych, mięknięcia miąższu oraz pogorszenia jędrności owoców (Prange
i Wright 2023). Długotrwałe przechowywanie w warunkach powyżej 8–10°C może skutkować przedwczesnym starzeniem się jabłek i rozwojem procesów gnilnych. Z kolei zbyt niskie temperatury (poniżej 0°C) mogą wywoływać zaburzenia chłodowe, takie jak brunatnienie miąższu, rozpad chłodowy czy pojawienie się uszkodzeń skórki (Prange i Wright 2023). Obniżenie zawartości tlenu w atmosferze kontrolowanej (KA) spowalnia intensywność procesów metabolicznych w tkankach owoców oraz ogranicza biosyntezę etylenu, co w efekcie opóźnia dojrzewanie i redukuje aktywność enzymatyczną prowadzącą do degradacji składników odżywczych i utraty jędrności (Fidler i in. 1973). Dodatkowo, dynamiczna atmosfera kontrolowana (DKA) umożliwia precyzyjne dostosowanie poziomu tlenu w komorze do reakcji fizjologicznych owoców, co pozwala ograniczyć zużycie energii i zmniejszyć ryzyko wystąpienia zaburzeń chłodowych (Kittemann i in. 2015). W praktyce przechowalniczej coraz częściej stosuje się również inhibitor etylenu 1-MCP (1-metylocyklopropen), który wiąże się z receptorami etylenu w tkankach owoców, blokując jego działanie. Dzięki temu możliwe jest spowolnienie procesów dojrzewania, ograniczenie mięknięcia miąższu oraz utrzymanie wysokiej jakości jabłek przez dłuższy czas (Watkins 2008).

4.6. Stabilność związków bioaktywnych w trakcie przechowywania owoców

Podczas przechowywania jabłek dochodzi do zmian w zawartości związków bioaktywnych, w tym polifenoli i witaminy C. Zawartość tych składników zależy od odmiany jabłek, a także od warunków, w jakich są przechowywane. Temperatura, skład atmosfery i okres przechowywania determinują procesy dojrzewania w jabłkach, czego efektem są znaczne różnice w poziomie wtórnych metabolitów po przechowywaniu (Grajek 2007). Badania wykazały, że w trakcie przechowywania świeżych jabłek zawartość związków polifenolowych może ulegać obniżeniu o około 30–35% w zależności od odmiany oraz warunków przechowalniczych (Czerwonka i Waszkiewicz-Robak 2009). Z kolei zawartość witaminy C, ściśle związanej z aktywnością przeciwutleniającą, również zmniejsza się w miarę wydłużania okresu przechowywania, co potwierdzają wcześniejsze badania nad wpływem warunków przechowywania na składniki antyoksydacyjne świeżych owoców (Proteggente i in. 2002). Ogólnie, przechowywanie jabłek prowadzi do stopniowego spadku zdolności przeciwutleniającej, będącego konsekwencją degradacji polifenoli i witaminy C (Grajek 2007).

Na degradację bioaktywnych składników jabłek wpływ mają czynniki środowiskowe katalizujące aktywność enzymów, a tym samym wpływające na szybkość reakcji chemicznych. Dostęp tlenu inicjuje reakcje utleniania fenoli, prowadząc do powstawania reaktywnych chinonów i brunatnych pigmentów, co skutkuje utratą jakości sensorycznej i odżywczej owocu (Walker i Ferrar 1998). Wysoka temperatura przyspiesza aktywność enzymów oksydacyjnych, takich jak polifenolooksydaza (PPO) i peroksydaza (POX), które katalizują przemiany fenoli i nasilają proces brązowienia podczas przechowywania (Hutabarat i Halbwirth 2019). Długotrwałe przechowywanie sprzyja stopniowej degradacji związków fenolowych w jabłkach poprzez kumulację reaktywnych form tlenu (ROS) oraz utlenianie enzymatyczne (Suzuki i in. 2012). Aktywność enzymów PPO i POX, które wykorzystują tlen i nadtlenek wodoru jako czynniki utleniające, jest kluczowa dla tempa degradacji polifenoli, a jej intensywność zależy od odmiany jabłka oraz warunków przechowywania (Hutabarat i Halbwirth 2019).

Technologie przechowywania wpływają na zachowanie bioaktywności jabłek. Przechowywanie w niskim stężeniu tlenu w warunkach KA ogranicza procesy utleniania i spowalnia degradację związków fenolowych, co pozwala na utrzymanie wysokiej aktywności przeciwutleniającej owoców (Anese i in. 2020). Z kolei zastosowanie technologii DKA i ULO umożliwia jeszcze dokładniejsze kontrolowanie poziomu tlenu,

co efektywnie stabilizuje poziom antocyjanów i kwasu askorbinowego podczas długoterminowego przechowywania (Bekele i in. 2016). Awad i De Jager (2000) wskazują, że zastosowanie 1-MCP (1-metylocyklopropenu) skutecznie hamuje dojrzewanie i procesy enzymatyczne odpowiedzialne za utratę bioaktywnych związków, w tym polifenoli. Związek ten jest inhibitorem etylenu, który blokuje jego receptory w tkankach owoców, spowalniając procesy dojrzewania i starzenia się jabłek podczas przechowywania. Przechowywanie w warunkach chłodniczych, szczególnie w połączeniu z kontrolowaną atmosferą, dodatkowo wspomaga trwałość związków fenolowych oraz właściwości przeciwutleniających, minimalizując degradację antocyjanów i flawonoidów (Li i in. 2008). Integracja wymienionych technologii stanowi skuteczną strategię przedłużania trwałości jabłek przy jednoczesnym zachowaniu ich wysokiej wartości bioaktywnej (Thewes i in. 2017).

4.7. Kierunki badań – luki poznawcze i potrzeba innowacyjnych odmian

Obecnie brakuje kompleksowych danych naukowych, które w sposób spójny łączyłyby odmianę jabłek, termin zbioru, zastosowaną technologię przechowywania oraz stabilność związków bioaktywnych. Większość dostępnych badań koncentruje się na pojedynczych aspektach tych zagadnień, np. wpływie konkretnej technologii chłodzenia na utrzymanie zawartości polifenoli czy zmianach jakościowych w czasie przechowywania wybranych odmian (Drogoudi i in. 2008). Brak jednak zintegrowanego podejścia umożliwiającego pełne zrozumienie interakcji między czynnikami genetycznymi (odmiana), agrotechnicznymi (termin zbioru) i technologicznymi (sposób przechowywania), które wspólnie determinują trwałość i aktywność biologiczną składników prozdrowotnych jabłek.

W obliczu rosnącego zainteresowania prozdrowotnymi właściwościami żywności istnieje potrzeba poszukiwania odmian jabłek o zwiększonej zawartości polifenoli oraz lepszej stabilności tych związków w trakcie przechowywania. Polifenole, w tym flawonole, flawan-3-ole, kwasy fenolowe i antocyjany, wykazują silne działanie przeciwutleniające i wspierają profilaktykę chorób degeneracyjnych (Bhagwat i in. 2011). Jednak ich zawartość w owocach zależy od wielu czynników, takich jak odmiana, warunki uprawy i sposób przechowywania (Francini i Sebastiani 2013). Badania Maragò i in. (2015) wykazały, że podczas przechowywania dochodzi do znacznych strat związków fenolowych, co negatywnie wpływa na aktywność antyoksydacyjną jabłek. Dlatego selekcja i hodowla odmian charakteryzujących się większą zawartością oraz

stabilnością polifenoli podczas długotrwałego przechowywania stanowi kluczowy kierunek dalszych badań (Rupasinghe i in. 2010).

Integracja wiedzy z zakresu fizjologii pozwala poznać mechanizmy dojrzewania, starzenia się i stresu oksydacyjnego, które determinują trwałość i walory sensoryczne jabłek (Paul i Pandey 2013). Chemia żywności umożliwia identyfikację zmian w składnikach bioaktywnych, takich jak kwasy organiczne, polifenole i cukry, które są bezpośrednio związane z wartością odżywczą i smakiem owoców (Bondonno i in. 2017). Z kolei technologia przechowalnictwa rozwija metody minimalizujące utratę jakości poprzez kontrolę składowych atmosfery, temperatury czy stosowanie inhibitorów etylenu, takich jak 1-metylocyklopropen (1-MCP) (Zheng i in. 2024). Połączenie tych dziedzin wiedzy pozwala opracowywać strategie ograniczające degradację wtórnych metabolitów i zachowujące integralność błon komórkowych w czasie przechowywania. Zintegrowane podejście wspiera rozwój zaawansowanych metod przechowywania, takich jak chłodzenie w atmosferze kontrolowanej, które utrzymuje aktywność enzymatyczną i równowagę metaboliczną owoców (Gago i in. 2016).

5. CEL BADAŃ I HIPOTEZY BADAWCZE

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu odmiany jabłoni oraz zastosowanej technologii przechowywania na jakość fizykochemiczną i właściwości prozdrowotne owoców, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości i stabilności związków bioaktywnych (m.in. polifenoli, flawonoidów, kwasów fenolowych). Celem badań była ocena i wskazanie potencjału surowców pochodzących z różnych odmian jabłoni jako surowców o wysokich właściwościach odżywczych i prozdrowotnych, które mogą znaleźć zastosowanie w przemyśle spożywczym — w szczególności w tworzeniu produktów o cechach żywności funkcjonalnej, wykazujących ponadstandardowe efekty odżywcze i zdrowotne.

Hipotezy badawcze

1. Zawartość związków bioaktywnych w owocach jabłoni zależy od cech genetycznych odmiany.
2. Technologia przechowywania determinuje stabilność związków bioaktywnych oraz jakość owoców.
3. Zastosowanie odpowiedniego doboru odmiany i technologii przechowywania umożliwia uzyskanie surowca o wyższej wartości odżywczej i stabilności związków bioaktywnych.

Część I

WPŁYW ODMIANY I WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA JAKOŚĆ I WŁAŚCIWOŚCI PROZDROWOTNE JABŁEK

I.1. Materiały i metody

Opis użytych materiałów i metod badawczych w części I niniejszej pracy doktorskiej został opisany w publikacji A stanowiącej część rozprawy. W niniejszym rozdziale zarysowano poszczególne etapy badań oraz sprecyzowano ich zakres. W dalszej części przedstawiono informację o zastosowanych metodach badań w ramach przeprowadzonego doświadczenia.

Wykaz publikacji:

Kistechok, A., Wrona, D., Krupa, T. 2022. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture, 12, 1876.

Materiał badawczy stanowiły owoce nowej polskiej odmiany jabłoni –'Chopin' oraz klonu 'JB', a także owoce czterech popularnych w Polsce odmian handlowych: 'Gala Brookfield', 'Šampion', 'Ligol' i 'Idared'. Owoce do badań pozyskano z Pola Doświadczalnego Instytutu Nauk Ogrodniczych 'Wilanów' zlokalizowanego w centralnej Polsce (52.259°N, 21.020°E).

Układ doświadczenia obejmował sześć genotypów jabłoni badanych przez trzy lata (2019–2021). Każdą odmianę i klon 'JB' oceniano w czterech powtórzeniach, co umożliwiło statystyczną weryfikację uzyskanych wyników. Jabłka zbierano z 8-letnich drzew rosnących na podkładce M.9. Owoce w ramach jednego powtórzenia zbierano z losowo wybranych 10 drzew w każdym rzędzie, dla każdej odmiany. Z każdego powtórzenia wybierano losowo po 10 jabłek, które stanowiły jednostkę do oceny. W każdym roku pobierano owoce o typowym dla danej odmiany stopniu dojrzałości zbiorczej. Jabłka wybierano spośród zdrowych owoców, wolnych od uszkodzeń mechanicznych i chorób. Do oceny wyróżników fizykochemicznych posłużono się całymi owocami, zgodnie z przyjętą metodyką badań. Ocenę zawartości wtórnych metabolitów oraz aktywności przeciwutleniającej wykonano oddzielnie dla skórki i miąższu jabłek. Fragmenty skórki pobierano pionowo z powierzchni owocu, po czym zarówno skórkę, jak i miąższ mielono w ciekłym azocie, aby zabezpieczyć materiał przed utratą składników bioaktywnych przed analizą chemiczną.

Ocenę owoców prowadzono bezpośrednio po zbiorze. Termin zbioru określano indywidualnie dla każdej odmiany na podstawie zawartości etylenu w komorach

nasiennych, indeksu Streifa oraz testu skrobiowego, co pozwoliło na ustalenie optymalnej dojrzałości zbiorczej jabłek.

Badane parametry

Istotnym elementem badań była ocena jakości i właściwości odżywczych owoców w podobnym stanie dojrzałości fizjologicznej. Stopień dojrzałości owoców określano na podstawie zawartości etylenu w komorach nasiennych ($\mu L \cdot L^{-1}$), indeksu Streifa oraz indeksu skrobiowego, ocenianego na podstawie reakcji skrobi z wodnym roztworem czystego jodu w roztworze jodku potasu (w skali od 1 do 10).

Zestawianie badanych wskaźników i zastosowanych metod badań zastosowanych w doświadczeniu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie badanych wskaźników i metod badań

Grupa parametrów	Oznaczane cechy	Metoda badań	Jednostka
Stan dojrzałości fizjologicznej owoców	Zawartość etylenu	Chromatograf gazowy (GC)	$\mu L \cdot L^{-1}$
	Indeks Streifa	Obliczeniowo eg wzoru: jędrność / (ekstrakt × indeks skrobiowy)	–
	Indeks skrobiowy	Metoda z roztworem I_2 w KI	1–10
Właściwości fizykochemiczne	Jędrność miąższu	Instron 5542	N
	Ekstrakt refraktometryczny	Refraktometr cyfrowy	°Brix
	Kwasowość miareczkowa	Metoda z 0,1 M NaOH	% kwasu jabłkowego
Skład chemiczny i wartość odżywcza	Cukry (sacharoza, glukoza, fruktoza)	Chromatograf cieczowy HPLC-RI	$g \cdot 100\ g^{-1}$ ś.m.
	Kwasy organiczne (jabłkowy, cytrynowy, winowy)	Chromatograf cieczowy HPLC-RI	$g \cdot 100\ g^{-1}$ ś.m.
	Całkowite polifenole	Metoda z odczynnikiem Folin–Ciocalteu	mg GAE·100 g^{-1} ś.m.
	Fenolokwasy i flawonole	Chromatograf cieczowy HPLC-DAD	$mg \cdot 100\ g^{-1}$ ś.m.
	Aktywność przeciwutleniająca	Metoda z odczynnikiem DPPH	mg AAE·100 g^{-1} ś.m.

Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem metod laboratoryjnych opisanych w literaturze naukowej.

I.2. Wyniki i dyskusja

I.2.1. Charakterystyka jakościowa owoców w momencie zbioru

Celem badań było określenie fizjologicznego stanu dojrzałości jabłek i wyznaczenia optymalnego terminu zbioru. Charakterystyka stanu dojrzałości nie stanowiła bezpośredniego celu badań, lecz była punktem odniesienia umożliwiającym porównanie odmian w zbliżonym stadium rozwojowym.

Stopień dojrzałości owoców oceniono na podstawie trzech wskaźników: zawartości etylenu w komorach nasiennych (IEC), indeksu Streifa oraz indeksu skrobiowego. Uzyskane wartości IEC obejmowały zakres od 0,5 do 1,4 $\mu L \cdot L^{-1}$, co wskazuje na optymlny poziom dojrzałości dla jabłek przeznaczonych do zbioru. Owoce wszystkich odmian i klonu ‘JB’ charakteryzowały się zbliżoną produkcją etylenu w komorach nasiennych, co umożliwiło rzetelną ocenę parametrów jakościowych jabłek. Stopień dojrzałości jabłek ma istotny wpływ na ich właściwości fizykochemiczne i zawartość związków bioaktywnych. Wraz z dojrzewaniem jabłek obserwuje się spadek jędrności miąższu i kwasowości, przy jednoczesnym wzroście zawartości cukrów oraz związków fenolowych, decydujących o właściwościach przeciwutleniających jabłek (Kviklys i in 2012; Drogoudi i in. 2008; Krupa i in. 2022). Podobny stopień dojrzałości jabłek w momencie zbioru, pozwala wnioskować, że różnice w jakości owoców (jędrność, zawartość cukrów, kwasów czy związków bioaktywnych) wynikały głównie z ich cech odmianowych/genetycznych, a nie ze stopnia dojrzałości podczas zbioru.

I.2.2. Wpływ cech odmianowych na parametry fizykochemiczne jabłek

Celem tego etapu badań była ocena jakości owoców wybranych odmian jabłoni i klonu ‘JB’ bezpośrednio po zbiorze. Oceniono jędrność miąższu, zawartość ekstraktu refraktometrycznego (SSC), kwasowość miareczkową (TA) oraz główne cukry i kwasy organiczne.

Wybór jabłek przez konsumentów nie zależy od ich właściwości odżywczych, ale w głównej mierze od wyglądu i smaku (Jaeger i in. 1998; Amyotte i in. 2017; Hoehn i in. 2003; Zdunek i in. 2011). W kontekście preferencji konsumenckich, jędrność jabłek w

przedziale od 65 do 75 N uznaje się za optymalną dla jabłek deserowych (Łysiak i in. 2020). Badania własne wykazały, że klon ‘JB’ i odmiana ‘Chopin’ spełniają te wymagania, wykazując większą jędrność miąższu niż ‘Šampion’ oraz ‘Ligol’, powszechnie uprawiane w Polsce. Wysoka jędrność miąższu może być związana z niższą aktywnością enzymów pektynolitycznych i korzystną strukturą komórek (Gwanpua i in. 2016). ‘Chopin’ i klon ‘JB’ cechują się wysoką jędrnością utrzymującą się po zbiorze oraz korzystnym bilansem cukrów i kwasów. Ważnym wyróżnikiem wyboru przez konsumentów jest smak owoców. Jabłka zawierają cukry proste, które są jednak łatwo przyswajalne i szybko wykorzystywane przez organizm ludzki (Aprea i in. 2017; Li i in. 2021; Mignard i in. 2022). W badaniach wykazano, że najobficiej występującym cukrem w jabłkach odmian uprawnych była fruktoza, a następnie sacharoza.

Zawartość ekstraktu (SSC), odzwierciedlająca poziom słodkości, różniła się między odmianami. Wyższą zawartość ekstraktu refraktometrycznego cechowały się jabłka klonu ‘JB’, natomiast owoce ‘Chopin’ wykazywał niższe wartości SSC. W badaniach stwierdzono zróżnicowanie zawartości ekstraktu między latami, wynikające z przebiegu warunków pogodowych w okresie dojrzewania owoców. Wyższe wartości omawianego wskaźnika odnotowano w 2019 roku, który charakteryzował się ciepłą i suchą pogodą oraz niedoborem opadów od czerwca do listopada. Stres wodny roślin sprzyjał koncentracji soków komórkowych i większemu nagromadzeniu cukrów w owocach. Średnia zawartość ekstraktu wynosiła wówczas 12,9°Brix (‘Chopin’) – 14,2°Brix (‘Idared’). W latach 2020–2021, przy większych opadach, wartości wskaźnika obniżyły się o 1–2 jednostki, co potwierdza wpływ warunków klimatycznych na akumulację składników determinujących zawartość ekstraktu (Jakobek i in. 2015). W analizowanych owocach stwierdzono różnice w zawartości cukrów prostych, które determinują słodkość i smak jabłek. Do głównych cukrów w jabłkach należą fruktoza, glukoza i sacharoza, przy czym fruktoza w większym stopniu wpływa na percepcję smaku przez konsumentów (Guyot i in. 2002). Klon ‘JB’ zawierał najwięcej cukrów prostych, zwłaszcza fruktozy (5,55 g·100 g^{-1} ś.m.), co potwierdzono we wszystkich latach badań, wskazując na stabilność tej cechy odmianowej. Odmiana ‘Chopin’ charakteryzowała się niższą zawartością cukrów (fruktoza 3,62 g·100 g^{-1} ś.m.) oraz wyższą kwasowością (ponad 1%), co kształtuje jej bardziej kwaskowaty profil smakowy (Jaeger i in. 1998; Amyotte i in. 2017; Hoehn i in. 2003; Zdunek i in. 2011).

Pod względem kwasowości (TA) odmianę ‘Chopin’ i klon ‘JB’ cechowały wyraźnie wyższe zawartości kwasów organicznych niż pozostałe odmiany. Poziom

kwasowości bezpośrednio po zbiorze jabłek przekraczał 1%, co nadaje owocom intensywniejszy smak i sprzyja trwałości przechowalniczej (Wojdyło i in. 2008). Kwasowość miareczkowa silnie wpływa na równowagę smakową i świeżość owoców. Wyższą kwasowość stwierdzono bezpośrednio po zbiorze w jabłkach klonu ‘JB’ i odmiany ‘Chopin’ (średnio 1,17% i 1,04% kw. jabłkowego), podczas gdy popularne odmiany ‘Gala Brookfield’, ‘Šampion’ i ‘Ligol’ charkteryzowały niższe wartości (od 0,3 do 0,6% kw. jabłkowego). Wysoka zawartość kwasu jabłkowego w klonie ‘JB’ (1,13 g·100 g^{-1} ś.m.) była nawet trzykrotnie większa niż u odmian popularnie uprawianych w Polsce. Wysoka zawartość kwasów organiczncych nadaje owocom wyraźny, orzeźwiający smak i zwiększa ich wartość przetwórczą (Aprea i in. 2017; Li i in. 2021; Mignard i in. 2022).

I.2.3. Wpływ cech odmianowych na właściwości prozdrowotne jabłek

Na zawartość polifenoli w jabłkach ma wpływ wiele czynników, takich jak odmiana (Raudone i in. 2017; Kevers i in. 2011) lub stopień dojrzałości (Wang i in. 2015). W badaniach stwierdzono zróżnicowanie zawartości polifenoli między analizowanymi odmianami i klonem ‘JB’, wynikające zarówno z uwarunkowań genetycznych, jak i wpływu warunków środowiskowych w poszczególnych latach. 2-3-krotnie wyższą zawartością polifenoli ogółem wyróżniał się klon ‘JB’ w porównaniu do pozostałych odmian. Większość cennych substancji w jabłkach znajduje się w skórce i tuż pod nią (Raudone i in. 2017; Petkovska i in. 2016), ale niestety wielu konsumentów spożywa jabłka po obraniu. Liczne badania pokazują, że skórka jabłek jest znacznie bogatsza w związki fenolowe niż miąższ (Viera i in. 2009; Kevers i in. 2011). W miąższu ‘JB’ wartości wynosiły 211–531 mg·100 g^{-1} ś.m., a w skórce przekraczały ok. 1280 mg·100 g^{-1} ś.m., co potwierdza wysoki potencjał antyoksydacyjny tego klonu. U odmian powszechnie dostępnych w polskich sklepach (‘Gala Brookfield’, ‘Šampion’ i ‘Ligol’) odnotowano średnie wartości wskaźnika: 73–228 mg·100 g^{-1} ś.m. w miąższu i 288–802 mg·100 g^{-1} ś.m. w skórce. Niezależnie od odmiany i roku badań zawartość polifenoli ogółem w skórce jabłek wynosiła 2–3-krotnie więcej niż w miąższu, co wiąże się z ich funkcją ochronną przed promieniowaniem UV, stresem oksydacyjnym i patogenami. Wysokie stężenie fenolokwasów stwierdzono w jabłkach klonu ‘JB’ i odmiany ‘Idared’. Fenolokwasy wykazują silne właściwości przeciwutleniające i chronią owoce przed stresem oksydacyjnym (Francini i Sebastiani 2013; Starowicz i in. 2020). Również zawartość flawonoli była zróżnicowana pod względem analizowanego fragmentu owocu.

Więcej związków z tej grupy notowano w skórce klonu ‘JB’, podczas gdy w owocach odmian popularnych w Polsce, tj. ‘Ligol’ i ‘Šampion’, wartości te były niższe. W jabłkach dominują kwercetyna i jej glikozydy, odpowiedzialne za barwę owoców i odporność na stres środowiskowy (McGhie i in. 2005; Francini i Sebastiani 2013).

Według Mignard i in. (2007) wyższej zawartość polifenoli ogółem towarzyszy wysoka aktywność przeciwutleniająca (AA). Aktywność przeciwutleniająca była najwyższa w miąższu owoców klonu ‘JB’, (0,46–0,58 mg AAE·100 g^{-1} ś.m.), natomiast większość ocenianych odmian i klon ‘JB’ cechował podobny poziom aktywności przeciwutleniającej w skórce. Odmiana ‘Chopin’ wykazywała umiarkowaną AA w miąższu, co mimo niższej zawartości polifenoli świadczy o obecności dobrze reaktywnych form fenolokwasów i flawonoli. Popularne odmiany (‘Ligol’, ‘Gala Brookfield’, ‘Šampion’) wyróżniały się niższą wartości AA w miąższu, co koreluje z mniejszą ilością fenoli. W 2019 roku, przy ciepłej i suchej pogodzie, odnotowano najwyższą zawartość polifenoli i aktywność przeciwutleniającą. Susza i silne nasłonecznienie sprzyjały syntezie związków fenolowych o działaniu ochronnym. W latach wilgotniejszych (2020–2021) wartości te były niższe, co potwierdza, że stres środowiskowy, taki jak deficyt wody i wysokie temperatury, stymuluje akumulację polifenoli i zwiększa potencjał antyoksydacyjny jabłek (Zydlik i in. 2020; Łysiak i in. 2020; Warrington i in. 1999).

I.2.4. Podsumowanie wyników

Przeprowadzone badania wykazały wyraźne zróżnicowanie cech fizykochemicznych
i poziomu związków bioaktywnych w owocach analizowanych odmian jabłoni i klonu ‘JB’. Odmiana ‘Chopin’ i klon ‘JB’ charakteryzowały się wyższą kwasowością miareczkową niż odmiany popularnie w Polsce, co nadaje ich owocom wyraźny, orzeźwiający smak. Szczególnie odmiana ‘JB’, posiadająca czerwony miąższ, wyróżniała się najwyższą zawartością związków bioaktywnych (polifenoli, flawonoli i fenolokwasów) oraz największą aktywnością antyoksydacyjną miąższu, co czyni ją odmianą o wyjątkowym potencjale prozdrowotnym. Odmianę ‘Chopin’ cechuje wysoka jędrność i kwasowość, dzięki czemu owoce tej odmiany łączą wysoką jakość sensoryczną z odpowiednią trwałością pozbiorczą.

Wyniki badań są zgodne z doniesieniami literaturowymi, które potwierdzają silny wpływ temperatury, natężenia światła oraz stresu wodnego na biosyntezę związków

fenolowych i aktywność enzymów antyoksydacyjnych w owocach jabłoni. Jak wskazują Warrington i in. (1999), jabłka dojrzewające w wyższych temperaturach cechują się większą zawartością ekstraktu i niższą kwasowością, co sprzyja również akumulacji polifenoli

w wyniku stresu cieplnego. Z kolei badania Zang i in. (2021) wykazały, że temperatura w okresie od kwietnia do października ma bezpośredni wpływ na jakość owoców i poziom związków bioaktywnych. Istotny jest również wpływ nasłonecznienia – jak podkreślają Carbone i in. (2011) oraz Raudone i in. (2017), flawonole, takie jak kwercetyna i jej pochodne, są najbardziej zależne od ekspozycji owocu na światło. Większe nasłonecznienie intensyfikuje syntezę tych związków w skórce, co tłumaczy ich wyższą koncentrację w odmianach o intensywnym wybarwieniu, np. klon ‘JB’. Ponadto, zgodnie z obserwacjami Mignard i in. (2022) oraz Kim i in. (2019), susza i stres wodny mogą indukować mechanizmy obronne roślin, prowadząc do zwiększonej aktywności enzymów antyoksydacyjnych (m.in. katalazy, peroksydazy, dysmutazy ponadtlenkowej). W efekcie roślina wytwarza większe ilości związków fenolowych o funkcji ochronnej, co potwierdzono także w badaniach własnych w roku 2019 – ciepłym i suchym, kiedy zawartość polifenoli i aktywność antyoksydacyjna były wyższe niż w pozostałych dwóch latach. Podobne wnioski przedstawili Francini i Sebastiani (2013) oraz Duda-Chodak i in. (2010), wskazując, że stres oksydacyjny wynikający z warunków środowiskowych aktywuje szlaki biosyntezy fenoli (szlak kwasu szikimowego), prowadząc do zwiększenia zawartości fenolokwasów i flawonoli w owocach.

.

Część II

ZMIANY WARTOŚCI ODŻYWCZEJ JABŁEK W TRAKCIE ICH DOJRZEWANIA

II.1. Materiały i metody

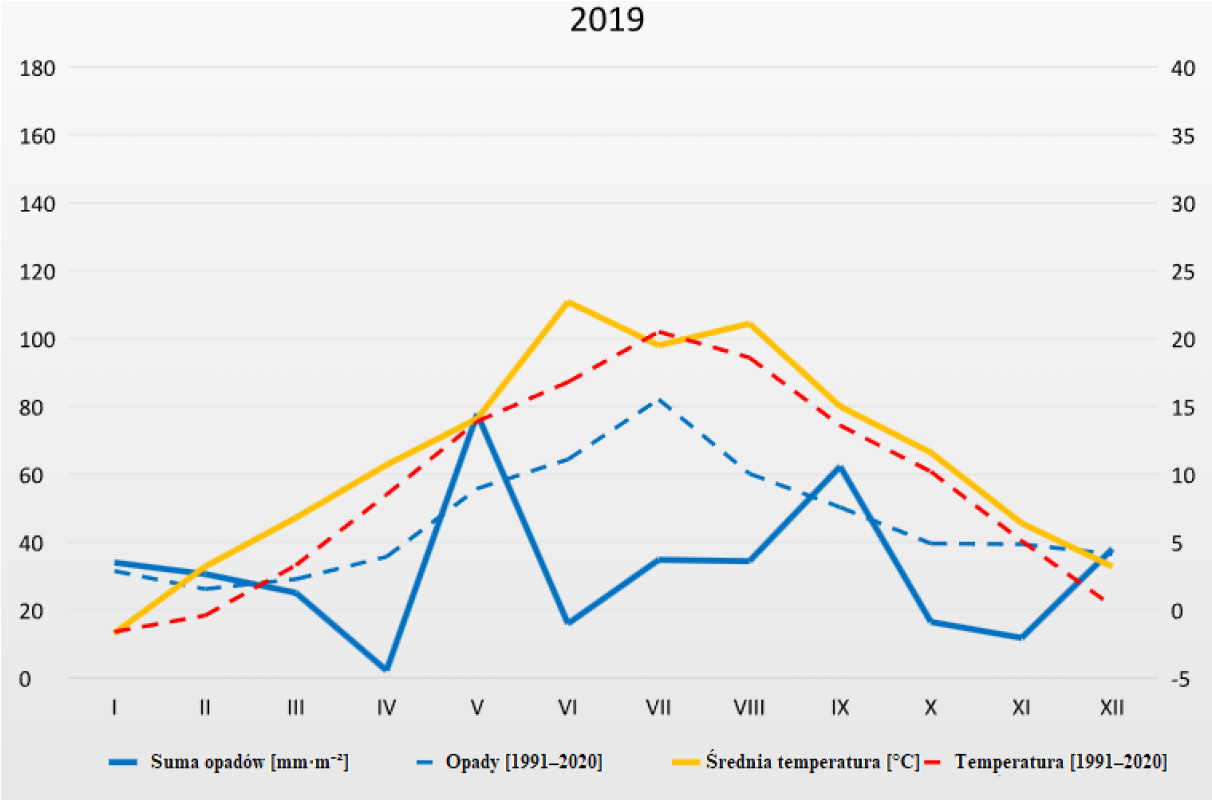
II.1.1. Materiał badawczy

W badaniach wykorzystano owoce nowej polskiej odmiany jabłoni ‘Chopin’ oraz klonu ‘JB’, wyhodowane w Katedrze Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (SGGW). Dla porównania analizowano również owoce czterech szeroko rozpowszechnionych w uprawie w Polsce odmian: ‘Gala Brookfield’, ‘Šampion’, ‘Ligol’ i ‘Idared’. Badania przeprowadzono w dwóch sezonach: 2019/20 i 2020/21, a zbiory trwały od sierpnia do końca września. Owoce pochodziły z Sadu Doświadczalnego Instytutu Nauk Ogrodniczych ‘Wilanów’ w Warszawie - Wilanowie. Owoce zbierano z drzew rosnących na podkładce M.9 w rozstawie 1,0 m x 3,5 m. W przypadku każdej ocenianej odmiany zastosowano identyczny program zabiegów agrotechnicznych, w tym nawożenie, formowanie, przerzedzanie i inne. Ochronę roślin w sadzie doświadczalnym INO ‘Wilanów’ przeprowadzono zgodnie z zasadami zintegrowanej ochrony roślin (IPO). Metodę indukowanego etylenu zastosowano w celu określenia optymalnego terminu zbioru owoców. W celu określenia wewnętrznego stężenia etylenu w komorze nasiennej jabłek pobrano 1 ml powietrza z komory za pomocą strzykawki. Próbki analizowano za pomocą chromatografu gazowego (HP 5890), a wyniki podano w µl/l. Wewnętrzne stężenie etylenu określono w 4 powtórzeniach, po 20 jabłek w każdym powtórzeniu (Tomala i in. 2021). Test skrobiowy przeprowadzono na przekrojach jabłek, spryskując je roztworem jodu w jodku potasu (I2 w KI), a uzyskane zabarwienie miąższu owoców porównano z tabelą standardową przypisującą wartości od 1 do 10. Wynik końcowy był średnią z każdego powtórzenia. Test skrobiowy przeprowadzono w 4 powtórzeniach, po 20 jabłek w każdym powtórzeniu (Tomala i in. 2020).

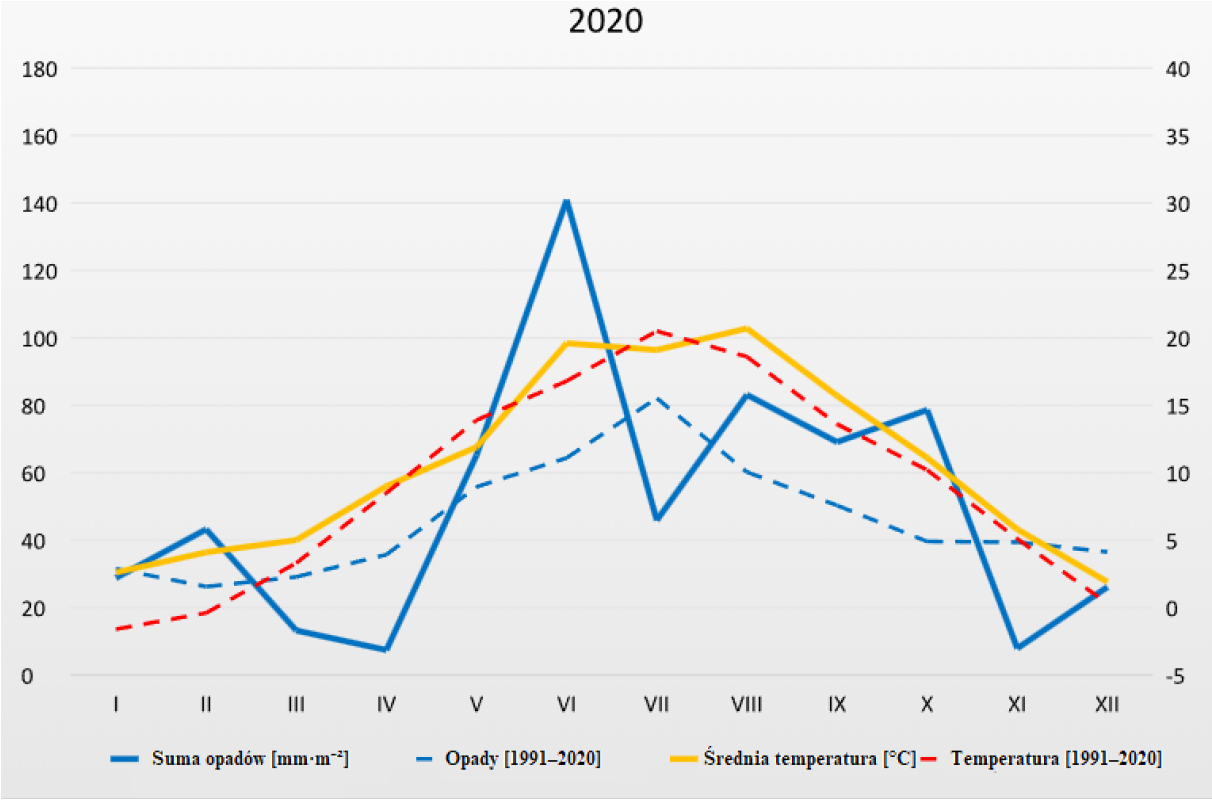
II.1.2. Warunki pogodowe

Dane klimatyczne uzyskano z polowej stacji meteorologicznej Davis Vantage Pro 7, zlokalizowanej na Polu Doświadczalnym. Dane pogodowe przedstawiono na rycinach 1 i 2. W celu zilustrowania warunków klimatycznych zastosowano metodę klimatogramu opracowaną przez Waltera (1973), polegającą na graficznym przedstawieniu średnich miesięcznych temperatur i miesięcznych sum opadów w stosunku 1 °C: 4,5 mm opadów. Suma rocznych opadów wyniosła odpowiednio 280,9 mm i 511,3 mm w latach 2019 i 2020. W ujęciu wieloletniej średniej liczba opadów w 2019 r. była o 49% niższa, natomiast w 2020 r. o 7,17% niższa (wieloletnia średnia z lat 1990–2020 wynosi 550,8

mm). Rok 2019 charakteryzował się zatem wyższą średnią temperaturą miesięczną i znacznie niższymi opadami w porównaniu z rokiem 2020.



Rycina 1. Klimatogram roku 2019 – średnie miesięczne temperatury i sumy opadów.



Rycina 2. Klimatogram roku 2020 – średnie miesięczne temperatury i sumy opadów.

II.1.3. Układ doświadczenia

Owoce zebrano z 10 drzew reprezentatywnych dla każdej odmiany, a po zbiorach umieszczono je w zwykłych warunkach przechowywania w chłodni (1°C, Rh ≈ 75%) i przechowywano przez 3 miesiące. Okres i warunki przechowywania zostały wybrane w celu określenia zmian w zawartości substancji bioaktywnych w jabłkach przeznaczonych jako surowiec do przetwórstwa. Ocenę właściwości odżywczych jabłek przeprowadzono dwukrotnie, bezpośrednio po zbiorach i ponownie po przechowywaniu. Wyżej wymienione analizy przeprowadzono w 4 powtórzeniach dla każdej odmiany, po 20 jabłek na powtórzenie. Skórkę i miąższ pobrano oddzielnie z owoców do analizy właściwości przeciwutleniających. Skórkę pobrano z przeciwległych stron jabłka, w pionie. Miąższ owoców pobrano w podobny sposób, wycinając 2 przeciwległe segmenty. Próbki pobrane z 20 owoców zostały połączone (test mieszany), natychmiast zamrożone w ciekłym azocie i zmielone w młynku IKA A11. Zmielony, zamrożony materiał przechowywano w zamrażarce w temperaturze -80°C do momentu analizy. Ocenę zawartości minerałów i bezpieczeństwa produktu, tj. zawartości pozostałości pestycydów w jabłkach, przeprowadzono natychmiast po zbiorze owoców.

II.1.4. Badane parametry

Jabłka scharakteryzowano pod względem właściwości odżywczych poprzez ocenę aktywności przeciwutleniającej, całkowitej zawartości polifenoli, kwasów fenolowych, flawonoli, błonnika a także oceniono skład mikro- i makroskładników.

Aktywność przeciwutleniającą określono zgodnie z metodą Saint Criq de Gaulejac
i in. (1999) w oparciu o redukcję wolnych rodników uzyskanych z DPPH (1,1-difenylo-2-pikrylohydrazyna, Sigma-Aldrich, Poznań). Aktywność przeciwutleniającą obliczono na podstawie pomiarów absorbancji dla konkretnej próbki (ekstrakt owocowy + $DPPH^+$) wykonanych po 20 minutach przy $\lambda = 517$ nm w stosunku do próbki kontrolnej (H_2O + $DPPH^+$). Wyniki wyrażono w mg na g F.W. kwasu askorbinowego (AAE).

Analizę całkowitej zawartości polifenoli przeprowadzono zgodnie z metodą Waterhouse'a (2002). Całkowitą zawartość polifenoli zmierzono za pomocą spektrofotometru Marcel s330 PRO (Marcel S.A., Warszawa, Polska) z odczynnikiem Folina-Ciocalteau, przy $\lambda = 700$ nm. Wyniki wyrażono w miligramach kwasu galusowego na 100 g^{-1} ś.m.

Całkowitą zawartość flawonoidów analizowano przy użyciu zmodyfikowanej metody Marinova i in. (2005). 5 g owoców sproszkowanych w ciekłym azocie zmieszano z 25 ml 80% metanolu i ekstrahowano przez 15 minut. Ekstrakcje przeprowadzono dwukrotnie. Do otrzymanych próbek dodawano kolejno wodę destylowaną, 5% $NaNO_2$, 10% $AlCl_3$ i 1 M NaOH w określonych odstępach czasu. Pomiary przeprowadzono za pomocą spektrofotometru Marcel s330 PRO (Marcel S.A., Warszawa, Polska) przy 510 nm. Całkowitą zawartość flawonoidów w owocach wyrażono w mg ekwiwalentu kwercetyny na 100 g^{-1} ś.m.

Analizę poszczególnych związków fenolowych pod kątem separacji i zawartości przeprowadzono przy użyciu zestawu HPLC serii Perkin-Elmer 200 z detektorem diodowym (DAD). Separację przeprowadzono przy użyciu kolumny LiChroCART 125-3 (Merck KGaA, Darmstadt, Niemcy) z prędkością przepływu 1 ml/min. Temperatura kolumny wynosiła 22°C. Faza ruchoma składała się z mieszaniny wody (A): 20% kwasu mrówkowego (B): acetonitrylu (C) o różnych gradientach stężenia. Związki fenolowe wykryto przy długościach fal 280, 300, 320 i 360 nm poprzez porównanie czasów retencji na uzyskanych chromatogramach ze standardowymi. Zawartość poszczególnych związków (łącznie dwie grupy: kwasy fenolowe i flawonole) podano w mg·100 g^{-1} ś.m. (Krupa i in. 2022).

Analizy makro- i mikroelementów (P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn) przeprowadzono w akredytowanym laboratorium J.S. Hamilton (zakres akredytacji: OiB nr 53/MON/2016). Proces mineralizacji przeprowadzono w zamkniętym systemie ciśnieniowym, powszechnie nazywanym ‘bombą teflonową’ (Reijo i in. 1989), wykorzystując energię mikrofalową z promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwości 2450 MHz. Metoda ta polega na reakcji składników próbki z kwasami mineralnymi w podwyższonej temperaturze w zamkniętym naczyniu teflonowym. Ciśnienie wytworzone przez uwalnianie gazu pozwala na przekroczenie temperatury wrzenia kwasów stosowanych w systemach otwartych. Ostateczne oznaczenie składników odżywczych przeprowadzono za pomocą spektrometrii masowej z plazmą indukcyjnie sprzężoną (ICP-MS) (Krachler i in. 2002). Technika ta mierzy intensywność strumienia jonów generowanego w plazmie. Jony są wytwarzane w plazmie indukcyjnie sprzężonej, a następnie rozdzielane przez analizator masowy na podstawie ich stosunku masy do ładunku. Do analizy próbek stałych zastosowano technikę ablacji laserowej (LA) (Fernández i in. 2007). Metoda ta polega na atomizacji powierzchniowej materiału próbki za pomocą skupionej wiązki

laserowej. Powstała faza gazowa i aerozol są transportowane do plazmy ICP za pomocą pomocniczego strumienia argonu.

Do oceny zawartości błonnika zastosowano oficjalną metodę AOAC 985.29 służącą do pomiaru całkowitego błonnika pokarmowego (TDF) w żywności. Metoda ta opiera się na enzymatycznym usuwaniu skrobi i białka z próbek za pomocą amylazy i proteazy w temperaturze odpowiednio 90°C i 60°C. Nierozpuszczalny błonnik pokarmowy (IDF) jest następnie oddzielany przez filtrację, a rozpuszczalny błonnik pokarmowy o wysokiej masie cząsteczkowej jest wytrącany za pomocą 78% etalonu i zbierany przez filtrację. Obie frakcje błonnika są suszone i ważone, co łącznie daje całkowitą zawartość błonnika pokarmowego w próbce. Wyniki są wyrażone jako procent świeżej masy.

Ponadto, w celu określenia bezpieczeństwa spożycia owoców uprawianych zgodnie z zasadami zintegrowanej ochrony roślin, oceniono pozostałości pestycydów stosowanych do ochrony roślin. Analizy przeprowadzono przy użyciu chromatografii gazowej sprzężonej z tandemową spektrometrią masową (GC-MS/MS) (Tsikas i in. 2014) w akredytowanym laboratorium J.S. Hamilton (zakres akredytacji: OiB nr 53/MON/2016).

II.1.5. Analiza statystyczna

Analizę statystyczną uzyskanych wyników badań przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Statistica 13.3. Zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji, a analizowanymi czynnikami były odmiana i technologia przechowywania. Do oceny istotności różnic między średnimi zastosowano test Tukey'a, przyjmując poziom istotności 5%.

II.2. Wyniki

Analiza wyników wykazała duże znaczenie czynnika odmianowego dla aktywności przeciwutleniającej (AA) miąższu jabłek wybranych odmian (tabela 4). Oceniając poziom aktywności przeciwutleniającej miąższu jabłek, w 2019 r. można wyróżnić trzy grupy jabłek. Pierwsza grupa, o niskiej aktywności przeciwutleniającej, obejmuje odmiany ‘Ligol’ i ‘Šampion’. Druga grupa składa się z odmian o wyższej AA i zaliczamy do niej ‘Gala Brookfield’, ‘Idared’ oraz nową odmianę ‘Chopin’. Z drugiej strony, wśród ocenianych odmian wyróżnia się klon ‘JB’, którego aktywność przeciwutleniająca miąższu jest o 70% wyższa niż w przypadku odmian z grupy o najniższej aktywności przeciwutleniającej. Podobnie w 2020 r. AA miąższu klonu ‘JB’

było o 43% wyższe niż w przypadku ‘Ligol’, odmiany o najniższej aktywności. Trzymiesięczny okres przechowywania w chłodni zwykłej przyczynił się do wzrostu aktywności przeciwutleniającej miąższu jabłek, co wykazano w przypadku czterech z sześciu ocenianych odmian (‘Gala Brookfield’, ‘Ligol’, ‘Chopin’, ‘Idared’), natomiast spowodował spadek AA w miąższu klonu ‘JB’. Analiza wariancji wykazała istotną interakcję między odmianą a rokiem badania, a także między odmianą a okresem przechowywania w odniesieniu do aktywności przeciwutleniającej miąższu ocenianych odmian. Nie stwierdzono jednak interakcji między rokiem badania a przechowywaniem jabłek w odniesieniu do omawianego wskaźnika. Analiza potwierdziła wpływ wszystkich zastosowanych czynników na aktywność przeciwutleniającą skórki owoców (tabela 3). W tym przypadku stwierdzono, że klon ‘JB’ i odmiana ‘Chopin’ nie wykazywały wyższej aktywności przeciwutleniającej niż większość ocenianych odmian. Ocena wpływu roku badania na AA skórki wykazała znaczenie tego czynnika w przypadku odmiany ‘Gala Brookfield’ i klonu ‘JB’, gdzie w obu przypadkach wartości AA spadły w drugim sezonie. Po przechowywaniu aktywność przeciwutleniająca wzrosła w trzech ocenianych odmianach, ale ani klon ‘JB’, ani odmiana ‘Chopin’ nie znalazły się w tej grupie.

Tabela 3. Wartości aktywności przeciwutleniającej (mg AAE·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań i okresu przechowywania

		Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Miąższ								
Rok	Rok 2019	0,39 ± 0,08	0,30 ± 0,03	0,29 ± 0,05	0,51 ± 0,08	0,34 ± 0,03	0,37 ± 0,10	< 0,01
	Rok 2020	0,37 ± 0,05	0,39 ± 0,02	0,30 ± 0,03	0,43 ± 0,03	0,34 ± 0,10	0,39 ± 0,04	< 0,01
	p-wartość (rok)	0,53	< 0,01	0,85	0,73	0,96	0,62	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	0,32 ± 0,02	0,33 ± 0,05	0,26 ± 0,03	0,52 ± 0,07	0,28 ± 0,05	0,32 ± 0,04	< 0,01
	3 mies. (przechowywanie)	0,44 ± 0,04	0,37 ± 0,05	0,33 ± 0,02	0,42 ± 0,01	0,39 ± 0,05	0,44 ± 0,04	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	0,24	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Skórka								
Rok	Rok 2019	0,74 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,67 ± 0,02	0,72 ± 0,01	0,72 ± 0,01	0,74 ± 0,01	< 0,01
	Rok 2020	0,72 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,66 ± 0,05	0,70 ± 0,03	0,72 ± 0,02	0,72 ± 0,03	< 0,01
	p-wartość (rok)	0,0098	0,1129	0,8337	0,0111	0,6837	0,0693	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	0,73 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,63 ± 0,02	0,71 ± 0,02	0,71 ± 0,01	0,72 ± 0,03	< 0,01
	3 mies. (przechowywanie)	0,74 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,69 ± 0,01	0,71 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,74 ± 0,01	< 0,01
	p-wartość	0,18	0,27	< 0,01	0,75	0,03	0,04	

Zawartość polifenoli ogółem (TPC) w miąższu jabłek była uzależniona od cech odmianowych, roku badania, a także przechowywania owoców (tabela 4). Odmiany jabłek różniły się znacznie pod względem całkowitej zawartości polifenoli. Spośród ocenianych odmian ‘Ligol’ charakteryzował się najniższą zawartością TPC w miąższu w obu latach badania. Pozostałe odmiany jabłek charakteryzowały się dość podobną zawartością polifenoli ogółem, a odmiana ‘Chopin’ znalazła się w tej grupie. Z drugiej strony, klon ‘JB’ dominował, wykazując ponad trzykrotnie wyższą zawartość TPC niż odmiana ‘Ligol’ i dwukrotnie wyższą niż pozostałe odmiany w 2019 r. W 2020 r. różnice między odmianami a klonem ‘JB’ były jeszcze bardziej wyraźne. Ponadto jedynie w miąższu jabłek klonu ‘JB’ nie notowano spadku TPC między latami badań. TPC w miąższu pozostałych odmian, w tym ‘Chopin’, znacznie spadło w drugim roku badania.

Wpływ przechowywania nie był korzystny dla klonu ‘JB’. Był to jedyny klon, w którym odnotowano spadek TPC miąższu po 3 miesiącach przechowywania owoców. Wpływ ocenianych czynników eksperymentalnych na TPC skórki jabłka był słabszy niż w przypadku miąższu. Analiza danych wykazała wpływ cech odmianowych i okresu przechowywania na TPC skórki owoców, ale wpływ roku badania nie był znaczący. W ocenie odmian ponownie dominował klon ‘JB’, w którego skórce TPC był 2-3 razy wyższy niż w skórce innych odmian, niezależnie od roku badania. Nieoczekiwanie bardzo wysoki poziom TPC odnotowano również w skórce odmiany ‘Idared’. Całkowita zawartość polifenoli uległa zmianie po przechowywaniu. Niestety, podobnie jak w przypadku miąższu, TPC klonu ‘JB’ zmniejszył się w skórce. Z drugiej strony, w przypadku pozostałych ocenianych odmian nie odnotowano żadnych znaczących zmian TPC (‘Chopin’ i ‘Šampion’) lub odnotowano wzrost TPC w skórce (‘Gala Brookfield’, ‘Ligol’ i ‘Idared’).

Tabela 4. Wartości całkowitej zawartości polifenoli (mg·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań i okresu przechowywania

		Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Miąższ								
Rok	Rok 2019	200 ± 47	223 ± 20	151 ± 25	445 ± 95	204 ± 23	251 ± 35	< 0,01
	Rok 2020	152 ± 16	153 ± 5	99 ± 9	432 ± 81	129 ± 31	156 ± 55	< 0,01
	p-wartość (rok)	0,04	< 0,01	< 0,01	0,8	< 0,01	< 0,01	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	150 ± 14	190 ± 45	113 ± 26	518 ± 17	157 ± 63	193 ± 96	< 0,01
	3 mies. (przechowywanie)	201 ± 46	185 ± 37	137 ± 36	359 ± 14	175 ± 27	214 ± 19	< 0,01
	p-wartość	0,03	0,84	0,23	< 0,01	0,54	0,61	
Skórka								
Rok	Rok 2019	840 ± 85	719 ± 50	425 ± 71	1223 ± 78	660 ± 57	1356 ± 137	< 0,01
	Rok 2020	946 ± 169	749 ± 48	354 ± 67	1217 ± 71	685 ± 76	1361 ± 104	< 0,01
	p-wartość (rok)	0,2015	0,3176	0,1061	0,8984	0,5471	0,9538	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	792 ± 45	760 ± 46	334 ± 50	1281 ± 43	628 ± 17	1256 ± 44	< 0,01
	3 mies. (przechowywanie)	994 ± 127	708 ± 40	445 ± 52	1159 ± 20	717 ± 66	1461,5 ± 48	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	0,06	< 0,01	< 0,01	0,09	< 0,01	

Zawartość kwasów fenolowych zależała od cech odmianowych i roku badania, natomiast nie wykazano wpływu okresu przechowywania na tę cechę ani w przypadku miąższu, ani skórki jabłek (tabela 5). Ponownie odmiany ‘Ligol’ i ‘Šampion’ charakteryzowały się niższą zawartością kwasów fenolowych, podczas gdy klon ‘JB’ charakteryzował się wysoką zawartością tych związków. W 2020 r. stwierdzono wzrost zawartości kwasów fenolowych w miąższu jabłek odmian ‘Šampion’ i ‘Ligol’, natomiast zmiany wartości wskaźnika w przypadku pozostałych odmian nie były statystycznie istotne. Po przechowywaniu zawartość kwasów fenolowych uległa niewielkiej zmianie, co było widoczne tylko w przypadku klonu ‘JB’, w miąższu którego odnotowano spadek wartości wskaźnika. Jednak kierunki zmian zawartości kwasów fenolowych odnotowane w innych odmianach jabłek nie wykazują tej samej tendencji. Jak wspomniano powyżej, zawartość kwasów fenolowych w skórce jabłek była determinowana przez cechy

genetyczne odmiany i rok badania. Wysoką zawartość związków odnotowano w skórce odmian ‘Gala Brookfield’ i ‘Idared’ w obu latach, a nieco niższa została stwierdzona w skórce klonu ‘JB’, zwłaszcza w drugim roku badań, Niestety odmiany ‘Chopin’ i ‘Šampion’ charakteryzowały się niskimi wartościami związków z grupy kwasów fenolowych w 2019 r. Przechowywanie owoców nie miało znaczącego wpływu na zawartość kwasów fenolowych w miąższu ocenianych odmian jabłek.

Tabela 5. Wartości zawartości kwasów fenolowych (mg·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań i okresu przechowywania

		Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Miąższ								
Rok	Rok 2019	11,6 ± 3,2	5,3 ± 0,6	7,1 ± 1,0	13,8 ± 1,6	10,0 ± 0,3	14,9 ± 1,3	< 0,01
	Rok 2020	12,1 ± 2,2	10,5 ± 1,3	8,5 ± 0,3	13,9 ± 1,7	10,3 ± 1,2	14,7 ± 0,5	< 0,01
	p-wartość (rok)	0,77	< 0,01	< 0,01	0,95	0,51	0,78	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	11,3 ± 2,9	8,2 ± 3,8	7,9 ± 0,9	15,3 ± 0,1	9,7 ± 0,6	14,4 ± 1,2	< 0,01
	3 mies. (przechowywanie)	12,3 ± 2,4	7,6 ± 1,9	7,6 ± 1,2	12,3 ± 0,7	10,6 ± 0,8	15,2 ± 0,3	< 0,01
	p-wartość	0,52	0,75	0,64	< 0,01	0,06	0,15	
Skórka								
Rok	Rok 2019	49,1 ± 6,8	33,3 ± 4,9	32,9 ± 1,6	38,4 ± 8,4	25,0 ± 1,5	53,8 ± 3,7	< 0,01
	Rok 2020	58,1 ± 4,9	45,3 ± 6,6	20,2 ± 3,2	46,9 ± 2,7	40,9 ± 2,2	54,6 ± 2,3	< 0,01
	p-wartość (rok)	0,03	< 0,01	< 0,01	0,04	< 0,01	0,65	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	50,6 ± 8,7	40,0 ± 12,3	24,4 ± 7,8	47,3 ± 1,9	32,0 ± 7,8	52,5 ± 3,1	< 0,01
	3 mies. (przechowywanie)	56,7 ± 4,6	38,6 ± 1,4	28,7 ± 6,1	38,0 ± 8,0	33,9 ± 9,8	55,8 ± 1,9	< 0,01
	p-wartość	0,16	0,78	0,32	0,02	0,71	0,05	

Zawartość flawonoidów w miąższu owoców nie była uzależniona ani od cech genetycznych odmian, ani od roku przeprowadzenia badań. Nie stwierdzono również żadnej interakcji między ocenianymi czynnikami eksperymentalnymi. Chociaż zaobserwowano zmiany zawartości flawonoidów po przechowywaniu (tabela 6), dotyczyły one tylko dwóch z sześciu badanych odmian (klon ‘JB’, ‘Gala Brookfield’).

Cechy odmianowe, rok badania i okres przechowywania miały wpływ na zawartość flawonoidów w skórce jabłek. Klon ‘JB’ wyróżniał się najwyższą zawartością flawonoidów w skórce spośród ocenianych odmian, co wykazano w 2020 r. Pozostałe odmiany, w tym ‘Chopin’, charakteryzowały się podobnymi wartościami wskaźnika. W 2020 r. zaobserwowano wzrost zawartości związków w skórce jabłek we wszystkich odmianach w porównaniu z 2019 r., ale tendencja ta została potwierdzona statystycznie dla trzech odmian: klonu ‘JB’, ‘Chopin’ i ‘Ligol’. Ponadto zauważono, że okres przechowywania wpływa na zawartość omawianych związków w skórce. Ponownie, zarówno bezpośrednio po zbiorach, jak i po 3 miesiącach przechowywania, klon ‘JB’ charakteryzował się najwyższą zawartością flawonoidów. Zmiany zawartości tych związków po przechowywaniu były wielokierunkowe, co uniemożliwiło wykazanie wyraźnej tendencji zmian. Chociaż wzrost zawartości flawonoidów w skórce jabłek po przechowywaniu stwierdzono w 4 z 6 odmian, tylko w przypadku ‘Idared’ zależność ta została potwierdzona statystycznie.

Tabela 6. Wartości całkowitej zawartości flawonoidów (mg·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań i okresu przechowywania

		Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Miąższ								
Rok	Rok 2019	119 ± 20	105 ± 3	115 ± 15	106 ± 4	106 ± 1	104 ± 2	0,08
	Rok 2020	112 ± 13	114 ± 13	100 ± 12	114 ± 22	111 ± 17	96 ± 16	0,22
	p-wartość (rok)	0,49	0,13	0,07	0,36	0,53	0,22	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	125 ± 19	113 ± 14	112 ± 14	119 ± 17	111 ± 11	99 ± 16	0,83
	3 mies. (przechowywanie)	106 ± 3	106 ± 4	103 ± 16	101 ± 9	106 ± 13	101 ± 7	0,12
	p-wartość	0,04	0,28	0,31	0,04	0,53	0,82	
Skórka								
Rok	Rok 2019	288 ± 27	268 ± 61	253 ± 41	303 ± 44	258 ± 27	292 ± 98	0,56
	Rok 2020	321 ± 40	305 ± 30	305 ± 29	393 ± 27	319 ± 27	336 ± 33	0,05
	p-wartość (rok)	0,12	0,21	0,05	< 0,01	< 0,01	0,32	
Przechowywanie	0 mies. (po zbiorze)	314 ± 18	269 ± 65	263 ± 45	335 ± 79	293 ± 43	270 ± 54	0,16
	3 mies. (przechowywanie)	294 ± 49	303 ± 23	295 ± 48	361 ± 30	283 ± 42	357 ± 66	0,01
	p-wartość	0,37	0,25	0,26	0,48	0,69	0,03	

Zawartość flawonoli w miąższu jabłek była zróżnicowana w zależności od genotypu, okresu przechowywania (tabela 7a) i roku badań (tabela 7b). Największe różnice pomiędzy odmianami dotyczyły głównie kwercytyno-3-O-ksylozydu oraz kwercytyno-3-O-galaktozydu. W jabłkach klonu ‘JB’ odnotowano najwyższe stężenia większości glikozydów kwercetyny, szczególnie kwercytyno-3-O-ksylozydu, natomiast najniższe wartości występowały zwykle w odmianach ‘Šampion’ i ‘Idared’. Porównanie lat wskazuje, że w 2020 roku stężenia większości związków (m.in. kwercytyno-3-O-ksylozydu, kwercytyno-3-O-glukozydu oraz kwercytyno-3-O-arabinozydu) były wyższe niż w 2019 roku. Świadczą o tym istotne różnice statystyczne dla wielu odmian. Może to sugerować wpływ warunków pogodowych w sezonie wegetacyjnym na intensywność syntezy flawonoli w miąższu. Okres przechowywania również wpływał na zawartość flawonoli, jednak kierunek zmian zależał od związku. Po 3 miesiącach przechowywania obserwowano wzrost zawartości kwercytyno-3-O-ksylozydu, kwercytyno-3-O-

glukozydu i kwercytyno-3-O-galaktozydu, natomiast w przypadku kwercytyno-3-O-ramnozydu oraz kwercytyno-3-O-rutynozydu zmiany były mniej wyraźne lub nieregularne. Statystycznie istotne różnice potwierdzono zwłaszcza dla kwercytyno-3-O-ksylozydu i kwercytyno-3-O-galaktozydu. Podsumowując, w miąższu wykazano istotny wpływ odmiany, roku badań oraz przechowywania na zawartość większości flawonoli. Najbardziej stabilnym związkiem pod względem zmienności między latami i odmianami był kwercytyno-3-O-ramnozyd. W skórce jabłek zawartość flawonoli była wielokrotnie wyższa niż w miąższu, co potwierdza lokalizację tych związków w zewnętrznych warstwach owocu. Różnice między odmianami były wyraźne i w większości przypadków istotne statystycznie. Największe wartości notowano u klonu ‘JB’, natomiast ‘Šampion’ i ‘Idared’ charakteryzowały się niższą zawartością większości analizowanych glikozydów kwercetyny. Porównanie lat wykazało, że w 2020 roku poziom większości związków (zwłaszcza kwercytyno-3-O-ksylozydu, kwercytyno-3-O-glukozydu i kwercytyno-3-O-galaktozydu) był wyższy niż w 2019, co potwierdzają istotne różnice statystyczne dla większości odmian. Wyjątek stanowiły niektóre odmiany, np. ‘Idared’, dla której wartości nie różniły się istotnie między latami. Wpływ przechowywania w przypadku skórki był bardziej wyraźny niż dla miąższu. Po trzech miesiącach przechowywania stężenie większości związków wzrosło, zwłaszcza kwercytyno-3-O-ksylozydu, kwercytyno-3-O-glukozydu i kwercytyno-3-O-galaktozydu. Wzrost był istotny statystycznie w wielu przypadkach, co może być związane z procesami dojrzewania po zbiorze oraz zmianami w metabolizmie fenoli podczas przechowywania. W przypadku kwercytyno-3-O-ramnozydu i kwercytyno-3-O-rutynozydu zmiany były mniej jednoznaczne i zależały od odmiany. Ogólnie rzecz biorąc, zawartość flawonoli w skórce była bardziej zależna od odmiany i roku badań niż od okresu przechowywania. Największą zmienność wykazywały związki o wysokiej aktywności biologicznej – kwercytyno-3-O-glukozyd i kwercytyno-3-O-arabinozyd.

Tabela 7a. Wartości poszczególnych związków flawonolowych (mg·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od okresu przechowywania

	Czas przechowywania	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Miąższ								
kwercytyno-3-O-ksylozyd	0 (po zbiorze)	2,57 ± 0,42	2,49 ± 0,32	2,26 ± 0,09	5,97 ± 0,19	2,65 ± 0,10	2,33 ± 0,14	< 0,01
	3 mies.	3,22 ± 0,33	2,74 ± 0,29	2,76 ± 0,22	5,09 ± 0,78	3,07 ± 0,24	2,91 ± 0,51	< 0,01
	p-wartość	0,02	0,23	< 0,01	0,03	< 0,01	0,03	
kwercytyno-3-O-glukozyd	0 (po zbiorze)	2,21 ± 0,52	2,40 ± 0,75	2,27 ± 0,31	2,92 ± 0,39	2,49 ± 0,18	2,58 ± 0,24	0,17
	3 mies.	2,88 ± 0,49	2,84 ± 0,86	3,33 ± 0,49	2,80 ± 0,25	3,05 ± 0,21	3,25 ± 0,46	0,46
	p-wartość	0,06	0,41	< 0,01	0,58	0,01	0,02	
kwercytyno-3-O-ramnozyd	0 (po zbiorze)	6,97 ± 0,47	6,73 ± 0,63	7,34 ± 0,12	7,71 ± 0,31	6,93 ± 0,87	6,85 ± 0,56	0,08
	3 mies.	7,39 ± 0,08	6,91 ± 0,58	7,42 ± 0,14	6,85 ± 0,71	6,99 ± 0,65	6,96 ± 0,47	0,31
	p-wartość	0,08	0,64	0,36	0,03	0,91	0,75	
kwercytyno-3-O-galaktozyd	0 (po zbiorze)	74,4 ± 1,25	70,0 ± 12,8	80,5 ± 2,9	82,9 ± 4,0	81,7 ± 1,5	80,4 ± 2,4	< 0,01
	3 mies.	82,7 ± 1,5	84,7 ± 2,2	95,7 ± 13,6	74,4 ± 3,6	89,0 ± 2,9	83,5 ± 1,5	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	0,03	0,04	< 0,01	< 0,01	0,03	
kwercytyno-3-O-rutynozyd	0 (po zbiorze)	4,21 ± 2,31	2,22 ± 0,34	2,69 ± 0,54	5,84 ± 3,14	1,90 ± 0,28	2,04 ± 0,16	< 0,01
	3 mies.	4,81 ± 2,88	4,96 ± 1,92	4,74 ± 2,11	1,88 ± 0,36	5,67 ± 2,74	4,48 ± 2,54	0,17
	p-wartość	0,72	0,01	0,06	0,02	0,01	0,06	
kwercytyno-3-O-arabinozyd	0 (po zbiorze)	7,99 ± 2,51	8,74 ± 1,36	8,34 ± 1,70	8,88 ± 0,42	7,66 ± 0,64	7,89 ± 1,29	0,75
	3 mies.	9,02 ± 1,45	9,08 ± 1,60	8,88 ± 1,93	8,30 ± 0,77	8,94 ± 0,80	8,11 ± 1,12	0,80
	p-wartość	0,45	0,72	0,65	0,17	0,02	0,78	
Skórka								
kwercytyno-3-O-ksylozyd	0 (po zbiorze)	12,20 ± 0,36	14,48 ± 1,95	15,49 ± 1,88	14,76 ± 2,47	15,15 ± 2,14	14,67 ± 2,40	0,17
	3 mies.	12,89 ± 0,28	20,61 ± 2,81	16,99 ± 2,01	16,41 ± 1,52	20,25 ± 0,96	20,66 ± 2,03	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	< 0,01	0,25	0,23	< 0,01	< 0,01	
kwercytyno-3-O-glukozyd	0 (po zbiorze)	11,69 ± 0,77	8,37 ± 2,37	9,89 ± 4,11	20,41 ± 0,92	18,80 ± 5,44	6,15 ± 0,91	< 0,01
	3 mies.	15,06 ± 0,74	9,98 ± 0,79	10,70 ± 4,47	30,08 ± 3,02	18,85 ± 1,56	8,92 ± 2,59	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	0,18	0,77	< 0,01	0,98	0,05	
kwercytyno-3-O-ramnozyd	0 (po zbiorze)	1,25 ± 0,34	1,44 ± 0,50	1,52 ± 0,57	48,44 ± 11,56	22,37 ± 11,56	15,74 ± 1,61	< 0,01
	3 mies.	1,56 ± 0,57	3,05 ± 0,47	2,90 ± 1,85	34,53 ± 14,05	18,58 ± 1,98	23,47 ± 1,14	< 0,01
	p-wartość	0,33	< 0,01	0,14	0,12	0,38	< 0,01	
kwercytyno-3-O-galaktozyd	0 (po zbiorze)	146,0 ± 4,6	171,7 ± 9,5	232,0 ± 9,3	202,8 ± 42,1	186,3 ± 19,9	176,7 ± 13,8	< 0,01
	3 mies.	164,2 ± 2,4	190,8 ± 0,7	244,9 ± 5,5	169,8 ± 16,7	180,3 ± 22,0	193,2 ± 8,5	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	< 0,01	0,02	0,13	0,66	0,05	
kwercytyno-3-O-rutynozyd	0 (po zbiorze)	4,13 ± 0,25	3,85 ± 0,80	4,43 ± 0,13	4,61 ± 0,21	3,06 ± 0,91	4,27 ± 0,33	< 0,01
	3 mies.	4,37 ± 0,28	4,95 ± 0,64	5,53 ± 0,29	5,01 ± 3,42	5,96 ± 1,50	6,25 ± 0,25	0,43
	p-wartość	0,19	0,04	< 0,01	0,80	< 0,01	< 0,01	
kwercytyno-3-O-arabinozyd	0 (po zbiorze)	51,31 ± 2,02	29,04 ± 1,32	33,83 ± 8,00	34,22 ± 6,88	8,25 ± 2,49	23,93 ± 1,06	< 0,01
	3 mies.	63,62 ± 3,22	31,67 ± 0,60	37,72 ± 10,78	25,77 ± 9,01	29,71 ± 2,59	25,36 ± 2,26	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	< 0,01	0,53	0,13	< 0,01	0,23	

Tabela 7b. Wartości poszczególnych związków flawonolowych (mg·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań

	Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Miąższ								
kwercytyno-3-O-ksylozyd	2019	2,54 ± 0,37	2,32 ± 0,13	2,50 ± 0,27	5,19 ± 0,84	2,95 ± 0,31	2,32 ± 0,13	< 0,01
	2020	3,25 ± 0,33	2,91 ± 0,16	2,52 ± 0,33	5,87 ± 0,34	2,77 ± 0,22	2,92 ± 0,50	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	< 0,01	0,89	0,12	0,32	0,03	
kwercytyno-3-O-glukozyd	2019	2,15 ± 0,34	1,82 ± 0,18	2,51 ± 0,53	2,75 ± 0,23	2,71 ± 0,41	2,84 ± 0,12	< 0,01
	2020	2,95 ± 0,55	3,42 ± 0,30	3,10 ± 0,66	2,98 ± 0,38	2,83 ± 0,24	2,99 ± 0,69	0,54
	p-wartość	0,02	< 0,01	0,15	0,28	0,59	0,63	
kwercytyno-3-O-ramnozyd	2019	6,96 ± 0,46	6,26 ± 0,32	7,42 ± 0,15	7,06 ± 0,93	6,28 ± 0,34	6,40 ± 0,10	< 0,01
	2020	7,39 ± 0,07	7,39 ± 0,12	7,34 ± 0,10	7,49 ± 0,13	7,64 ± 0,36	7,41 ± 0,06	0,11
	p-wartość	0,07	< 0,01	0,99	0,33	< 0,01	< 0,01	
kwercytyno-3-O-galaktozyd	2019	79,4 ± 4,6	84,8 ± 2,1	96,1 ± 13,2	80,2 ± 6,4	84,7 ± 1,5	83,8 ± 1,2	< 0,01
	2020	77,7 ± 3,9	69,9 ± 12,6	80,0 ± 2,4	77,0 ± 4,2	86,0 ± 5,8	80,1 ± 2,1	< 0,01
	p-wartość	0,54	0,03	0,02	0,37	0,62	< 0,01	
kwercytyno-3-O-rutynozyd	2019	7,09 ± 0,76	4,51 ± 2,37	4,89 ± 1,92	5,55 ± 3,42	5,23 ± 3,17	4,60 ± 2,43	0,61
	2020	1,94 ± 0,16	2,67 ± 0,54	2,54 ± 0,62	2,16 ± 0,62	2,34 ± 0,67	1,92 ± 0,04	0,13
	p-wartość	< 0,01	0,12	0,03	0,06	0,07	0,03	
kwercytyno-3-O-arabinozyd	2019	6,60 ± 1,19	7,45 ± 0,11	6,92 ± 0,40	8,26 ± 0,74	7,74 ± 0,88	6,84 ± 0,19	< 0,01
	2020	10,41 ± 0,51	10,37 ± 0,44	10,30 ± 0,94	8,91 ± 0,42	8,86 ± 0,70	9,15 ± 0,52	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,12	0,05	< 0,01	
Skórka								
kwercytyno-3-O-ksylozyd	2019	12,25 ± 1,74	15,27 ± 1,89	14,86 ± 1,32	13,62 ± 1,33	16,62 ± 3,36	15,72 ± 3,48	0,1
	2020	12,84 ± 0,33	19,82 ± 3,68	17,62 ± 1,15	17,54 ± 0,61	18,79 ± 2,21	19,61 ± 2,86	< 0,01
	p-wartość	0,03	0,05	0,02	< 0,01	0,26	< 0,01	
kwercytyno-3-O-glukozyd	2019	12,66 ± 1,74	16,61 ± 2,57	20,03 ± 1,32	27,03 ± 5,99	22,04 ± 2,44	8,50 ± 0,56	< 0,01
	2020	14,10 ± 1,67	10,73 ± 0,33	14,57 ± 0,68	23,46 ± 3,81	15,61 ± 2,31	9,27 ± 2,24	< 0,01
	p-wartość	0,21	< 0,01	< 0,01	0,29	< 0,01	< 0,01	
kwercytyno-3-O-ramnozyd	2019	0,98 ± 0,05	1,86 ± 0,81	1,04 ± 0,03	42,72 ± 5,93	25,93 ± 9,03	19,92 ± 2,67	< 0,01
	2020	1,83 ± 0,35	2,63 ± 0,90	3,38 ± 1,39	40,25 ± 19,73	16,01 ± 4,29	19,28 ± 5,14	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	0,18	< 0,01	0,79	0,05	0,81	
kwercytyno-3-O-galaktozyd	2019	157,6 ± 7,1	176,6 ± 14,3	232,1 ± 10,1	173,4 ± 13,0	170,5 ± 23,3	173,9 ± 11,1	< 0,01
	2020	152,6 ± 11,4	185,8 ± 5,2	244,8 ± 4,1	199,2 ± 45,8	196,1 ± 12,5	196,0 ± 5,7	< 0,01
	p-wartość	0,43	0,21	0,03	0,25	0,04	< 0,01	
kwercytyno-3-O-rutynozyd	2019	4,01 ± 0,13	3,80 ± 0,79	4,84 ± 0,47	6,50 ± 1,97	5,68 ± 1,79	5,26 ± 1,25	0,02
	2020	4,49 ± 0,18	5,00 ± 0,55	5,11 ± 0,67	3,12 ± 1,49	3,34 ± 1,18	5,27 ± 0,76	< 0,01
	p-wartość	< 0,01	0,02	0,47	0,01	0,04	0,99	
kwercytyno-3-O-arabinozyd	2019	59,21 ± 7,60	30,02 ± 2,22	26,45 ± 1,59	31,70 ± 3,22	20,71 ± 2,32	23,04 ± 2,43	< 0,01
	2020	55,72 ± 5,13	30,69 ± 0,64	45,10 ± 3,39	28,28 ± 12,17	17,26 ± 11,49	26,26 ± 1,37	< 0,01
	p-wartość	0,41	0,53	< 0,01	0,56	0,63	< 0,01	

Zawartość kwasów fenolowych w miąższu badanych odmian jabłek i klonu ‘JB’ wykazywała istotne zróżnicowanie w zależności od genotypu, roku badań i okresu przechowywania (tabela 8). Najwyższe stężenia kwasu chlorogenowego odnotowano w odmianie ‘Idared’, natomiast najniższe – w odmianie ‘Šampion’. Wskazuje to na silny wpływ czynników genetycznych na akumulację tego związku. Różnice pomiędzy odmianami były istotne statystycznie. Porównanie lat 2019 i 2020 wykazało, że w większości odmian nie zaobserwowano dużych różnic w zawartości kwasu chlorogenowego, z wyjątkiem ‘Ligol’ i ‘Chopin’, w których w 2020 roku stężenie tego związku było istotnie niższe. Wskazuje to na umiarkowany wpływ czynników środowiskowych w danym sezonie wegetacyjnym na biosyntezę tego kwasu.

Glukozyd kwasu kawowego występował w znacznie niższych ilościach niż kwas chlorogenowy, a jego zawartość zależała w największym stopniu od odmiany i okresu przechowywania. Jabłka klonu ‘JB’ wyróżniały się zdecydowanie wyższą zawartością tego związku w obu latach badań, co potwierdza bardzo istotne różnice między badanymi genotypami. W roku 2020 odnotowano wyższe wartości w owocach odmian ‘Šampion’, ‘Ligol’ i ‘Chopin’, co może wskazywać na zwiększoną aktywność enzymatyczną związaną z syntezą pochodnych kwasu kawowego w warunkach danego sezonu. W przypadku kwasu p-kumaroylo-chinowego w miąższu wykazano istotne różnice między latami w odmianach ‘Šampion’ i ‘Ligol’. Odmiana ‘Ligol’ cechowała się wyjątkowo wysoką zawartością tego związku w 2020 roku, co mogło wynikać z różnic w warunkach świetlnych lub termicznych w okresie dojrzewania owoców. Okres przechowywania wpłynął na zwiększenie zawartości większości badanych kwasów. Po 3 miesiącach przechowywania stężenie kwasu chlorogenowego istotnie wzrosło w odmianach ‘Gala Brookfield’ i ‘Šampion’, natomiast w owocach klonu ‘JB’ i odmiany ‘Chopin’ zmiany nie były statystycznie potwierdzone. Zawartość glikozydu kwasu kawowego wzrosła po przechowywaniu w większości odmian, podczas gdy dla kwasu p-kumaroylo-chinowego tendencje wzrostowe wystąpiły głównie w jabłkach odmiany ‘Gala Brookfield’. Ogólnie przechowywanie sprzyjało wzrostowi zawartości związków fenolowych, co może wynikać z aktywacji szlaków fenolowych w wyniku stresu oksydacyjnego.

W skórce jabłek zawartość kwasów fenolowych była kilkukrotnie wyższa niż w miąższu, co jest zgodne z typową lokalizacją tych związków w tkankach peryferyjnych. Najwyższe stężenia kwasu chlorogenowego odnotowano w jabłkach odmian ‘Gala Brookfield’ i ‘Idared’, a najniższe w owocach odmiany ‘Chopin’. Wpływ odmiany był bardzo wyraźny. Różnice między latami wskazują, że w 2020 roku poziom kwasu

chlorogenowego był wyraźnie wyższy niż w 2019, szczególnie w jabłkach ‘Gala Brookfield’ i ‘Chopin’. Wzrost ten może być efektem różnic w nasłonecznieniu i temperaturze, które stymulują aktywność enzymów uczestniczących w biosyntezie związków fenolowych. Zawartość glukozydu kwasu kawowego wykazała silne zróżnicowanie między odmianami i latami. W 2020 roku wartości tego związku były znacząco wyższe w owocach ‘Ligol’, ‘Chopin’ i ‘Idared’, podczas gdy jabłkach odmiany ‘Šampion’ i klonu ‘JB’ zanotowano niższe poziomy. Wysoka zmienność może wskazywać na znaczący wpływ interakcji odmiana × środowisko na syntezę tego związku. Kwas p-kumaroylo-chinowy występował w dużych ilościach w skórce jabłek klonu ‘JB’ i odmian ‘Ligol’ i ‘Gala Brookfield’. W 2020 roku jego zawartość była istotnie wyższa niż w 2019 dla większości odmian, przy czym największe wartości odnotowano w owocach klonu ‘JB’. Okres przechowywania wpłynął na wzrost zawartości kwasów fenolowych w skórce. Po 3 miesiącach przechowywania stężenie kwasu chlorogenowego zwiększyło się istotnie w owocach ‘Šampion’, ‘Ligol’, ‘JB’, ‘Chopin’ i ‘Idared’. Zmiany w zawartości glukozydu kwasu kawowego były mniej wyraźne, a statystycznie istotne różnice zanotowano jedynie w nielicznych przypadkach. Dla kwasu p-kumaroylo-chinowego po przechowywaniu obserwowano tendencję wzrostową, szczególnie w jabłkach odmian ‘Gala Brookfield’ i ‘Šampion’.

Tabela 8. Wartości poszczególnych związków flawonolowych (mg·100 g^{-1} ś.m.) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań i okresu przechowywania

MIĄŻSZ									
		Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Kwas chlorogenowy	Rok przechowywania	2019	9,08 ± 1,70	2,27 ± 0,21	6,90 ± 0,53	6,08 ± 0,53	5,62 ± 0,18	11,69 ± 0,98	< 0,01
		2020	9,93 ± 1,20	2,39 ± 0,17	3,82 ± 0,46	5,39 ± 1,16	6,32 ± 0,57	12,34 ± 0,11	< 0,01
		p-wartość	0,39	0,32	< 0,01	0,26	0,02	0,17	—
	Okres przechowywania	0	8,15 ± 0,84	2,18 ± 0,10	4,95 ± 1,60	6,03 ± 0,49	5,66 ± 0,31	11,75 ± 1,00	< 0,01
		3	10,86 ± 0,53	2,48 ± 0,15	5,77 ± 1,53	5,44 ± 1,20	6,27 ± 0,57	12,28 ± 0,20	< 0,01
		p-wartość	< 0,01	< 0,01	0,43	0,33	0,06	0,27	—
Kafeloiloglukozyd	Rok przechowywania	2019	0,49 ± 0,07	0,46 ± 0,10	0,52 ± 0,12	0,60 ± 0,19	0,72 ± 0,10	0,31 ± 0,09	< 0,01
		2020	0,50 ± 0,03	0,64 ± 0,10	0,76 ± 0,17	6,26 ± 2,21	0,56 ± 0,04	0,40 ± 0,07	< 0,01
		p-wartość	0,81	0,02	0,02	0,85	< 0,01	0,12	—
	Okres przechowywania	0	0,45 ± 0,03	0,45 ± 0,10	0,50 ± 0,12	0,47 ± 0,55	0,59 ± 0,06	0,27 ± 0,05	< 0,01
		3	0,54 ± 0,02	0,65 ± 0,09	0,78 ± 0,15	4,09 ± 0,16	0,61 ± 0,19	0,31 ± 0,07	< 0,01
		p-wartość	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1	0,1	< 0,01	—
Kwas p-kumarojlochinowy	Rok przechowywania	2019	1,59 ± 0,65	0,93 ± 0,11	1,49 ± 0,19	1,85 ± 0,09	1,65 ± 0,19	1,27 ± 0,06	< 0,01
		2020	1,22 ± 0,13	0,45 ± 0,12	3,16 ± 0,98	2,21 ± 0,54	1,64 ± 0,21	1,30 ± 0,08	< 0,01
		p-wartość	0,23	< 0,01	< 0,01	0,17	0,95	0,84	—
	Okres przechowywania	0	1,05 ± 0,13	0,58 ± 0,24	2,14 ± 0,24	1,51 ± 0,18	1,13 ± 0,10	1,15 ± 0,08	< 0,01
		3	1,76 ± 0,48	0,80 ± 0,25	3,34 ± 1,63	1,86 ± 0,34	1,78 ± 0,11	1,44 ± 0,15	< 0,01
		p-wartość	< 0,01	0,18	0,18	0,21	0,02	< 0,01	—

SKÓRKA									
		Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
Kwas chlorogenowy	Rok przechowywania	2019	21,29 ± 5,71	18,42 ± 3,14	22,07 ± 0,32	21,02 ± 8,59	10,11 ± 1,39	25,04 ± 5,24	< 0,01
		2020	38,00 ± 2,22	16,74 ± 2,50	22,79 ± 4,12	19,28 ± 1,31	8,54 ± 0,82	29,12 ± 3,68	< 0,01
		p-wartość	< 0,01	0,37	0,7	0,67	0,05	0,34	—
	Okres przechowywania	0	25,73 ± 10,13	14,78 ± 0,82	20,40 ± 1,68	14,85 ± 4,65	8,38 ± 0,65	24,12 ± 4,12	< 0,01
		3	33,55 ± 6,63	20,39 ± 1,17	24,46 ± 2,51	19,31 ± 2,93	10,27 ± 1,28	26,81 ± 3,75	0,02
		p-wartość	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,07	0,02	—
Kafeloiloglukozyd	Rok przechowywania	2019	7,71 ± 0,43	5,27 ± 0,28	2,32 ± 0,40	3,19 ± 0,48	7,13 ± 0,66	7,37 ± 0,56	< 0,01
		2020	7,76 ± 0,28	3,51 ± 0,16	9,11 ± 0,25	4,39 ± 0,43	10,65 ± 0,65	9,12 ± 0,65	< 0,01
		p-wartość	0,82	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
	Okres przechowywania	0	7,55 ± 0,30	4,34 ± 0,70	5,47 ± 3,49	3,76 ± 1,03	3,83 ± 1,75	7,86 ± 0,84	< 0,01
		3	7,32 ± 0,42	4,44 ± 1,08	5,96 ± 3,31	3,82 ± 0,97	9,47 ± 1,81	8,82 ± 0,95	< 0,01
		p-wartość	0,09	0,86	0,82	0,89	0,32	0,07	—
Kwas p-kumarojlochinowy	Rok przechowywania	2019	8,79 ± 0,46	7,97 ± 1,05	13,38 ± 1,94	15,73 ± 1,19	11,96 ± 0,19	9,40 ± 1,92	< 0,01
		2020	9,40 ± 0,26	9,46 ± 0,52	9,14 ± 6,00	14,76 ± 1,40	8,81 ± 2,74	8,51 ± 2,99	0,08
		p-wartość	0,03	0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
	Okres przechowywania	0	8,79 ± 0,46	7,71 ± 0,82	7,25 ± 4,46	11,44 ± 4,46	8,32 ± 0,60	5,66 ± 1,04	0,04
		3	9,40 ± 0,26	9,46 ± 0,52	9,14 ± 6,00	14,76 ± 1,40	8,81 ± 2,74	8,51 ± 2,99	0,08

Ogólnie można stwierdzić, że zawartość poszczególnych makro- i mikroelementów w owocach była determinowana zarówno przez cechy odmianowe, jak i przez rok prowadzenia badań. Pod względem zawartości fosforu i potasu nowe genotypy hodowli SGGW wyróżniały się wyższym poziomem tych składników, choć nie w każdym roku badań (tabela 9). Odmiany ‘Gala Brookfield’ i ‘Idared’ również charakteryzowały się wyższą zawartością fosforu i potasu w owocach, jednak w ich przypadku czynniki klimatyczne również wpływały na poziom omawianych makroelementów. Klon ‘JB’ cechował się niższą zawartością wapnia, podobnie jak odmiana ‘Chopin’. W obu latach badań owoce odmiany ‘Gala Brookfield’ wyróżniały się natomiast największą

zasobnością w wapń. Z kolei pod względem zawartości magnezu klon ‘JB’ należał do grupy odmian o wyższym poziomie tego pierwiastka w owocach, w przeciwieństwie do odmiany ‘Chopin’. Ocena zawartości mikroelementów w owocach badanych odmian wykazała, że owoce klonu ‘JB’ charakteryzowały się niższą zawartością żelaza, miedzi i cynku w porównaniu z pozostałymi odmianami (tabela 10). Natomiast odmiana ‘Chopin’ należała do grupy odmian o wyższej lub średniej zawartości mikroelementów w owocach, w zależności od analizowanego składnika i roku badań. Poziom mikroelementów wykazywał zmienność między latami, jednak kierunki zmian — zwłaszcza w odniesieniu do zawartości żelaza i miedzi — nie pozwalają na wskazanie jednoznacznej tendencji.

Tabela 9. Zawartość makroskładników mineralnych w jabłkach (mg·kg^{-1} ś.m.)

Fosfor (Phosphorus)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	111 ± 1	81 ± 5	63 ± 5	113 ± 7	100 ± 7	102 ± 1	< 0,01
2020	85 ± 1	85 ± 1	77 ± 1	130 ± 2	115 ± 2	85 ± 1	< 0,01
p-wartość	< 0,01	0,23	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
Potas (Potassium)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	1118 ± 8	960 ± 61	534 ± 27	1247 ± 49	881 ± 25	1321 ± 18	< 0,01
2020	1000 ± 2	925 ± 12	851 ± 12	1458 ± 36	1120 ± 21	977 ± 10	< 0,01
p-wartość	< 0,01	0,38	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
Wapń (Calcium)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	68 ± 2	44 ± 3	30 ± 2	40 ± 1	47 ± 5	41 ± 3	< 0,01
2020	60 ± 2	82 ± 1	23 ± 1	46 ± 1	47 ± 1	51 ± 1	< 0,01
p-wartość	< 0,01	< 0,01	0,01	0,81	< 0,01	< 0,01	—
Magnez (Magnesium)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	46 ± 1	44 ± 2	29 ± 2	54 ± 1	38 ± 3	61 ± 1	< 0,01
2020	53 ± 1	54 ± 1	39 ± 1	68 ± 1	46 ± 3	49 ± 1	< 0,01
p-wartość	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—

Tabela 10. Zawartość mikroskładników mineralnych w jabłkach (mg·kg^{-1} świeżej masy)

Żelazo (Iron)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	1,56 ± 0,07	1,91 ± 0,06	1,41 ± 0,04	1,37 ± 0,06	1,51 ± 0,11	1,74 ± 0,11	< 0,01
2020	1,69 ± 0,01	1,57 ± 0,03	0,79 ± 0,07	1,53 ± 0,01	1,36 ± 0,07	1,28 ± 0,02	< 0,01
p-wartość	0,04	< 0,01	< 0,01	0,01	0,13	< 0,01	—
Miedź (Copper)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	0,80 ± 0,02	0,84 ± 0,02	0,76 ± 0,02	0,37 ± 0,03	0,77 ± 0,06	0,70 ± 0,09	< 0,01
2020	0,35 ± 0,05	0,51 ± 0,01	0,27 ± 0,05	0,35 ± 0,06	0,40 ± 0,04	0,32 ± 0,03	< 0,01
p-wartość	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,54	< 0,01	< 0,01	—
Mangan (Manganese)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	0,42 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,70 ± 0,02	0,40 ± 0,04	0,41 ± 0,01	< 0,01
2020	0,46 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,33 ± 0,05	0,73 ± 0,08	0,41 ± 0,04	0,37 ± 0,01	< 0,01
p-wartość	0,01	0,49	0,04	0,59	0,83	0,06	—
Cynk (Zinc)							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	0,83 ± 0,03	0,53 ± 0,11	0,31 ± 0,03	0,26 ± 0,02	0,88 ± 0,38	0,75 ± 0,25	< 0,01
2020	0,33 ± 0,05	0,41 ± 0,07	0,71 ± 0,04	0,27 ± 0,01	0,35 ± 0,09	0,59 ± 0,04	< 0,01
p-wartość	< 0,01	0,17	< 0,01	0,45	0,08	0,36	—

Zawartość błonnika w owocach badanych odmian jabłoni wykazywała zróżnicowanie zależne zarówno od cech odmianowych, jak i od roku prowadzenia badań. W 2019 roku wyższym poziomem błonnika charakteryzowały się owoce odmian ‘Ligol’, ‘Idared’ oraz klonu ‘JB’. Odmiana ‘Chopin’ wyróżniała się natomiast nieco niższą wartością tego wskaźnika (tabela 11). W 2020 roku odnotowano istotne obniżenie zawartości błonnika w owocach niemal wszystkich badanych odmian. Wyjątek stanowił klon ‘JB’, w którego owocach stwierdzono ponad dwukrotnie wyższy poziom błonnika w porównaniu z pozostałymi odmianami, choć również w jego przypadku wartość tego wskaźnika uległa istotnemu zmniejszeniu w porównaniu z rokiem 2019. Pozostałe odmiany charakteryzowały się zbliżoną zawartością błonnika w owocach. Po okresie przechowywania wzrost zawartości błonnika zaobserwowano jedynie w owocach

odmiany ‘Chopin’. W owocach pozostałych odmian odnotowano spadek zawartości błonnika, jednak zmiany te nie zostały potwierdzone statystycznie.

Tabela 11. Wartości błonnika pokarmowego (%) w miąższu i skórce jabłek w zależności od roku badań i okresu przechowywania

Według roku							
Rok	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
2019	1,44 ± 0,24	1,90 ± 0,14	2,55 ± 0,19	2,28 ± 0,12	2,13 ± 0,16	2,35 ± 0,19	< 0,01
2020	0,66 ± 0,19	0,57 ± 0,08	0,55 ± 0,01	1,63 ± 0,12	0,82 ± 0,35	0,60 ± 0,11	< 0,01
p-wartość	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
Według okresu przechowywania							
Przechowywanie (mies.)	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	p-wartość
0	1,22 ± 0,43	1,25 ± 0,82	1,61 ± 1,21	2,05 ± 0,35	1,38 ± 0,97	1,54 ± 1,09	0,6
3	0,85 ± 0,39	1,22 ± 0,64	1,45 ± 1,04	1,87 ± 0,37	1,57 ± 0,48	1,45 ± 0,82	0,8
p-wartość	0,15	0,94	0,82	0,4	0,69	0,93	—

Bezpieczeństwo żywności stanowi istotny wskaźnik oceny jakości owoców, oparty na analizie związków toksycznych dla człowieka. W obu latach badań zawartość pozostałości środków ochrony roślin (APC) w owocach była znacznie niższa od wartości dopuszczonych przepisami Unii Europejskiej (tabela 12). Warto podkreślić, że w 2019 roku jedynie owoce odmiany ‘Chopin’ oraz klonu ‘JB’ nie zawierały żadnych pozostałości środków ochrony roślin. Natomiast w 2020 roku obie te odmiany charakteryzowały się mniejszą liczbą wykrytych związków (klon ‘JB’ – 3 związki, ‘Chopin’ – 4 związki) w porównaniu z odmianą ‘Gala Brookfield’, będącą jednym z popularnych sportów podstawowej odmiany jabłoni uprawianej w Unii Europejskiej, w której stwierdzono obecność sześciu związków.

Tabela 12. Pozostałości pestycydów (mg·kg^{-1} ś.m.) w jabłkach w zależności od odmiany i roku badań

Rok 2019							
Pestycyd	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	Limit (mg·kg^{-1})
Kaptan	0,016 ± 0,008	0,012 ± 0,006	—	—	—	1,9 ± 0,95	3
Fludioksonil (Fludioxonil)	0,052 ± 0,026	0,010 ± 0,005	—	—	—	—	5
Ditianon (Dithianon)	0,037 ± 0,019	0,040 ± 0,020	0,018 ± 0,009	—	—	—	3
Flonicamid	0,022 ± 0,011	—	—	—	—	—	0,2
Spirotetramat	0,016 ± 0,008	—	—	—	—	—	0,8
Rok 2020							
Pestycyd	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	JB	Chopin	Idared	Limit (mg·kg^{-1})
Kaptan	0,36 ± 0,18	0,20 ± 0,10	0,12 ± 0,06	0,11 ± 0,06	0,009 ± 0,01	1,6 ± 0,8	3
Fludioksonil (Fludioxonil)	0,12 ± 0,06	—	0,077 ± 0,039	—	—	—	5
Tebukonazol (Tebuconazole)	0,11 ± 0,06	0,029 ± 0,015	0,073 ± 0,037	0,020 ± 0,01	—	—	0,3
Boskalid (Boscalid)	0,07 ± 0,04	0,08 ± 0,04	—	—	—	0,12 ± 0,06	2
Fluopyram	0,13 ± 0,07	—	0,026 ± 0,013	0,081 ± 0,04	—	—	0,5
Thiacloprid	0,07 ± 0,04	0,007 ± 0,04	0,005 ± 0,03	—	—	—	0,3
Pyraklostrobina (Pyraclostrobin)	—	—	0,029 ± 0,015	—	—	—	0,3
Metoksyfenozyd (Methoxyfenozide)	—	—	—	—	—	0,010 ± 0,00	2

II.3. Dyskusja

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają istotny wpływ cech genotypowych na poziom związków bioaktywnych oraz właściwości przeciwutleniające jabłek, co jest zgodne z wcześniejszymi doniesieniami literaturowymi dotyczącymi

biochemicznego zróżnicowania owoców (Wang i in. 2015; Duda-Chodak i in. 2010). Spośród analizowanych odmian wyraźnie wyróżniał się klon ‘JB’, charakteryzujący się czerwoną barwą miąższu oraz najwyższym poziomem całkowitych polifenoli (TPC), flawonoidów i kwasów fenolowych, a także wysokim stężeniem wybranych związków fenolowych, takich jak pochodne kwercetyny. Istotnie wyższa aktywność przeciwutleniająca klonu ‘JB’ w porównaniu z tradycyjnie uprawianymi odmianami, tj. ‘Ligol’ czy ‘Šampion’, znajduje potwierdzenie w literaturze, która wskazuje na wyjątkowo wysokie stężenie antocyjanów i ich pochodnych w odmianach o czerwonym miąższu (Znang i in. 2019; Znang i in. 2013; Li i in. 2020). W 2019 roku aktywność przeciwutleniająca miąższu klonu ‘JB’ była o ponad 70% wyższa niż w przypadku odmian ‘Ligol’ i ‘Šampion’, a także przewyższała wartości notowane dla powszechnie uprawianych w Europie odmian ‘Idared’ i ‘Gala’. Wyniki te potwierdzają potencjał klonu ‘JB’ jako cennego źródła związków bioaktywnych o działaniu przeciwutleniającym.

Odmiana ‘Chopin’, choć nie osiągnęła tak wysokich wartości jak klon ‘JB’, wykazała zrównoważony profil polifenolowy i stabilny poziom aktywności przeciwutleniającej, co czyni ją interesującą z punktu widzenia żywienia. Wyróżnia się ona niską alergennością oraz brakiem rumieńca na skórce. Warto podkreślić, że mimo iż ‘Chopin’ nie dominowała pod względem całkowitej zawartości polifenoli, jej miąższ charakteryzował się umiarkowanym poziomem tych związków, zbliżonym do wartości notowanych dla odmian ‘Idared’ i ‘Gala Brookfield’. Dodatkowo wykazywała stosunkowo wysoką stabilność niektórych związków w trakcie przechowywania, co może mieć znaczenie w kontekście technologii przechowalniczych. Odmiana ta cechowała się również brakiem pozostałości środków ochrony roślin, co czyni ją szczególnie atrakcyjną dla konsumentów preferujących żywność ekologiczną i funkcjonalną (Ferreira i in. 2021; L. de Graf i in. 2022).

Interesującym zjawiskiem zaobserwowanym w badaniach był wielokierunkowy wpływ przechowywania owoców na zawartość poszczególnych związków fenolowych. Podczas gdy w niektórych odmianach (np. ‘Gala Brookfield’, ‘Idared’) przechowywanie powodowało wzrost zawartości m.in. kwasu chlorogenowego, w klonie ‘JB’ stwierdzono spadek całkowitej zawartości polifenoli oraz części flawonoidów. Całkowita zawartość polifenoli i aktywność przeciwutleniająca były szczególnie wysokie w miąższu klonu ‘JB’, gdzie wartość TPC w 2019 roku ponad trzykrotnie przekraczała poziom notowany dla odmiany ‘Ligol’. Wartość ta utrzymała się również w 2020 roku, co wskazuje na genetycznie uwarunkowaną zdolność tej odmiany do biosyntezy i utrzymania wysokiego

poziomu związków fenolowych, niezależnie od zmiennych warunków środowiskowych (Raudone i in. 2017; Mignard i in. 2021). Jednocześnie spadek zawartości TPC po przechowywaniu może wynikać z oksydacyjnej degradacji części związków fenolowych, co jest zgodne z obserwacjami innych autorów (Kalt i in. 1999). Może to również świadczyć o wysokiej wrażliwości metabolicznej tej odmiany na warunki przechowalnicze, co wymaga dalszych badań w kierunku optymalizacji przechowywania owoców o czerwonym miąższu.

Zgodnie z wcześniejszymi doniesieniami (Francini i in. 2013; Markowski i Płocharski 2006) skórka jabłek zawiera więcej flawonoli niż miąższ. Najwyższe wartości tego wskaźnika w skórce odnotowano również dla klonu ‘JB’, który utrzymywał wysokie stężenia flawonoli, takich jak kwercetyna-3-O-glukozyd i kwercetyna-3-O-ksylozyd, niezależnie od roku badań. Warto zauważyć, że zawartość flawonoidów w skórce wzrastała po przechowywaniu, co może być związane z aktywacją wtórnych szlaków biosyntezy w warunkach stresu oksydacyjnego towarzyszącego przechowywaniu (Preti i in. 2021; Łysiak i in. 2020). Dane literaturowe wskazują, że zawartość związków fenolowych w jabłkach zależy nie tylko od odmiany, lecz również od warunków klimatycznych i geograficznych (Raudone i in. 2017; Preti i Tarola 2021). Wyniki badań z dwóch sezonów (2019 i 2020) wykazały istotne różnice międzyroczne w zawartości związków bioaktywnych, potwierdzając znaczenie warunków pogodowych w okresie wegetacji dla metabolizmu wtórnego jabłek. Na przykład zawartość kwercetyny-3-O-glukozydu i innych glikozydów flawonoidowych istotnie wzrosła w 2020 roku w miąższu i skórce kilku odmian, w tym ‘Šampion’, ‘Idared’ i ‘Ligol’, co może być związane ze zwiększonym nasłonecznieniem lub stresem środowiskowym w tym okresie (Maria i in. 2006; Rucević i in. 2003; Lončarić i in. 2014; Znang i in. 2018).

Istotne zmiany odnotowano również w zawartości poszczególnych związków fenolowych, takich jak kwas chlorogenowy, kwas p-kumarowo-chinowy oraz glukozyd kwasu kawowego. Wzrost zawartości kwasu chlorogenowego po przechowywaniu u większości odmian (zwłaszcza w skórce) może wskazywać na aktywację szlaku biosyntezy fenylopropanoidów lub przemiany metabolitów prekursorowych. Utrzymujący się wysoki poziom kwasu chlorogenowego w odmianie ‘Idared’ może świadczyć o naturalnie wysokim potencjale akumulacyjnym tego związku.

Należy podkreślić, że zmiany w składzie polifenoli i aktywności przeciwutleniającej były silnie zależne od odmiany oraz interakcji z rokiem badań. Warunki klimatyczne – w tym długość okresu wegetacji, średnie temperatury i

nasłonecznienie – wpływają na intensywność syntezy fenoli i flawonoli (Yourung i in. 2019; Mignard i in. 2021). Wyższe średnie temperatury w 2020 roku mogły sprzyjać zwiększonej ekspresji genów zaangażowanych w biosyntezę związków fenolowych, co potwierdza wyższa zawartość wielu analizowanych metabolitów w owocach w drugim roku badań.

Dane dotyczące zawartości makro- i mikroelementów również okazały się interesujące. Owoce odmiany ‘Chopin’ charakteryzowały się wyższą zawartością żelaza i cynku niż jabłka klonu ‘JB’, co może mieć znaczenie z punktu widzenia wartości odżywczej. Z kolei wyższa zawartość magnezu w klonie ‘JB’ może wspierać aktywność enzymatyczną związaną z metabolizmem fenoli i flawonoidów, ponieważ magnez stanowi kofaktor wielu enzymów biosyntezy wtórnej (Liu 2013). Mimo, że zmienność międzyroczna nie pozwala na jednoznaczne określenie profilu mineralnego, obie odmiany wpisują się w ogólną tendencję wzrostu jakości odżywczej jabłek (Fallahi i Simons 1996; Tomala 1997).

W kontekście żywności funkcjonalnej należy również podkreślić znaczenie zawartości błonnika pokarmowego, którego istotnie wyższy poziom w klonie ‘JB’ w porównaniu z pozostałymi odmianami w obu sezonach badań wskazuje na dodatkowe korzyści zdrowotne tej odmiany. Wysoka zawartość błonnika może być związana z grubszą strukturą ścian komórkowych oraz większą akumulacją fenoli związanych z pektynami, co potwierdzają inne badania (Jakobek 2015). Zawartość błonnika w jabłkach ma istotne znaczenie dla regulacji poziomu glukozy we krwi oraz profilaktyki chorób metabolicznych (Gayer i in 2019; Głąbska i in. 2020), co czyni klon ‘JB’ szczególnie atrakcyjnym surowcem do produkcji żywności funkcjonalnej.

Ocena bezpieczeństwa żywności, oparta na analizie pozostałości środków ochrony roślin, wskazuje na przewagę nowych genotypów (‘Chopin’ i klonu ‘JB’) nad odmianami konwencjonalnymi, takimi jak ‘Gala Brookfield’. Zarówno ‘Chopin’, jak i klon ‘JB’ charakteryzowały się bardzo niskim poziomem pozostałości środków ochrony roślin — w 2019 roku były to jedyne odmiany, w których nie stwierdzono ich obecności, co jest zgodne z aktualnymi trendami konsumenckimi ukierunkowanymi na poszukiwanie żywności wolnej od pestycydów (Ferreira i in. 2021; L. de Graaf i in. 2022).

II.2.3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano poniższe wnioski. Ujęte punkty stanowią syntetyczne podsumowanie najważniejszych rezultatów uzyskanych w doświadczeniu.

1) Badane odmiany jabłoni i klon ‘JB’ wykazują wyraźne zróżnicowanie w zawartości i stabilności związków bioaktywnych, przy czym klon ‘JB’ charakteryzuje się najwyższą zawartością polifenoli, flawonoidów i fenolokwasów oraz największą aktywnością antyoksydacyjną.
2) Skład bioaktywny jabłek jest silnie uwarunkowany genetycznie, ale również może być modyfikowany przez czynniki środowiskowe i warunki oraz okres przechowywania.
3) Odmiana ‘Chopin’, mimo umiarkowanej zawartości związków fenolowych, wyróżnia się czystością biologiczną, odpornością na parcha jabłoni co czyni ją szczególnie przydatną do upraw ekologicznych i dla osób prowadzących zrównoważony styl życia.
4) Oba nowe polskie genotypy – klon ‘JB’ i odmiana ‘Chopin’ – można uznać za wartościowe pod względem prozdrowotnym i użytkowym. Klon ‘JB’ stanowi surowiec o wysokiej aktywności antyoksydacyjnej i bogatym profilu fenolowym, natomiast odmiana ‘Chopin’ wyróżnia się bezpieczeństwem żywnościowym.
5) Oba genotypy (odmiana ‘Chopin’ i klon ‘JB’) mają potencjał, by stać się funkcjonalnymi składnikami nowoczesnej żywności prozdrowotnej, wpisując się w rosnące zapotrzebowanie konsumentów na produkty naturalne o korzystnym wpływie na zdrowie.

Część III

WPŁYW WARUNKÓW PRZECHOWYWANIA NA JAKOŚĆ I WŁAŚCIWOŚCI PROZDROWOTNE JABŁEK

III.1. Materiały i metody

III.1.1. Materiał badawczy

Opis użytych materiałów i metod badawczych w części III niniejszej pracy doktorskiej został opisany w publikacji B stanowiącej część rozprawy. W niniejszym podrozdziale przedstawiono charakterystykę materiału roślinnego oraz warunki jego pozyskania, które stanowiły podstawę przeprowadzonych badań nad wpływem warunków przechowywania na jakość i właściwości prozdrowotne jabłek.

Wykaz publikacji:

Kistechok, A., Wrona, D., Krupa, T. 2023. Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. Agriculture, 13(3), 612.

Materiał badawczy stanowiły owoce jabłoni uprawianych w warunkach centralnej Polski. Wśród nich znalazła się nowa polska odmiana – ‘Chopin’ oraz klon ‘JB’ (obie hodowli SGGW) a także cztery odmiany powszechnie uprawiane w kraju: ‘Gala Brookfield’, ‘Šampion’, ‘Ligol’ oraz ‘Idared’. Celem niniejszego badania była ocena wpływu zmiennych parametrów, tj. składu gazowego atmosfery w komorze chłodniczej oraz okresu przechowywania, na właściwości fizykochemiczne i wartość odżywczą owoców dwóch polskich genotypów jabłoni. Reprezentatywne cechy owoców odmiany ‘Chopin’ i klonu ‘JB’ oceniono w odniesieniu do odmian jabłoni uprawianych komercyjnie w Polsce.

Jabłka pochodziły z Pola Doświadczalnego Instytutu Nauk Ogrodniczych ‘Wilanów’, położonego w Warszawie – Wilanowie (52.259°N, 21.020°E). Lokalizacja ta charakteryzuje się typowym dla centralnej Polski klimatem umiarkowanym, z chłodnymi zimami i umiarkowanie ciepłymi latami. Gleby w tym rejonie mają charakter brunatny, gliniasto-piaszczysty, o dobrej przepuszczalności i zasobności w składniki mineralne. Drzewa rosły w systemie intensywnej uprawy w formie wrzecionowej, w rozstawie 3,5 × 1,0 m, na podkładce M.9. Jabłka pochodziły z drzew dziesięcioletnich, które znajdowały się w pełni owocowania.

Zbiór owoców przeprowadzano w okresie optymalnej dojrzałości zbiorczej, indywidualnie określanej dla każdej odmiany. Do ustalenia terminu zbioru zastosowano test skrobiowy, indeks Streifa oraz pomiar stężenia etylenu w komorach nasiennych. Takie podejście pozwoliło na uzyskanie partii owoców o zbliżonym stanie

fizjologicznym, co miało kluczowe znaczenie dla oceny wpływu warunków przechowywania na ich jakość i wartość odżywczą.

Po zbiorze owoce zostały poddane wstępnej selekcji. Do doświadczenia wybierano wyłącznie jabłka zdrowe, typowe dla danej odmiany pod względem wielkości i kształtu, bez uszkodzeń mechanicznych, przebarwień czy objawów chorób. Taka procedura miała na celu wyeliminowanie czynników mogących zniekształcać wyniki pomiarów jakościowych i chemicznych.

Każdą z odmian i klon 'JB' oceniano w trzech powtórzeniach, przy czym każde powtórzenie stanowiło próbę złożoną z 10-20 losowo wybranych owoców. Ocenę jakości i wartości odżywczych owoców wykonano bezpośrednio po zbiorze jabłek oraz co 3 miesiące w trakcie przechowywania. Owoce przechowywano przez okres 9 miesięcy.

Jabłka przechowywano w trzech technologiach chłodniczych; w chłodni zwykłej (NA) w temperaturze ok. 1°C i Rh ok 80%, w Ultra Low Oxigen (ULO), CO_2 = 1,5%, O_2 = 1,5%, w temperaturze ok. 1°C i Rh ok 95% oraz w dynamicznie kontrolowanej atmosferze (DKA), CO_2 = 0,6%, O_2 = 0,6% w temperaturze ok. 1°C i Rh ok 95%.

Badane parametry

Bezpośrednio po zbiorze oceniono cechy jakościowe jabłek tj. jędrność, kwasowość, zawartość ekstraktu oraz właściwości odżywcze: zawartość błonnika, polifenoli ogółem, flawonoidów ogółem i aktywność przeciwutleniającą. Dodatkowo po zbiorze owoców zbadano zawartość makro i mikroelementów oraz pozostałości środków ochrony roślin. Każdorazowo po kolejnym okresie przechowywania, co 3 miesiące, oceniono jędrność, kwasowość i zawartość ekstraktu. Badania uzupełniono o cechy prozdrowotne owoców oceniając zawartość błonnika, polifenoli ogółem, flawonoidów ogółem i aktywność przeciwutleniającą.

Analizy związków biologicznie czynnych wykonano oddzielnie w skórce i miąższu jabłek. Bezpośrednio po zbiorze jabłka obierano. Następnie oddzielnie skórkę i miąższ pozbawiony komór nasiennych mrożono i mielono w ciekłym azocie. Zmielony materiał umieszczono w zamrażalce głębokiego mrożenia, w temperaturze -78°C, do czasu analiz. Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem metod laboratoryjnych opisanych w publikacji B i literaturze naukowej.

Analiza statystyczna

Analizę statystyczną otrzymanych wyników badań wykonano w programie Statistica 13.3 (StatSoft Polska, Kraków, Polska). Zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji, a analizowane czynniki stanowiły odmiana i technologia przechowywania.

Testem Tukey'a posłużono się do oceny istotności różnic między średnimi przyjmując poziom istotności 5%.

III.2. Wyniki i dyskusja

III.2.1. Wpływ warunków przechowywania na utrzymanie jakości owoców

Celem badań było określenie wpływu trzech systemów przechowywania – DKA, ULO oraz chłodni zwykłej na cechy fizykochemiczne owoców jabłoni ('Gala Brookfield', 'Šampion', 'Ligol', 'Idared', 'Chopin' i klon 'JB') w trakcie długoterminowego przechowywania. W badaniach skupiono się na ocenie zmian podstawowych wyróżników jakości i trwałości pozbiorczej jabłek, tj. jędrności, zawartości ekstraktu refraktometrycznego i kwasowości miareczkowej.

Warunki w których przechowywane są jabłka w dużym stopniu wpływają na ich trwałość pozbiorczą oraz cechy sensoryczne. Właściwie dobrany składu atmosfery w komorze chłodniczej pozwala ograniczyć tempo procesów oddechowych i degradacyjnych w jabłkach, co sprzyja utrzymaniu jędrności, kwasowości oraz pozostałych parametrów jakościowych owoców (Przybyłko i in. 2021). W badaniach własnych stwierdzono znaczące różnice w cechach odmianowych między badanymi odmianami. Po zbiorach odmiana 'Gala Brookfield' miała najwyższą twardość, niemniej klon 'JB' oraz odmiana 'Chopin' stanowiły grupę jabłek o nieznacznie niższej jędrności. Niestety, w przypadku klonu 'JB' stwierdzono szybką utratę jędrności. Ponadto zaobserwowano bardzo intensywne objawy gnicia, które uniemożliwiły przechowywanie klonu 'JB' przez okres dłuższy niż 3 miesiące. Ogólnie, owoce przechowywane w warunkach kontrolowanej atmosfery (ULO lub DKA) charakteryzowały się znacznie wyższą jędrnością niż po przechowywaniu w chłodni zwykłej. Zastosowanie niskiego stężenia tlenu w systemie DKA ogranicza aktywność enzymatyczną i procesy rozkładu ścian komórkowych, wydłużając trwałość miąższu jabłek (Fawbuch i in. 2009). Po 9 miesiącach przechowywania w warunkach DKA odmiany 'Ligol', 'Chopin' i 'Gala Brookfield' cechowała wciąż jędrność miąższu powyżej 45 N. Należy podkreślić, że po tym samym okresie przechowywania w chłodni zwykłej żadna z ocenianych odmian nie miała wymaganej przez konsumentów jędrności. Skuteczność zastosowania technologii DKA w hamowaniu utraty jędrności jabłek został opisany przez Mditshwa i in. (2018), Thewes i in. (2015) oraz Krupa i in. (2022).

Zawartość ekstraktu refraktometrycznego (°Brix), odzwierciedlająca głównie sumę cukrów rozpuszczalnych, ulegała jedynie niewielkim zmianom podczas

przechowywania. W warunkach DKA zawartość ekstraktu pozostawała stabilna przez cały okres badań, natomiast po przechowywaniu w chłodni zwykłej obserwowano nieznaczny wzrost wartości wskaźnika. Zjawisko to może wynikać z szybszej utraty wody w warunkach niższej wilgotności względnej w chłodni zwykłej i koncentracji substancji rozpuszczalnych w wyniku transpiracji (Gasser i Arx, 2015). Dodatkowo niskie stężenie tlenu w DKA skutecznie hamowało proces oddychania, w którym zużywane są cukry proste oraz kwasy organiczne. Niemniej jednak wielu autorów wskazuje, że za gromadzenie cukrów i kwasów odpowiedzialne są głównie cechy odmianowe (Hoehn i in. 2003; Aprea i in. 2017). W ocenianych odmianach różnice w zawartości ekstraktu były umiarkowane. Grupa odmian o wyższej zawartości ekstraktu bezpośrednio po zbiorze obejmowała ‘Ligol’, ‘Chopin’ i ‘Idared’. Natomiast po dziewięciu miesiącach przechowywania większe wartości omawianego wskaźnika stwierdzono w jabłkach ‘Gala Brookfield’ i ‘Chopin’.

Analiza kwasowości owoców bezpośrednio po zbiorach wykazała duże różnice między odmianami, przy czym wartość wskaźnika dla klonu ‘JB’ i odmiany ‘Chopin’ była ponad dwukrotnie wyższa niż w przypadku innych odmian. Pomimo kwaśnego smaku jabłka odkwaszają organizm, ponieważ zawierają dużo alkalicznego potasu (regulującego gospodarkę wodną) i żelaza (zapobiegającego anemii). Kwasowość jabłek ocenianych odmian była w większym stopniu determinowana przez cechy odmianowe niż przez warunki przechowywania. Wolniejsze tempo utraty kwasowości jabłek odnotowano w systemie DKA, co potwierdza wysoką skuteczność tej metody w ograniczaniu procesów respiracyjnych i metabolizmu kwasów organicznych (Putnik i in. 2017). W warunkach chłodni zwykłej zmniejszenie kwasowości było najbardziej intensywne, co prowadziło do pogorszenia równowagi smakowej i obniżenia jakości owoców.

III.2.2. Wpływ warunków przechowywania na właściwości odżywcze jabłek

Celem tego etapu badań była analiza zmian w zawartości wybranych związków kształtujących właściwości odżywcze jabłek podczas długotrwałego przechowywania w różnych warunkach. Oceniono zawartosc błonnika pokarmowego, całkowitą zawartość polifenoli (TPC), flawonoidów (TFC) oraz aktywność przeciwutleniającą (DPPH), a także skład mineralny owoców. Dodatkowo zbadano pozostałości środków ochrony roślin w celu potwierdzenia bezpieczeństwa konsumpcji żywności.

Zawartość błonnika w jabłkach ocenianych bezpośrednio po zbiorach była bardzo niska. Podczas przechowywania zaobserwowano znaczny wzrost zawartości błonnika w owocach. Wyjątkowo duży wzrost zaobserwowano po przechowywaniu jabłek w zaawansowanych technologiach ULO i DKA. Wzrost ten mógł być wynikiem częściowej degradacji polisacharydów ścian komórkowych i tworzenia nierozpuszczalnych frakcji błonnika w miarę starzenia się owoców. Największe wartości błonnika odnotowano w owocach odmian 'Chopin' i 'Ligol'. W literaturze można znaleźć informacje wskazujące na wpływ okresu przechowywania na zawartość błonnika. Frakcje te obejmują arabinoksylan, inulinę, pektynę, celulozę, β-glukan i skrobię oporną (Ötles i Ozgoz 2014; Marlett i Vollendorf 1994). Natomiast Marlet (2000) wskazuje, że przechowywanie nie miało wpływu na całkowitą lub nierozpuszczalną zawartość błonnika w jabłkach, ale stężenie ligniny Klasona było wyższe w próbkach przechowywanych przez 12 miesięcy niż w próbkach przechowywanych przez 4 lub 8 miesięcy. Wzrost niektórych frakcji błonnika pokarmowego jest związany z mięknięciem jabłek lub procesami dojrzewania powodującymi np. mięknięcie lub wzrost zawartości cukrów (Gordon 1978).

Z punktu widzenia konsumentów owoców zawartość przeciwutleniaczy z grupy polifenoli jest ważnym kryterium wpływającym na prozdrowotne właściwości żywności. Zawartość przeciwutleniaczy w jabłkach zależy od wielu czynników, od odmiany (Kistechok i in. 2022; Kevers i in. 2011) po stopień dojrzałości (Yurong 2019). W doświadczeniu własnym wykazano, że zawartość polifenoli ogółem była związana z odmianą jabłek. Najwyższe wartości wskaźnika stwierdzono w miąższu i skórce klonu 'JB', natomiast najniższe w odmianie 'Ligol'. Badanie wykazało znaczący wpływ atmosfery o obniżonej zawartości tlenu na spowolnienie procesów prowadzących do utraty tych ważnych związków. Po 3 miesiącach przechowywania zaobserwowano wzrost zawartości polifenoli w jabłkach większości odmian, szczególnie szybki po przechowywaniu w chłodni zwykłej. Natomiast po 6 i 9 miesiącach stwierdzono stopniowy spadek poziomu polifenoli ogółem. Spadek ten był jednak wolniejszy w warunkach przechowywania w atmosferze dynamicznie kontrolowanej niż w chłodni zwykłej. Podobne wyniki uzyskali także Napolitano i in. (2004), stwierdzając początkowy wzrost zawartości katechiny i flawonoidów po krótkim okresie przechowywania. Badania własne wskazują, że technologia DKA skutecznie ogranicza tempo degradacji związków fenolowych poprzez zmniejszenie intensywności oddychania i metabolizmu owoców, co potwierdzają wcześniejsze prace Putnika i in. (2017) oraz Kolniak-Ostek i in. (2014), którzy opisali większą stabilność związków

fenolowych w warunkach ULO i DKA. Również Carbone i in. (2014) odnotowali znaczny spadek TPC w odmianie ‘Braeburn’ po przechowywaniu w 1°C, o 50% w skórce i 20% w miąższu jabłek. Czynnik odmianowy wpływał na zawartość flawonoidów – najwyższą zawartość tych związków odnotowano w jabłkach klonu ‘JB’. W trakcie przechowywania obserwowano niewielkie wahania TFC, bez wyraźnych trendów spadkowych, co sugeruje względną stabilność tych związków podczas przechowywania. W odmianie ‘Chopin’ odnotowano wzrost TFC po przechowywaniu w warunkach DKA i ULO. Wyniki te są zgodne z obserwacjami Marinovej i in. (2005), którzy wskazywali na odporność flawonoidów na utlenianie w warunkach ograniczonego dostępu tlenu, oraz z badaniami Yurong i in. (2019), potwierdzającymi zwiększoną zawartość flawonoidów w skórce jabłek po przechowywaniu w kontrolowanej atmosferze.

W literaturze można znaleźć wielokierunkowe opisy zmian zdolności antyoksydacyjnej podczas przechowywania. W badaniach własnych najwyższą zdolnością antyoksydacyjną charakteryzowały się owoce klonu ‘JB’ oraz odmian ‘Chopin’ i ‘Idared’. Wraz z wydłużeniem okresu przechowywania aktywność antyoksydacyjna stopniowo malała, jednak tempo tego spadku było istotnie niższe w atmosferze DKA i ULO w porównaniu do chłodni zwykłej. Zjawisko to wiąże się z mniejszą utratą związków fenolowych oraz flawonoidów, które bezpośrednio determinują właściwości antyoksydacyjne jabłek. Analogiczne tendencje zaobserwowali Putnik i in. (2017), wskazując, że w niskotlenowej atmosferze utrata potencjału antyoksydacyjnego przebiega znacznie wolniej. Z kolei Hoang i in. (2011) odnotowali spadek aktywności antyoksydacyjnej w czasie przechowywania, co potwierdza wielokierunkowość wyników uzyskiwanych dla różnych odmian i warunków.

Zawartość składników mineralnych (Ca, Mg, K, Fe, Zn) była zróżnicowana w zależności od odmiany i technologii przechowywania. Wysokie stężenie wapnia (Ca) i magnezu (Mg) korelowało z lepszą trwałością owoców oraz mniejszym nasileniem procesów gnilnych. Ca stabilizuje błony komórkowe i zmniejsza przepuszczalność ścian komórkowych, co ogranicza rozwój zaburzeń fizjologicznych w czasie przechowywania.

III.2.3. Podsumowanie wyników

Na podstawie wyników badań twierdzono, że technologia przechowywania w dynamicznie kontrolowanej atmosferze (DKA) najefektywniej ogranicza proces dojrzewania jabłek oraz utratę związków bioaktywnych. W warunkach DKA, dzięki ciągłemu dostosowywaniu poziomu tlenu i dwutlenku węgla do aktualnego metabolizmu

owoców, zachodzi spowolnienie procesów fizjologicznych, co pozwala na dłuższe utrzymanie wysokiej zawartości związków fenolowych, flawonoidów i zdolności antyoksydacyjnej w porównaniu z chłodnią zwykłą (NA). Wykazano, że nowe odmiany, takie jak ‘Chopin’ charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami przechowalniczymi oraz wysoką wartością odżywczą jabłek. Klon ‘JB’ wyróżnia się pod względem kwasowości i zawartości TPC i TFC oraz zdolności przeciwutleniającej, ale charakteryzuje się bardzo niską zdolnością do przechowywania. W porównaniu z popularnymi odmianami komercyjnymi, jak ‘Idared’ czy ‘Ligol’, nowa odmiana ‘Chopin’ i klon ‘JB’ cechowały się wyższą zawartością nutraceutyków po zbiorze. Zastosowanie optymalnych warunków przechowywania w komorze chłodniczej może umożliwić utrzymanie wysokich parametrów wartości odżywczej jabłek przez niemal cały rok.

Badania potwierdzają, że stosowanie nowoczesnych technologii kontrolowanej atmosfery, zwłaszcza DKA, stanowi skuteczną metodę przedłużania trwałości jabłek, minimalizując straty związków bioaktywnych oraz zachowując ich właściwości prozdrowotne. Nowa odmiana ‘Chopin’ i klon ‘JB’ wykazują duży potencjał dla sadownictwa. Ponadprzeciętna kwasowość i wysoka zawartość polifenoli i flawonoidów prawdopodobnie predysponują jabłka klonu ‘JB’ jako cenny surowiec do przetwórstwa, a odmiana ‘Chopin’ łączy wysoką wartość odżywczą z wysoką zdolnością przechowalniczą, co czyni ją szczególnie atrakcyjną dla produkcji jabłek deserowych oraz jako surowiec do produkcji żywności funkcjonalnej.

6 . JEDNOTEMATYCZNY CYKL PUBLIKACJI

agriculture

MDPI

Article

Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland

Andrii Kistechok *, Dariusz Wrona and Tomasz Krupa

Department of Pomology and Horticulture Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS), 159C Nowoursynowska Street, 02-787 Warsaw, Poland
* Correspondence: andrii_kistechok@sggw.edu.pl; Tel.: +48-22-593-20-81

Abstract: The aim of the study was to describe the physicochemical properties, with particular emphasis on nutritional value, of apples 'Chopin' and clone 'JB'. The new cultivars were compared with the cultivars commonly cultivated in Polish orchards, namely 'Gala Brookfield', 'Šampion', 'Ligol' and 'Idared'. The study focuses on the evaluation of physicochemical characteristic (firmness, soluble solids content and titratable acidity) and the content of monosaccharides, sucrose and organic acids based on HPLC with an RI detector. In addition, the nutritional value of apples were described separately for the flesh and peel of the fruit, focusing on the assessment of the antioxidant activity and the content of total polyphenols, phenolic acids, flavonols using the HPLC technique. 'Chopin' and 'JB' clone apples are characterized by very high acidity, over 1%, which is related to the high content of malic acid. The red flesh 'JB' clone is characterized by a high content of bioactive compounds in both the peel and flesh of apples. High temperatures and a lack of precipitation contribute to a higher polyphenol content in apples, which proves that apart from the genetic features of the cultivars, the climatic conditions also determine the nutritional value of the fruit.

Keywords: apple; firmness; SSC; monosaccharides; titratable acidity; acids; total polyphenols; antioxidant activity

check for updates

Citation: Kistechok, A.; Wrona, D.; Krupa, T. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. *Agriculture* **2022**, *12*, 1876. https://doi.org/10.3390/agriculture12111876

Academic Editor: Grzegorz Lysiak

Received: 30 September 2022
Accepted: 7 November 2022
Published: 9 November 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Poland, Spain and Italy are the largest fruit producers in Europe. Poland is especially prominent in the production of apples, cherries, raspberries, currants and gooseberries [1,2]. Comparing apple production in Poland and other European Union countries, we see that the same apple cultivars are very popular in different countries. In the European Union, 'Golden Delicious', 'Idared', 'Jonagold' and its mutants, and 'Gala' and its mutants are the most widespread [2]. On the other hand, the Central Statistical Office reports that in Poland [3], the most widespread include 'Idared' (22% of the total apple area in Poland), 'Jonagold' (17%) and 'Gala' (6%). Apple cultivars are characterized by different consumption and sensory attributes, which has been proven in numerous studies [4,5]. According to WHO recommendations, the daily intake of fruit and vegetables should be a minimum of 400 g [6]. Fruit and vegetables are an important component of diets and appropriate dietary programmes can reduce the risk of lifestyle diseases [7]. It is generally recommended that vegetable intake should be higher than fruit intake [8]. However, in a properly designed nutrition program, fruit cannot be omitted, although the benefits of fruit consumption are related to the characteristics of specific fruits. In the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003–2010, it was shown that the inclusion of any apple in children's diets contributed to a reduction in children's weight as well as influencing higher overall fruit intake [9]. Furthermore, according to Hodgson et al. [10], daily apple consumption reduces the risk of mortality among elderly women caused by various causes, including cancer. Similarly, a review by Gayer et al. [11] showed that apple consumption significantly reduces body weight, significantly reduces the risk of

cerebrovascular disease, cardiovascular death, type 2 diabetes and mortality, reducing the overall risk of cardiovascular disease.

By analysing the ingredients of various diets, it can be concluded that fruit is an important element in many weight-loss diets [12,13], and that its dietary benefits are due to its nutritional properties. Apples contain numerous compounds with antioxidant activity, e.g., ascorbic acid and from the polyphenol group in the form of simple phenols, benzoic acids, phenyl propanoids and flavonoids [14]. Flavonoids and phenolic acids are the predominant polyphenol groups in apples [15,16], but their content depends on the part of the fruit analysed. Significant levels of flavonols are found in the skin of apples [15], while numerous phenolic acids can be found in the flesh [17]. The content of biologically active compounds in apples is determined by many factors: cultivar [18,19], degree of ripeness [20] or fruit fragment [21,22] and geographic area [23,24].

A priority indicator of apple consumer quality is the attractive appearance of the fruit and, in the case of red apples, skin colour is very important [25]. However, the texture of apples is a second extremely important sensory attribute influencing consumer liking, which determines the final acceptance and habituation of the consumer to a particular apple cultivar [5]. Texture, in combination with taste and appearance of apples, resulting from consumer tastes, becomes one of the main priorities in breeding and varietal selection [26,27]. Important components of apple texture are considered to be crispness, firmness and juiciness but also skin firmness [5]. In addition, high firmness combined with juiciness are very positively perceived in consumer evaluation [28].

The aim of the study was to describe the physicochemical characteristics and nutritional value of the fruit of two Polish apple cultivars. In the study, individual fruit characteristics of the 'Chopin' cultivar and the 'JB' clone were compared with commonly grown apple cultivars in Poland. The evaluation focused on the characteristics that distinguish the two cultivars in the content of biologically active compounds and, in addition, on the physicochemical characteristics (firmness, sugar content and acidity), determinants in the positive perception of apples.

2. Materials and Methods

The fruit of the new cultivar 'Chopin', clone 'JB' and most popular cultivars, such as 'Gala Brookfield', 'Idared', 'Šampion' and 'Ligol', came from the Experimental Field of the Institute of Horticultural Sciences 'Wilanów', located in central Poland (52.259° N, 21.020° E). Apples were collected from 8-year-old trees growing on M.9 rootstock at a spacing of 1.0 m × 3.5 m. Fruits were harvested from a random selection of 10 trees per row, respectively, for each cultivar. The 'Chopin' cultivar obtained by Prof. E. Pitera is a cultivar promoted for cultivation in Poland, previously described in publications [29]. In 2016, it was entered into the cultivar register of the Research Centre For Cultivar Testing (COBORU) under the number S616 and is a protected by right (PBR) cultivar. It is a single-color cultivar with green skin, without blush. Clone 'JB' is at the preliminary stage of registration and the author is Prof. A. Przybyla [30]. A unique feature is the red flesh of the 'JB' clone. Both cultivars are resistant to apple scab.

The research was conducted in 2019–2021. The weather data are shown in Figures S1–S3. To illustrate climatic conditions, the climatogram method developed by Walter [31] was used, which involves graphically depicting average monthly temperatures and monthly precipitation totals in a ratio of 1 °C:4.5 mm of precipitation. The year 2019 was warm and dry. Precipitation deficits occurred from June to November. In 2020, heavy precipitation occurred in June (more than 140 mm) and in September and October. In 2021, July and August were very wet (precipitation of about 140 mm), while a dry period occurred in September and October. Average temperatures in 2020 and 2021 were around 20 °C in July and August but both years were cooler than 2019.

Apples were characterized in terms of physicochemical quality by assessing firmness, soluble solids content (SSC) and titratable acidity (TA). In addition, the nutritional properties of apples were presented, focusing on the evaluation of antioxidant activity (AA) and

the content of total polyphenols (TPC), phenolic acids, flavonols, sugars and organic acids. The analyses of antioxidant properties were assessed separately in fruit peel and flesh. The fruit samples for assessing nutritional value, separately taken from peel and flesh, were immediately frozen in liquid nitrogen and stored (−80 °C) after collection. The peel of apples was taken from opposite sides of the fruit, vertically (from top to bottom). All peel fragments of 10 fruits from the replicate (mixed test) were ground in an IKA A11 grinder (IKA Werke, Staufen, Denmark) in liquid nitrogen. Fruit flesh was sampled similarly, cutting 2 opposite segments from 10 apples in replicate. These analyses were carried out in 4 replicates for each cultivar.

Measurements included the evaluation of the ethylene content of the seed chambers (IEC) and the Streif index and starch index to determine the optimum harvest date. The ethylene content in the seed chambers (μL/L) was assessed according to a commonly used method [5]. It was measured in the core space of the apples using a 1 mL syringe for air sampling. From each apple, 1 mL of air was taken and ethylene content was assessed using a gas chromatograph (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA). The starch index (SI) was estimated according to Tomala et al. [32]. The measurement was based on the evaluation of the reaction of starch with Lugol's solution and was visually assessed on a 10-point scale. The Straif index was evaluated based on three components, i.e., firmness, soluble solids content and starch index, according to the formula:

$$\text{Index Streif} = \frac{\text{firmness}}{\text{soluble colids content} \times \text{starch index}}$$

Firmness was analysed after removing the skin from the apple and was measured on two opposite sides of the fruit for each apple. The measurement was performed with an Instron 5542 penetrometer (Instron, Norwood, MA, USA), using a stainless steel plunger tip (diameter: 11 mm; head speed: 240 mm/min) [32,33]. Results are presented in Newtons (N). The evaluation of soluble solids content was performed after squeezing juice from 10 apples. A digital refractometer PR-32 (Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) was used for the measurement [32,33]. The results of the evaluation of soluble solids content were expressed in °Brix. Titritable acidity was assessed in juice diluted with distilled water in a ratio of 1:10. The measurement was carried out using a TitroLine 5000 automatic titrator (Xylem Analytics Germany GmbH, Weilheim, Germany) by titrating the resulting mixture with NaOH (0.1 M) to a pH value of 8.1 [32,33]. The results of the titratable acidity assessment were expressed in % after conversion to malic acid equivalent.

Total polyphenol content was estimated using the spectrophotometric method [34] with the Folin–Ciocalteu reagent. The absorbance of the solution was measured using a Marcel 330S PRO spectrophotometer (Marcel, Zielonka, Poland). The measurement was performed at λ = 700 nm and the results were converted from the curve to gallic acid (mg·100 g^{-1} FW).

The quantitative and qualitative analysis of phenolic compounds (phenolic acids and flavonols) was performed using the HPLC technique described in our earlier study [35]. For the analysis, we used a Perkin-Elmer 200 series HPLC kit with a DAD (Diode Array Detector) using a LiChroCART 125-3 column (Merck KGaA, Darmstadt, Germany). The following analysis parameters were used: flow rate of 1 mL/min and oven temperature of 22 °C. The mobile phase consisted of a mixture of water (A), 20% formic acid (B) and acetonitrile (C) at different concentration gradients. The content of individual compounds (total of two groups: phenolic acids and flavonols) is given in (mg·100 g^{-1} FW).

Antioxidant activity was evaluated according to the method of Saint Criq de Gaulejac et al. [36] using the synthetic radical DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, Sigma-Aldrich, Poznań, Poland). Results were expressed in mg per g FW of ascorbic acid (AAE). (mg AAE·100 g^{-1} FW).

The content of sucrose and monosaccharides and organic acids (malic, citric, tartaric) were determined in 2021 year by HPLC-RI, as described previously by Zielinski et al. [37], and expressed as grams of sugar content or organic acid per 100 g fresh weight (FW).

Statistical Analysis

The results were analysed statistically in Statistica 13.3 (StatSoft Polska, Krakow, Poland), using the two-way analysis of variance. Tukey's test was used for the evaluation of the significance of differences between the means, accepting the significance level as 5%.

3. Results

The maturity stage of the fruit is shown in Table 1. Three indices were used to determine the optimal harvest time: internal ethylene content, starch index and Streif index. The tests used indicate that the apples had very similar maturity at harvest in all years of the study.

Table 1. Characteristic of the maturity stage of apples assessed directly after harvest.

Cultivars	Years		
	2019	2020	2021
	Internal ethylene content (μL/L)		
'Gala Brookfield'	1.04 ± 0.50	0.74 ± 0.58	1.41 ± 0.05
'Šampion'	0.52 ± 0.60	1.16 ± 0.01	1.18 ± 0.04
'Ligol'	1.75 ± 0.50	1.30 ± 0.08	1.13 ± 0.02
clone 'JB'	0.79 ± 0.30	0.82 ± 0.10	0.70 ± 0.18
'Chopin'	1.40 ± 0.90	1.32 ± 0.25	1.40 ± 0.07
'Idared'	1.41 ± 0.10	1.27 ± 0.04	1.42 ± 0.06
	Streif index (−)		
'Gala Brookfield'	0.11 ± 0.008	0.10 ± 0.010	0.11 ± 0.011
'Šampion'	0.07 ± 0.010	0.07 ± 0.004	0.08 ± 0.007
'Ligol'	0.07 ± 0.004	0.08 ± 0.007	0.07 ± 0.005
clone 'JB'	0.07 ± 0.006	0.07 ± 0.005	0.09 ± 0.008
'Chopin'	0.09 ± 0.007	0.09 ± 0.009	0.09 ± 0.007
'Idared'	0.07 ± 0.003	0.09 ± 0.008	0.08 ± 0.007
	Starch index (−)		
'Gala Brookfield'	6.2 ± 0.5	7.4 ± 0.2	6.7 ± 0.4
'Šampion'	6.4 ± 0.4	6.6 ± 0.6	6.1 ± 0.2
'Ligol'	6.4 ± 0.3	7.1 ± 0.9	6.6 ± 0.5
clone 'JB'	6.5 ± 0.2	7.7 ± 0.1	6.2 ± 0.5
'Chopin'	6.2 ± 0.1	7.4 ± 0.1	6.6 ± 0.3
'Idared'	6.9 ± 0.1	7.1 ± 0.2	7.6 ± 0.1

Data are presented as mean ± standard deviation.

One of the most important quality indicators influencing consumer acceptance and decisions is fruit firmness. Among the cultivars studied, priority is given to 'Gala Brookfield', characterized by the highest firmness in all years of the study (Table 2). 'Chopin' fruit was characterized by lower, but still high in firmness. This cultivar stood out from the others, especially in 2019 and 2020; although in 2021, the value of the indicator in question for this cultivar fell within the same statistical group as clone 'JB' and 'Idared'. Clone 'JB', on the other hand, ranked together with 'Idared' and 'Ligol' in the same cultivar group. The Šampion cultivar differed from the other cultivars in that it stood out as having the lowest apple firmness during the three-year study. The value of the index fluctuated from one survey year to the next, and only in the case of 'Šampion' and clone 'JB' was no such relationship shown. The difference between the extreme values in the years depended on the cultivar and ranged from 9% ('Gala Brookfield', 'Ligol') to 12–13% ('Chopin', 'Idared').

Table 2. The values of firmness (N) for apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	Firmness			
	2019	**2020**	**2021**	***p*-Value**
'Gala Brookfield'	85.5 ± 1.4	89.3 ± 0.9	81.9 ± 1.0	<0.01
'Šampion'	58.3 ± 0.4	58.7 ± 0.8	58.3 ± 0.1	0.75
'Ligol'	65.8 ± 0.5	61.3 ± 0.5	60.3 ± 1.7	<0.01
clone 'JB'	65.2 ± 3.6	68.6 ± 3.1	70.6 ± 1.6	0.25
'Chopin'	70.1 ± 2.1	78.6 ± 0.8	70.3 ± 0.6	<0.01
'Idared'	65.0 ± 1.0	73.9 ± 1.3	72.5 ± 1.4	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation.

The analysis of the soluble solids content showed that this parameter depended on the cultivar used in the study as well as on the year the fruit was harvested. Apples in 2019 were characterized by a significantly higher SSC than in subsequent years (Table 3). The changes in SSC values observed in the experiment were not characterized by a unidirectional vector of the variable but were multidirectional depending on the cultivar. Thus, in 2019 'Idared', clone 'JB' and 'Ligol' can be placed in one group of cultivars with higher SSC in apple flesh. On the opposite side of the scale were 'Chopin' and 'Gala Brookfield' planned. In the following year 2020, again clone 'JB' had a high SSC, but this year 'Ligol', 'Chopin' and 'Idared' were placed in the lower SSC group. The year 2021 saw further changes and although 'Chopin' was a low SSC cultivar again, 'Gala Brookfield' and 'Šampion' joined this group again. On the other end of the scale, we had clone 'JB' for the third year in a row, as well as 'Idared' and 'Ligol'. Such a high variability in years between cultivars makes it possible to identify only 'Chopin' as the cultivar with low SSC and clone 'JB' with high SSC in apples. The high SSC in apples of clone 'JB' was determined by a high glucose content, almost three times higher than 'Chopin', 'Idared' or 'Ligol' (Table 4). Clone 'JB' was also characterized by high fructose content similar to the sweet cultivars, i.e., 'Gala Brookfield' and 'Šampion'. 'Chopin', on the other hand, was characterized by low levels of simple sugars. In the experiment, no significant differences were found in terms of sucrose content between the cultivars tested, regardless of the year of testing.

Table 3. The values of solids soluble content (°Brix) for apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	SSC			
	2019	**2020**	**2021**	***p*-Value**
'Gala Brookfield'	13.0 ± 0.1	12.0 ± 0.1	11.6 ± 0.1	<0.01
'Šampion'	13.4 ± 0.2	12.4 ± 0.2	11.3 ± 0.1	<0.01
'Ligol'	13.8 ± 0.1	11.1 ± 0.1	12.5 ± 0.4	<0.01
clone 'JB'	13.9 ± 0.1	12.9 ± 0.1	12.5 ± 0.2	<0.01
'Chopin'	12.9 ± 0.6	11.2 ± 0.1	11.5 ± 0.3	<0.01
'Idared'	14.2 ± 0.2	11.5 ± 0.1	12.4 ± 0.3	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation.

The statistical analysis of the titratable acidity of the cultivars studied distinguished two groups of apples characterized by extreme values of the index. The group of low-acid fruit included 'Ligol', 'Šampion' and 'Gala Brookfield', with the latter cultivar clearly indicated as having the lowest acid content in apple flesh (Table 5). The second group consisted of 'Idared', 'Chopin' and clone 'JB'. In this case, the apples of clone 'JB', but also

'Chopin', were characterized by very high titratable acidity (TA), exceeding 1% in almost every year of the study. The TA of the apples changed significantly depending on the year of the study. However, these changes did not cause significant differences between cultivars, as fruit from the first group contained from 0.28 to 0.65%, while the TA of apples from the second group ranged from 0.76 to 1.33% and was therefore on average two times higher. The high TA was influenced by the main hydroxy acids present in the apples, i.e., malic acid, citric acid and tartaric acid (Table 6). The content of the individual acids was determined by varietal characteristics. In general, malic acid is the main acid found in the fruit of the analysed cultivars, and the highest malic acid content was found in apples of clone 'JB', in which the value of this index was almost three times higher than in commonly grown apple cultivars. A high, but by more than 30% lower, content of malic acid was found in the cultivars 'Chopin' and 'Idared'. Clone 'JB' also contained more of the other identified acids, namely citric and tartaric. Unexpectedly, the 'Chopin' cultivar contained less citric acid than 'Gala Brookfield', and compared to 'Šampion', less tartaric acid.

Table 4. The values of sugar content (g·100 g^{-1} FW) for apples depending on testing cultivars.

Cultivars	Sugar		
	Sucrose	**Glucose**	**Fructose**
'Gala Brookfield'	4.11 ± 0.31	0.76 ± 0.04	5.91 ± 0.32
'Šampion'	3.68 ± 0.09	0.86 ± 0.02	5.86 ± 0.11
'Ligol'	3.39 ± 0.87	0.34 ± 0.12	4.95 ± 1.41
clone 'JB'	5.39 ± 0.22	1.23 ± 0.15	5.55 ± 0.08
'Chopin'	4.65 ± 1.59	0.40 ± 0.08	3.62 ± 0.15
'Idared'	4.96 ± 0.15	0.43 ± 0.07	5.08 ± 0.10
p-value	0.14	<0.01	0.02

Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 5. The values of titratable acidity (%) for apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	Titratable Acidity			
	2019	**2020**	**2021**	***p*-Value**
'Gala Brookfield'	0.28 ± 0.01	0.36 ± 0.01	0.47 ± 0.02	<0.01
'Šampion'	0.39 ± 0.02	0.58 ± 0.01	0.65 ± 0.01	<0.01
'Ligol'	0.42 ± 0.01	0.57 ± 0.01	0.64 ± 0.04	<0.01
clone 'JB'	1.00 ± 0.03	1.33 ± 0.03	1.19 ± 0.02	<0.01
'Chopin'	0.90 ± 0.06	1.14 ± 0.01	1.08 ± 0.05	<0.01
'Idared'	0.76 ± 0.05	0.95 ± 0.01	0.88 ± 0.01	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation.

The content of total polyphenols in apples of the appraised cultivars was determined by varietal characteristics. Clone 'JB' was characterized by a two to three times higher TPC in the flesh than the other cultivars, although in 2021 'Idared' was also characterized by a similar TPC in apple flesh (Table 7). Assessing the total polyphenol content of the apple peel showed similar relationships between cultivars as seen in the flesh. The peel of clone 'JB' and 'Idared' contained two times more polyphenols than the same fruit element in the other cultivars. The evaluation of the apples made it possible to identify the cultivar whose fruit did not contain much total polyphenols, i.e., 'Ligol'. Regardless of the part of the fruit tested, this cultivar is characterized by a low content of compounds from the phenolic group. The content of total polyphenols in the flesh or skin of the other cultivars was

significantly higher than in 'Ligol' but also significantly lower than clone 'JB'. TPC content was also determined by weather conditions. A significant change in TPC depending on the year of the study was noted in the flesh of 'Šampion', 'Chopin', 'JB' clone and 'Idared', and in the peel of 'Šampion', 'Chopin' and 'Idared'. In general, it can be said that the listed cultivars were characterized by higher TPC in 2019 than in the subsequent years of the study.

Table 6. The values of acid content (g·100 g^{-1} FW) for apples depending on testing cultivars.

Cultivars	Acids		
	Malic	**Citric**	**Tartaric**
'Gala Brookfield'	0.386 ± 0.019	0.069 ± 0.002	0.010 ± 0.002
'Šampion'	0.541 ± 0.010	0.046 ± 0.001	0.012 ± 0.001
'Ligol'	0.413 ± 0.111	0.031 ± 0.009	0.007 ± 0.002
clone 'JB'	1.130 ± 0.003	0.081 ± 0.004	0.014 ± 0.003
'Chopin'	0.778 ± 0.053	0.041 ± 0.001	0.011 ± 0.003
'Idared'	0.656 ± 0.010	0.025 ± 0.007	0.006 ± 0.001
p-value	<0.01	<0.01	0.01

Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 7. The values of total polyphenols content (mg·100 g^{-1} FW) for flesh and peel of apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	Years			*p*-Value
	2019	**2020**	**2021**	
		Flesh		
'Gala Brookfield'	158 ± 13	142 ± 5	170 ± 24	0.28
'Šampion'	228 ± 2	150 ± 1	163 ± 8	<0.01
'Ligol'	133 ± 18	93.0 ± 5	98.3 ± 15	0.06
clone 'JB'	531 ± 10	504 ± 6	211 ± 34	<0.01
'Chopin'	212 ± 24	102 ± 5	126 ± 27	<0.01
'Idared'	279 ± 22	107 ± 7	205 ± 12	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		Peel		
'Gala Brookfield'	782 ± 25	802 ± 50	740 ± 28	0.29
'Šampion'	743 ± 51	777 ± 19	453 ± 29	<0.01
'Ligol'	368 ± 23	300 ± 35	288 ± 48	0.14
clone 'JB'	1289 ± 33	1273 ± 43	1282 ± 20	0.90
'Chopin'	632 ± 19	623 ± 6	509 ± 10	<0.01
'Idared'	1236 ± 44	1276 ± 20	935 ± 98	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; FW—fresh weigh.

Among the apple cultivars assessed, 'Idared' stood out for its high content of phenolic acids in the flesh (Table 8). In all years of the study, the indicated cultivar was characterized by a two-fold higher content of phenolic acids in the flesh than cultivars with a low content of these compounds. The group of cultivars with high phenolic acid content also included clone 'JB' (years 2019 and 2020) and 'Gala Brookfield' (in 2020). On the other end of the scale were cultivars with low levels of phenolic acids in the apple flesh and we can include 'Šampion' in 2019 and 2021 and 'Ligol' and 'Chopin' in 2020 in this group. The level of phenolic acids in the peel of the apples evaluated was variable depending on the genetic characteristics of the cultivar and the year of the study. However, the year of the study determined changes in the phenolic acid content of apple peel only in cultivars with a low

phenolic acid content. During the three-year study, it was found that the cultivars 'Idared', 'Gala Brookfield' and clone 'JB' were characterized by a high and constant level of phenolic acids in the peel. Low levels of phenolic acids were found in the peel of 'Šampion' apples in 2019 and 2021, in 2020 and 2021 in 'Ligol' and in 2019 in 'Chopin'.

Table 8. The values of phenolic acids content (mg·100 g^{-1} FW) for flesh and peel of apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	Years			*p*-Value
	2019	2020	2021	
		Flesh		
'Gala Brookfield'	8.7 ± 0.1	13.9 ± 0.7	8.5 ± 0.2	<0.01
'Šampion'	4.7 ± 0.1	11.7 ± 0.1	7.0 ± 0.2	<0.01
'Ligol'	7.2 ± 0.5	8.8 ± 0.2	8.8 ± 0.4	<0.01
clone 'JB'	15.2 ± 0.1	15.3 ± 0.1	9.3 ± 0.3	<0.01
'Chopin'	10.1 ± 0.4	9.4 ± 0.5	9.0 ± 0.2	0.06
'Idared'	14.5 ± 1.6	14.3 ± 0.3	15.4 ± 0.1	0.48
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		Peel		
'Gala Brookfield'	45.7 ± 7.3	55.5 ± 5.0	41.9 ± 0.4	0.09
'Šampion'	28.9 ± 0.5	51.2 ± 1.2	24.2 ± 3.3	<0.01
'Ligol'	31.6 ± 0.6	17.3 ± 0.1	23.5 ± 3.4	<0.01
clone 'JB'	46.0 ± 1.2	48.7 ± 1.0	46.5 ± 0.5	0.06
'Chopin'	24.9 ± 0.7	39.1 ± 0.6	32.6 ± 2.3	<0.01
'Idared'	51.6 ± 3.6	53.5 ± 0.9	49.6 ± 0.9	0.28
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; FW—fresh weigh.

During a three-year study, it was found that the flavonols content of apple flesh was only valued by varietal traits in one year. It was then shown that cultivars containing more polyphenols or phenolic acids ranked lower in terms of flavonols content (Table 9). However, this thesis was not proven in subsequent years of the study, and the value of the index was highly variable between years, making it impossible to show any trends. The flavonols content was influenced by the year of the study. It turned out that the studied cultivars, with the exception of 'Gala Brookfield', had a higher content of flavonols in the flesh in 2021 than in 2019 or 2020. In contrast, the trends describing the flavonols content of apple peel are similar to the observed relationships for total polyphenols or phenolic acids. In this case, apples of clone 'JB' were again characterized by high levels of flavonols in the peel, while 'Šampion' and 'Ligol' apples were characterized by low levels of these compounds. Unexpectedly, 'Idared' was also characterized by a low flavonols content in the apple peel. Assessing the impact of the year of the study, it was found that apples in 2020 had a higher flavonols content in the peel than in the other two years of the study.

The content of antioxidant compounds determines the antioxidant activity of the fruit. Clone 'JB' was characterized by high AA in apple flesh in all years of the study (Table 10). In the subsequent years of the study, the of clone 'JB' flesh was 107%, 70% and 178% higher than that of 'Ligol', the cultivar characterized by the lowest value of this parameter, respectively. The cultivar 'Ligol' also stood out in terms of the level of AA of the apple peel. In this evaluation, AA in the 'Ligol' peel was again found to be lower than in the other cultivars. In contrast, the differences between the other cultivars assessed were not so significant and only in 2021 'Šampion' and 'Gala Brookfield' apples had lower levels of AA than in the skins of clone 'JB', 'Idared' or 'Chopin' apples. AA variability between study years was observed for 'Šampion' and 'JB' clone (skin and flesh), 'Gala Brookfield' only in peel and 'Chopin' only in flesh. It should be noted that in 2020 'Šampion' had the highest AA value, while 'Chopin' and 'JB' clone had the lowest AA value in fruit flesh. On

the other hand, the AA of the peel of the 'Gala Brookfield', 'Šampion' and 'JB' clone was higher in 2019 than in 2020.

Table 9. The values of flavonols (mg·100 g^{-1} FW) for the flesh and peel of apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	Years			*p*-Value
	2019	2020	2021	
		Flesh		
'Gala Brookfield'	134 ± 17	116 ± 16	136 ± 2	0.28
'Šampion'	107 ± 7	118 ± 16	141 ± 2	0.04
'Ligol'	119 ± 14	104 ± 2	143 ± 1	0.01
clone 'JB'	108 ± 2	130 ± 15	141 ± 1	0.02
'Chopin'	107 ± 1	115 ± 13	139 ± 1	0.01
'Idared'	105 ± 1	92.6 ± 19	141 ± 1	0.01
p-value	0.03	0.24	0.38	
		Peel		
'Gala Brookfield'	312 ± 4	317 ± 23	311 ± 1	0.91
'Šampion'	212 ± 2	326 ± 23	301 ± 10	<0.01
'Ligol'	238 ± 32	288 ± 33	344 ± 39	0.06
clone 'JB'	263 ± 1	407 ± 4	362 ± 5	<0.01
'Chopin'	268 ± 30	319 ± 29	297 ± 12	0.21
'Idared'	226 ± 2	315 ± 30	288 ± 16	0.01
p-value	<0.01	<0.01	0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; FW—fresh weigh.

Table 10. The values of antioxidant activity (mg AAE·100 g^{-1} FW) for flesh and peel of apples depending on cultivars and years of testing.

Cultivars	Years			*p*-Value
	2019	2020	2021	
		Flesh		
'Gala Brookfield'	0.32 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.40 ± 0.03	0.02
'Šampion'	0.28 ± 0.02	0.38 ± 0.01	0.33 ± 0.01	<0.01
'Ligol'	0.25 ± 0.03	0.27 ± 0.02	0.19 ± 0.01	0.02
clone 'JB'	0.58 ± 0.02	0.46 ± 0.01	0.53 ± 0.03	<0.01
'Chopin'	0.33 ± 0.03	0.25 ± 0.01	0.37 ± 0.02	<0.01
'Idared'	0.29 ± 0.03	0.36 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.03
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		Peel		
'Gala Brookfield'	0.74 ± 0.01	0.72 ± 0.01	0.68 ± 0.01	<0.01
'Šampion'	0.74 ± 0.01	0.74 ± 0.01	0.66 ± 0.03	<0.01
'Ligol'	0.65 ± 0.02	0.62 ± 0.01	0.60 ± 0.01	0.01
clone 'JB'	0.73 ± 0.01	0.69 ± 0.01	0.74 ± 0.02	<0.01
'Chopin'	0.71 ± 0.02	0.71 ± 0.01	0.70 ± 0.01	0.46
'Idared'	0.74 ± 0.01	0.70 ± 0.01	0.71 ± 0.03	0.55
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; FW—fresh weigh.

4. Discussion

In recent years, 'healthy lifestyles' based on sports participation and appropriate nutrition programmes have become increasingly important. New diets are being developed with the aim of preventing weight loss and civilization diseases, such as diabetes and cardiovascular disease. The foundation on which most nutrition programmes are based is

fruit and vegetables, and the prevalence and availability of apples makes them an ideal component of diets [38,39]. In general, more and more attention is being paid to products that can be categorized as so-called functional foods, i.e., products with above-average nutritional properties. Apples, and in particular certain cultivars characterized by such properties, can be included in this group and become a staple ingredient in diets [40]. Consumers' choice of apple is not determined solely by its nutritional properties but by its appearance and taste [26,27,41,42]. Apples contain monosaccharides; however, these are easily digested and rapidly utilized by the human body. In studies, the most abundant sugar in apples of cultivated cultivars was fructose followed by sucrose [43–45]. Our own research showed significant differences between commonly grown apple cultivars in Poland and 'Chopin' or 'JB' clone. Apple cultivars considered sweet by consumers, such as 'Šampion' and 'Gala', were characterized by lower sugar and SSC but also low TA. The high SSC is largely due to monosaccharides, the levels of which were high in apples of clone 'JB'. Many studies raise the issue of the determination of sugars, acids by varietal characteristics [41,43] and the content of individual sugars, which can vary considerably within apple cultivars. According to Li et a. [44], wild apple cultivars produce fruit that is more acidic than cultivated cultivars, which is strongly influenced by genetic background and growing location. In the experiment, we found that 'Chopin' apples and clone 'JB' apples had above-average organic acid content, regardless of the year of the study. Despite their sour taste, the apples deacidify the body because they are rich in the alkaline potassium (regulates water balance) and iron (prevents anaemia). In our study, it was noted that the soluble solids content and titratable acidity of apples are influenced by weather conditions and especially important is the period preceding fruit harvest. In 2019 (a dry and warm year), all evaluated cultivars were characterized by higher soluble solids content than in subsequent years. However, in 2020 and 2021, cultivars harvested in late August and September ('Gala Brookfield', 'Šampion') were characterized by a different SSC and TA than those harvested more than a month later, which was probably related to the frequency of precipitation occurring in both years. The data obtained in the experiment confirm previous reports on the significance of the effect of weather conditions on apple quality [45–47].

As with other types of fruit, most of the valuable substances in apples are found in the peel and just below the peel [21,48], but unfortunately many consumers eat apples after they have been peeled. Numerous studies show that the peel of apples is much richer in phenolic compounds than the flesh [21,49,50]. The polyphenol content of apples is influenced by many factors, such as the varietal factor [21,50] or the degree of ripeness [18]. Koutsos et al. [51] demonstrated that the consumption of apples or their bioactive components is associated with beneficial effects on lipid metabolism and other markers of cardiovascular disease. The effects of flavanol rich foods, such as apples on blood pressure, may be due to the monomeric flavanols, mainly (-)-epicatechin, and the oligomeric flavanols, i.e., procyanidins [52,53]. Our own research indicates that there were significant differences in the composition of the bioactive compounds of the cultivars evaluated. Clone 'JB' was particularly rich in compounds from the polyphenol group in both the skin and flesh of apples. 'Idared' also deserves a distinction in terms of total polyphenol content. On the other hand, the fruit of the 'Chopin' cultivar had an average content of total polyphenols and other antioxidants, i.e., phenolic acids and flavonols. Distinctive clone 'JB' was in the forefront among cultivars with a high content of antioxidant compounds, although the level of individual antioxidants was determined by the year of study. Differences in the content of biologically active compounds may be due to both differences between cultivars and the maturity of the fruit analysed, as pointed out by MacLean et al. [54]. In a study [55,56], polyphenol content and antioxidant activity were found to differ significantly between the cultivars studied, with higher polyphenol content, accompanied by excellent antioxidant activity both in the flesh and in the whole fruit.

The nutritional properties of apples largely depend on the cultivar [57,58], the type of cultivation [59] weather conditions [60,61] and agrotechnical aspects [62]. As for envi-

ronmental factors, the role of weather conditions, such as temperature and precipitation, is crucial and has only been discussed in a limited number of research papers. Warrington et al. [63] found that fruit grown at higher temperatures had higher average weight, higher soluble solids content and lower starch concentration at harvest maturity. Regarding polyphenol formation and antioxidant capacity in fruit, studies suggest that heat stress may be a trigger, and that low temperatures may stimulate the expression of genes involved in, for example, anthocyanin synthesis in apple peel [64,65]. Additionally, among polyphenols, flavonols are the most weather-dependent; the degree of exposure to sunlight is suggested as an underlying mechanism [66]. According to Zang et al. [67] average, minimum and maximum temperatures from April to October are the main influences on fruit quality. The influence of climatic conditions was the significant factor determining the nutritional properties of apples in the study. In the warm and rainless year of 2019, most cultivars showed higher TPC than in subsequent years. However, the content of individual compounds was variable and dependent on varietal characteristics and climatic conditions. The experiment confirmed that temperatures and precipitation occurring in the period before fruit ripening affect the content of biologically active compounds in apples [68–70]. High temperature during apple ripening, can lead to the increased activity of antioxidant enzymes. In response, the plant produces an antioxidant defence system composed of enzymes or increased amounts of antioxidants [45,56]. Many of these processes can be supported by photosynthetic activity [71]. Therefore, it is very important to select apple cultivars with the highest content of phenolic compounds and to determine exactly how the different factors affect phenolic levels.

5. Conclusions

The present study showed diversity in the cultivars, focusing on the quality of fruit as well as their nutritional value. In a three-year study, the average fruit acidity of the 'Chopin' and 'JB' clone was found to be almost three times higher than in fruits commonly grown in Poland. An important feature of cultivars with red flesh, such as the JB clone, is of significantly higher content of antioxidant compounds than in other cultivars. The content of antioxidant compounds determines the antioxidant activity of the fruit, so the flesh of the 'JB' clone apples was characterized by high antioxidant activity. However, weather conditions strongly affect the physicochemical quality and content of biologically active compounds in apples. In dry and warm summers, fruits may contain more monosaccharides and less organic acids. In addition, their antioxidant profile is modified. Higher air temperatures and a lack of precipitation in the period before apples ripen can contribute as stress factors to an increase in the polyphenol content of apple flesh and peel.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: https://www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture12111876/s1, Figure S1: Average monthly temperatures and monthly precipitation in 2019; Figure S2: Average monthly temperatures and monthly precipitation in 2020; Figure S3: Average monthly temperatures and monthly precipitation in 2021.

Author Contributions: Conceptualization, A.K., D.W. and T.K.; methodology, A.K., D.W. and T.K.; formal analysis, A.K., D.W. and T.K.; investigation, A.K., D.W. and T.K.; writing—original draft preparation, A.K., D.W. and T.K., writing—review and editing, A.K., D.W. and T.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to give thanks to A. Przybyla and E. Pitera for providing the fruits for the research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Łakomiak, A.; Zhichkin, K.A. Economic aspects of fruit production: A case study in Poland. *BIO Web Conf.* **2020**, *17*, 00236. [CrossRef]
2. Eurostat. Two-thirds of the EU's fruit plantation area is concentrated in Spain, Italy and Poland. In *Eurostat Newsrelease*; Eurostat: Brussels, Belgium, 2019; Volume 32, pp. 1–4.
3. Niszczota, S. Horticultural production orchard survey in 2017. *Inf. Syg.* **2018**, *30*, 1–10. (In Polish)
4. Adamczyk, M.; Rembiałkowska, E.; Wasiak-Zys, G. The comparison of sensory quality of apples from organic and conventional production and after storage. *Zywn.-Nauka Technol. Jakosc* **2006**, *2*, 11–19. (In Polish)
5. Bejaei, M.; Stanich, K.; Cliff, M.A. Modelling and Classification of Apple Textural Attributes Using Sensory, Instrumental and Compositional Analyses. *Foods* **2021**, *10*, 384. [CrossRef] [PubMed]
6. Report of a Joint WHO/FAO Expert Consultation: Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Diseases. WHO Technical Report Series, No. 916. Geneva. 2003. Available online: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42665/WHO_TRS_916.pdf;jsessionid=CF30CD76B8744B43CBF93ABE00602478?sequence=1 (accessed on 2 November 2022).
7. World Health Organization (WHO). Promoting Fruit and Vegetable Consumption around the World. Available online: https://www.who.int/dietphysicalactivity/fruit/en/ (accessed on 5 January 2021).
8. Kalmpourtzidou, A.; Eilander, A.; Talsma, E.F. Global Vegetable Intake and Supply Compared to Recommendations: A Systematic Review. *Nutrients* **2020**, *12*, 1558. [CrossRef]
9. O'Neil, C.E.; Nicklas, T.A.; Fulgoni, V.L. Consumption of apples is associated with a better diet quality and reduced risk of obesity in children: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003–2010. *Nutr. J.* **2015**, *14*, 48. [CrossRef] [PubMed]
10. Hodgson, J.; Prince, R.; Woodman, R.; Bondonno, C.; Ivey, K.; Bondonno, N.; Rimm, E.B.; Ward, N.C.; Croft, K.D.; Lewis, J.R. Apple intake is inversely associated with all-cause and disease-specific mortality in elderly women. *Br. J. Nutr.* **2016**, *115*, 860–867. [CrossRef]
11. Gayer, B.A.; Avendano, E.E.; Edelson, E.; Nirmala, N.; Johnson, E.J.; Raman, G. Effects of Intake of Apples, Pears, or Their Products on Cardiometabolic Risk Factors and Clinical Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Curr. Dev. Nutr.* **2019**, *3*, nzz109. [CrossRef]
12. Muraki, I.; Imamura, F.; Manson, J.E.; Hu, F.B.; Willett, W.C.; van Dam, R.M.; Sun, Q. Fruit consumption and risk of type 2 diabetes: Results from three prospective longitudinal cohort studies. *BMJ* **2013**, *347*, F5001. [CrossRef]
13. Cho, K.D.; Han, C.K.; Lee, B.H. Loss of body weight and fat and improved lipid profiles in obese rats fed apple pomace or apple juice concentrate. *J. Med. Food* **2013**, *16*, 823–830. [CrossRef]
14. Francini, A.; Sebastiani, L. Phenolic Compounds in Apple (*Malus* × *domestica* Borkh.): Compounds Characterization and Stability during Postharvest and after Processing. *Antioxidants* **2013**, *2*, 181–193. [CrossRef] [PubMed]
15. Markowski, J.; Płocharski, W. Determination of phenolic compounds in apples and processed apple products. *J. Fruit Ornam. Plant Res.* **2006**, *14*, 133–141. Available online: http://www.insad.pl/files/journal_pdf/Suppl_2_2006/Suppl_2_full_12_2006.pdf (accessed on 20 November 2020).
16. Tsao, R.; Yang, R. Optimization of a new mobile phase to know the complex and real polyphenolic composition: Towards a total phenolic index using high-performance liquid chromatography. *J. Chromatogr. A* **2003**, *1012*, 29–40. [CrossRef] [PubMed]
17. Russel, L.F.; Wolfe, L.I.; Ryan, D.A.J. Method development and generation of profiles for selected phenolics from apple cultivars used for processed products. *J. Food Sci.* **2002**, *67*, 2819–2826. [CrossRef]
18. Wang, X.Q.; Li, C.Y.; Liang, D.; Zou, Y.J.; Li, P.M.; Ma, F.W. Phenolic compounds and antioxidant activity in red-fleshed apples. *J. Funct. Foods* **2015**, *18*, 1086–1094. [CrossRef]
19. Duda-Chodak, A.; Tarko, T.; Satora, P.; Sroka, P.; Tuszyński, T. The profile of polyphenols and antioxidant properties of selected apple cultivars grown in Poland. *J. Fruit Ornam. Plant Res.* **2010**, *18*, 39–50. Available online: http://www.inhort.pl/files/journal_pdf/journal_2010_2/full4%202010(2).pdf (accessed on 20 November 2020).
20. Yurong, M.; Qingfeng, B.; Jingying, S.; Tiantian, D.; Cai-Zhong, J.; Qingguo, W. 1-Methylcyclopropene (1-MCP), storage time, and shelf life and temperature affect phenolic compounds and antioxidant activity of 'Jonagold' apple. *Postharvest Biol. Technol.* **2019**, *150*, 71–79. [CrossRef]
21. Raudone, L.; Raudonis, R.; Liaudanskas, M.; Janulis, V.; Viskelis, P. Phenolic antioxidant profiles in the whole fruit, flesh and peel of apple cultivars grown in Lithuania. *Sci. Hortic.* **2017**, *216*, 186–192. [CrossRef]
22. Luo, J.C.; Zhang, P.; Li, S.Q.; Shah, N.P. Antioxidant, antibacterial, and anti-proliferative activities of free and bound phenolics from peel and flesh of Fuji apple. *J. Food Sci.* **2016**, *81*, M1735–M1742. [CrossRef]
23. Preti, R.; Tarola, A.M. Study of polyphenols, antioxidant capacity and minerals for the valorisation of ancient apple cultivars from Northeast Italy. *Eur. Food Res. Technol.* **2021**, *247*, 273–283. [CrossRef]
24. Liaudanskas, M.; Viškelis, P.; Kviklys, D.; Raudonis, R.; Janulis, V. A Comparative Study of Phenolic Content in Apple Fruits. *Int. J. Food Prop.* **2015**, *18*, 945–953. [CrossRef]
25. Wong, R.; Kim, S.; Chung, S.J.; Cho, M.S. Texture preferences of Chinese, Korean and US consumers: A case study with apple and pear dried fruits. *Foods* **2020**, *9*, 377. [CrossRef] [PubMed]
26. Jaeger, S.R.; Andani, Z.; Wakeling, I.N.; MacFie, H.J.H. Consumer preferences for fresh and aged apples: A cross-cultural comparison. *Food Qual. Prefer.* **1998**, *9*, 355–366. [CrossRef]

27. Amyotte, B.; Bowen, A.J.; Banks, T.; Rajcan, I.; Somers, D.J. Mapping the sensory perception of apple using descriptive sensory evaluation in a genome wide association study. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0171710. [CrossRef]
28. Teh, S.L.; Kostick, S.; Brutcher, L.; Schonberg, B.; Barritt, B.; Evans, K. Trends in fruit quality improvement from 15 years of selection in the apple breeding program of Washington State University. *Front. Plant Sci.* **2021**, *18*, 714325. [CrossRef]
29. Bokszczanin, K. Ocena jakościowa i sensoryczna owoców czterech mieszańców jabłoni. In *Czynniki Wpływające na Plonowanie i Jakość Owoców Roślin Sadowniczych*; Wrona, D., Ed.; Hortpress: Warsaw, Poland, 2020; pp. 5–19. (In Polish)
30. Przybyła, A. Perspektywy hodowli jabłoni—Jabłka o czerwonym miąższu. In *Czynniki Wpływające na Plonowanie i Jakość Owoców Roślin Sadowniczych*; Tomala, K., Ed.; Hortpress: Warsaw, Poland, 2014; pp. 115–117. (In Polish)
31. Walter, H. *Vegetationszonen und Klima*; Ulmer: Stuttgart, Germany, 1973.
32. Tomala, K.; Grzęda, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. The Effects of Preharvest 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment on the Fruit Quality Parameters of Cold-Stored 'Szampion' Cultivar Apples. *Agriculture* **2020**, *10*, 80. [CrossRef]
33. Tomala, K.; Grzęda, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. Analysis of Possibility to Apply Preharvest 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment to Delay Harvesting of Red Jonaprince Apples. *Sustainability* **2020**, *12*, 4575. [CrossRef]
34. Carbone, K.; Giannini, B.; Picchi, V.; Scalzo, R.L.; Cecchini, F. Phenolic composition and free radical scavenging activity of different apple varieties in relation on the cultivar, tissue type and storage. *Food Chem.* **2011**, *127*, 493–500. [CrossRef]
35. Krupa, T.; Zaraś-Januszkiewicz, E.; Kistechok, A. Influence of 1-Methylcyclopropene on the Antioxidants of 'Red Cap' Apples during Transportation and Shelf Life. *Agronomy* **2021**, *11*, 341. [CrossRef]
36. De Gaulejac, S.C.; Provost, C.; Viras, N. Comparative study of polyphenol scavenging activities assessed by different methods. *J. Agric. Food Chem.* **1999**, *47*, 425–431. [CrossRef]
37. Zielinski, A.A.F.; Braga, C.M.; Demiate, I.M.; Beltrame, F.L.; Nogueira, A.; Wosiacki, G. Development and optimization of a HPLC-RI method for the determination of major sugars in apple juice and evaluation of the effect of the ripening stage. *Food Sci. Technol.* **2014**, *34*, 38–44. [CrossRef]
38. Hyson, D.A. A comprehensive review of apples and apple components and their relationship to human health. *Adv. Nutr.* **2011**, *2*, 408–420. [CrossRef] [PubMed]
39. Hyson, D.A. A review and critical analysis of the scientific literature related to 100% fruit juice and human health. *Advances in Nutrition* **2015**, *15*, 37–51. [CrossRef]
40. Boyer, J.; Liu, R.H. Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutr. J.* **2004**, *3*, 5–13. [CrossRef] [PubMed]
41. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbühl, B.; Künsch, U. Efficacy of instrumental measurements or determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharv. Biol. Technol.* **2003**, *27*, 27–37. [CrossRef]
42. Zdunek, A.; Cybulska, J.; Konopacka DRutkowski, K. Inter-laboratory analysis of firmness and sensory texture of stored apples. *Int. Agrophysics* **2011**, *25*, 67–75.
43. Aprea, E.; Charles, M.; Endrizzi, I.; Laura Corollaro, M.; Betta, E.; Biasioli, F.; Gasperi, F. Sweet taste in apple: The role of sorbitol, individual sugars, organic acids and volatile compounds. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 44950. [CrossRef]
44. Li, Y.; Sun, H.; Li, J.; Qin, S.; Yang, W.; Ma, X.; Qiao, X.; Yang, B. Effects of Genetic Background and Altitude on Sugars, Malic Acid and Ascorbic Acid in Fruits of Wild and Cultivated Apples (*Malus* sp.). *Foods* **2021**, *10*, 2950. [CrossRef]
45. Mignard, P.; Beguería, S.; Gimenez, R.; Font i Forcada, C.; Reig, G.; Moreno, M.A. Effect of genetics and climate on apple sugars and organic acids profiles. *Agronomy* **2022**, *12*, 827. [CrossRef]
46. Kim, I.; Ku, K.; Jeong, M.; Kim, S.S.; Mitchell, A.E.; Lee, J. A comparison of the chemical composition and antioxidant activity of several new early- to mid-season apple cultivars for a warmer climate with traditional cultivars. *J. Sci. Food Agric.* **2019**, *99*, 4712–4724. [CrossRef]
47. Li, M.; Guo, J.; He, J.; Xu, C.; Li, J.; Mi, C.; Tao, S. Possible impact of climate change on apple yield in Northwest China. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser. B* **2019**, *139*, 191–203. [CrossRef]
48. Petkovska, A.; Gjamovski, V.; Stefova, M. Comparison of different extraction solvents for assay of the polyphenol content in the peel and pulp of 21 apple cultivars from Macedonia. *Maced. J. Chem. Chem. Eng.* **2016**, *35*, 29–38. [CrossRef]
49. Vieira, F.G.K.; Borges, G.D.S.C.; Copetti, C.; Gonzaga, L.V.; Nunes, E.C.; Fett, R. Activity and contents of polyphenolic antioxidants in the whole fruit, flesh and peel of three apple cultivars. *Arch Latinoam Nutr.* **2009**, *59*, 101–106. [PubMed]
50. Kevers, C.; Pincemail, J.; Tabart, J.; Defraigne, J.O.; Dommes, J. Influence of cultivar, harvest time, storage conditions, and peeling on the antioxidant capacity and phenolic and ascorbic acid contents of apples and pears. *J. Agric. Food Chem.* **2011**, *59*, 6165–6171. [CrossRef] [PubMed]
51. Koutsos, A.; Riccadonna, S.; Ulaszewska, M.M.; Franceschi, P.; Trošt, K.; Galvin, A.; Braune, T.; Fava, F.; Perenzoni, D.; Mattivi, F.; et al. Two apples a day lower serum cholesterol and improve cardiometabolic biomarkers in mildly hypercholesterolemic adults: A randomized, controlled, crossover trial. *Am. J. Clin. Nutr.* **2020**, *111*, 307–318. [CrossRef] [PubMed]
52. Hollands, W.J.; Tapp, H.; Defernez, M.; Perez Moral, N.; Winterbone, M.S.; Philo, M.; Lucey, A.J.; Kiely, M.E.; Kroon, P.A. Lack of acute or chronic effects of epicatechin-rich and procyanidin-rich apple extracts on blood pressure and cardiometabolic biomarkers in adults with moderately elevated blood pressure: A randomized, placebo-controlled crossover trial. *Am. J. Clin. Nutr.* **2018**, *108*, 1006–1014. [CrossRef]

53. Bondonno, N.P.; Bondonno, C.P.; Blekkenhorst, L.C.; Considine, M.J.; Maghzal, G.; Stocker, R.; Woodman, R.J.; Ward, N.C.; Hodgson, J.M.; Croft, K.D. Flavonoid-rich apple improves endothelial function in individuals at risk for cardiovascular disease: A randomized controlled clinical trial. *Mol. Nutr. Food Res.* **2018**, *62*, 1700674. [CrossRef]
54. MacLean, D.D.; Murr, D.P.; DeEll, J.R.; Horvath, C.R. Postharvest variation in apple (*Malus* × *domestica* Borkh.) flavonoids follow in harvest, storage, and 1-MCP treatment. *J. Agric. Food Chem.* **2006**, *54*, 870–878. [CrossRef]
55. Graziani, G.; Gaspari, A.; Di Vaio, C.; Cirillo, A.; Ronca, C.L.; Grosso, M.; Ritieni, A. Assessment of In Vitro Bioaccessibility of Polyphenols from Annurca, Limoncella, Red Delicious, and Golden Delicious Apples Using a Sequential Enzymatic Digestion Model. *Antioxidants* **2021**, *10*, 541. [CrossRef]
56. Mignard, P.; Beguería, S.; Reig, G.; Font i Forcada, C.; Moreno, M.A. Genetic origin and climate determine fruit quality and antioxidant traits on apple (*Malus* × *domestica* Borkh). *Sci. Hortic.* **2021**, *285*, 110–142. [CrossRef]
57. Wu, J.; Gao, H.; Zhao, L.; Liao, X.; Chen, F.; Wang, Z.; Hu, X. Chemical compositional characterization of some apple cultivars. *Food Chem.* **2007**, *103*, 88–93. [CrossRef]
58. Napolitano, A.; Cascone, A.; Graziani, G.; Ferracane, R.; Scalfi, L.; Di Vaio, C.; Ritieni, A.; Fogliano, V. Influence of Variety and Storage on the Polyphenol Composition of Apple Flesh. *J. Agric. Food Chem.* **2004**, *52*, 6526–6531. [CrossRef] [PubMed]
59. Lamperi, L.; Chiuminatto, U.; Cincinelli, A.; Galvan, P.; Giordani, E.; Lepri, L.; Del Bubba, M. Polyphenol levels and free radical scavenging activities of four apple cultivars from integrated and organic farming in different italian areas. *J. Agric. Food Chem.* **2008**, *56*, 6536–6546. [CrossRef] [PubMed]
60. Zydlik, Z.; Rutkowski, K.; Świerczyński, S.; Morkunas, I.; Yoon, H.-K.; Seo, J.-H.; Kang, K.-J.; Kleiber, T. The effect of climatic conditions in successive plant growing seasons on the response of selected varieties of apple trees (*Malus domestica* Borkh.). *J. Elem.* **2020**, *25*, 205–224. [CrossRef]
61. Łysiak, G.P.; Michalska-Ciechanowska, A.; Wojdyło, A. Postharvest changes in phenolic compounds and antioxidant capacity of apples cv. *Jonagold growing in different locations in Europe, Food Chem.* **2020**, *310*, 125912. [CrossRef]
62. Łata, B.; Łaźny, R.; Przybyłko, S.; Wrona, D. *Malus* Antioxidant Metabolism Following Bacterial–Fungal Inoculation in Organic Farming: From Root to Fruit. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 9466. [CrossRef]
63. Warrington, I.J.; Fulton, T.A.; Halligan, E.A.; de Silva, H.N. Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **1999**, *124*, 468–477. [CrossRef]
64. Yuri, J.A.; Neira, A.; Maldonado, F.; Quilodran, A.; Simeone, D.; Razmilic, I.; Palomo, I. Total phenol and quercetin content and antioxidant activity in apples in re sponse to thermal, light stress and to organic management. *J. Appl. Bot. Food Qual.* **2014**, *87*, 131–138. [CrossRef]
65. Ubi, B.E.; Honda, C.; Bessho, H.; Kondo, S.; Wada, M.; Kobayashi, S.; Moriguchi, T. Expression analysis of anthocyanin biosynthetic genes in apple skin: Effect of UV-B and temperature. *Plant Sci.* **2006**, *170*, 571–578. [CrossRef]
66. Loncaric, A.; Pilizota, V. Effect of variety, growing season and storage on polyphenol profile and antioxidant activity of apple peels. *Sci.-Prof. J. Nutr. Diet.* **2014**, *3*, 96–105.
67. Zhang, Q.; Zhou, B.; Li, M.; Wei, Q.; Han, Z. Multivariate analysis between meteorological factor and fruit quality of Fuji apple at different locations in China. *J. Integr. Agric.* **2018**, *17*, 1338–1347. [CrossRef]
68. Yuri, J.A.; Neira, A.; Quilodran, A.; Motomura, Y.; Palomo, I. Antioxidant activity and total phenolics concentration in apple peel and flesh is determined by cultivar and agroclimatic growing regions in Chile. *J. Food Agric. Environ.* **2009**, *7*, 513–517. [CrossRef]
69. Ahmadi, H.; Ghalhari, G.F.; Baaghideh, M. Impacts of climate change on apple tree cultivation areas in Iran. *Clim. Change* **2018**, *153*, 91–103. [CrossRef]
70. Gitea, M.A.; Gitea, D.; Tit, D.M.; Purza, L.; Samuel, A.D.; Bungau, S.; Badea, G.E.; Aleya, L. Orchard management under the effects of climate change: Implications for apple, plum, and almond growing. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2019**, *26*, 9908–9915. [CrossRef] [PubMed]
71. Pandey, V.P.; Awasthi, M.; Singh, S.; Tiwari, S.; Dwivedi, U.N. A Comprehensive Review on Function and Application of Plant Peroxidases. *Biochem. Anal. Biochem.* **2017**, *6*, 308. [CrossRef]

agriculture

MDPI

Article

Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland

Andrii Kistechok *, Dariusz Wrona and Tomasz Krupa

Department of Pomology and Horticulture Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS), 159C Nowoursynowska Street, 02-787 Warsaw, Poland; dariusz_wrona@sggw.edu.pl (D.W.); tomasz_krupa@sggw.edu.pl (T.K.)

* Correspondence: andrii_kistechok@sggw.edu.pl; Tel.: +48-22-593-20-81

Abstract: The aim of this study is to assess the storability and nutritional value of new Polish apple cultivars recommended for cultivation after storage under low-oxygen atmospheric conditions (ULO and DCA). Fruit characteristics of 'Chopin' and clone 'JB' were evaluated in relation to commonly grown apple cultivars. Fruits of six selected apple cultivars were stored for a period of 9 months in conventional (0.04% CO_2: 21% O_2), Ultra-Low Oxygen (1.5% CO_2: 1.5% O_2), and Dynamic Controlled Atmosphere (0.6% CO_2: 0.6% O_2) cold storage. Physicochemical characteristics of the apples (firmness, soluble solids, acidity, and fibre content), nutritional and antioxidant values of the fruit (P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, total polyphenols, total flavonoids, and antioxidant capacity), and safety of consumption (residues of pesticides) were assessed. The new cultivar 'Chopin' and clone 'JB' were characterised by above-average acidity and clone 'JB' stood out in terms of antioxidant properties. Storage in a low-oxygen atmosphere in DCA was more effective in limiting fruit ripening than conventional cold storage, contributing to the preservation of the high potential of biologically active compounds in the apples. Apples after 9 months of storage were characterised by higher firmness (from 3.5 to 14 N), higher total polyphenol content in the flesh (from 8 to 23 mg·100 g^{-1} FW) and peel (from 32 to 97 mg·100 g^{-1} FW), as well as higher antioxidant capacity in the flesh (from 15 to 37 mg AAE·100 g^{-1} FW) and peel (from 28 to 59 mg AAE·100 g^{-1} FW) when stored in DCA compared to cold storage.

Keywords: Dynamic Controlled Atmosphere; Ultra-Low Oxygen; fruit quality; antioxidant properties; polyphenols

check for updates

Citation: Kistechok, A.; Wrona, D.; Krupa, T. Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. *Agriculture* **2024**, *14*, 59. https://doi.org/10.3390/agriculture14010059

Academic Editor: Grzegorz Lysiak

Received: 20 November 2023
Revised: 24 December 2023
Accepted: 27 December 2023
Published: 28 December 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

In European countries, apples are considered a staple in the human diet, valued for their various health-promoting properties [1–3]. Being a potential source of many nutrients like vitamins (C, B group, and E), pigments (beta carotene), minerals (N, P, K, Ca, Mg, and Fe) [4], dietary fibre [5,6], and a number of phytochemicals (polyphenols), they have gained recognition for their high nutritional potential affecting the human body [6–8]. Thanks to the widespread cultivation of this species in temperate countries, apples are readily available to consumers [9,10]. However, the preservation of valuable nutrients in apples during the storage period, transportation, or distribution on the store shelf is a key determinant of the technology in which the fruit is stored [11].

In a healthy diet, emphasis is placed on fruits and vegetables, due to the polyphenols found in them that play a very important role in human nutrition. These bioactive compounds play a key role in reducing free radicals that cause various diseases in the human body, often referred to as diseases of civilisation [1,6–8,12]. They protect against the risk of neurodegenerative diseases, reduce asthma symptoms, and are widely used in the prevention of many chronic diseases such as diabetes, hypertension, and cancer. The conditions under which the fruit is stored after harvest affect the maintenance of polyphenol

level in apples [12,13]. Previous research results indicate that the low oxygen concentration in the atmosphere in the cold storage chamber is conducive to maintaining the high physicochemical quality of apples [14,15]. The effect of storage conditions on fruit quality is widely reported in the literature [16–18]. Radenkovs and Juhnevica-Radenkova [17] demonstrated that the use of low oxygen concentration in the storage chamber favours the reduction in weight loss of apples when confronted with fruit stored in cold storage. Many authors argue that the maintenance of high firmness, acidity, or low soluble solids content in apples is favoured by storage under ULO conditions [16,17,19]. Further lowering the oxygen concentration to the limit of aerobic and anaerobic respiration in apples (DCA technology) measurably reduces fruit ripening. However, the effect of DCA conditions correlates with the varietal characteristics of the apples. According to Gasser and van Arx [20], storing the cultivars 'Topaz' and 'Otava' in DCA has no positive effect on fruit quality compared to ULO conditions, while in the case of the cultivar 'Ariane', fruit stored in DCA retained firmness and acidity better compared to fruit stored under ULO conditions. The higher storage efficiency of apples in DCA than ULO or cold storage is reported by many researchers [19,21–23]. Oxygen levels used during storage in DCA are maintained at the limit of the anaerobic compensation point (ACP), the point at which O_2 uptake and CO_2 production are minimal. Storing apples under these conditions maximally reduces respiration rates and metabolite production [21,24]. Currently, much attention is being paid to assessing the relationship between storage conditions, involving traditional and innovative technologies and the nutritional, antioxidant, and physicochemical properties of apples [13,24]. Due to the evidence that the polyphenol content is dependent on the genetic traits of the variety, there is a lack of consistency in the literature in describing the results for the postharvest storage of apple fruit. In a study by Carbone et al. [25], the total phenolic content of 'Braeburn' apples was significantly reduced after storage at low temperature (1 °C), by 50% and 20% in the peel and flesh, respectively. Also, Kolniak-Ostek et al. [26] found that in apples stored for 6 months, the total polyphenol concentration decreased up to 27%, depending on the cultivar. However, Napolitano et al. [27] reported an increase in flesh catechin and phloridzin content, as well as antioxidant activity, after cold storage of the Italian cultivar 'Annurca'. The highly effective respiration rate reduction in ULO and DCA significantly slows down apple metabolism. According to Putnik et al. [28], an increase in total phenolic compounds can occur in apple flesh after storage in CA and ULO. The high stability of phenolic compounds during storage in ULO and DCA is reported by many authors [16,17,19,29]. Putnik et al. [28] demonstrated a lack of correlation between total phenolic content and antioxidant activity. The general opinion is that during long-term storage, antioxidant activity decreases in both peel and flesh tissues [30,31].

With the promotion of healthy diets and lifestyles among consumers in developed countries, this knowledge enables producers to make informed choices about fruit distribution, optimizing the health benefits consumers receive. Properly selected storage technology makes it possible to extend the supply period of apples with minimal loss of their health-promoting properties [17,19,21,32]. The nutritional potential of apples is influenced by their mineral content (e.g., Ca, K, Mg, Zn, and Se) but additionally determines their storability. High calcium content in the middle lamella of the cell wall stabilises the permeability of compounds between cells. This is conducive to reducing the occurrence of physiological disorders, contributing to improving the storability of apples [33,34].

Dietary fibre is a group of food components that are resistant to the action of digestive enzymes and are mainly found in cereals, fruits, and vegetables [35]. Dietary fibre is studied in two groups: water-soluble and water-insoluble organic compounds, which can be divided into many different fractions including arabinoxylan, inulin, pectin, bran, cellulose, β-glucan, and resistant starch [36,37]. Dietary fibre is a major component of low-energy products, which have become increasingly important in recent years. Dietary fibre also has technological and functional properties that can be used in food formulation, as well as numerous beneficial effects on human health. The dietary fibre content of apples

is influenced by varietal characteristics [36], storage conditions that cause the softening of the fruit [38,39], as well as dehydration [40].

To ensure a holistic understanding of apple distribution management, pesticide residue evaluation appears to be a critically important issue [41]. Foods that are classified as functional products should not only have elevated nutrient values, but they should also be safe for consumption [42]. In EU countries, the Integrated Plant Production System was introduced in 2014. Integrated Production (IP) is a modern food production system that makes sustainable use of technical and biological progress, plant protection and fertilisation, and pays special attention to protecting the environment and human health. This system has facilitated quality control at all stages of production.

The link between apple storage technology and the preservation of their nutritional integrity and antioxidant capacity is an important one [12]. The aim of this study is to evaluate the influence of dynamically controlled atmosphere and ultra-low atmosphere technology, as well as the storage period, on the physicochemical properties and nutritional value of apples grown in central Poland, with particular emphasis on two new Polish apple tree selections. In the experiment, representative fruit characteristics of the 'Chopin' variety and the 'JB' clone were evaluated in relation to commercially grown apple tree varieties in Poland.

2. Materials and Methods

2.1. Location of the Experiment and Research Material

Apples of varieties commonly grown in Poland were used for the tests performed in the 2021–2022 season: 'Gala Brookfield', 'Idared', 'Šampion', and 'Ligol'. In addition, the new Polish cultivar 'Chopin' recommended for commodity cultivation and the red-fleshed clone 'JB' were evaluated. The fruit of the evaluated varieties came from the experimental orchard of the Institute of Horticultural Sciences 'Wilanów', WULS-SGGW. The orchard is located in central Poland (52.259° N, 21.020° E), in an area with a warm temperate transitional climate, with an annual rainfall of 500–550 mm. The orchard has very fertile soils, dominated by mads (alluvial soils), characterised by a significant content of humus and clay materials. Fruits for the experiment were harvested from trees aged 10 years, growing on M.9 rootstock. The trees grow at a spacing of 1 m × 3.5 m. Fruits were harvested from 10 selected trees for each cultivar. Fruit harvest date was determined using the Streif index and starch test. In addition, the ethylene content in the seed chambers of the apples was evaluated to determine the maturity of the fruit after harvest.

2.2. Experimental Layout

During fruit harvesting, selections were made by rejecting fruit with visible damage or signs of rotting. After harvesting, the fruits were transported to a cold store, where the apples were randomly divided into 3 groups—according to the technology in which they were stored. The apples were stored in 3 containers of 1 m^3 each. Approximately 600 pieces of fruit in 6 packs of 15 kg plastic were placed in one container. Gas levels in the containers were regulated automatically using an Oxystat 200 system (David Bishop Ltd., Heathfield, UK), correcting CO_2 and O_2 content every 4 h. The fruit was stored for a period of 9 months. Assessment of fruit quality and nutritional value was performed immediately after apple harvest and every 3 months during storage. Testing of individual fruit characteristics at each date was performed in three repetitions and one repetition consisted of 10–20 fruits depending on the analysis conducted.

Analyses of biologically active compounds were evaluated separately in apple peel and flesh. Immediately after harvesting, peel and flesh were frozen using liquid nitrogen and then stored in a deep freezer at −78 °C. The frozen material was ground in the presence of liquid nitrogen in an analytical mill A11 basic and the extraction of biologically active compounds was carried out in powdered material.

2.3. Storage Technology

Apples were stored using the following technologies:

NA—ordinary cold storage, CO_2 = 0.04%, O_2 = 21%, temperature ≈ 1 °C, Rh ≈ 80%;
ULO—Ultra-Low Oxygen, CO_2 = 1.5%, O_2 = 1.5%, temperature ≈ 1 °C, Rh ≈ 95%;
DCA—Dynamic Controlled Atmosphere, CO_2 = 0.6%, O_2 = 0.6%, temperature ≈ 1 °C, Rh ≈ 95%.

The composition of the atmosphere in the containers was regulated automatically by an Oxystat 200 system (David Bishop Ltd., Heathfield, UK). In addition, DCA technology used Handy PEA fluorimeters (Hansatech Industries Ltd., Pentney, UK) to assess apple stress caused by a too low oxygen concentration. The composition of the atmosphere under DCA conditions was maintained at about 0.6% CO_2 and about 0.6% O_2, changing the oxygen content during periods of apple stress by 0.1%.

2.4. Research Methodology

The starch test, the Streif index method, and the ethylene content of the seed chambers of apples were used to evaluate the timing of harvest and the maturity of the fruit immediately after harvest.

The starch test (SI) is the simplest and cheapest way to determine harvest date. Representative fruit samples are cut crosswise and soaked or sprayed with a reagent (Lugol's fluid). The starch test involves staining the starch contained in the apple flesh by iodine found in potassium iodide (Lugol's liquid). The resulting image (the starch has been stained a dark blue colour) is compared with reference plates. As we approach harvest and later during storage, the phenomenon of starch decomposition into simple sugars takes place, so that more and more of the area is left uncoloured. The starch index (SI) was estimated according to Tomala et al. [43]. The Streif index was evaluated based on three components, i.e., firmness, soluble solids content, and starch index, according to the formula:

$$\text{Index Streif} = \frac{\text{firmness}}{\text{soluble solids content} \times \text{starch index}}$$

Ethylene content in the seed chambers was assessed according to the method described in an earlier study [14]. Ethylene content was evaluated using a gas chromatograph (HP 5890, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA), equipped with a packed column, and FID detector. The oven temperature was 150 °C and the retention time was about 1.5 min.

The following indices were used to assess fruit quality: flesh firmness, soluble solids content, and apple acidity. Flesh firmness (FF) was measured using a 10 mm diameter probe mounted in a universal testing machine (TM 5542; Instron, High Wycombe, UK). The measurement speed was 240 mm-min^{-1}. Firmness was measured at two opposite locations on the apple, after the peel was removed. The location for the first test was visually selected in the reddest area or opposite the greenest area for the 'Chopin' cultivar. The testing machine was programmed to detect contact with the sample and then move to a depth of 10 mm, collecting force data every 0.0254 mm. The indicator value was expressed as the maximum force used to plunge the mandrel to the indicated depth and was expressed in Newton (N). The soluble solids content (SSC) of the juice obtained from the apples was determined using a PR^{-32} alpha handheld refractometer (Atago, Tokyo, Japan). The results were expressed in degrees Brix (°Brix) [14].

Acidity (TA) was measured in an aqueous extract from a medium fruit sample by titration with 0.1 N sodium hydroxide (NaOH) to a pH endpoint of 8.1, using a TitroLine 5000 system (Si Analytics, Mainz, Germany). Results were expressed as a percentage of malic acid [14].

The nutritional value and mineral composition of apples were described by the content of fibre, total polyphenols (TPC), and total flavonoids (TFC); antioxidant capacity was assessed as well as the composition of micro- and macronutrients. The official AOAC 985.29 method for measuring TDF in foods was used to assess fibre content. The method

is based on the enzymatic removal of starch and protein from samples by amylase and protease at 90 °C and 60 °C, respectively. Insoluble dietary fibre (IDF) is then separated by filtration, and soluble high-molecular-weight dietary fibre is precipitated with 78% etalon and collected by filtration. Both fibre fractions are dried and weighed, which together give the total dietary fibre content of the sample. The results are expressed as a percentage of fresh weight. Analysis of the total polyphenol content was carried out according to the Waterhouse method [44]. Total polyphenols were measured using a Marcel s330 PRO spectrophotometer (Marcel S.A., Warsaw, Poland) with Folin-Ciocalteau reagent, at λ = 700 nm. The results are expressed in milligrams of gallic acid per 100 g^{-1} FW (fresh weight). Total flavonoids were analysed using the modified method of Marinova et al. [45]. An amount of 5 g of fruit powdered in liquid nitrogen was mixed with 25 mL of 80% methanol and extracted for 15 min. The extractions were carried out twice. Distilled water, 5% $NaNO_2$, 10% $AlCl_3$, and 1 M NaOH were added successively to the resulting samples at specified intervals. We took measurements using a Marcel s330 PRO spectrophotometer (Marcel S.A., Warsaw, Poland) at 510 nm. The total flavonoid content of the fruit was expressed as mg quercetin equivalent per 100 g^{-1} FW (fresh weight). Antioxidant capacity was determined according to the method of Saint Criq de Gaulejac et al. [46] based on the reduction of free radicals obtained from DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, Sigma-Aldrich, Poznań). Antioxidant capacity was calculated from absorbance measurements for the specific sample (fruit extract + $DPPH^+$) taken after 20 min at λ = 517 nm relative to the control sample (H_2O + $DPPH^+$). Results were expressed in mg per g F.W. of ascorbic acid (AAE). Macro- and micronutrient (P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, and Zn) analyses were performed at the J.S. Hamilton accredited laboratory (OiB accreditation scope No. 53/MON/2016). Mineralisation was performed in a closed-pressure system in a so-called 'Teflon bomb' using microwave energy from electromagnetic radiation at 2450 MHz. Pressure mineralisation involves the reaction of sample components with mineral acids at elevated temperatures in a closed Teflon vessel, known as a Teflon bomb. The pressure created by the release of gases allows for higher temperatures than the boiling points of the acids in open systems. The final determination was performed by inductively coupled plasma ionisation mass spectrometry (ICP-MS). The principle of ICP-MS is to measure the intensity of the ion flux generated in the plasma. The ions are produced in the inductively coupled plasma and then separated using a mass analyser, where the separation is achieved due to the value of the mass-to-charge ratio. For the analysis of solid samples, a laser evaporation (LA) technique was used, which involves surface atomisation of the sample material using a focused laser beam. The gas phase and aerosol generated are transferred to the ICP plasma by means of an auxiliary gas stream—argon.

Food safety analysis was carried out based on the results of residues of pesticides in apples. The tests were performed using gas chromatography (GC-MS/MS) at the J.S. Hamilton accredited laboratory (OiB accreditation scope No. 53/MON/2016).

2.5. Statistical Analysis

Statistical analysis of the obtained test results was performed using Statistica 13.3 software (StatSoft Poland, Krakow, Poland). Two-factor analysis of variance was used, and the analysed factors were variety and storage technology. The Tukey test was used to assess the significance of differences between the averages, assuming a significance level of 5%.

3. Results

Data describing the physiological state of the fruits of the studied varieties are shown in Figures 1–3. Fruit maturity immediately after harvesting was at a similar level. The slightly lower ethylene content in the seed chamber of apples of clone 'JB' does not indicate a less advanced level of fruit maturity and may be due to its individual characteristics (Figure 2). The values presented in Figure 3 indicate that the fruit was harvested at the optimal time of harvest, just after the onset of climacteric ripening.

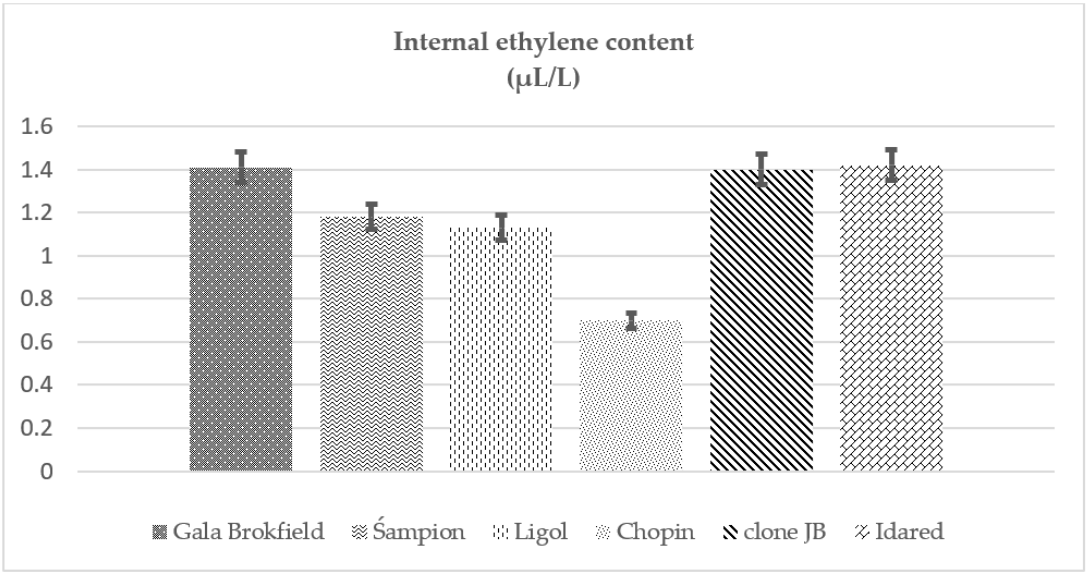


Figure 1. The values of internal ethylene content (µL/L), characteristic of the maturity stage of apples assessed directly after harvest. Data are presented as mean ± standard deviation.

Figure 2. The values of Streif index (−), characteristic of the maturity stage of apples assessed directly after harvest. Data are presented as mean ± standard deviation.

Significantly different varietal characteristics were noted between the cultivars studied. After harvesting, 'Gala Brookfield' had the highest firmness value and 'Šampion' had the lowest. The difference in index values between the two varieties was as high as 28.8% (Figure 4). Clone 'JB' and the cultivars 'Chopin' and 'Idared' posed a group of apples with similar firmness, intermediate to the above-mentioned cultivar. Cultivar characteristics determined the storage quality of the fruit (Table 1). The 'Šampion' cultivar had the lowest firmness immediately after harvest and after storage, regardless of the period as well as the conditions under which the fruit was stored. 'Šampion' fruit firmness after 6 and 9 months of storage was characterised by a value lower than acceptable to consumers, determined at 45 N. A similarly rapid loss of firmness was found in the 'JB' clone. In addition, very intense rotting symptoms were observed, which prevented the 'JB' clone from being stored for longer than 3 months. The cultivar 'Ligol' had the lowest loss of firmness, amounting to only 10.9% of the period of 9 months of apple storage under DCA conditions. In general,

fruit stored in ULO or DCA cold storage had significantly higher firmness than after storage in NA. It should be emphasised that after 9 months of storage in NA, most of the cultivars evaluated did not have acceptable firmness. After the same storage period with DCA, the cultivars 'Ligol', 'Chopin', 'Gala Brookfield', and 'Idared' retained high flesh firmness. Only in the case of the Idared variety was the effect of storage conditions on flesh firmness after this storage period not proven.

Figure 3. The values of starch index (−), characteristic of the maturity stage of apples assessed directly after harvest. Data are presented as mean ± standard deviation.

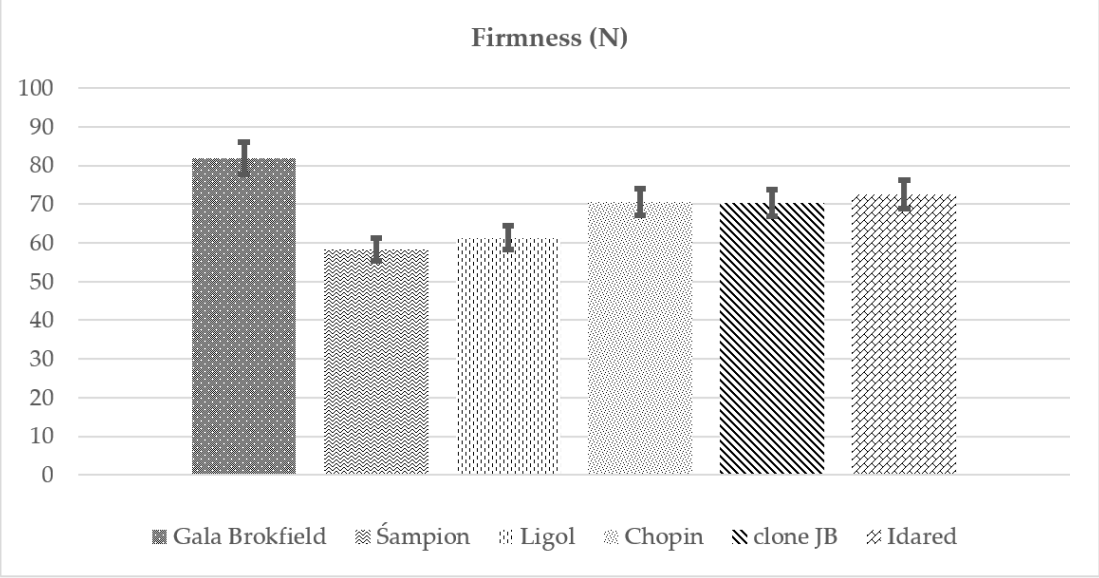


Figure 4. The values of firmness (N) for apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviations.

Table 1. The values of firmness (N) for apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	53.3 ± 0.9	58.5 ± 0.3	60.9 ± 0.2	<0.01
Šampion	42.5 ± 0.3	42.6 ± 0.3	50.7 ± 0.2	<0.01
Ligol	54.5 ± 0.3	58.6 ± 0.3	60.1 ± 0.2	<0.01
clone JB	41.7 ± 0.6	47.5 ± 1.0	51.3 ± 1.0	<0.01
Chopin	52.6 ± 0.7	59.1 ± 1.4	62.5 ± 0.8	<0.01
Idared	51.3 ± 0.6	55.0 ± 0.4	57.6 ± 0.8	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	47.2 ± 0.8	50.9 ± 1.2	56.6 ± 0.8	<0.01
Šampion	26.8 ± 0.8	31.0 ± 0.4	37.4 ± 1.3	<0.01
Ligol	50.5 ± 0.3	52.4 ± 0.4	57.3 ± 0.3	<0.01
clone JB	-	-	-	
Chopin	42.7 ± 1.0	55.1 ± 0.4	57.7 ± 0.3	<0.01
Idared	45.8 ± 0.7	43.5 ± 0.7	51.6 ± 1.4	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	39.4 ± 0.2	43.4 ± 1.0	46.9 ± 0.5	<0.01
Šampion	20.9 ± 0.6	29.6 ± 0.6	34.9 ± 0.5	<0.01
Ligol	41.4 ± 0.7	44.6 ± 0.7	54.6 ± 0.2	<0.01
clone JB	-	-	-	
Chopin	38.5 ± 1.0	43.9 ± 1.2	49.6 ± 1.3	<0.01
Idared	41.2 ± 0.5	43.7 ± 1.1	44.7 ± 1.2	0.028
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

The soluble solids content after fruit harvest varied depending on the apple cultivar (Figure 5). Unexpectedly, the lowest SSC content was found in 'Gala Brookfield' apples, a cultivar considered sweet by consumers. The group with significantly higher SSC included 'Ligol', the 'JB' clone, and 'Idared'. The effect of storage technology was variable and depended on the storage period and the variety evaluated (Table 2). It was observed that DCA technology stabilises the soluble solids of fruit between different cultivars with increasing storage period. A similar but weaker effect was observed after storage in ULO but was not found in NA. Overall, SSC fluctuated during the course of the study, making it impossible to clearly indicate the direction of these changes for all varieties. However, it is possible to isolate an increase in SSC in most varieties stored in NA.

The analysis of acidity in postharvest fruit showed a large difference between cultivars, with the TA value of the 'JB' clone and 'Chopin' cultivar being more than twice as high as the other cultivars (Figure 6). 'Idared' was also distinguished by higher acidity, while the 'sweet' cultivar 'Gala Brookfield' was lower. TA in the fruit of the evaluated cultivars was more strongly determined by varietal characteristics than by storage conditions (Table 3). It should be noted, however, that the influence of storage conditions increased with the extension of the storage period. Analysis of the data showed that the 'JB' clone and 'Chopin' and 'Idared' cultivars had higher TA, while the 'Gala Brookfield', 'Šampion', and 'Ligol' cultivars had lower TA. The described cultivars' differences were proven during 9 months of storage, regardless of storage conditions. The effect of storage technology depended on the cultivar group. After 3 months, significantly higher TA was found in 'Gala Brookfield', 'Šampion', 'Ligol', and 'Chopin', while after 9 months of storage, more effective inhibition of TA loss was proven in all cultivars after storage in DCA.

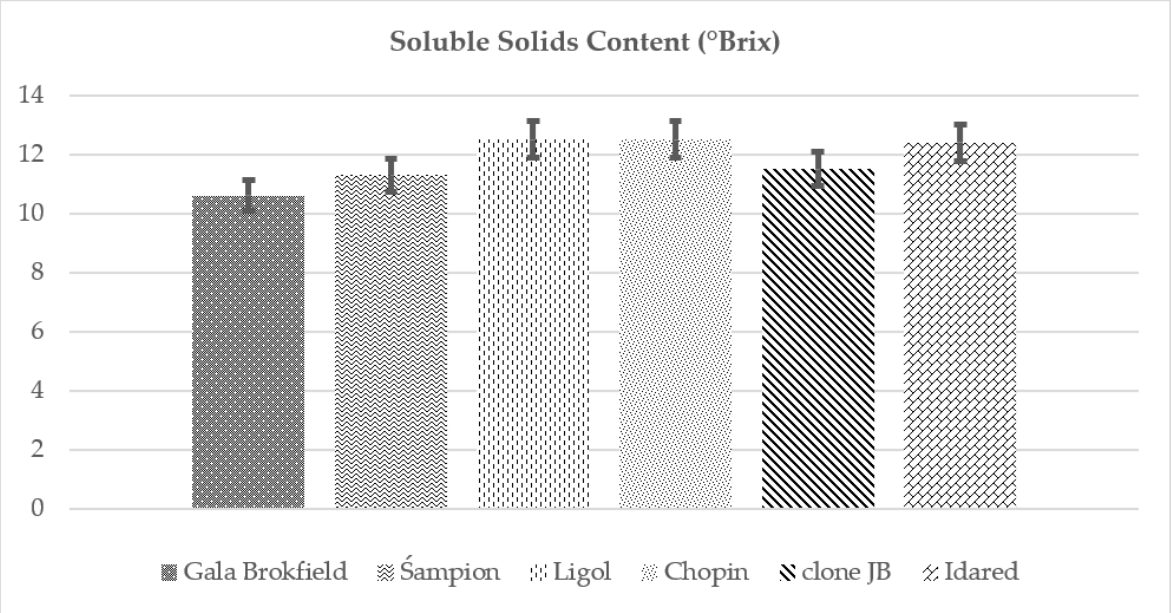


Figure 5. The values of soluble solids content (°Brix) for apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviations.

Table 2. The values of soluble solids content (°Brix) for apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	11.4 ± 0.1	11.5 ± 0.1	11.3 ± 0.4	0.757
Šampion	11.3 ± 0.1	11.9 ± 0.1	11.5 ± 0.1	<0.01
Ligol	12.5 ± 0.1	11.4 ± 0.2	12.5 ± 0.1	<0.01
clone JB	12.1 ± 0.2	12.4 ± 0.2	12.5 ± 0.1	0.155
Chopin	12.2 ± 0.1	11.9 ± 0.1	12.6 ± 0.1	0.139
Idared	11.3 ± 0.1	11.9 ± 0.2	12.1 ± 0.2	0.014
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	12.0 ± 0.1	11.9 ± 0.2	12.7 ± 0.5	0.072
Šampion	11.6 ± 0.1	12.1 ± 0.2	11.9 ± 0.2	0.061
Ligol	11.8 ± 0.1	11.4 ± 0.1	12.6 ± 0.4	0.005
clone JB	-	-	-	
Chopin	12.6 ± 0.1	12.8 ± 0.1	12.8 ± 0.1	0.301
Idared	10.9 ± 0.1	11.7 ± 0.1	11.7 ± 0.1	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	0.024	
		9 months		
Gala Brookfield	12.7 ± 0.1	12.0 ± 0.2	12.2 ± 0.1	0.023
Šampion	11.9 ± 0.1	11.5 ± 0.2	11.5 ± 0.2	0.105
Ligol	13.0 ± 0.2	11.1 ± 0.6	11.7 ± 0.4	0.011
clone JB	-	-	-	
Chopin	12.6 ± 0.2	12.4 ± 0.4	11.9 ± 0.2	0.083
Idared	11.6 ± 0.2	11.8 ± 0.3	11.7 ± 0.3	0.872
p-value	<0.01	0.052	0.146	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

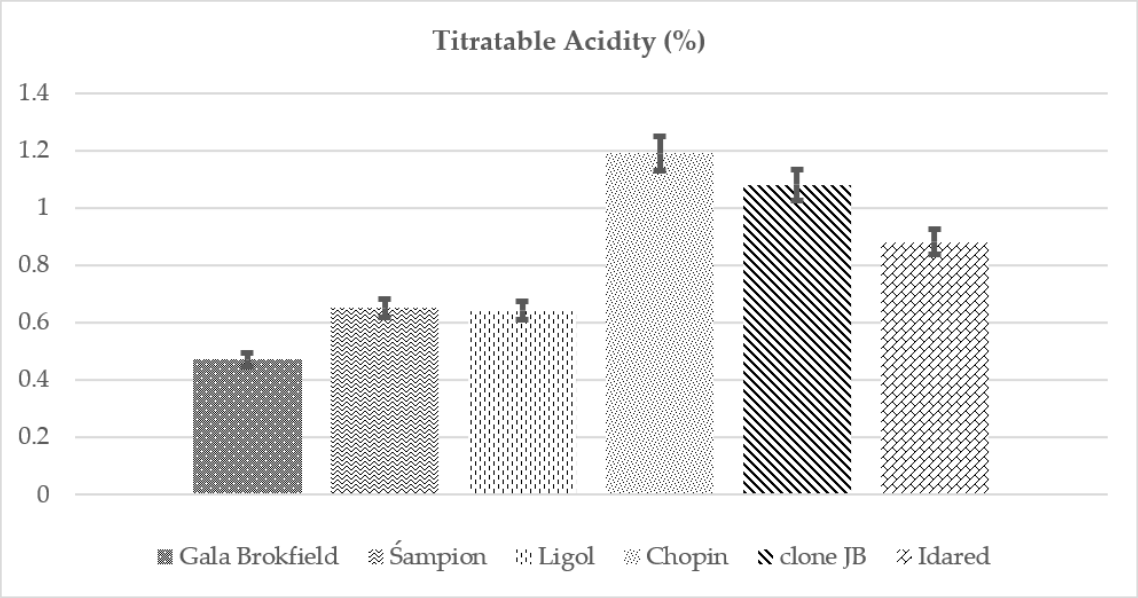


Figure 6. The values of titratable acidity (%) for apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviations.

Table 3. The values of titratable acidity (%) for apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	0.38 ± 0.02	0.38 ± 0.01	0.42 ± 0.01	0.013
Šampion	0.50 ± 0.01	0.54 ± 0.01	0.56 ± 0.02	0.008
Ligol	0.50 ± 0.01	0.53 ± 0.01	0.60 ± 0.02	<0.01
clone JB	1.03 ± 0.04	1.11 ± 0.03	1.15 ± 0.04	0.053
Chopin	0.71 ± 0.01	0.78 ± 0.01	0.81 ± 0.03	<0.01
Idared	0.68 ± 0.01	0.67 ± 0.02	0.69 ± 0.02	0.522
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	0.35 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.31 ± 0.01	<0.01
Šampion	0.44 ± 0.01	0.40 ± 0.02	0.44 ± 0.01	0.021
Ligol	0.46 ± 0.01	0.46 ± 0.01	0.50 ± 0.01	<0.01
clone JB	-	-	-	-
Chopin	0.64 ± 0.01	0.77 ± 0.01	0.71 ± 0.02	<0.01
Idared	0.67 ± 0.04	0.65 ± 0.01	0.63 ± 0.02	0.320
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	0.24 ± 0.01	0.25 ± 0.01	0.28 ± 0.01	<0.01
Šampion	0.28 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.35 ± 0.01	<0.01
Ligol	0.26 ± 0.01	0.29 ± 0.02	0.32 ± 0.01	<0.01
clone JB	-	-	-	-
Chopin	0.36 ± 0.01	0.39 ± 0.01	0.49 ± 0.01	<0.01
Idared	0.47 ± 0.01	0.47 ± 0.01	0.46 ± 0.01	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

Of the cultivars tested, lower postharvest fibre content was found in 'Gala Brookfield' and 'Idared'. Both cultivars were characterised by an almost 50% lower value of the index than in other cultivars, among which 'Ligol' and 'Chopin' should be singled out as cultivars

characterised by higher fibre content (Figure 7). Fibre content in fruit highly significantly depended on the cultivar as well as storage conditions. In general, most cultivars showed an increase in fibre content at successive analysis dates after storage (Table 4). On the first date of analysis after storage (after 3 months), the increase in the index value was insignificant in fruit stored in NA but much higher in fruit from DCA. The increase in fibre content with DCA technology, compared to postharvest values, was found especially in the 'Gala Brookfield' and 'Idared' cultivars. At subsequent analysis dates, after 6 and 9 months of storage, there was a further increase in fibre content, faster with DCA or ULO technology than NA. Unexpectedly, 'Gala Brookfield' and 'Idared', classified after harvest as low-fibre varieties, after 9 months of storage in DCA or ULO, were characterised by a higher index value than the other cultivars. 'Chopin', on the other hand, stood out in terms of fibre content among cultivars stored under NA conditions, throughout the end of the study.

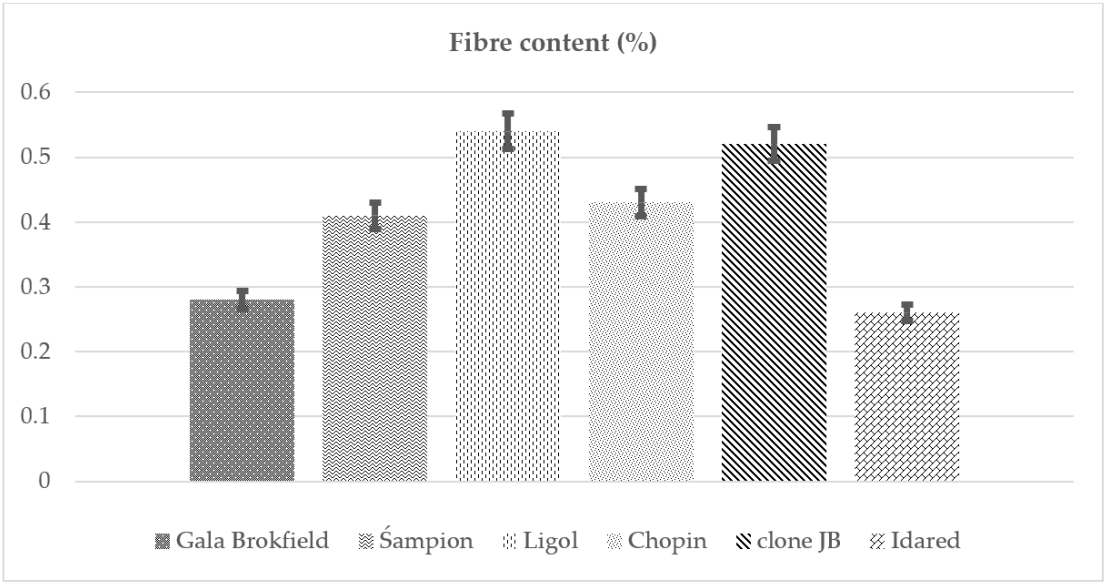


Figure 7. The values of dietary fibre (%) for apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

Varietal traits strongly influenced the content of total polyphenols in the flesh (Figure 8) and peel (Figure 9) of apples. A high TPC content was recorded in the flesh of clone 'JB', while a twofold lower TPC content was characteristic of 'Ligol' flesh. Even greater differences were found in apple peel. In this case, the value of TPC in the peel of clone 'JB' was more than four times higher than in the peel of 'Ligol'. High TPC content was also distinguished by 'Gala Brookfield' and 'Idared'. Analysis of the results indicates that a stronger determinant of TPC is the cultivar ($p < 0.01$) than the storage technology ($p > 0.01$ for most analyses) in both apple elements evaluated (Tables 5 and 6). After 3 months of storage, an increase in TPC values versus postharvest values was found in both apple flesh and peel in almost all varieties. In contrast, a decrease in TPC was observed at subsequent analysis dates in relation to the earlier analysis date. On the first post-storage analysis date, 'Gala Brookfield' and 'Idared', as well as clone 'JB', were characterised by higher flesh and peel TPC contents than the other cultivars. The cultivar with the lowest TPC content was 'Ligol'. Analyses at subsequent storage dates confirmed the previously noted relationship. The dynamics of change in TPC content were conditioned by the technology in which the fruit was stored. After 3 months of storage in NA, a higher TPC value was found in apples stored in NA than in ULO or DCA (with the exception of clone JB). In contrast, on subsequent analysis dates (after 6 and 9 months), a higher TPC was found in apples after storage in DCA than in NA.

Table 4. The values of dietary fibre (%) for apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	0.32 ± 0.01	0.49 ± 0.01	0.64 ± 0.01	<0.01
Šampion	0.46 ± 0.02	0.57 ± 0.01	0.66 ± 0.02	<0.01
Ligol	0.62 ± 0.01	0.71 ± 0.05	0.78 ± 0.01	<0.01
clone JB	0.53 ± 0.02	0.78 ± 0.02	1.07 ± 0.05	<0.01
Chopin	0.69 ± 0.02	0.73 ± 0.01	0.82 ± 0.02	<0.01
Idared	0.29 ± 0.01	0.56 ± 0.02	0.63 ± 0.01	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	0.57 ± 0.05	0.92 ± 0.02	1.33 ± 0.05	<0.01
Šampion	0.53 ± 0.05	0.62 ± 0.02	1.13 ± 0.05	<0.01
Ligol	0.73 ± 0.05	0.84 ± 0.01	0.97 ± 0.05	<0.01
clone JB	-	-	-	-
Chopin	1.07 ± 0.05	1.08 ± 0.05	1.13 ± 0.02	<0.01
Idared	0.53 ± 0.05	1.30 ± 0.04	2.07 ± 0.05	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	0.83 ± 0.05	1.13 ± 0.05	1.63 ± 0.05	<0.01
Šampion	0.57 ± 0.05	0.70 ± 0.01	1.20 ± 0.01	<0.01
Ligol	0.77 ± 0.05	0.96 ± 0.01	1.23 ± 0.05	<0.01
clone JB	-	-	-	-
Chopin	1.10 ± 0.05	1.33 ± 0.01	1.27 ± 0.09	<0.01
Idared	0.77 ± 0.05	1.57 ± 0.05	2.42 ± 0.02	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

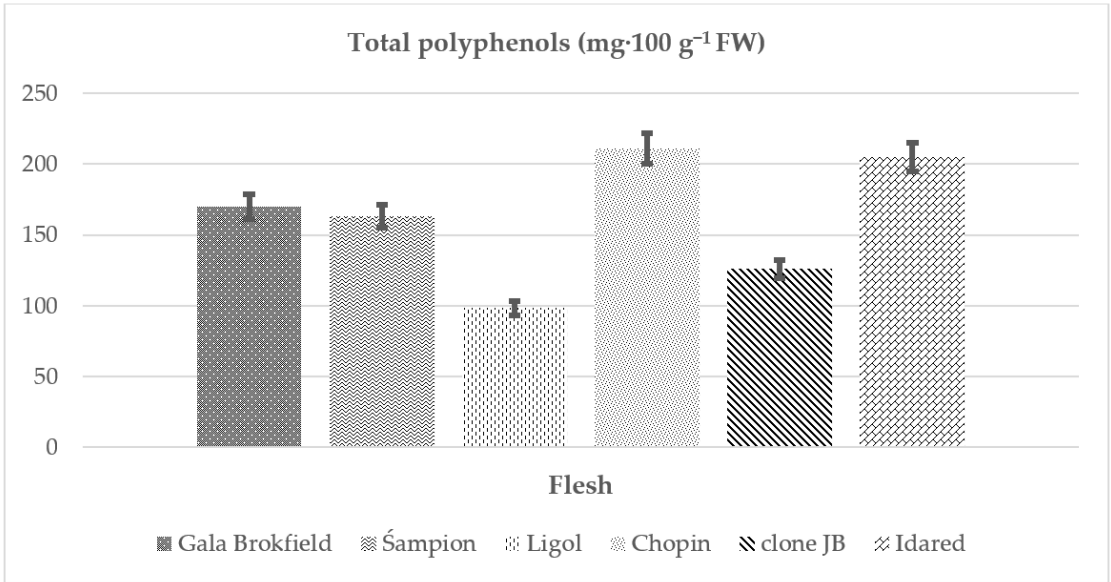


Figure 8. The values of total polyphenols content (mg·100 g^{-1} FW) for the flesh of apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

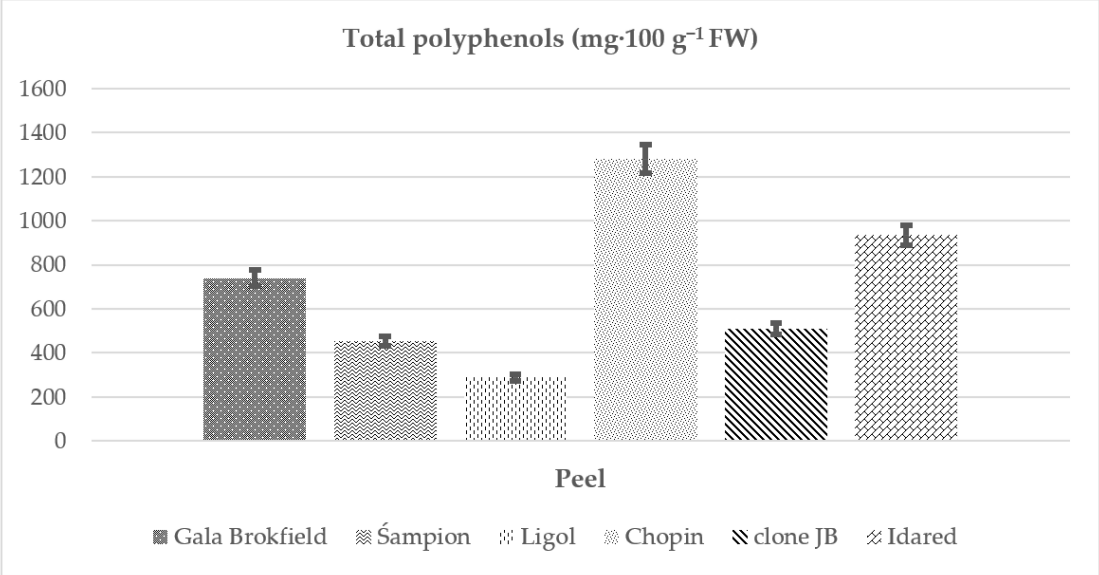


Figure 9. The values of total polyphenols content (mg·100 g^{-1} FW) for the peel of apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 5. The values of total polyphenols content (mg·100 g^{-1} FW) for the flesh of apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	207 ± 3	200 ± 1	198 ± 1	0.027
Šampion	181 ± 4	171 ± 2	168 ± 4	0.019
Ligol	121 ± 2	110 ± 2	109 ± 3	0.010
clone JB	147 ± 11	172 ± 8	180 ± 13	0.041
Chopin	139 ± 3	133 ± 3	130 ± 3	0.049
Idared	227 ± 8	213 ± 4	209 ± 5	0.023
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	169 ± 13	186 ± 9	195 ± 7	0.040
Šampion	143 ± 5	153 ± 7	160 ± 8	0.013
Ligol	99 ± 5	106 ± 4	107 ± 5	0.037
clone JB	-	-	-	-
Chopin	114 ± 7	128 ± 6	127 ± 3	0.021
Idared	192 ± 6	204 ± 3	200 ± 7	0.034
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	154 ± 8	171 ± 6	169 ± 4	<0.01
Šampion	136 ± 2	144 ± 4	144 ± 3	0.038
Ligol	87 ± 6	99 ± 5	97 ± 7	0.047
clone JB	-	-	-	-
Chopin	104 ± 3	117 ± 4	127 ± 8	0.028
Idared	183 ± 9	197 ± 3	202 ± 1	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

Table 6. The values of total polyphenols content (mg·100 g^{-1} FW) for the peel of apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	821 ± 25	774 ± 31	765 ± 17	0.033
Šampion	484 ± 7	461 ± 9	454 ± 16	0.049
Ligol	357 ± 24	316 ± 15	317 ± 12	<0.01
clone JB	1154 ± 18	1167 ± 22	1205 ± 19	0.035
Chopin	578 ± 11	542 ± 10	517 ± 12	<0.01
Idared	1085 ± 37	1020 ± 21	973 ± 19	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	775 ± 18	732 ± 10	739 ± 26	0.012
Šampion	407 ± 12	431 ± 8	449 ± 13	0.014
Ligol	275 ± 9	310 ± 13	308 ± 18	<0.01
clone JB	-	-	-	-
Chopin	478 ± 11	503 ± 12	519 ± 8	0.031
Idared	924 ± 32	991 ± 28	1010 ± 34	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	630 ± 24	711 ± 27	718 ± 16	<0.01
Šampion	358 ± 23	417 ± 18	435 ± 28	0.029
Ligol	259 ± 12	294 ± 19	291 ± 14	<0.01
clone JB	-	-	-	-
Chopin	418 ± 18	463 ± 9	484 ± 6	<0.01
Idared	776 ± 21	842 ± 27	870 ± 17	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

Total flavonoid content, like TPC, highly significantly depended on the characteristics of the cultivar studied. Again, clone 'JB' was distinguished from other cultivars by high TFC in the flesh (Figure 10) and peel (Figure 11) of apples after harvest. 'Gala Brookfield' and 'Idared' were also characterised by high TFC values in both apple elements, and the flesh of 'Šampion' contained higher TFC values than 'Ligol' and 'Chopin' immediately after fruit harvest. The differences in TFC content between varieties found after fruit harvest were observed at further stages of the study after storage. TFC values for apple flesh and peel did not change significantly between analysis dates, after storage in NA (Tables 7 and 8). A fluctuation of TFC content in apples stored in ULO or DCA was noted, but the changes referred to few cases and varieties. Higher TFC in the apple flesh after storage in DCA and ULO was registered in the 'Chopin' cultivar. TFC changes in apple peel were inconclusive. 'Gala Brookfield' and 'Ligol' peel showed a decrease in TFC after storage in ULO, while 'Šampion' peel registered an increase in TFC after storage in ULO.

Antioxidant capacity is determined by the content of TPC and TFC. The clone 'JB', which stood out in terms of the aforementioned indices, was characterised by the highest antioxidant capacity both in the flesh (Figure 12) and in the peel (Figure 13) of the apples. Among the other cultivars, only 'Ligol' was characterised by low antioxidant capacity, especially in the flesh (65% lower than clone 'JB'). As in the previously discussed studies, it was shown that the varietal factor is highly significant in determining antioxidant capacity, but storage conditions modify its values. After 3 months of storage, an increase in antioxidant capacity was found in the flesh of the cultivars studied (with the exception of clone 'JB'). The process of antioxidant capacity growth was faster in apples stored in NA than in ULO or DCA. (Tables 9 and 10) The growth of antioxidant capacity in the fruit peel after

storage for 3 months was found only in 'Ligol' apples. Extending the storage period to 6 and 9 months resulted in a decrease in the antioxidant capacity between the analysis dates in both the flesh and peel of apples. Among the cultivars, 'Gala Brookfield', clone 'JB' (only after 3 months), 'Chopin', and 'Idared' were distinguished by higher antioxidant capacity in apple flesh and peel. The recorded process of antioxidant capacity loss between 3 and 9 months of storage progressed more slowly if apples were stored in ULO or DCA than NA. The dynamics of this process were faster for the antioxidant capacity of the flesh than for that of the peel.

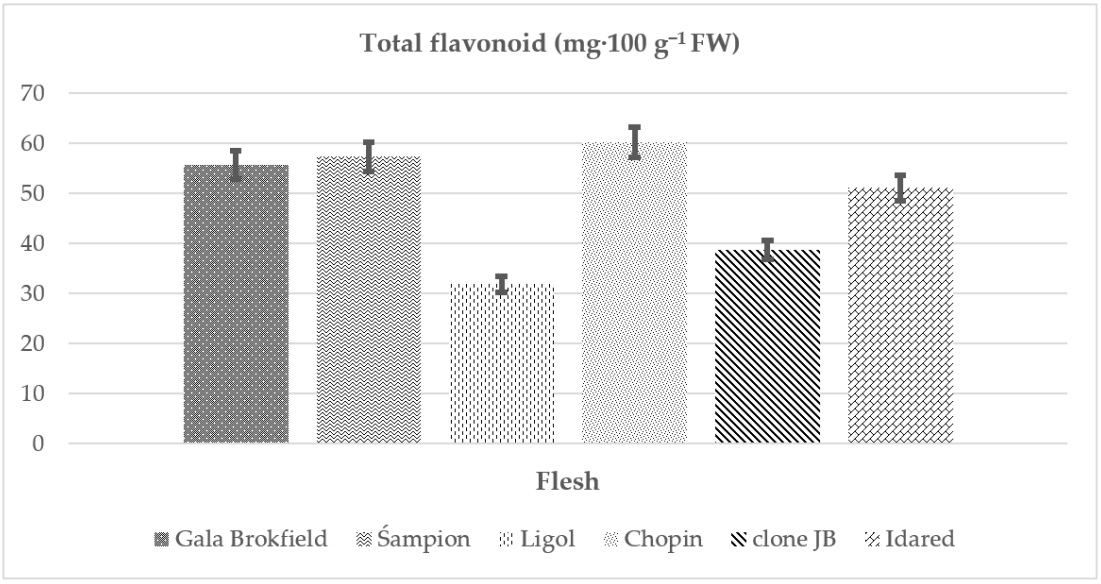


Figure 10. The values of total flavonoids (mg·100 g^{-1} FW) for the flesh of apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

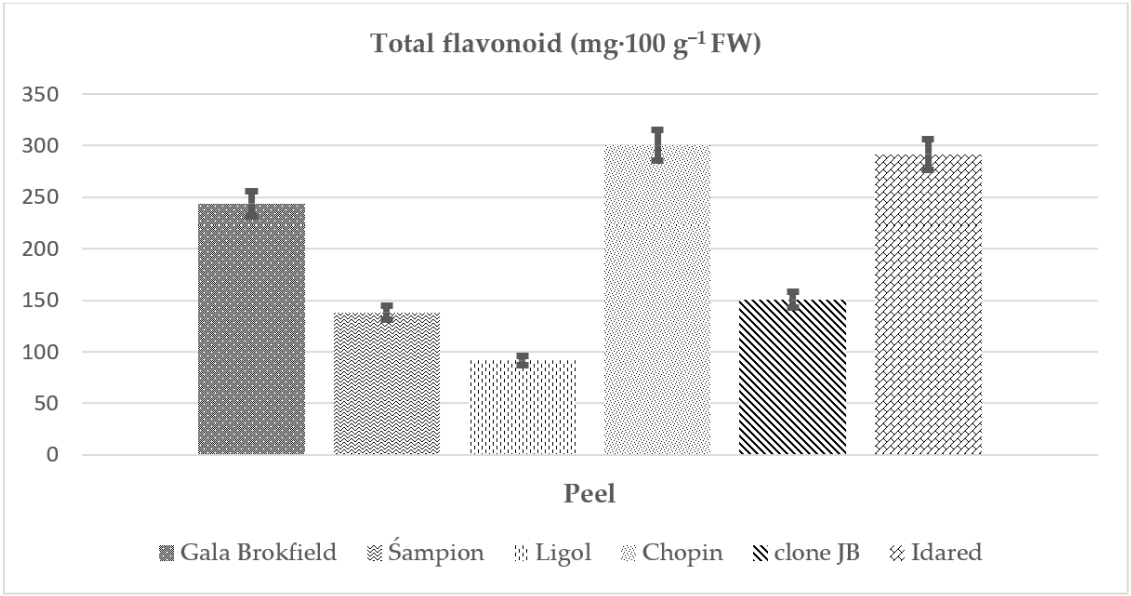


Figure 11. The values of total flavonoids (mg·100 g^{-1} FW) for the peel of apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 7. The values of total flavonoids (mg·100 g^{-1} FW) for the flesh of apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	57.63 ± 1.25	58.00 ± 1.28	59.43 ± 1.97	0.506
Šampion	58.00 ± 0.22	55.90 ± 1.06	57.50 ± 0.80	0.079
Ligol	34.37 ± 1.94	33.53 ± 0.91	30.53 ± 0.87	0.062
clone JB	63.43 ± 0.96	65.20 ± 2.29	67.37 ± 1.40	0.133
Chopin	37.13 ± 1.72	48.17 ± 2.19	47.00 ± 1.48	<0.01
Idared	53.77 ± 1.09	53.97 ± 1.03	54.17 ± 1.72	0.955
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	57.47 ± 1.35	59.81 ± 2.47	60.70 ± 1.19	0.244
Šampion	56.30 ± 2.13	55.99 ± 2.00	56.43 ± 1.57	0.972
Ligol	36.20 ± 2.79	37.64 ± 2.27	28.96 ± 2.15	0.024
clone JB	-	-	-	-
Chopin	36.64 ± 1.80	42.83 ± 2.02	50.20 ± 1.59	<0.01
Idared	55.17 ± 1.39	54.23 ± 1.69	52.42 ± 1.89	0.729
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	58.60 ± 2.30	60.27 ± 1.96	60.93 ± 1.40	0.499
Šampion	59.17 ± 1.47	57.79 ± 1.12	59.92 ± 4.86	0.780
Ligol	34.17 ± 1.11	37.20 ± 1.63	32.47 ± 1.02	0.027
clone JB	-	-	-	-
Chopin	41.20 ± 0.90	51.72 ± 4.37	49.03 ± 2.01	0.023
Idared	55.67 ± 1.89	54.60 ± 0.51	56.04 ± 1.08	0.547
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

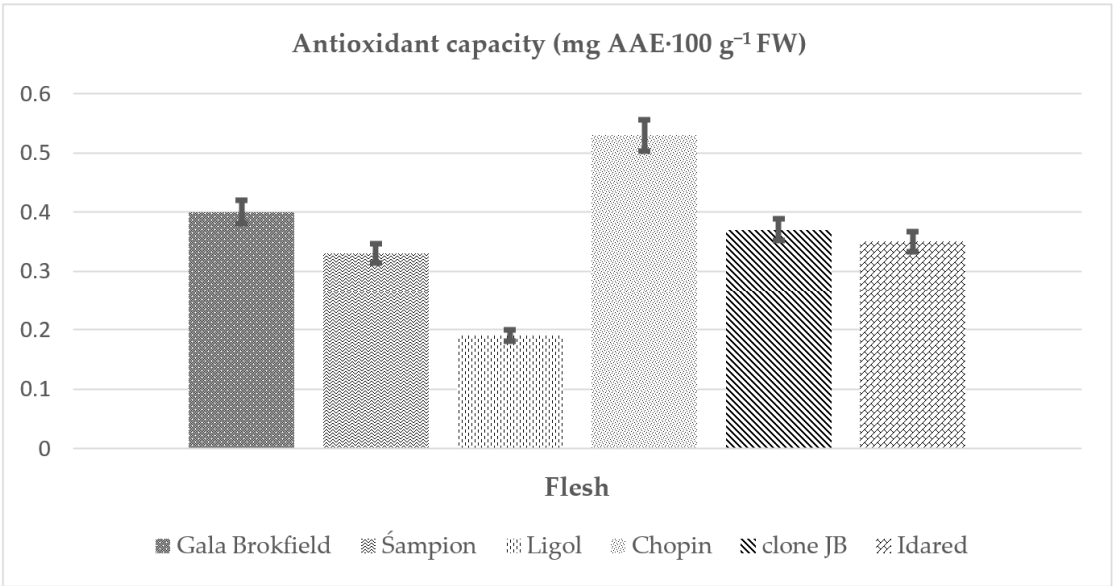


Figure 12. The values of antioxidant capacity (mg AAE·100 g^{-1} FW) for the flesh of apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 8. The values of total flavonoids (mg·100 g^{-1} FW) for the peel of apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	250.1 ± 3.4	239.2 ± 1.8	257.1 ± 3.6	<0.01
Šampion	144.4 ± 5.1	152.4 ± 3.7	151.1 ± 3.7	0.208
Ligol	99.5 ± 3.3	99.7 ± 2.1	102.7 ± 5.0	0.643
clone JB	315.3 ± 10.8	311.1 ± 11.6	316.8 ± 7.9	0.852
Chopin	164.2 ± 1.8	173.2 ± 3.8	166.2 ± 2.7	0.047
Idared	292.6 ± 3.5	300.5 ± 1.4	303.8 ± 3.2	0.018
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	254.4 ± 2.1	230.4 ± 9.7	255.3 ± 5.7	0.015
Šampion	146.7 ± 1.4	196.5 ± 5.1	142.8 ± 11.6	<0.01
Ligol	107.7 ± 4.0	96.5 ± 3.6	103.8 ± 1.7	0.034
clone JB	-	-	-	-
Chopin	162.4 ± 4.3	163.3 ± 13.7	120.9 ± 5.0	<0.01
Idared	286.3 ± 15.4	304.1 ± 1.8	285.4 ± 15.8	0.326
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	256.0 ± 4.9	242.1 ± 3.5	260.8 ± 6.6	0.026
Šampion	147.0 ± 1.0	171.3 ± 11.2	153.4 ± 3.6	0.028
Ligol	102.9 ± 3.8	98.7 ± 2.3	103.9 ± 4.2	0.355
clone JB	-	-	-	-
Chopin	163.7 ± 3.6	173.2 ± 4.8	168.7 ± 1.2	0.094
Idared	295.1 ± 11.4	299.4 ± 19.1	311.8 ± 13.2	0.546
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

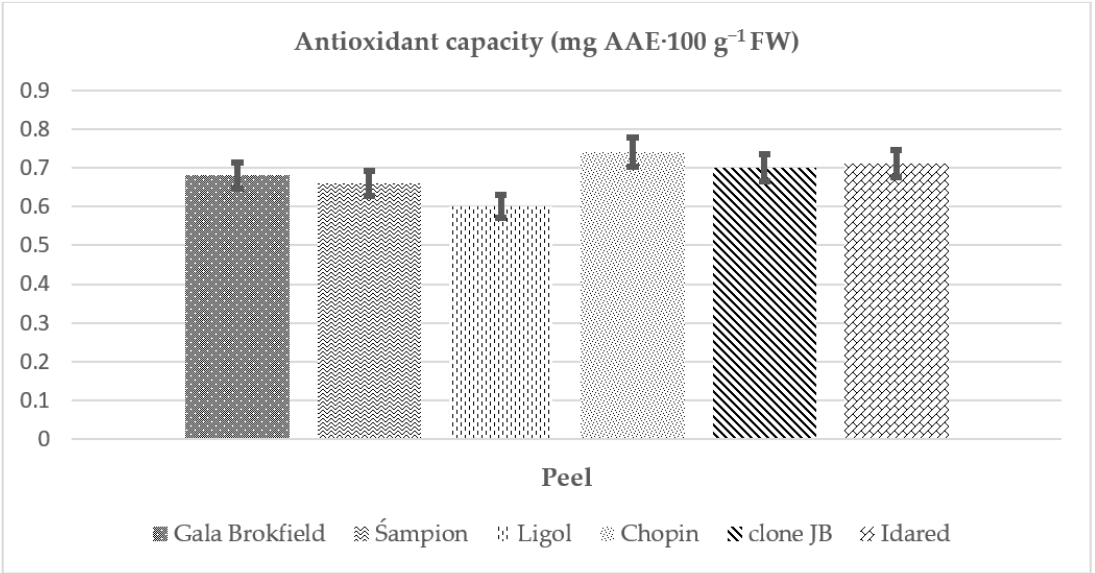


Figure 13. The values of antioxidant capacity (mg AAE·100 g^{-1} FW) for the peel of apples depending on cultivars after harvesting. Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 9. The values of antioxidant capacity (mg AAE·100 g^{-1} FW) for the flesh of apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	0.495 ± 0.007	0.457 ± 0.004	0.441 ± 0.003	<0.01
Šampion	0.369 ± 0.004	0.355 ± 0.007	0.342 ± 0.004	<0.01
Ligol	0.241 ± 0.006	0.230 ± 0.006	0.222 ± 0.005	0.029
clone JB	0.438 ± 0.014	0.476 ± 0.015	0.487 ± 0.009	0.039
Chopin	0.494 ± 0.011	0.461 ± 0.016	0.447 ± 0.007	0.011
Idared	0.492 ± 0.008	0.428 ± 0.009	0.417 ± 0.010	<0.01
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	0.418 ± 0.006	0.404 ± 0.003	0.395 ± 0.004	0.022
Šampion	0.289 ± 0.003	0.309 ± 0.001	0.319 ± 0.004	<0.01
Ligol	0.193 ± 0.004	0.204 ± 0.005	0.212 ± 0.002	0.016
clone JB	-	-	-	-
Chopin	0.393 ± 0.009	0.404 ± 0.006	0.425 ± 0.004	0.033
Idared	0.369 ± 0.008	0.389 ± 0.009	0.396 ± 0.005	0.048
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	0.306 ± 0.005	0.333 ± 0.003	0.344 ± 0.006	<0.01
Šampion	0.232 ± 0.002	0.262 ± 0.003	0.269 ± 0.003	<0.01
Ligol	0.164 ± 0.004	0.175 ± 0.003	0.179 ± 0.004	0.018
clone JB	-	-	-	-
Chopin	0.321 ± 0.007	0.335 ± 0.008	0.346 ± 0.008	0.043
Idared	0.320 ± 0.009	0.332 ± 0.002	0.346 ± 0.005	0.045
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

The analysis of the results showed no significant effect of the cultivar characteristics of the evaluated cultivars on the content of macronutrients in apples (Table 11). Only the calcium content was significantly higher in 'Gala Brookfield' and 'Idared' apples than in the other cultivars. Higher, but not statistically shown, phosphorus content was characterised by the cultivar 'Chopin' and clone 'JB', potassium by 'Chopin' and 'Šampion', and magnesium content in all cultivars was at a similar level. Among the analysed micronutrients, significantly higher iron content was found in 'Idared' apples and zinc content in 'Gala Brookfield' and 'Idared' apples (Table 12).

Eight chemical compounds, residues of synthetic pesticides, were found in the fruit of the evaluated cultivars. It should be noted that none of the identified compounds were found in 'Chopin' apples, while only Kaptan was found in slim quantities in clone 'JB'. None of the identified compounds exceeded the permitted EU standards. The highest number of pesticide residues was identified in 'Šampion' (five compounds) and in 'Gala Brookfield' and 'Ligol', with three chemical compounds each (Table 13).

Table 10. The values of antioxidant capacity (mg AAE·100 g^{-1} FW) for the peel of apples depending on cultivars and storage technology.

Cultivars	NA	ULO	DCA	*p*-Value
		3 months		
Gala Brookfield	0.708 ± 0.007	0.692 ± 0.003	0.689 ± 0.005	0.047
Šampion	0.657 ± 0.005	0.653 ± 0.004	0.640 ± 0.005	0.022
Ligol	0.660 ± 0.011	0.643 ± 0.010	0.635 ± 0.010	0.126
clone JB	0.695 ± 0.004	0.717 ± 0.004	0.724 ± 0.002	<0.01
Chopin	0.714 ± 0.004	0.708 ± 0.001	0.706 ± 0.003	0.155
Idared	0.736 ± 0.010	0.728 ± 0.008	0.726 ± 0.010	0.602
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		6 months		
Gala Brookfield	0.616 ± 0.007	0.636 ± 0.006	0.643 ± 0.009	0.015
Šampion	0.580 ± 0.004	0.613 ± 0.006	0.620 ± 0.003	<0.01
Ligol	0.560 ± 0.009	0.581 ± 0.006	0.590 ± 0.010	0.046
clone JB	-	-	-	-
Chopin	0.646 ± 0.003	0.671 ± 0.004	0.674 ± 0.003	<0.01
Idared	0.669 ± 0.009	0.690 ± 0.010	0.701 ± 0.011	0.036
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	
		9 months		
Gala Brookfield	0.561 ± 0.012	0.602 ± 0.009	0.609 ± 0.014	<0.01
Šampion	0.521 ± 0.017	0.567 ± 0.012	0.580 ± 0.009	<0.01
Ligol	0.530 ± 0.009	0.554 ± 0.009	0.560 ± 0.010	0.033
clone JB	-	-	-	-
Chopin	0.626 ± 0.004	0.653 ± 0.009	0.660 ± 0.010	<0.01
Idared	0.648 ± 0.009	0.683 ± 0.004	0.676 ± 0.007	0.017
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	

Data are presented as mean ± standard deviation; NA—ordinary cold storage; ULO—Ultra-Low Oxygen; DCA—Dynamic Controlled Atmosphere.

Table 11. The values of macroelements (mg·kg^{-1} FW) for apples depending on cultivars after harvesting.

	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	Clone JB	Chopin	Idared	*p*-Value
			Macroelements				
Phosphorus	68.7 ± 15.1	81.2 ± 17.9	77.8 ± 17.1	98.6 ± 21.7	107 ± 23	84.6 ± 18.6	0.225
Potassium	854 ± 179	1035 ± 217	909 ± 191	911 ± 191	1297 ± 272	921 ± 193	0.185
Calcium	55.1 ± 13.2	30.0 ± 7.2	25.1 ± 6.0	36.8 ± 8.8	29.2 ± 7.0	43.8 ± 10.5	0.015
Magnesium	43.0 ± 7.7	45.7 ± 8.2	44.7 ± 8.0	43.7 ± 7.9	40.4 ± 7.3	46.6 ± 8.4	0.941

Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 12. The values of microelements (mg·kg^{-1} FW) for apples depending on cultivars after harvesting.

	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	Clone JB	Chopin	Idared	*p*-Value
			Microelements				
Iron	0.95 ± 0.22	0.90 ± 0.21	1.07 ± 0.25	1.11 ± 0.25	1.31 ± 0.30	2.13 ± 0.49	<0.01
Copper	0.31 ± 0.06	0.34 ± 0.02	0.39 ± 0.08	0.41 ± 0.08	0.35 ± 0.07	0.28 ± 0.06	<0.01
Zinc	0.43 ± 0.10	0.21 ± 0.05	0.28 ± 0.06	0.24 ± 0.05	0.22 ± 0.05	0.33 ± 0.07	<0.01

Data are presented as mean ± standard deviation.

Table 13. Pesticide residues in apples depending on cultivars after harvesting.

	Gala Brookfield	Šampion	Ligol	Clone JB	Chopin	Idared	Limit
Kaptan	0.011 ± 0.006	0.011 ± 0.006	0.010 ± 0.005	0.013 ± 0.007		0.47 ± 0.24	≤10.0
Tebuconazole	0.046 ± 0.023	0.028 ± 0.014	0.015 ± 0.008				≤0.3
Fluopyram	0.051 ± 0.026	0.028 ± 0.014	0.018 ± 0.009				≤0.8
Fludioxonil		0.019 ± 0.010					≤5.0
Cyprodinil		0.037 ± 0.019					≤2.0
Boscalid						0.14 ± 0.07	≤2.0
Flonicamid						0.059 ± 0.030	≤0.3
Pyraclostrobin						0.091 ± 0.046	≤0.5

Data are presented as mean ± standard deviation.

4. Discussion

The production of apples in terms of commodity weight tops the list of fruit species grown in Poland [47,48]. According to information from the U.S. Department of Agriculture (USDA) [49], world apple production was about 80 million tons in 2022, of which about 12 million tons of apples were produced in the EU. Poland's share of EU production was more than 30% (about 4 million tons), which puts Poland in the 4th–5th position on the list of world apple producers. In the commodity orchards of the European Union, the most common varieties are 'Golden Delicious', 'Idared', and mutations of 'Jonagold' or 'Gala' [48]. In Poland, 74 apple tree cultivars are registered with COBORU (Research Center for Cultivar Testing), of which the orchards are dominated by 'Gala' (17.9% of production), 'Red Jonaprince' (15.3%), 'Golden Delicious' (15.2%), 'Idared' (11.2%), and 'Šampion' (9.6%). A similar selection of cultivars in Poland and the EU increases competitiveness, which translates into the search for new apple cultivars that are attractive in terms of cultivation but also in terms of nutritional value [50–52].

'Chopin' is a Polish apple cultivar, selected by Prof. Emilian Pitera (WULS- SGGW in Warsaw). It was created from a cross between the 'Granny Smith' cultivar and U 211 (scab-resistant clone). The apples are distinguished by the green base colour of the peel among other cultivars and the lack of blush (like 'Golden Delicious'). The 'Chopin' cultivar is scab-resistant, characterised by high acidity, good storage ability in NA, and according to consumers, low allergenicity. It is listed in COBORU and has been protected by law (PBR) since 2016. Clone 'JB' was bred by Prof. A. Przybyla (WULS- SGGW in Warsaw), currently under registration. Like 'Chopin', it is a scab-resistant cultivar. It is characterised by the formation of anthocyanins in the flesh, which places it in the group of apples with red flesh. The red pigmentation is present throughout the fruit's development. The vegetative tissues and flowers of these cultivars are also intensely coloured.

The study evaluated new apple cultivars of the WULS-SGGW selection with reference to commonly grown cultivars in the EU. A key element of the research was to define the impact of different storage technologies on the storage quality and nutritional value of the tested cultivars. The storability of fruit is a strategic element of distribution that enables the supply of apples beyond their ripening period on the tree. The results of the study unfortunately showed low storability of clone 'JB'. After 6 months of storage, advanced signs of rot were found in the fruit, which disqualified it for further testing. In addition to varietal characteristics, the reason for such intensive fruit rot in cold storage could have been the lack of applied protection during the growing season, caused by the 'JB' clone's resistance to apple scab—the main disease occurring during the growing season. However, it should be noted that the second scab-resistant cultivar 'Chopin' was characterised by high storage capacity, as were the other cultivars. The use of technologically advanced storage conditions, i.e., ULO and DCA, promoted the better preservation of fruit quality.

In general, fruit stored in ULO or DCA cold storage was characterised by higher firmness than after storage in NA, and the favourable effect was stronger with an increasing storage period. It should be noted that only under DCA conditions, after 9 months of

storage, were most cultivars characterised by acceptable firmness (above 45 N), including the cultivar 'Chopin'. DCA conditions proved to be exceptionally effective in maintaining high firmness for the cultivar 'Ligol'. The decrease in firmness after 9 months of storage in DCA was only 10.9% in relation to postharvest values. The success of the use of DCA technology in inhibiting the loss of firmness by different fruit cultivars was reported by Mditshwa et al. [53], Thewes et al. [21], and Krupa et al. [54]. Stabilisation of ripening processes at a low level in the ULO and DCA technologies promoted lower soluble solids content and higher acidity in apples. The values of both indicators changed slightly during apple storage in DCA. The low oxygen concentration in DCA effectively inhibited the respiration process, in which simple sugars as well as organic acids are consumed, as confirmed by the results of our own study. Nevertheless, many authors point out that varietal characteristics are mainly responsible for the accumulation of sugars and acids [55,56]. Prominent in terms of high acidity were the 'Chopin' cultivar and the 'JB' clone. Despite the sour taste, apples deacidify the body, because they have a lot of alkaline potassium (regulates water balance) and iron (prevents anaemia). Fibre content was very low in the apples evaluated immediately after harvest. A significant increase in the fibre content of the fruit was observed during storage. An exceptionally large increase was observed after storing apples in ULO and DCA advanced technologies, and in 'Idared' apples after 9 months of storage in DCA, the increase in the value of the index was fourfold. Under NA conditions, an increase in fibre content was observed only after 6 and 9 months of storage. In the literature, we find information indicating the effect of the storage period on fibre content. These fractions include arabinoxylan, inulin, pectin, cellulose, β-glucan, and resistant starch [35,37]. Marlet [36] indicates that storage had no effect on the total or insoluble fibre content of apples but that Klason lignin concentrations were higher in samples stored for 12 months than in those stored for 4 or 8 months. The increase in certain dietary fibre fractions is related to the softening of the apples or to ripening processes causing, for example, softening or an increase in sugars [38]. Differences in the fibre content of stored apples are often due to obtaining data by different analytical methods and also as a result of the analysis of different apple varieties [37,38]. Some of these procedures do not completely remove the simple sugars from the residual fibre. In our study, the observed increase in dietary fibre content in fresh fruit (without conversion to dry matter) may be related to the factors mentioned above. There is a lack of information in the literature on the effect of advanced storage technologies on this fruit quality indicator. From the point of view of the value of fruit consumers, the content of antioxidants from the group of polyphenols is an important criterion for the health-promoting nature of food. In many publications, the authors point out the differences in the content of the compounds between the peel and the pulp in favour of the former [52,57,58]. The antioxidant content of apples is determined by many factors, from the varietal factor [14,59] or the degree of ripeness [30]. In our own experiment, the apple peel was characterised by up to four times higher TPC content than apple flesh. The study showed a significant effect of an atmosphere with reduced oxygen content on slowing down the processes leading to the loss of these important compounds. During the first period of storage, up to 3 months, an increase in TPC values was found in comparison with postharvest values, with the increase being higher in NA than in DCA, which resulted in fruits stored in NA having a higher TPC content. Longer storage resulted in lower TPC content, and again this process occurred more strongly in NA than in DCA or ULO. The effect of these changes was a higher TPC content in fruit stored in DCA than in NA or ULO, after 9 months of storage. The results of the study confirm reports by MacLean et al. [60], suggesting that the rate of apple ripening, which is influenced by storage conditions, is responsible for changes in TPC content during storage. Reducing the rate of respiration and ethylene production in a very low-oxygen atmosphere promotes the preservation of valuable components for the consumer [21,27,54]. This is also confirmed by studies on the compound 1-MCP, in which fruit treated with this 'ripening inhibitor' showed higher contents of biologically active compounds after storage than untreated fruit [26,31,61].

In addition, the higher firmness of fruit stored in DCA maintains the semi-permeability of cell walls, making it more difficult to degrade compounds contained in the cells. The varietal factor is a strong determinant of fruit nutritional value. In our study, clone 'JB' stood out in terms of TPC and TFC content, as well as antioxidant capacity. In general, it can be said that antioxidant capacity was determined by the content of TPC and TFC, and the effect of storage conditions on antioxidant capacity was analogous to both groups of compounds. After 3 months of storage, the growth of antioxidant capacity of the tested varieties was faster in apples stored in NA than in ULO or DCA. In contrast, at subsequent analysis dates, the recorded antioxidant capacity loss between 3 and 9 months of storage progressed more slowly if apples were stored in ULO or DCA than in NA.

In the literature, we find a multidirectional description of antioxidant capacity changes during storage. A study by Hoang et al. [61] showed a decrease in the antioxidant capacity of apples. On the other hand, Lu et al. [62] and Yurong et al. [30] found increased antioxidant capacity in apple peel after storage, while Kolniak-Ostek et al. [26] showed no change in the value of the index for apples during storage. Such different results of the work are probably due to the high variability of varietal characteristics, fruit maturity, or the conditions under which the observations were carried out. Continuing them is necessary to develop appropriate apple storage parameters for the ever-emerging new cultivars.

5. Conclusions

The experiment demonstrated the inhibition of apple ripening in low-oxygen storage technology, which had a beneficial effect on their physicochemical properties and the stabilisation of polyphenol and flavonoid levels. The results indicate that the varietal factor is a stronger determinant of apple quality traits than the storage technology. 'Ligol' and 'Idared' apples were characterised by high firmness even after 9 months of cold storage, while 'Šampion' apples were characterised by drastically low firmness already after 6 months. The use of DCA technology enables the long-term storage of 'Ligol', 'Chopin', 'Gala Brookfield', and 'Idared' apples, which are still characterised by acceptable firmness (above 45 N) and high acidity. Limiting the rate of ripening of the apples in an atmosphere with very low oxygen content also favours the retention of valuable components for the consumer, i.e., polyphenols and flavonoids at a high level. The 'JB' clone excels in terms of TPC and TFC content and antioxidant capacity, but it is characterised by very low storability. Among the cultivars, 'Chopin', 'Idared', and 'Gala Brookfield' are characterised by a higher content of biologically active compounds than 'Ligol' or 'Šampion'. The low oxygen content of the DCA technology contributes to slowing down the loss of polyphenols and, in the case of flavonols, no reduction in their content was noted even after 9 months of storage in all varieties. The above-average acidity and high content of polyphenols and flavonoids probably predisposes 'JB' apples as a valuable raw material for processing.

Author Contributions: Conceptualisation, A.K. and D.W.; methodology, A.K. and T.K.; software, A.K.; validation, A.K., D.W. and T.K.; formal analysis, A.K.; investigation, A.K.; data curation, A.K. and T.K.; writing—original draft preparation, A.K., D.W. and T.K.; writing—review and editing, A.K., D.W. and T.K.; visualisation, A.K.; supervision, D.W. and T.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was carried out within the framework of the NAWA Scholarship Program for the Polish Diaspora No. PPS/PDR/2018/1/00022/U/01 (doctoral studies).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: The authors would like to give thanks to A. Przybyla and E. Pitera for providing the fruits obtained in the SGGW breeding program for the research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Patocka, J.; Bhardwaj, K.; Klimova, B.; Nepovimova, E.; Wu, Q.; Landi, M.; Kuca, K.; Valis, M.; Wu, W. *Malus domestica*: A Review on Nutritional Features, Chemical Composition, Traditional and Medicinal Value. *Plants* **2020**, *9*, 1408. [CrossRef] [PubMed]
2. Spengler, R.N. Origins of the apple: The role of megafaunal mutualism in the domestication of Malus and rosaceous trees. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 617. [CrossRef] [PubMed]
3. Jacob, R.A.; Sotoudeh, G. Vitamin C Function and Status in Chronic Disease. *Nutr. Clin. Care* **2002**, *5*, 66–74. [CrossRef] [PubMed]
4. Campeanu, G.; Neata, G.; Darjanschi, G. Chemical Composition of the Fruits of Several Apple Cultivars Growth as Biological Crop. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca* **2009**, *37*, 161–164. [CrossRef]
5. Henríquez, C.; Speisky, H.; Chiffelle, I.; Valenzuela, T.; Araya, M.; Simpson, R.; Almonacid, S. Development of an Ingredient Containing Apple Peel, as a Source of Polyphenols and Dietary Fiber. *J. Food Sci.* **2010**, *75*, H172–H181. [CrossRef]
6. Koutsos, A.; Lima, M.; Conterno, L.; Gasperotti, M.; Bianchi, M.; Fava, F.; Vrhovsek, U.; Lovegrove, J.A.; Tuohy, K.M. Effects of Commercial Apple Varieties on Human Gut Microbiota Composition and Metabolic Output Using an In Vitro Colonic Model. *Nutrients* **2017**, *9*, 533. [CrossRef] [PubMed]
7. Biedrzycka, E.; Amarowicz, R. Diet and Health: Apple Polyphenols as Antioxidants. *Food Rev. Int.* **2008**, *24*, 235–251. [CrossRef]
8. Sethi, S.; Joshi, A.; Arora, B.; Bhowmik, A.; Sharma, R.R.; Kumar, P. Significance of FRAP, DPPH, and CUPRAC assays for antioxidant activity determination in apple fruit extracts. *Eur. Food Res. Technol.* **2020**, *246*, 591–598. [CrossRef]
9. Łysiak, G.P.; Szot, I. The Possibility of Using Fruit-Bearing Plants of Temperate Climate in the Treatment and Prevention of Diabetes. *Life* **2023**, *13*, 1795. [CrossRef]
10. Vuković Vimić, A.; Vujadinović Mandić, M.; Fotirić Akšić, M.; Vukićević, K.; Meland, M. Climate Potential for Apple Growing in Norway—Part 1: Zoning of Areas with Heat Conditions Favorable for Apple Growing under Observed Climate Change. *Atmosphere* **2023**, *14*, 993. [CrossRef]
11. Wang, X.; Ouyang, Y.Y.; Liu, J.; Zhu, M.M.; Zhao, G.; Bao, W.; Hu, F.B. Fruit and vegetable consumption and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer: Systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *BMJ* **2014**, *349*, g4490. [CrossRef] [PubMed]
12. Sacchetti, G.; Cocci, E.; Pinnavaia, G.; Mastrocola, D.; Rosa, M.D. Influence of Processing and Storage on the Antioxidant Activity of Apple Derivatives. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2008**, *43*, 797–804. [CrossRef]
13. Maragò, E.; Iacopini, P.; Camangi, F.; Scattino, C.; Ranieri, A.; Stefani, A.; Sebastiani, L. Phenolic Profile and Antioxidant Activity in Apple Juice and Pomace: Effects of Different Storage Conditions. *Fruits* **2015**, *70*, 213–215. [CrossRef]
14. Kistechok, A.; Wrona, D.; Krupa, T. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. *Agriculture* **2022**, *12*, 1876. [CrossRef]
15. Małachowska, M.; Tomala, K. Apple Quality during Shelf-Life after Long-Term Storage and Simulated Transport. *Agriculture* **2023**, *13*, 2045. [CrossRef]
16. Łysiak, G.P.; Rutkowski, K.; Walkowiak-Tomczak, D. Effect of Storage Conditions on Storability and Antioxidant Potential of Pears cv. 'Conference'. *Agriculture* **2021**, *11*, 545. [CrossRef]
17. Radenkovs, V.; Juhnevica-Radenkova, K. Comparison of three storage techniques for post-harvest quality preservation of six commercially available cultivars of apple. *Int. J. Fruit Sci.* **2018**, *18*, 268–286. [CrossRef]
18. Lafer, G. Storability and fruit quality of 'Braeburn' apples as affected by harvest date, 1-mcp treatment and different storage conditions. *Acta Hortic.* **2008**, *796*, 179–184. [CrossRef]
19. Koricanac, A.; Miletić, N.; Popović, B.; Mitrović, O.; Lukić, M.; Pešaković, M.; Tomić, J. The Effect of ULO and NA Storage on Changes in the Quality of Apple Fruit (*Malus domestica* Borkh.) during Shelf Life. *Agronomy* **2020**, *10*, 25. [CrossRef]
20. Gasser, F.; Arx, K. Dynamic CA storage of organic apple cultivars. *Acta Hortic.* **2015**, *1071*, 527–532. [CrossRef]
21. Thewes, F.R.; Both, V.; Brackmann, A.; Weber, A.; de Oliveira Anese, R. Dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen storage on 'Gala' mutants, quality maintenance. *Food Chem.* **2015**, *188*, 62–70. [CrossRef] [PubMed]
22. Weber, A.; Thewes, F.R.; Sellwig, M.; Brackmann, A.; Wünsche, J.N.; Kittemann, D.; Neuwald, D.A. Dynamic controlled atmosphere: Impact of elevated storage temperature on anaerobic metabolism and quality of 'Nicoter' apples. *Food Chem.* **2019**, *298*, 125017. [CrossRef] [PubMed]
23. Weber, A.; Thewes, F.R.; de Oliveira Anese, R.; Both, V.; Pavanello, E.P.; Brackmann, A. Dynamic controlled atmosphere (DCA): Interaction between DCA methods and 1-methylcyclopropene on 'Fuji Suprema' apple quality. *Food Chem.* **2017**, *235*, 136–144. [CrossRef] [PubMed]
24. Thewes, F.R.; Brackmann, A.; de Oliveira Anese, R.; Ludwig, V.; Schultz, E.E.; Dos Santos, L.F.; Wendt, L.M. Effect of dynamic controlled atmosphere monitored by respiratory quotient and 1-methylcyclopropene on the metabolism and quality of 'Galaxy' apple harvested at three maturity stages. *Food Chem.* **2017**, *222*, 84–93. [CrossRef] [PubMed]
25. Carbone, K.; Giannini, B.; Picchi, V.; Scalzo, R.L.; Cecchini, F. Phenolic composition and free radical scavenging activity of different apple varieties in relation on the cultivar, tissue type and storage. *Food Chem.* **2011**, *127*, 493–500. [CrossRef]
26. Kolniak-Ostek, J.; Wojdyło, A.; Markowski, J.; Siucińska, K. 1-Methylcyclopropene postharvest treatment and their effect on apple quality during long-term storage time. *Eur. Food Res. Technol.* **2014**, *239*, 603–612. [CrossRef]
27. Napolitano, A.; Cascone, A.; Graziani, G.; Ferracane, R.; Scalfi, L.; di Vaio, C.; Ritieni, A.; Fogliano, V. Influence of variety and storage on the polyphenol composition of apple flesh. *J. Agric. Food Chem.* **2004**, *52*, 6526–6531. [CrossRef]

28. Putnik, P.; Kovačević, D.B.; Herceg, K.; Pavkov, I.; Zorić, Z.; Levaj, B. Effects of modified atmosphere, anti-browning treat-ments and ultrasound on the polyphenolic stability, antioxidant capacity and microbial growth in fresh-cut apples. *J. Food Process Eng.* **2017**, *40*, e12539. [CrossRef]
29. Fawbush, F.; Nock, J.F.; Watkins, C.B. Antioxidant contents and activity of 1-methylcyclopropene (1-MCP)-treated Empire apples in air and controlled atmosphere storage. *Postharvest Biol. Technol.* **2009**, *52*, 30–37. [CrossRef]
30. Yurong, M.; Qingfeng, B.; Jingying, S.; Tiantian, D.; Cai-Zhong, J.; Qingguo, W. 1-Methylcyclopropene (1-MCP), storage time, and shelf life and temperature affect phenolic compounds and antioxidant activity of 'Jonagold' apple. *Postharvest Biol. Technol.* **2019**, *150*, 71–79. [CrossRef]
31. Krupa, T.; Zaraś-Januszkiewicz, E.; Kistechok, A. Influence of 1-Methylcyclopropene on the Antioxidants of 'Red Cap' Ap-ples during Transportation and Shelf Life. *Agronomy* **2021**, *11*, 341. [CrossRef]
32. Ghafir, S.A.M. Physiological and anatomical comparison between four different apple cultivars under cold-storage conditions. *Acta Biol. Szeged.* **2009**, *53*, 21–26. Available online: https://abs.bibl.u-szeged.hu/index.php/abs/article/view/2663 (accessed on 25 October 2023).
33. Ranjbar, S.; Rahemi, M.; Ramezanian, A. Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious. *Sci. Hortic.* **2018**, *240*, 57–64. [CrossRef]
34. Wójcik, P.; Gubbuk, H.; Akgül, H.; Gunes, E.; Ucgun, K.; Koçal, H.; Küçükyumuk, C. Effect of Autumn Calcium Spray at a High Rate on 'Granny Smith' Apple Quality and Storability. *J. Plant Nutr.* **2009**, *33*, 46–56. [CrossRef]
35. Ötles, S.; Ozgoz, S. Health effects of dietary fiber. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* **2014**, *13*, 191–202. [CrossRef]
36. Marlett, J.A. Changes in Content and Composition of Dietary Fiber in Yellow Onions and Red Delicious Apples During Commercial Storage. *J. AOAC Int.* **2000**, *83*, 992–996. [CrossRef]
37. Marlett, J.A.; Vollendorf, N.W. Dietary fiber content and composition of different forms of fruits. *Food Chem.* **1994**, *51*, 39–44. [CrossRef]
38. Gordon, A.J. *Topics in Dietary Fiber Research*; Spiller, G.A., Amen, R.J., Eds.; Plenum Press: New York, NY, USA, 1978; pp. 59–103. [CrossRef]
39. Kays, S.J. *Postharvest Physiology of Perishable Plant Products*; Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, 1991; pp. 1–532.
40. Sharma, P.; Gupta, A.; Issar, K. Effect of Packaging and Storage on Dried Apple Pomace and Fiber Extracted from Pomace. *J. Food Process. Preserv.* **2017**, *41*, e12913. [CrossRef]
41. Slowik-Borowiec, M.; Kurdziel, A.; Rupar, J.; Rogozinska, K.; Szpyrka, E. Kontrola poziomów pozostałości środków ochrony roślin w owocach i warzywach z terenu południowo-wschodniej Polski w roku 2009. *Prog. Plant Prot.* **2010**, *4*, 1980–1986.
42. Góralczyk, K.; Strucinski, P.; Korcz, W.; Czaja, K.; Hernik, A.; Snopczynski, T.; Ludwicki, J.K. Badania pozostałości pestycydów w żywności pochodzenia roślinnego w Polsce w latach 2004–2007. *Rocz. Państwowego Zakładu Hig.* **2009**, *60*, 113–119. [CrossRef]
43. Tomala, K.; Grzęda, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. The Effects of Preharvest 1-Methylcyclopropene (1-MCP) Treatment on the Fruit Quality Parameters of Cold-Stored 'Szampion' Cultivar Apples. *Agriculture* **2020**, *10*, 80. [CrossRef]
44. Waterhouse, A.L. Determination of total phenolics. *Curr. Protoc. Food Anal. Chem.* **2002**, *6*, I1.1.1–I1.1.8. [CrossRef]
45. Marinova, D.; Ribarova, F.; Atanassova, M. Total Phenolics and Total Flavonoids in Bulgarian Fruits and Vegetables. *J. Univ. Chem. Technol. Metall.* **2005**, *40*, 255–260.
46. Saint-Cricq De Gaulejac, N.; Provost, C.; Vivas, N. Comparative study of polyphenol scavenging activities assessed by different methods. *J. Agric. Food Chem.* **1999**, *47*, 425–431. [CrossRef] [PubMed]
47. Łakomiak, A.; Zhichkin, K.A. Economic aspects of fruit production: A case study in Poland. *BIO Web Conf.* **2020**, *17*, 00236. [CrossRef]
48. Eurostat. Two-thirds of the EU's fruit plantation area is concentrated in Spain, Italy and Poland. In *Eurostat Newsrelease*; Eurostat: Brussels, Belgium, 2019; Volume 32, pp. 1–4.
49. USDA (US Department of Agriculture). Available online: https://www.usda.gov/ (accessed on 15 September 2023).
50. Przybyłko, S.; Kowalczyk, W.; Wrona, D. The Effect of Mycorrhizal Fungi and PGPR on Tree Nutritional Status and Growth in Organic Apple Production. *Agronomy* **2021**, *11*, 1402. [CrossRef]
51. Sawicka, M.; Latocha, P.; Łata, B. Peel to Flesh Bioactive Compounds Ratio Affect Apple Antioxidant Potential and Cultivar Functional Properties. *Agriculture* **2023**, *13*, 478. [CrossRef]
52. Ponder, A.; Jariené, E.; Hallmann, E. The Effect of Storage Conditions on the Content of Molecules in *Malus domestica* 'Chopin' cv. and Their In Vitro Antioxidant Activity. *Molecules* **2022**, *27*, 6979. [CrossRef]
53. Mditshwa, A.; Fawole, O.A.; Opara, U.L. Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples—A review. *Food Packag. Shelf Life* **2018**, *16*, 59–68. [CrossRef]
54. Krupa, T.; Klimek, K.; Zaraś-Januszkiewicz, E. Nutritional Values of Minikiwi Fruit (*Actinidia arguta*) after Storage: Comparison between DCA New Technology and ULO and CA. *Molecules* **2022**, *27*, 4313. [CrossRef]
55. Hoehn, E.; Gasser, F.; Guggenbühl, B.; Künsch, U. Efficacy of instrumental measurements or determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharv. Biol. Technol.* **2003**, *27*, 27–37. [CrossRef]
56. Aprea, E.; Charles, M.; Endrizzi, I.; Laura Corollaro, M.; Betta, E.; Biasioli, F.; Gasperi, F. Sweet taste in apple: The role of sorbitol, individual sugars, organic acids and volatile compounds. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 44950. [CrossRef] [PubMed]

57. Petkovsek, M.M.; Stampar, F.; Veberic, R. Parameters of inner quality of the apple scab resistant and susceptible apple cultivars (*Malus domestica* Borkh). *Sci. Hortic.* **2007**, *114*, 37–44. [CrossRef]
58. Kschonsek, J.; Wolfram, T.; Stöckl, A.; Böhm, V. Polyphenolic compounds analysis of old and new apple cultivars and contribution of polyphenolic profile to the in vitro antioxidant capacity. *Antioxidants* **2018**, *24*, 20. [CrossRef] [PubMed]
59. Kevers, C.; Pincemail, J.; Tabart, J.; Defraigne, J.O.; Dommes, J. Influence of cultivar, harvest time, storage conditions, and peeling on the antioxidant capacity and phenolic and ascorbic acid contents of apples and pears. *J. Agric. Food Chem.* **2011**, *59*, 6165–6171. [CrossRef]
60. MacLean, D.D.; Murr, D.P.; DeEll, J.R.; Horvath, C.R. Postharvest variation in apple (*Malus* × *domestica* Borkh.) flavonoids follow in harvest, storage, and 1-MCP treatment. *J. Agric. Food Chem.* **2006**, *54*, 870–878. [CrossRef]
61. Hoang, N.T.T.; Golding, J.B.; Wilkes, M.A. The effect of postharvest 1-MCP treatment and storage atmosphere on 'Cripps Pink' apple phenolics and antioxidant activity. *Food Chem.* **2011**, *127*, 1249–1256. [CrossRef]
62. Lu, X.; Ma, Y.; Liu, X. Effects of maturity and 1-MCP treatment on postharvest quality and antioxidant properties of 'Fuji' apples during long-term cold storage. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **2012**, *53*, 378–386. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Mgr inż. Andrii Kistechok Warszawa, 27.10.2025 r.

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
tel.: (+22) 59 32 109
mail: andrii.kistechok@gmail.com

Rada Dyscypliny Rolnictwa i Ogrodnictwa
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy pt.:

A) **Kistechok, A.,** Wrona, D., Krupa, T. 2022. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture, 12(11), 1876.

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na: współtworzeniu koncepcji, wyborze metodyki badań, przeprowadzeniu doświadczeń, opracowaniu badań, opracowaniu analizy statystycznej, przygotowaniu manuskryptu oraz wykonaniu ostatecznej korekty pracy.

B) **Kistechok, A.,** Wrona, D., Krupa, T. 2023. Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. Agriculture, 14(1), 59.

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na: współtworzeniu koncepcji, wyborze metodyki badań, przeprowadzeniu doświadczeń, opracowaniu badań, opracowaniu analizy statystycznej, przygotowaniu manuskryptu oraz wykonaniu ostatecznej korekty pracy.

…….

Podpis

Dr hab. Dariusz Wrona, prof. SGGW Warszawa,
27.10.2025 r.
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
tel.: (+22) 59 32 109
mail: dariusz_wrona@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwa i Ogrodnictwa
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy pt.:
A) **Kistechok, A.,** Wrona, D., Krupa, T. 2022. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture, 12(11), 1876.
mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na: współtworzeniu koncepcji, wyborze metodyki badań, nadzorowaniu badań oraz wykonaniu ostatecznej korekty pracy.
B) **Kistechok, A.,** Wrona, D., Krupa, T. 2023. Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. Agriculture, 14(1), 59.
mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na: współtworzeniu koncepcji, wyborze metodyki badań, nadzorowaniu badań oraz wykonaniu ostatecznej korekty pracy.

…….
Podpis

Dr. hab. Tomasz Krupa Warszawa,

27.10.2025 r.

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
tel.: (+22) 59 32 109
mail: tomasz_krupa@sggw.edu.pl

Rada Dyscypliny Rolnictwa i Ogrodnictwa
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy pt.:

A) **Kistechok, A.,** Wrona, D., Krupa, T. 2022. Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture, 12(11), 1876.

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na: współtworzeniu koncepcji, wyborze metodyki badań, opracowaniu analizy statystycznej, pomocy w przygotowaniu manuskryptu oraz wykonaniu ostatecznej korekty pracy.

B) **Kistechok, A.,** Wrona, D., Krupa, T. 2023. Effect of Storage Conditions on the Storability and Nutritional Value of New Polish Apples Grown in Central Poland. Agriculture, 14(1), 59.

mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na: współtworzeniu koncepcji, wyborze
metodyki badań, opracowaniu analizy statystycznej, pomocy w przygotowaniu manuskryptu oraz wykonaniu ostatecznej korekty pracy.

…….

Podpis

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując wyniki badań należy stwierdzić iż zarówno cel jak i hipotezy badawcze zostały osiągnięte.

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących wpływu odmiany jabłoni oraz warunków przechowywania na skład bioaktywny owoców, sformułowano następujące wnioski:

1. Przeprowadzone badania potwierdziły istotne zróżnicowanie odmian jabłoni pod względem cech jakościowych, składu chemicznego oraz wartości biologicznej owoców, przy czym zasadniczą rolę w kształtowaniu tych właściwości odgrywał czynnik genotypowy.
2. Odmiana ‘Chopin’ i klon ‘JB’ wyróżniają się wśród powszechnie uprawianych odmian w Polsce korzystnymi parametrami jakościowymi oraz wysoką zawartością związków bioaktywnych, zwłaszcza polifenoli i flawonoidów, determinujących ich wysoką aktywność antyoksydacyjną.
3. Klon ‘JB’, charakteryzujący się czerwonym miąższem, wyróżnia się ponad przeciętną zawartość polifenoli i flawonoidów ogółem, zarówno w miąższu, jak i w skórce jabłek, a także wysoką aktywnością przeciwutleniającą. Cecha ta utrzymuje się bezpośrednio po zbiorze oraz po przechowywaniu w chłodni, co potwierdza jego duży potencjał odmianowy w zakresie akumulacji związków prozdrowotnych. Niestety, pomimo bardzo wysokiej wartości odżywczej owoców wykazuje on ograniczoną zdolność przechowalniczą, co stanowi istotny czynnik ograniczający jego przydatność do długotrwałego przechowywania, lecz jednocześnie wskazuje na jego duży potencjał jako surowca dla przetwórstwa spożywczego o podwyższonej wartości prozdrowotnej.
4. Jabłka klonu ‘JB’ cechują się wysokim poziomem błonnika pokarmowego co może wynikać z bardziej zwartej struktury ściany komórkowej i większego udziału pektyn związanych z polifenolami. Cecha ta zwiększa ich wartość technologiczną
   w przetwórstwie.
5. Owoce odmiany ‘Chopin’ wyróżniają się wysoką kwasowością oraz umiarkowanie wysoką zawartością metabolitów wtórnych, jednak wykazują zmienność składu chemicznego pod wpływem warunków środowiskowych i

przechowalniczych, co może wskazywać na ich wyższą wrażliwość na czynniki zewnętrzne.

6. Warunki pogodowe w okresie wegetacji w istotny sposób wpływają na jakość fizykochemiczną jabłek oraz na poziom związków biologicznie czynnych. W latach o suchym i ciepłym lecie następuje wzrost zawartości cukrów redukujących, spadek kwasów organicznych oraz modyfikacja profilu antyoksydacyjnego owoców.
7. Zastosowanie technologii kontrolowanej atmosfery przechowywania ogranicza tempo dojrzewania owoców, pozwalając na utrzymanie ich jędrności, wysokiej kwasowości oraz stabilności poziomu polifenoli i flawonoidów.
8. Odmiany ‘Chopin’ i ‘Idared’ są szczególnie przydatne do przechowywania w technologii kontrolowanej atmosfery (ULO i DKA), ze względu na zachowanie akceptowalnej jędrności, wysokiej kwasowości oraz korzystnego profilu związków bioaktywnych po długotrwałym przechowywaniu.
9. Ocena bezpieczeństwa żywności potwierdziła brak wykrywalnych pozostałości środków ochrony roślin w owocach odmiany ‘Chopin’ i klonu ‘JB’, co wskazuje na ich potencjalną przydatność do upraw ekologicznych, zgodnie z aktualnymi trendami rynkowymi i regulacjami Unii Europejskiej.

8. LITERATURA

1. Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biology and Technology, 15(3), 207–225.
2. Acquavia, M. A., Pascale, R., Foti, L., Carlucci, G., Scrano, L., Martelli, G., Brienza, M., Coviello, D., Bianco, G., Lelario, F. (2021). Analytical methods for extraction and identification of primary and secondary metabolites of apple (*Malus domestica*) fruits: A review. Separations, 8(7), 91. https://doi.org/10.3390/separations8070091
3. Agudo, A. (2004). Measuring intake of fruit and vegetables. World Health Organization.
4. Ahmadi-Afzadi, M. (2012). Genetic and biochemical properties of apples that affect storability and nutritional value. Introductory Paper at the Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science, 1.
5. Alonso-Salces, R. M., Korta, E., Barranco, A., Berrueta, L. A., Gallo, B., Vicente, F. (2001). Determination of polyphenolic profiles of Basque cider apple varieties using accelerated solvent extraction. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49, 3761–3767.
6. Ambrożewicz, E., Skrzydlewska, E. (2009). Antyoksydacyjne właściwości czarnej porzeczki. Farmaceutyczny Przegląd Naukowy, 10, 30–34.
7. Amyotte, B., Bowen, A. J., Banks, T., Rajcan, I., Somers, D. J. (2017). Mapping the sensory perception of apple using descriptive sensory evaluation in a genome wide association study. PLoS ONE, 12, e0171710.
8. Anese, R. O., Thewes, F. R., Brackmann, A., Schultz, E. E., Wagner, R., Klein, B., Roberto, M., Berghetti, P., Mallmann Wendt, L. (2020). Growth regulators on quality traits and volatile organic compounds profile of 'Royal Gala' apple at harvest and after dynamic controlled atmosphere storage. Postharvest Biology and Technology, 164, 111158.
9. Aprea, E., Charles, M., Endrizzi, I., Corollaro, M. L., Betta, E., Biasioli, F., Gasperi, F. (2017). Sweet taste in apple: The role of sorbitol, individual sugars, organic acids and volatile compounds. Scientific Reports, 7, 44950.
10. Awad, M. A., De Jager, A. (2000). Flavonoid and chlorogenic acid concentrations in skin of 'Jonagold' and 'Elstar' apples during and after regular and ultra-low oxygen storage. Postharvest Biology and Technology, 20, 15–24.

11. Begić-Akagić, A., Spaho, N., Oručević, S., Drkenda, P., Kurtović, M., Gaši, F., Kopjar, M., Piližota, V. (2011). Influence of cultivar, storage time, and processing on the phenol content of cloudy apple juice. Croatian Journal of Food Science and Technology, 3(2), 1-8.
12. Bekele, E. A., Ampofo-Asiama, J., Alis, R. R., Hertog, M. L. A. T. M., Nicolai, B. M., Geeraerd, A. H. (2016). Dynamics of metabolic adaptation during initiation of controlled atmosphere storage of 'Jonagold' apple: Effects of storage gas concentrations and conditioning. Postharvest Biology and Technology, 117, 9–20.
13. Bhagwat, S. B., Haytowitz, D. B., Holden, J. M. (2011). USDA database for the flavonoid content of selected foods (Release 3.1). U.S. Department of Agriculture. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/80400525/Data/Flav/Flav_R03-1.pdf
14. Bizjak, J., Mikulic-Petkovsek, M., Stampar, F., Veberic, R. (2013). Changes in primary metabolites and polyphenols in the peel of "Braeburn' apples (*Malus domestica* Borkh.) during advanced maturation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 61, 10283–10292.
15. Bondonno, N. P., Bondonno, C. P., Ward, N. C., Hodgson, J. M., Croft, K. D. (2017). The cardiovascular health benefits of apples: Whole fruit vs. isolated compounds. Trends in Food Science Technology, 69, 243–256.
16. Boyer, J., Liu, R. H. (2004). Apple phytochemicals and their health benefits. Nutrition Journal, 3, 1–15.
17. Brown, A. G., Harvey, M. (1971). The nature and inheritance of sweetness and acidity in the cultivated apple. Euphytica, 20, 68–80.
18. Carbone, K., Giannini, B., Picchi, V., Scalzo, R. L., Cecchini, F. (2011). Phenolic composition and free radical scavenging activity of different apple varieties in relation to cultivar, tissue type, and storage. Food Chemistry, 127, 493–500.
19. Costa, F., Stella, S., Van de Weg, W. E., Guerra, W., Sansavini, S. (2004). Functional markers as a genetic approach to study ethylene production and fruit softening in apple. Acta Horticulturae: 5th International Postharvest Symposium, Verona, Italy, 6–13 June. (In press).
20. Czerwonka, M., Waszkiewicz-Robak, B. (2009). Wpływ procesu technologicznego na zawartość związków polifenolowych i aktywność przeciwutleniającą jabłek i przetworów jabłkowych. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 2, 61–64.

21. Davey, M. W., Auwerkerken, A., Keulemans, J. (2007). Relationship of apple vitamin C and antioxidant contents to harvest date and postharvest pathogen infection. Journal of the Science of Food and Agriculture, 87, 802–813.
22. De Oliveira, M. C., Sichieri, R., Moura, A. S. (2003). Weight loss associated with a daily intake of three apples or three pears among overweight women. Nutrition, 19, 253–256.
23. De Smedt, V., Pauwels, E., De Baerdemaeker, J., Nicolaï, B. (1998). A microscopic observation of mealiness in apples: A quantitative approach. Postharvest Biology and Technology, 14, 151–158.
24. DeLong, J. M., Prange, R. K., Leyte, J. C., Harrison, P. A. (2004). A new technology that determines low-oxygen thresholds in controlled-atmosphere-stored apples. HortTechnology, 14, 262–266.
25. Dobrzański, B., Rabcewicz, J., Rybczyński, R. (2006). Handling of apple: Transport techniques and efficiency, vibration, damage and bruising, texture, firmness and quality. Centre of Excellence AGROPHYSICS for Applied Physics in Sustainable Agriculture.
26. Dobrzański, B., Rybczyński, R., Gołacki, K. (2000). Quality parameter of storage apples as a firmness. International Agrophysics, 14, 149–157.
27. Dobrzański, B., Rybczyński, R., Dobrzańska, A., Wójcik, W. (2001). Some physical and nutritional quality parameters of storage apple. International Agrophysics, 15, 13–18.
28. Drogoudi, P. D., Michailidis, Z., Pantelidis, G. (2008). Peel and flesh antioxidant content and harvest quality characteristics of seven apple cultivars. Scientia Horticulturae, 115, 149–153.
29. Drozdowicz, M. (1969). Budowa przechowalni i przechowywanie owoców przez producentów. CRS, Warszawa.
30. Duda-Chodak, A., Tarko, T., Satora, P., Sroka, P., Tuszyński, T. (2010). The profile of polyphenols and antioxidant properties of selected apple cultivars grown in Poland. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 18, 39–50.
31. Eberhardt, M. V., Lee, C. Y., Liu, R. H. (2000). Antioxidant activity of fresh apples. Nature, 405, 903–904.
32. Espley, R. V., Leif, D., Plunkett, B., McGhie, T., Henry-Kirk, R., Hall, M., Johnston, J. W., Punter, M. P., Boldingh, H., Nardozza, S., Volz, R. K., O'Donnell, S., & Allan, A. C. (2019). Red to brown: An elevated anthocyanic response in apple drives

ethylene to advance maturity and fruit flesh browning. Frontiers in Plant Science, 10, 1248.

33. Fallahi, E.; Simons, B.R. (1996). Interrelations among leaf and fruit mineral nutrients and fruit quality in "Delicious' apples. J. Tree Fruit Prod. 1, 15–25.
34. FAO/WHO. (2004, September 1–3). Fruit and vegetables for health: Report of a joint FAO/WHO workshop. Kobe, Japan.
35. Farooq, R. A., Khan, I. (2012). Physico-chemical quality of apple cv. Gala fruit stored at low temperature. FUUAST Journal of Biology, 2, 103–107.
36. Fawbush, F.; Nock, J.F.; Watkins, C.B. (2009). Antioxidant contents and activity of 1-methylcyclopropene (1-MCP)-treated Empire apples in air and controlled atmosphere storage. Postharvest Biol. Technol. 52, 30–37.
37. Ferreira C., Sofia C. Duarte, Eduardo Costa, Andr´e M.P. T. Pereira, Liliana J. G. Silva , Anabela Almeida, Celeste Lino, Angelina Pena. (2021). Urine biomonitoring of glyphosate in children: Exposure and risk assessment. Environmental Research 198, 111294
38. Fernández, B., Claverie, F., Pécheyran, C., Donard, O. F. X., Claverie, F. (2007). Direct analysis of solid samples by fs-LA-ICP-MS. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 26(10), 951–966. https://doi.org/10.1016/j.trac.2007.08.008
39. Fidler, J. C., Wilkinson, B. G., Edney, K. L. (1973). The biology of apple and pear storage. In Research Review of the Commonwealth Bureaux of Horticulture and Plantation Crops (Vol. 3, pp. xiii–235). Commonwealth Agricultural Bureaux Farnham Royal.
40. Francini, A., Sebastiani, L. (2013). Phenolic compounds in apple (*Malus domestica* Borkh.): Compounds characterization and stability during postharvest and after processing. Antioxidants, 2(3), 181–193.
41. Fratianni, F.; Coppola, R.; Nazzaro, F. (2011). Phenolic Composition and Antimicrobial and Antiquorum Sensing Activity of an Ethanolic Extract of Peels from the Apple Cultivar Annurca. J. Med. Food. 14, 957–963.
42. Gayer, B.A.; Avendano, E.E.; Edelson, E.; Nirmala, N.; Johnson, E.J.; Raman, G. (2019). Effects of Intake of Apples, Pears, or Their Products on Cardiometabolic Risk Factors and Clinical Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. Curr. Dev. Nutr. , 3, nzz109.
43. Gago, C. M. L., Guerreiro, A. C., Miguel, G., Panagopoulos, T., da Silva, M. M., Antunes, M. D. C. (2016). Effect of calcium chloride and 1-MCP (SmartFresh™)

postharvest treatment on ‘Golden Delicious’ apple cold storage physiological disorders. Scientia Horticulturae, 211, 440–448.

44. Gasser, F.; Arx, K. (2015). Dynamic CA storage of organic apple cultivars. Acta Hortic. 1071, 527–532
45. George, V. C., Rupasinghe, H. P. V. (2017). Apple flavonoids suppress carcinogen-induced DNA damage in normal human bronchial epithelial cells. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2017, Article 1767198.
46. Gordon, A.J. (1978). Topics in Dietary Fiber Research; Spiller, G.A., Amen, R.J., Eds. Plenum Press: New York, NY, USA, 59–103.
47. Grajek, W. (red.). (2007). Przeciwutleniacze w żywności. WNT.
48. Głąbska, D.; Guzek, D.; Groele, B.; Gutkowska, K. (2020). Fruit and Vegetable Intake and Mental Health in Adults: A Systematic Review. Nutrients 2020, 12, 115.
49. Gross, K. C., Wang, C. Y., Saltveit, M. (2016). The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks. USDA-ARS, Handbook No. 66.
50. Guyot, S., Bourvellec, C., Marnet, N., Drilleau, J. F. (2002). Procyanidins are the most abundant polyphenols in dessert apples at maturity. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 35(3), 289–291.
51. Gwanpua, S., Mellidou, I., Boeckx, J., et al. (2016). Expression analysis of candidate cell wall-related genes associated with changes in pectin biochemistry during postharvest apple softening. Postharvest Biology and Technology, 112, 176–185.
52. Harker, F. R., Gunson, A. F., Brookfield, P. L. (2002). An apple a day: The influence of memory on consumer judgment of quality. Food Quality and Preference, 13(3), 173–179.
53. Harris, J., de Steenhuijsen Piters, B., McMullin, S., Bajwa, B., de Jager, I., Brouwer, I. D. (2023). Fruits and vegetables for healthy diets: Priorities for food system research and action. National Center for Biotechnology Information. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK599612
54. He, J., & Giusti, M. M. (2010). Anthocyanins: Natural colorants with health-promoting properties. Annual Review of Food Science and Technology, 1, 163–187.
55. Hoang, N. T. T., Golding, J. B., Wilkes, M. A. (2011). The effect of postharvest 1-MCP treatment and storage atmosphere on ‘Cripps Pink’ apple phenolics and antioxidant activity. Food Chemistry, 127, 1249–1256.

56. Hoehn, E., Gasser, F., Guggenbühl, B., Künsch, U. (2003). Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. Postharvest Biology and Technology, 27, 27–37.
57. Hutabarat, O. S., Flachowsky, H., Regos, I., Miosic, S., Kaufmann, C., Faramarzi, S., Halbwirth, H. (2016). Transgenic apple plants overexpressing the chalcone 3-hydroxylase gene of Cosmos sulphureus show increased levels of 3-hydroxyphloridzin and reduced susceptibility to apple scab and fire blight. Planta, 243(5), 1213–1224. https://doi.org/10.1007/s00425-016-2475-9
58. Hutabarat, O. S., Halbwirth, H. (2019). Polyphenol oxidase and peroxidase activity in apple: Dependency on cultivar and fruit processing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 355, 012106.
59. ICI Business, (2021). The European market potential for apple.
60. Ircha, J. (2005). Bilans cieplny przechowalni jabłek. Zakład Instalacji Budowlanych i Fizyki Budowli, Politechnika Warszawska, 67–75.
61. Jaeger, S. R., Andani, Z., Wakeling, I. N., MacFie, H. J. H. (1998). Consumer preferences for fresh and aged apples: A cross-cultural comparison. Food Quality and Preference, 9, 355–366.
62. Jakobek L. (2015). Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. Food Chemistry, Volume 175, 556-567.
63. Jakobek, L., García-Villalba, R., Tomás-Barberán, F. A. (2013). Polyphenolic characterization of old local apple varieties from Southeastern European region. Journal of Food Composition and Analysis, 31(2), 199–211.
64. Janick, J., Sansavini, S. (1997, October 10). Il miglioramento genetico del melo (*Malus domestica* Borkh): Apple breeding and genetics (*Malus domestica* Borkh). In 2nd International Symposium: Stato dell'arte e prospettive del miglioramento genetico dei fruttiferi: melo, ciliegio, kaki e castagno (pp. 14–68). Faenza, Italy.
65. Kader, A. A. (1983). Postharvest quality maintenance of fruits and vegetables in developing countries. In Postharvest Physiology and Crop Production (pp. 455–470). Plenum Press.
66. Kader, A. A. (2002). Postharvest technology of horticultural crops (Vol. 3311). University of California, Richmond, CA: UCANR Publications.

67. Kalt W, Forney CF, Martin A. (1999). Prior RL. Antioxidant capacity, vitamin C, phenolics, and anthocyanins after fresh storage of small fruits. J Agric Food Chem. 1999, Nov;47(11):4638-44.
68. Kevers, C., Pincemail, J., Tabart, J., Defraigne, J. O., Dommes, J. (2011). Influence of cultivar, harvest time, storage conditions, and peeling on the antioxidant capacity and phenolic and ascorbic acid contents of apples and pears. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59, 6165–6171.
69. Kiczorowska, B. (2009). Zawartość Na, K, Ca i Mg w jadalnych częściach – w miąższu i skórce jabłek odmian uprawianych amatorsko. Bromatologia i Chemia Toksykologiczna, 42(3), 803–807.
70. Kim, I., Ku, K., Jeong, M., Kim, S. S., Mitchell, A. E., Lee, J. (2019). A comparison of the chemical composition and antioxidant activity of several new early- to mid-season apple cultivars for a warmer climate with traditional cultivars. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99, 4712–4724.
71. Kingston, C. (1992). Maturity indices for apple and pear. In Horticultural Reviews (Vol. 13, pp. 407–432).
72. Kistechok, A.; Wrona, D.; Krupa, T. (2022). Quality and Nutritional Value of 'Chopin' and Clone 'JB' in Relation to Popular Apples Growing in Poland. Agriculture 2022, 12, 1876.
73. Kittemann, D., McCormick, R., Neuwald, D. A. (2015). Effect of high temperature and 1-MCP application or dynamic controlled atmosphere on energy savings during apple storage. European Journal of Horticultural Science, 80, 33–38.
74. Kolniak-Ostek, J., Wojdyło, A., Markowski, J., Siucińska, K. (2014). 1-Methylcyclopropene postharvest treatment and its effect on apple quality during long-term storage time. European Food Research and Technology, 239, 603–612.
75. Korićanac, A., Miletić, N., Popović, B., Mitrović, O., Lukić, M., Pešaković, M., Tomić, J. (2020). The effect of ULO and NA storage on changes in the quality of apple fruit (*Malus domestica* Borkh.) during shelf life. Agronomy, 10, 25, 1–11. https://doi.org/10.3390/agronomy10010025
76. Krachler, M., Mohl, C., Emons, H., Shotyk, W. (2002). Analytical procedures for the determination of selected trace elements in peat and plant samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 57(8), 1277–1289. https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00068-X

77. Kruczyńska, D. (2013). Ilustrowany katalog odmian jabłoni. Instytut Ogrodnictwa.
78. Krupa, T.; Klimek, K.; Zara´s-Januszkiewicz, E. (2022). Nutritional Values of Minikiwi Fruit (Actinidia arguta) after Storage: Comparison between DKA New Technology and ULO and CA. Molecules 2022, 27, 4313.
79. Kuczyński, A. P. (2003). Ocena jędrności przechowywanych jabłek przy zastosowaniu statystycznej metody redukcji wymiarów w modelu. Acta Agrophysica, 2(4), 767–802.
80. Kupferman, E. (1997). Controlled atmosphere storage of apples. In CA'97 Proceedings (Vol. 2, pp. 1–30). Postharvest Horticulture Series No. 16. University of California, Davis.
81. Kvikliene, N., Kviklys, D., Vi, P. (2006). Changes in fruit quality during ripening and storage in the apple cultivar "Auksis'. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 14, 195–202. https://bit.ly/3qgcTcG
82. Kviklys, D., Kviklienė, N., Bite, A., Lepsis, J., Univer, T., Univer, N., Uselis, N., Lanauskas, J., & Buskienė, L. (2012). Baltic fruit rootstock studies: Evaluation of 12 apple rootstocks in North-East Europe. Horticultural Science (Prague), 39(1), 1–7.
83. L. de Graaf, M. Boulanger, M. Bureau, G. Bouvier, M. Meryet-Figuiere, S. Tual, P. Lebailly, I. Baldi. (2022). Occupational pesticide exposure, cancer and chronic neurological disorders: A systematic review of epidemiological studies in greenspace workers. Environmental Research 203 111822.
84. Lang, C., Hübert, T. (2012). A colour ripeness indicator for apples. Food and Bioprocess Technology, 5, 3244–3249.
85. Lange, E., Ostrowski, W. (1992). Przechowalnictwo owoców (2nd ed.). PWRiL.
86. Lee, C. Y. (2012). Common nutrients and nutraceutical quality of apples. New York Fruit Quarterly, 20(3), Fall.
87. Leja, M., Mareczek, A., Ben, J. (2001). Antioxidant properties of two apple cultivars during long-term storage. Food Chemistry, 80, 303–307.
88. Li, M. J., Ma, F. W., Zhang, M., Pu, F. (2008). Distribution and metabolism of ascorbic acid in apple fruits (*Malus domestica* Borkh. cv. Gala). Plant Science, 174, 606–612.
89. Li, C.X.; Zhao, X.H.; Zuo, W.F.; Zhang, T.L.; Zhang, Z.Y.; Chen, X.S. (2020). Phytochemical profiles, antioxidant, and antiproliferative activities of four red-fleshed apple varieties in China. J. Food Sci. 85, 718–726.

90. Li, Y., Sun, H., Li, J., Qin, S., Yang, W., Ma, X., Qiao, X., Yang, B. (2021). Effects of genetic background and altitude on sugars, malic acid and ascorbic acid in fruits of wild and cultivated apples (*Malus* sp.). Foods, 10, 2950. https://doi.org/10.3390/foods10122950
91. Liu (2013). RH Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet. Adv Nutr. 4, 384–392.
92. Łysiak, G. P., Michalska-Ciechanowska, A., Wojdyło, A. (2020). Postharvest changes in phenolic compounds and antioxidant capacity of apples cv. Jonagold growing in different locations in Europe. Food Chemistry, 310, 125912.
93. Lončarić, A., & Piližota, V. (2014). Effect of variety, growing season and storage on polyphenol profile and antioxidant activity of apple peels. Hrana u zdravlju i bolesti: znanstveno-stručni časopis za nutricionizam i dijetetiku, 3(2).
94. Maragò, E., Iacopini, P., Camangi, F., Scattino, C., Ranieri, A., Stefani, A., Sebastiani, L. (2015). Phenolic profile and antioxidant activity in apple juice and pomace: Effects of different storage conditions. Fruits, 70(4), 213–223.
95. Marinova, D., Ribarova, F., Atanassova, M. (2005). Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 40, 255–260.
96. Markowski, J.; Płocharski, W. (2006). Determination of phenolic compounds in apples and processed apple products. J. Fruit Ornam. Plant Res. 14, 133–141
97. Marlett, J.A. (2000). Changes in Content and Composition of Dietary Fiber in Yellow Onions and Red Delicious Apples During Commercial Storage. J. AOAC Int. 2000, 83, 992–996
98. Marlett, J.A.; Vollendorf, N.W. (1994). Dietary fiber content and composition of different forms of fruits. Food Chem. 1994, 51, 39–44.
99. Mattheis, J. (2016). Fruit maturity and quality. WSU Tree Fruit Extension.
100. McColl, K. (2016, February). Increasing fruit and vegetable consumption to reduce the risk of noncommunicable diseases. World Health Organization.
101. McGhie, T. K., Hunt, M., Barnett, L. E. (2005). Cultivar and growing region determine the antioxidant polyphenolic concentration and composition of apples grown in New Zealand. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53, 3065–3070.

102. Mditshwa, A.; Fawole, O.A.; Opara, U.L. (2018). Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples—A review. Food Packag. Shelf Life 2018, 16, 59–68.
103. Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Jourjon, F., Prost, C. (2006). Characterization of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivars and maturity stage. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54, 2678–2687.
104. Mignard, P., Beguería, S., Giménez, R., Font i Forcada, C., Reig, G., Moreno, M. A. (2022). Effect of genetics and climate on apple sugars and organic acids profiles. Agronomy, 12, 827.
105. Mignard, P., Beguería, S., Reig, G., Font i Forcada, C., Moreno, M. A. (2021). Genetic origin and climate determine fruit quality and antioxidant traits on apple (*Malus domestica* Borkh.). Scientia Horticulturae, 285, 110–142.
106. Mohebi, M., Babalar, M., Askari, M. A., Talae, A., Ahmadi, A. (2017). Effects of harvest date on apple fruit quality at harvesting and after cold storage. Journal of Postharvest Technology, 5(2), 29–36.
107. Mosel, H. D., Herrmann, K. (1974). Phenolics of fruits. IV. Phenolics of blackberries and raspberries and their changes during development and ripeness of fruits. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung, 154, 324–327.
108. Napolitano, A., Cascone, A., Graziani, G., Ferracane, R., Scalfi, L., Di Vaio, C., Ritieni, A., Fogliano, V. (2004). Influence of variety and storage on the polyphenol composition of apple flesh. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52, 6526–6531.
109. Ötles, S.; Ozgoz, S. (2014) Health effects of dietary fiber. Acta Sci. Pol. Technol. Aliment. 2014, 13, 191–202
110. Paul, V., Pandey, R. (2013). Delaying tomato fruit ripening by using 1-methylcyclopropene (1-MCP) for better postharvest management: Current status and prospects in India. Indian Journal of Plant Physiology, 18, 195–207.
111. Pereira-Lorenzo, S., Ramos-Cabrer, A. M., Fischer, M. (n.d.). Breeding apple (*Malus domestica* Borkh). In S. M. Jain P. M. Priyadarshan (Eds.), Breeding plantation tree crops (p. 45). Springer.
112. Petkova, N., Bileva, T., Valcheva, E., Dobrevska, G., Grozeva, N., Todorova, M., Popov, V. (2019). Bioactive compounds and antioxidant activity in apple fruits cultivar Florina. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 25(Suppl. 3), Agricultural Academy.

113. Petkovska, A., Gjamovski, V., Stefova, M. (2016). Comparison of different extraction solvents for assay of the polyphenol content in the peel and pulp of 21 apple cultivars from Macedonia. Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 35, 29–38.
114. Pomerleau, J., Lock, K., Knai, C., McKee, M. (2005). Interventions designed to increase adult fruit and vegetable intake can be effective: A systematic review of the literature.
115. Preti, R., Tarola, A.M. (2021). Study of polyphenols, antioxidant capacity and minerals for the valorisation of ancient apple cultivars from Northeast Italy. Eur Food Res Technol. 247, 273–283.
116. Prange, R. K., Wright, A. H. (2023). A review of storage temperature recommendations for apples and pears. Foods, 12, 466, 1–17. https://doi.org/10.3390/foods12030466
117. Prichko, T. (2020). Evaluation of biochemical indicators of apple fruits quality for the complex selection of the valuable source material for breeding. BIO Web of Conferences, 25, 02019, 2–7.
118. Przybyłko, S.; Kowalczyk, W.; Wrona, D. (2021). The Effect of Mycorrhizal Fungi and PGPR on Tree Nutritional Status and Growth in Organic Apple Production. Agronomy, 11, 1402.
119. Proteggente, A. R., Pannala, A. S., Paganga, G., Van Buren, L., Wagner, E., Wiseman, S., Van De Put, F., Dacombe, C., Rice-Evans, C. A. (2002). The antioxidant activity of regularly consumed fruit and vegetables reflects their phenolic and vitamin C composition. Free Radical Research, 36, 217–233.
120. Putnik, P., Kovačević, D. B., Herceg, K., Pavkov, I., Zorić, Z., Levaj, B. (2017). Effects of modified atmosphere, anti-browning treatments and ultrasound on the polyphenolic stability, antioxidant capacity and microbial growth in fresh-cut apples. Journal of Food Process Engineering, 40, e12539.
121. Pyryt, B., Wrześniak, M. (2011). Ocena jakości wybranych odmian jabłek deserowych dostępnych w sprzedaży detalicznej. Bromatologia i Chemia Toksykologiczna, 44(3), 934–938.
122. Rantala, R. T. T., Loring, D. H. (1989). Teflon bomb decomposition of silicate materials in a microwave oven. Analytica Chimica Acta, 220, 263–267. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)80270-6

123. Raudone, L., Raudonis, R., Liaudanskas, M., Janulis, V., Viskelis, P. (2017). Phenolic antioxidant profiles in the whole fruit, flesh and peel of apple cultivars grown in Lithuania. Scientia Horticulturae, 216, 186–192.
124. Rawel, H. M., Kulling, S. E. (2007). Nutritional contribution of coffee, cacao and tea phenolics to human health. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2, 399–406.
125. Reijo T.T. Rantala, Douglas H. Loring, (1989). Teflon bomb decomposition of silicate materials in a microwave oven, Analytica Chimica Acta, Volume 220, Pages 263-267.
126. Rucević I, Perl A, Barisić-Drusko V, Adam-Perl M. (2003). The role of the low energy diet in psoriasis vulgaris treatment. Coll Antropol. 27 Suppl 1:41-8.
127. Rusnak, J. (2013). Wskaźniki dojrzałości zbiorczej owoców. Małopolski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Karniowicach.
128. Rupasinghe H. P. V., Huber G. M., Embree C. G., Forsline P. L. (2010). Red-fleshed apple as a source for functional beverages. Canadian Journal of Plant Science, 90(4), 597-606
129. Rutkowski, K., Konopacka, D. (2001). Jędrność jabłek. Cz. 1. Hasło Ogrodnicze, 4.
130. Saint-Cricq De Gaulejac, N., Provost, C., Vivas, N. (1999). Comparative study of polyphenol scavenging activities assessed by different methods. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47, 425–431. https://doi.org/10.1021/jf980700b
131. Sanzani, S. M., De Girolamo, A., Schena, L., Solfrizzo, M., Ippolito, A., Visconti, A. (2009). Control of Penicillium expansum and patulin accumulation on apples by quercetin and umbelliferone. European Food Research and Technology, 228, 381–389.
132. Shewa, A. G., Gobena, D. A., Ali, M. K. (2022). Review on postharvest quality and handling of apple. Journal of Agricultural Science and Food Technology, 8(1), 28.
133. Słupski, J., Tarko, T., Drożdż, I. (2018). Składniki bioaktywne surowców i produktów roślinnych. Polskie Towarzystwo Technologów Żywności.
134. Starowicz, M., Achrem-Achremowicz, B., Piskuła, M. K., Zieliński, H. (2020). Phenolic compounds from apples: Reviewing their occurrence, absorption, bioavailability, processing, and antioxidant activity – a review. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 70(4), 321–336.

135. Starzec, A., Raj, D., Fecka, I. (2020). Właściwości prozdrowotne owoców jabłoni domowej w świetle najnowszych badań naukowych (*Malus domestica* Borkh.). Farmacja Polska, 76(3), 137–148. https://doi.org/10.xxxxx (jeśli dostępny DOI)
136. Suzuki, N., Koussevitzky, S., Mittler, R., Miller, G. (2012). ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress. Plant, Cell Environment, 35(2), 259–270. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02336.x
137. The Centre for the Promotion of Imports (CBI). (2021, September 28). The European market potential for apples. https://www.cbi.eu/market-information
138. Thewes, F.R.; Both, V.; Brackmann, A.; Weber, A.; de Oliveira Anese, R. (2015). Dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen storage on 'Gala' mutants, quality maintenance. Food Chem. 188, 62–70
139. Thewes, F. R., Brackmann, A., Both, V., Weber, A., Anese, R. O., Ferrão, T. S., Wagner, R. (2017). The different impacts of dynamic controlled atmosphere and controlled atmosphere storage on the quality attributes of 'Fuji Suprema' apples. Postharvest Biology and Technology, 130, 7–20.
140. Tomala, K. (1997). Orchard factors affecting nutrient content and fruit quality. Acta Hort. 448, 257–264
141. Tomala, K.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Małachowska, M.; Krupa, T.; Gutkowska, K. (2021). The Influence of 1-Methylcyclopropene on the Quality Parameters of Idared Apples after 8 Weeks of Storage Simulating Long-Distance Transportation. Agronomy, 11, 528.
142. Tomala, K.; Małachowska, M.; Guzek, D.; Głąbska, D.; Gutkowska, K. (2020). The Effects of 1-Methylcyclopropene Treatment on the Fruit Quality of 'Idared' Apples during Storage and Transportation. Agriculture 2020, 10, 490.
143. Treutter, D. (2001). Biosynthesis of phenolic compounds and its regulation in apple. Plant Growth Regulation, 34, 71–89.
144. Tsao, R. (2010). Chemistry and Biochemistry of Dietary Polyphenols. Nutrients, 2(12), 1231–1246.
145. Tsikas, D., Zoerner, A. A. (2014). Analysis of eicosanoids by LC-MS/MS and GC-MS/MS: A historical retrospect and a discussion. Journal of Chromatography B, 964, 79–88. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2014.03.017
146. Vieira, F. G. K., Borges, G. D. S. C., Copetti, C., Gonzaga, L. V., Nunes, E. C., Fett, R. (2009). Activity and contents of polyphenolic antioxidants in the whole

fruit, flesh and peel of three apple cultivars. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 59, 101–106.

147. Walker, J. R. L., Ferrar, P. H. (1998). Diphenol oxidases, enzyme-catalysed browning and plant disease resistance. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews, 15(1), 457–498. https://doi.org/10.1080/02648725.1998.10647966

148. Walter, H. (1973). Vegetationszonen und Klima; Ulmer: Stuttgart, Germany.

149. Wang, X. Q., Li, C. Y., Liang, D., Zou, Y. J., Li, P. M., Ma, F. W. (2015). Phenolic compounds and antioxidant activity in red-fleshed apples. Journal of Functional Foods, 18, 1086–1094.

150. Warrington, I. J., Fulton, T. A., Halligan, E. A., de Silva, H. N. (1999). Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. Journal of the American Society for Horticultural Science, 124, 468–477.

151. Waterhouse, A. L. (2002). Determination of total phenolics. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, 6, I1.1.1–I1.1.8.

152. Watkins, C. B. (2008). Dynamic controlled atmosphere storage – A new technology for the New York storage industry? New York Fruit Quarterly, 16(1), 23–26.

153. Wolfe, K., Wu, X., Liu, R. H. (2003). Antioxidant activity of apple peels. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51, 609–614.

154. World Health Organization. (2006). Global strategy on diet, physical activity and health: A framework to monitor and evaluate implementation. World Health Organization.

155. World Health Organization. (2018). Healthy diet (Fact Sheet No. 394). World Health Organization.

156. Wojdyło, A., Oszmiański, J., Laskowski, P. (2008). Polyphenolic compounds and antioxidant activity of new and old apple varieties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56(15), 6520-6530.

157. Yoon, H., Liu, R. H. (2007). Effect of selected phytochemicals and apple extracts on NF-kB activation in human breast cancer MCF-7 cells. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 55, 3167–3173.

158. Yurong, M., Qingfeng, B., Jingying, S., Tiantian, D., Cai-Zhong, J., Qingguo, W. (2019). 1-Methylcyclopropene (1-MCP), storage time, shelf life and temperature affect phenolic compounds and antioxidant activity of 'Jonagold' apple. Postharvest Biology and Technology, 150, 71–79.

159. Zalega, J., Szostak-Węgierek, D. (2013). Żywienie w profilaktyce nowotworów. Część I. Polifenole roślinne, karotenoidy, błonnik pokarmowy. Problemy Higieny i Epidemiologii, 94(1), 41–49.
160. Zdunek, A., Cybulska, J., Konopacka, D., Rutkowski, K. (2011). Inter-laboratory analysis of firmness and sensory texture of stored apples. International Agrophysics, 25, 67–75.
161. Zhang, Q., Zhou, B., Li, M., Wei, Q., Han, Z. (2018). Multivariate analysis between meteorological factors and fruit quality of Fuji apple at different locations in China. Journal of Integrative Agriculture, 17, 1338–1347.
162. Zhang, X.; Huo, H.Q.; Sun, X.H.; Zhu, J.; Dai, H.Y.; Zhang, Y.G. (2019). Nanocrystallization of Anthocyanin Extract from Red-Fleshed Apple 'QN-5′ Improved Its Antioxidant Effect through Enhanced Stability and Activity under Stressful Conditions. Molecules 24(7), 1421
163. Zhang, Y.G.; Zhu, J.; Dai, H.Y. (2013). Morphological characteristics and pollination compatibility of a new red flesh apple, Hongxun No.1. Research on Crops 14, 199–204.
164. Zheng, L., Ma, W., Liu, P., Song, S., Wang, L., Yang, W., Ren, H., Wei, X., Zhu, L., Peng, J., et al. (2024). Transcriptional factor MdESE3 controls fruit acidity by activating genes regulating malic acid content in apple. Plant Physiology. https://doi.org/10.1093/plphys/kiae282
165. Zydlik, Z., Rutkowski, K., Świerczyński, S., Morkunas, I., Yoon, H.-K., Seo, J.-H., Kang, K.-J., Kleiber, T. (2020). The effect of climatic conditions in successive plant growing seasons on the response of selected varieties of apple trees (*Malus domestica* Borkh.). Journal of Elementology, 25, 205–224.

Wyrażam zgodę na udostępnienie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW

…….

(czytelny podpis autora pracy)