**UNIWERSYTET WARMIŃSKO-MAZURSKI**
**W OLSZTYNIE**

**Wydział Nauki o Żywności**



Katedra Przetwórstwa i Chemii Surowców Roślinnych

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**Mgr inż. Emilia Szabłowska**

# Wpływ mąki z żołędzi na wartość odżywczą oraz właściwości fizyczne wyrobów piekarskich i ciastkarskich

Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem:

**dr hab. inż. Małgorzaty Tańskiej, prof. UWM**

Olsztyn 2023

**UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN**

**Faculty of Food Sciences**



Department of Plant Raw Materials Chemistry and Processing

**DOCTORAL DISSERTATION**

**MSc. Eng. Emilia Szabłowska**

# Effect of acorn flour on nutritional value and physical properties of bakery and pastry products

Doctoral dissertation written under supervision of

**dr hab. eng. Małgorzata Tańska, prof. UWM**

Olsztyn 2023

*Składam najserdeczniejsze podziękowania*
***Pani Promotor dr hab. inż. Małgorzacie Tańskiej, prof. UWM***
*za nieocenioną pomoc i wsparcie na wszystkich etapach prowadzonych badań*
*i tworzenia rozprawy doktorskiej.*
*Przekazywana przez Panią Profesor wiedza, wsparcie merytoryczne*
*i inspiracja do podejmowania kolejnych działań*
*stanowiły podstawę do zrealizowania założeń naukowych i badawczych.*
*Cierpliwość Pani Profesor, nieustanne wsparcie i życzliwość pozwoliły uwierzyć,*
*że założone cele są możliwe do osiągnięcia.*

*Chciałabym również wyrazić swoją wdzięczność*
***Pani dr hab. inż. Millenie Ruszkowskiej, prof. UMG***
*za wsparcie merytoryczne w ocenie właściwości fizycznych i sorpcyjnych.*
*Dziękuję za możliwość realizacji stażu naukowego oraz każde dobre słowo.*

*Podziękowania kieruję do moich współpracowników*
*z **Wydziału Nauk Informatyczno-Technologicznych Akademii Łomżyńskiej**.*
*Dziękuję za cierpliwość i wyrozumiałość w chwilach nieobecności,*
*w których moja praca skupiała się na realizacji rozprawy doktorskiej.*

*Mojej Rodzinie dziękuję za ogromne wsparcie, które otrzymywałam na co dzień.*
*Mężowi – za każdą podaną kawę, każdy spacer*
*i każdą minutę poświęconą na wysłuchanie każdej wątpliwości i każdej radości.*
*Rodzicom – za czas poświęcony wnukowi wtedy, kiedy ja nie mogłam być obecna*
*i cierpliwość w chwilach, w których mi jej brakowało.*

*Synku, Tobie przede wszystkim dedykuję niniejszą pracę.*
*Najważniejszym tytułem zawsze będzie mama.*

# Spis treści

STRESZCZENIE....4
ABSTRACT....5
INFORMACJA O REALIZACJI I FINANSOWANIU BADAŃ....6
INFORMACJA O WŁĄCZENIU PUBLIKACJI W ZAKRES ROZPRAWY DOKTORSKIEJ ....7
1. WSTĘP – UZASADNIENIE PODJĘCIA BADAŃ....8
2. PRZEGLĄD LITERATURY ....10
2.1. Pochodzenie i występowanie żołędzi ....10
2.2. Zróżnicowanie gatunkowe żołędzi....13
2.3. Składniki bioaktywne w żołędziach ....16
2.4. Potencjalne zagrożenia związane ze spożyciem żołędzi....20
2.5. Historyczne i współczesne wykorzystanie żołędzi w żywności ....22
2.6. Produkcja mąki żołędziowej ....26
3. HIPOTEZA BADAWCZA, CEL GŁÓWNY I CELE SZCZEGÓŁOWE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ....29
3.1. Hipoteza badawcza ....29
3.2. Cel główny....29
3.3. Cele szczegółowe....29
4. PLAN BADAŃ....30
5. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ ....32
5.1. Materiał badań ....32
5.2. Procedury otrzymywania wyrobów piekarskich i ciastkarskich....33
5.2.1. Wypiek chleba pszennego i żytniego z dodatkiem mąki żołędziowej....33
5.2.2. Wypiek muffinów....36
5.2.3. Wypiek ciastek kruchych....38
5.3. Metody analityczne....39
5.3.1. Analiza podstawowego składu chemicznego mąk zbożowych i żołędziowych ....39
5.3.2. Oznaczenie cech fizycznych mąk żołędziowych....39
5.3.3. Ocena właściwości sorpcyjnych mąk żołędziowych ....40
5.3.4. Ocena właściwości wypiekowych mąk zbożowych i żołędziowych oraz ich mieszanek ....42
5.3.5. Ocena jakości technologicznej chleba ....45

5.3.6. Pomiar parametrów barwy mąk oraz wyrobów piekarskich i ciastkarskich .....46
5.3.7. Pomiar właściwości teksturalnych wyrobów piekarskich i ciastkarskich .....47
5.3.8. Ocena wartości odżywczej wyrobów piekarskich i ciastkarskich .....48
5.3.9. Ocena sensoryczna wyrobów piekarskich i ciastkarskich .....49
5.3.10. Oznaczenie profilu związków lotnych wybranych produktów ciastkarskich.....49
5.3.11. Oznaczenie ogólnej zawartości wolnych związków fenolowych w mąkach oraz wyrobach piekarskich i ciastkarskich.....50
5.3.12. Oznaczenie ogólnej zawartości wolnych flawonoidów w mąkach oraz wybranych wyrobach ciastkarskich .....51
5.3.13. Oznaczenie profilu związków fenolowych metodą chromatografii cieczowej w mąkach oraz wyrobach piekarskich i ciastkarskich.....51
5.3.14. Oznaczenie pojemności przeciwutleniającej mąk oraz wyrobów piekarskich i ciastkarskich.....53
5.4. Analiza statystyczna wyników.....54
6. REZULTATY BADAŃ.....55
6.1. Zmienność jakości i właściwości wypiekowych mąki żołędziowej w zależności od gatunku żołędzi i metody produkcji mąki.....55
6.1.1. Właściwości fizyczne i funkcjonalne mąki żołędziowej .....55
6.1.2. Skład chemiczny mąki żołędziowej.....56
6.2.2. Właściwości wypiekowe mąki żołędziowej .....58
6.2. Jakość mąki żołędziowej polskiej w porównaniu do mąki żołędziowej greckiej oraz mąk chlebowych .....61
6.2.1. Skład chemiczny mąk żołędziowych i mąk chlebowych.....62
6.2.2. Właściwości fizyczne mąk żołędziowych .....63
6.2.3. Właściwości sorpcyjne mąk żołędziowych .....66
6.3. Wpływ dodatku mąki żołędziowej polskiej na właściwości wypiekowe mąki pszennej ..72
6.3.1. Właściwości fermentograficzne i amylograficzne.....72
6.3.2. Właściwości farinograficzne.....75
6.3.3. Właściwości ekstensograficzne .....77
6.3.4. Właściwości technologiczne ciasta i chleba .....79
6.3.5. Właściwości fizyczne chleba .....83
6.4. Wpływ pochodzenia mąki żołędziowej i metody prowadzenia ciasta na jakość chleba pszennego i żytniego .....87
6.4.1. Właściwości technologiczne ciasta i chleba .....87

6.4.2. Właściwości fizyczne chleba ..... 90
6.4.3. Jakość sensoryczna chleba ..... 96
6.4.4. Wartość odżywcza chleba ..... 99
6.4.5. Zawartość związków fenolowych oraz pojemność przeciwutleniająca chleba ..... 101
6.4.6. Wpływ pochodzenia i dodatku mąki żołędziowej oraz metody prowadzenia ciasta na jakość chleba pszennego i żytniego oraz biodostępność związków fenolowych ..... 108
6.5. Wpływ dodatku i metody fermentacji mąki żołędziowej na jakość muffinów pszennych i biodostępność związków fenolowych ..... 113
6.5.1. Właściwości fizyczne muffinów ..... 113
6.5.2. Jakość sensoryczna muffinów ..... 118
6.5.3. Wartość odżywcza muffin ..... 120
6.5.4. Zawartość związków fenolowych oraz pojemność przeciwutleniającą muffinów ..... 122
6.5.5. Analiza statystyczna siły wpływu fermentacji mąki żołędziowej oraz jej dodatku na cechy muffinów ..... 127
6.6. Wpływ dodatku i pochodzenia mąki żołędziowej na jakość ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych oraz profil związków lotnych ..... 131
6.6.1. Cechy fizyczne ciastek kruchych ..... 131
6.6.2. Jakość sensoryczna ciastek kruchych ..... 136
6.6.3. Wartość odżywcza ciastek kruchych ..... 138
6.6.4. Profil związków lotnych ciastek kruchych ..... 141
6.5.5. Analiza statystyczna siły wpływu pochodzenia mąki żołędziowej oraz jej dodatku na cechy ciastek kruchych ..... 144
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI ..... 148
8. BIBLIOGRAFIA ..... 150
9. SPIS TABEL I RYSUNKÓW ..... 174
10. ZAŁĄCZNIKI ..... 178

## Streszczenie

Mąka żołędziowa stanowi przykład surowca, którego wprowadzenie do tradycyjnej żywności wzbogaca jej podstawowy skład o związki bioaktywne, takie jak: jednonienasycone kwasy tłuszczowe, sterole, tokoferole, składniki mineralne, związki fenolowe i błonnik pokarmowy. Ze względu na fakt, że jest to surowiec wysokoskrobiowy, naturalnym kierunkiem wykorzystania mąki żołędziowej w produkcji żywności jest jej wprowadzenie do wyrobów piekarskich i ciastkarskich. Jednakże ze względu na brak białek glutenowych oraz wysoką zawartość tłuszczu i błonnika pokarmowego, mąka żołędziowa może negatywnie wpływać na właściwości fizyczne produktów z jej udziałem.

Zrealizowane w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej badania opierały się na aktualnej wiedzy dotyczącej możliwości wykorzystania mąki żołędziowej w produkcji piekarskiej i ciastkarskiej jako składnika wzbogacającego w składniki bioaktywne, którą zebrano i opisano w publikacji przeglądowej, stanowiącej integralną część rozprawy doktorskiej. W części eksperymentalnej dokonano oceny składu chemicznego oraz właściwości mąki żołędziowej, którą następnie wprowadzono do receptur chleba pszennego i żytniego prowadzonego różnymi metodami, ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych oraz ciastek biszkoptowo-tłuszczowych (muffin). Wypieczone produkty oceniano pod względem właściwości fizycznych, sensorycznych i przeciwutleniających, oraz składu chemicznego, w tym szczególną uwagę zwrócono na profil związków fenolowych. W pracy analizowano wpływ zarówno wielkości dodatku (w zakresie 5-70%) i pochodzenia (mąki z żołędzi polskich i greckich), jak również obróbki mąki żołędziowej przed jej wprowadzeniem do produktu (brak obróbki, fermentacja spontaniczna i kierowana).

Przeprowadzone badania potwierdziły, że mąka żołędziowa różni się pod względem właściwości wypiekowych od mąk tradycyjnie stosowanych, a tym samym wpływa na cechy fizyczne produktów piekarskich i cukierniczych z jej udziałem, w tym przede wszystkim barwę, cechy tekstury, strukturę i objętość. Istotnym jest wpływ mąki żołędziowej na skład i zawartość związków fenolowych, wśród których najbardziej charakterystyczne dla surowca są kwasy fenolowe, głównie elagowy i galusowy. Stwierdzono, że sposób oddziaływania mąki żołędziowej na jakość wyrobów piekarskich i ciastkarskich zależny jest od jej pochodzenia i poziomu dodatku oraz zastosowanej obróbki wstępnej (fermentacji) i może być zmieniany w procesie produkcyjnym poprzez wybór metody prowadzenia ciasta.

**Słowa kluczowe:** mąka żołędziowa; chleb; ciastka; fermentacja; właściwości fizyczne; związki fenolowe; pojemność przeciwutleniająca

## Abstract

Acorn flour is an example of a raw material whose introduction into traditional food enriches its basic composition with bioactive compounds such as monounsaturated fatty acids, sterols, tocopherols, minerals, phenolic compounds and dietary fibre. Due to the fact that it is a high-starch raw material, the natural direction for the use of acorn flour in food production is its introduction into bakery and pastry products. However, due to its lack of gluten proteins and high fat and dietary fibre content, acorn flour can negatively affect the physical properties of products made with it.

The research carried out within the scope of this dissertation was based on current knowledge regarding the possibility of using acorn flour in bakery and pastry production as a bioactive enrichment ingredient, which was collected and described in a review publication, which is an integral part of the dissertation. In the experimental part, the chemical composition and properties of acorn flour were evaluated, which was then introduced into the recipes of wheat and rye baked goods carried out by different methods, wheat and gluten-free shortbread cookies and sponge cake (muffin). The baked products were evaluated for physical, sensory and antioxidant properties, as well as chemical composition, including special attention to the profile of phenolic compounds. The study analysed the effect of both the amount of additive (in the range of 5-70%) and the origin (Polish and Greek acorn flours), as well as the treatment of acorn flour before its introduction into the product (no treatment, spontaneous and directed fermentation).

The study confirmed that acorn flour differs in its baking properties from traditionally used flours, and thus affects the physical characteristics of bakery and confectionery products with its participation, including primarily colour, texture characteristics, texture and volume. Of significance is the effect of acorn flour on the composition and content of phenolic compounds, among which phenolic acids, mainly ellagic and gallic acids, are the most characteristic of the raw material. It was found that the way acorn flour affects the quality of bakery and pastry products depends on its origin and level of addition, as well as the pretreatment (fermentation) used and can be changed in the production process by selection of the dough method.


**Keywords:** acorn flour; bread; cookies; fermentation; physical properties; phenolic compounds; antioxidant capacity

## Informacja o realizacji i finansowaniu badań

Badania prowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane z wykorzystaniem:

- zaplecza analitycznego (aparatura, urządzenia) stanowiącego wyposażenie laboratoriów Katedry Przetwórstwa i Chemii Surowców Roślinnych, Wydział Nauki o Żywności, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie;
- zaplecza technologiczno-analitycznego (aparatura, maszyny, urządzenia), stanowiącego wyposażenie laboratoriów Zakładu Technologii i Bezpieczeństwa Żywności, Wydział Nauk Informatyczno-Technologicznych, Akademia Łomżyńska w Łomży.

Na realizację badań pozyskano finansowanie zewnętrzne ze środków Narodowego Centrum Nauki w Krakowie, w ramach projektu badawczego w konkursie PRELUDIUM 20:

- Tytuł projektu: „*Badania modelowe dotyczące zastosowania obróbki żołędzi i/lub mąki żołędziowej oraz warunków prowadzenia ciasta na cechy jakościowe i zawartość biodostępnych polifenoli w produktach piekarskich i ciastkarskich*”;
- Projekt nr 2021/41/N/NZ9/02668;
- Okres realizacji: 08.02.2022 r. – 07.02.2024 r.;
- Wartość projektu: 103 320 zł.

## Informacja o włączeniu publikacji w zakres rozprawy doktorskiej

Niniejszą rozprawę doktorską stanowią:

- zebrane i opracowane dane literaturowe w postaci opublikowanej publikacji przeglądowej, dotyczącej dotychczasowych osiągnięć nauki w zakresie produkcji, składu oraz wykorzystania mąki żołędziowej w produkcji piekarskiej i ciastkarskiej:

**P1. Szabłowska E.**, Tańska M., 2021. Acorn flour properties depending on the production method and laboratory baking test results: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 980-1008, https://doi.org/10.1111/1541-4337.12683

***IF = 15,786; MEiN$_{2021}$ = 200 pkt.***

*Wkład w powstanie publikacji dotyczył współudziału w opracowaniu koncepcji manuskryptu, zebrania i dokonania przeglądu dostępnej literatury, udziału w opracowaniu wstępnej i ostatecznej wersji manuskryptu. Szacowany udział procentowy: 75%.*

- wyniki badań własnych zrealizowanych w laboratorium, dotyczące składu i właściwości wybranych mąk żołędziowych oraz ich wpływu na cechy jakościowe wybranych produktów piekarsko-ciastkarskich, wchodzących w zakres badań zaplanowanych w ramach wymienionego wcześniej projektu badawczego otrzymanego w ramach konkursu PRELUDIUM 20.

# 1. Wstęp – uzasadnienie podjęcia badań

Żołędzie odgrywały istotną role żywieniową od czasów prehistorycznych. Rdzenna ludność wielu kultur na całym świecie wprowadzała żołędzie do diety jako jej główny składnik niezbędny do zapewnienia wyżywienia, oraz będący ważnym elementem tradycji kulinarnej oraz medycyny ludowej. Na przestrzeni dziejów znaczenie żołędzi malało, a w doniesieniach literaturowych zaczęto nadawać im miano „pożywienia czasów głodu" lub charakteryzować wyłącznie w kategorii pasz zwierzęcych. Jako problematyczną zaczęto postrzegać również wysoką zawartość tanin w żołędziach, powodującą konieczność stosowania dodatkowych procesów przetwórczych (Zocchi i in., 2022).

Chęć poznania nawyków i tradycji żywieniowych minionych pokoleń w ramach zyskującego na znaczeniu trendu „powrotu do korzeni" i wpisania historii odżywiania jako istotnego elementu historii rozwoju człowieka (Śmiałęk i Gutkowska, 2017) przyniosła ponowne zainteresowanie żołędziami, jako surowcem spożywczym. Ponadto coraz większy nacisk kładzie się na zrównoważony rozwój gospodarski i przyjazne dla środowiska procesy przemysłowe, w co również wpisuje się wykorzystanie żołędzi w produkcji żywności (Vinha i in., 2016). Żołędzie są przykładem surowca, którego wprowadzenie do tradycyjnej żywności wzbogaca jej podstawowy skład o związki bioaktywne, takie jak jednonienasycone kwasy tłuszczowe i sterole (Akcan i in., 2017), a także związki fenolowe i tokoferole, które wykazują silne właściwości przeciwutleniające (Papoti i in., 2018). Żołędzie wyróżnia również wysoka zawartość składników mineralnych, wśród których dominują: żelazo, cynk, miedź i wapń (Papoti i in., 2018). Ponadto triterpeny znajdujące się w żołędziach są potencjalnymi środkami przeciwcukrzycowymi i mogą zapobiegać zwłóknieniu wątroby (Lei i in., 2018).

Biorąc pod uwagę podstawowy skład chemiczny, w którym dominującym składnikiem jest skrobia (Silva i in., 2016) oraz uwzględniając istotny udział produktów piekarskich i cukierniczych w żywieniu człowieka (Ceglińska, 2017; Kazimierska, 2022), przetwarzanie żołędzi na mąkę oraz jej wprowadzenie do pieczywa i ciastek wydaje się być dobrym narzędziem do wzbogacenia diety człowieka o produkty żołędziowe.

Dostępne opracowania naukowe, dotyczące wykorzystania mąki żołędziowej w przemyśle piekarskim i ciastkarskim, pozostają w wielu przypadkach w sprzeczności. Autorzy wskazują na pozytywny wpływ mąki żołędziowej na wartość odżywczą produktów z jej udziałem, przy czym rezultaty badań nad wpływem mąki żołędziowej na cechy jakościowe i akceptację konsumencką są niejednoznaczne (Ajo, 2018; Amina i Djamel, 2018; Gonzaga i in., 2015; Hrušková i in., 2019; Kim i Joo, 2019; Korus i in., 2015, 2017; Martins i in., 2020;

Park i in., 2017; Parsei i in., 2018; Pasqualone i in., 2019; Purabdolah i in., 2020; Skendi i in., 2018; Švec i in., 2018; Torabi i in., 2020). Zmienność wyników testów wypiekowych może być zależna od wielu czynników, wśród których najważniejsze to, m.in., gatunek i pochodzenie żołędzi oraz związane z nimi czynniki środowiskowe, kształtujące jakość surowca, zastosowanie dodatkowych procesów obróbki żołędzi i/lub mąki żołędziowej przed wprowadzeniem do produktu, zróżnicowany skład recepturowy oraz metody wytwarzania produktów z mąką żołędziową. Z tego względu zasadne jest podejmowanie nowych badań, które pozwolą na opracowanie nowych technologii lub ulepszenie już istniejących, w celu wyprodukowania wyrobów piekarskich i ciastkarskich o podwyższonej wartości odżywczej i jednocześnie o akceptowalnych cechach fizycznych i sensorycznych.

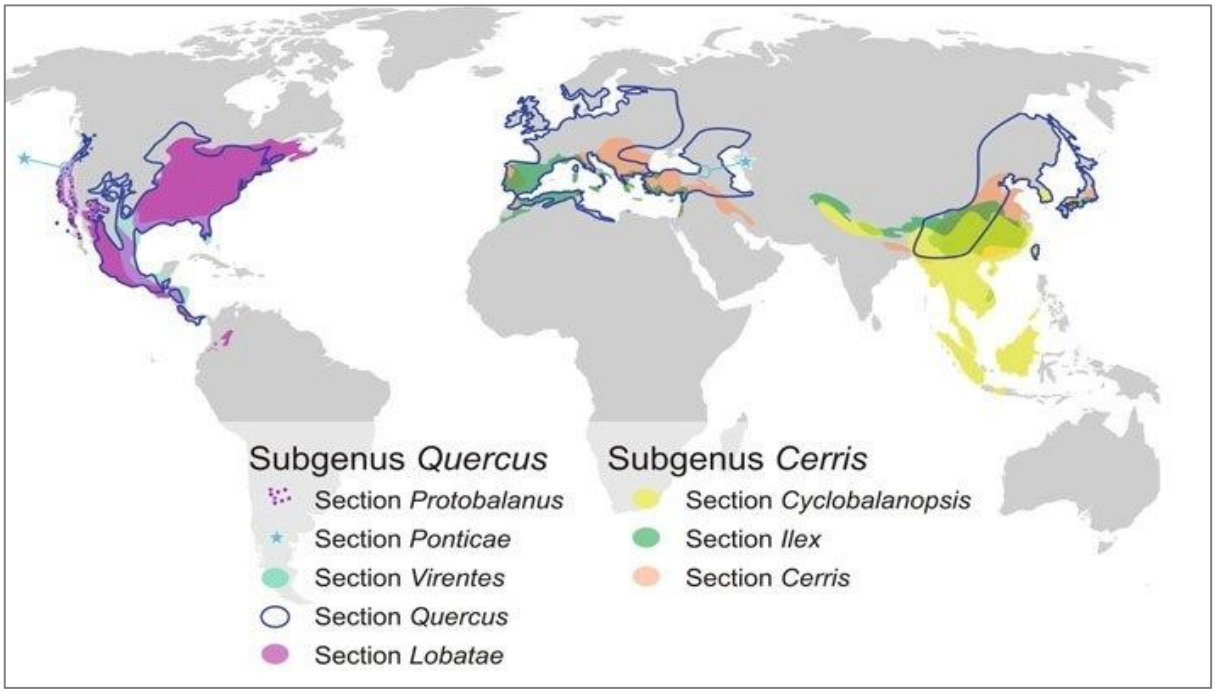
Zocchi i in. (2022) wskazują m.in. na konieczność prowadzenia badań, w których określony zostanie wpływ metod fermentacyjnych i produkcji zakwasów na zmiany zawartości związków fenolowych w produkcie finalnym, w tym tanin. Szczególnie ważnym wydaje się zrozumienie wpływu tych procesów na degradację elagotanin, jednej z głównych grup związków taninowych w żołędziach (Kiss i Piwowarski, 2016; Molina-García i in., 2018) i uwalnianie kwasu elagowego. Kwas elagowy, będący produktem rozkładu elagotanin, obok działania neuroprotekcyjnego, przeciwzapalnego, antyoksydacyjnego, w przewodzie pokarmowym człowieka wykorzystywany jest jako substrat do produkcji urolityn, związków bioaktywnych wykazujących pozytywne działanie w walce z nowotworami jelita grubego, otyłością, chorobami układu krążenia (Espín i in., 2013; García-Villalba i in., 2016; Giménez-Bastida i in., 2020; Kang i in., 2016).

Biorąc pod uwagę powyższe, w oparciu o dokonany w ramach niniejszej pracy przegląd dostępnej literatury podjęto badania, których głównym celem była ocena możliwości zastosowania mąki żołędziowej w produkcji piekarsko-ciastkarskiej z uwzględnieniem jej wpływu na cechy fizyczne, jakość sensoryczną i wartość odżywczą wyrobów. Podjęto również badania prowadzące do oceny wpływu wybranej metody obróbki mąki (różne warunki fermentacji) oraz metod prowadzenia ciasta (metody bezpośrednie i pośrednie) na potencjał przeciwutleniający wyrobów oraz profil i zawartość w nich wolnych związków fenolowych o potencjalnie większej biodostępności dla organizmu.

# 2. Przegląd literatury

## 2.1. Pochodzenie i występowanie żołędzi

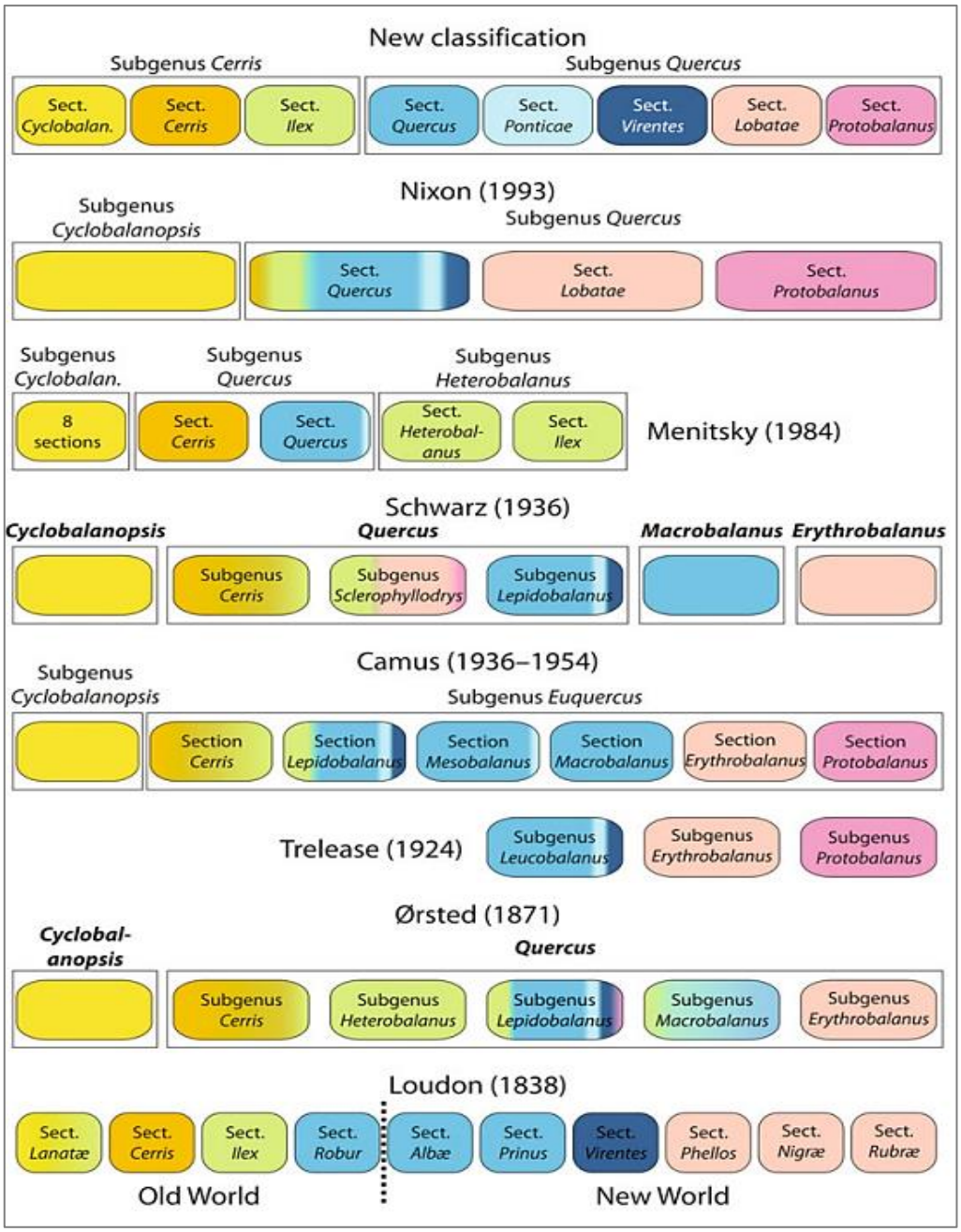
Żołędzie to owoce dębów – drzew rodzaju *Quercus ssp*., znane ludziom od pokoleń na całym świecie, w różnych narodach, kulturach i religiach (Tantray i in., 2017). Szacuje się, że światowa populacja dębów osiągać może do 600 różnych gatunków, których obszar występowania obejmuje przede wszystkim Europę, Amerykę Północną, północną część Afryki oraz Azję Mniejszą (Ballesteros i Pritchard, 2020) (**rysunek 1**). Siedliskiem występowania dębów są zarówno lasy liściaste strefy umiarkowanej, wiecznie zielone lasy strefy umiarkowanej i subtropikalnej, jak i subtropikalne i tropikalne sawanny (Sacchelli i in., 2021). Szeroki zakres występowania dębów, obejmujący ok. 40° szerokości i 75° długości geograficznej, związany jest z ich zdolnością do adaptacji do zróżnicowanych warunków klimatyczno-glebowych (Wang i in., 2023).




**Rysunek 1.** Rozmieszczenie dębów na świecie, z podziałem na podrodzaje i sekcje.
Źródło: Denk i in. (2017).

Jak podają Yang i in. (2016) oraz Wang i in. (2023), duża liczba między- i wewnątrzgatunkowych odmian dębów, będąca wynikiem między- i wewnątrzgatunkowej hybrydyzacji i introgresji, utrudniają taksonomiczną klasyfikację rodzaju *Quercus*.

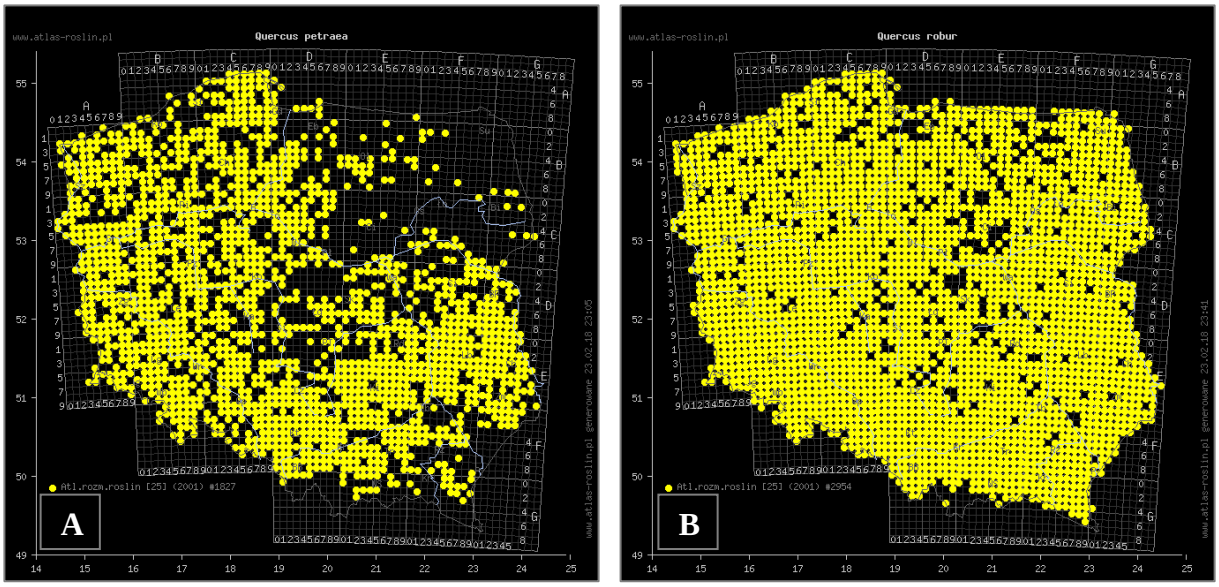
Na przestrzeni ostatnich 185 lat siedmiokrotnie podejmowano próby klasyfikacji dębów (**rysunek 2**). Najnowsza klasyfikacja została zaproponowana przez Denk i in. (2017) i obejmuje podział rodzaju *Quercus* na dwa podrodzaje (*Quercus* i *Cerris*), w ramach których wyróżniono osiem sekcji. Podstawą do podziału, w ramach nowej klasyfikacji, były cechy morfologiczne, zależności molekularno-filogenetyczne oraz historia ewolucji, a nie wyłącznie cechy morfologiczne, w oparciu o które dokonywano klasyfikacji gatunków we wcześniejszych opracowaniach.




**Rysunek 2.** Klasyfikacja taksonomiczna gatunku *Quercus*.

Źródło: Denk i in. (2017).

W Polsce najbardziej rozpowszechnione gatunki to dęby szypułkowe (*Q. robur*) i bezszypułkowe (*Q. petraea*) (**rysunek 3**). Rodzimym gatunkiem pozostaje również dąb omszony (*Q. pubescens*), uznany za gatunek zagrożony, którego występowanie w stanie naturalnym ograniczone jest obecnie do leśnego rezerwatu przyrody Bielinek w zachodniej Polsce (Milecka i in., 2004). Gatunkami wprowadzonymi, uznanymi za inwazyjne, są: wywodzący się z Ameryki Północnej dąb czerwony (*Q. rubra*) (Sawicki, 2011) oraz pochodzący z Turcji dąb burgundzki (*Q. cerris*) (Danielewicz i in., 2014).



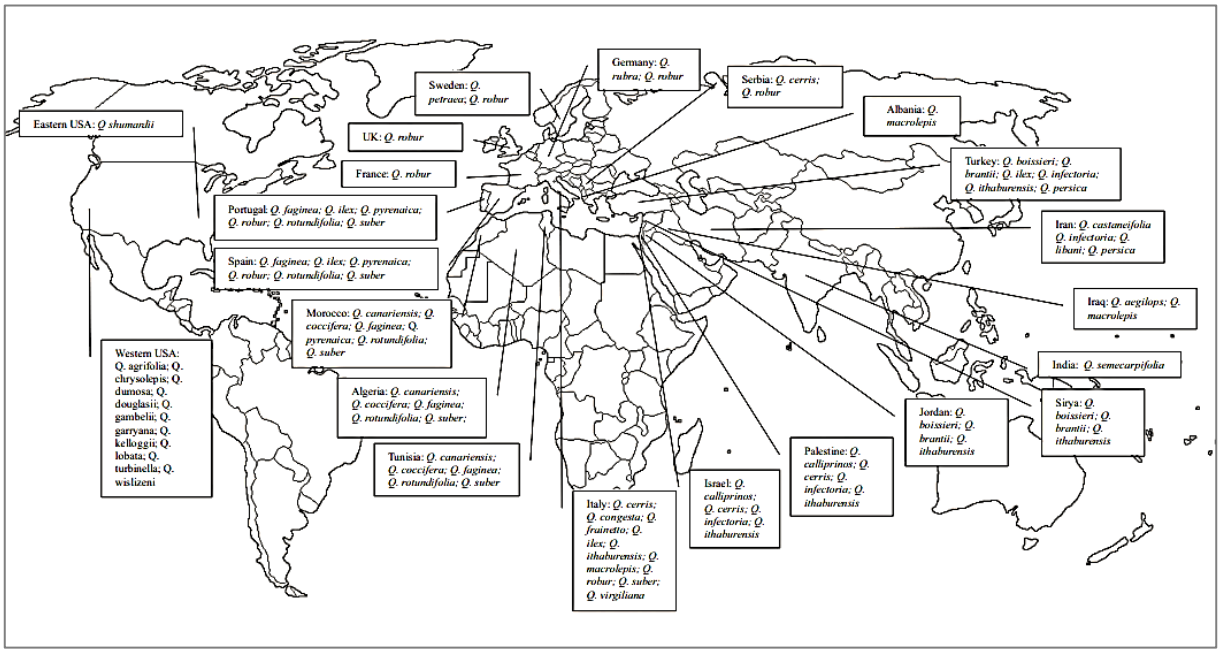

**Rysunek 3.** Rozmieszczenie dębów w Polsce: A – dąb bezszypułkowy (*Q. petraea*); B – dąb szypułkowy (*Q. robur*).
Źródło: https://atlas-roslin.pl/

Dęby mają długą historię uprawy w Europie i na innych kontynentach, a praktykowanie uprawy dębu obejmuje zarówno naturalne obszary leśne, jak i sztuczne zalesienia dokonane przez człowieka (Saha i in., 2017; Wang i in., 2023). W Polsce tereny leśne obejmują ok. 9435 tys. ha (z uwzględnieniem gruntów związanych z gospodarką leśną) (Bank Danych o Lasach, 2023), z czego drzewostany dębowe stanowią ok. 6% (Szewczyk i Kuźmiński, 2009). Dla porównania: w Chinach dęby stanowią ok. 13% ogólnej powierzchni lasów naturalnych (Wang i in., 2023), a w Iranie powierzchnia zajmowana przez dęby wynosi ok. 6 mln ha (Pourhashemi i in., 2013). Celowość prowadzenia upraw zależna jest od regionu, kulturowego znaczenia i gatunków dębów rosnących na danym terenie. Najczęściej wymieniane są cele nasiennicze i paszowe (Akli i in., 2022; Chirino i in., 2008; Pantera i in., 2018; Rodríguez-Estévez i in., 2012; Sacchelli i in., 2021; Stavi i in., 2022; Villar-Salvador i in., 2004). Stavi

i in. (2022) oraz Wang i in. (2023) wskazują równieżna pozyskiwanie z upraw dębów surowców na potrzeby produkcji żywności (żołędzie), drewna do produkcji mebli i beczek na wino, czy ekstraktów związków biologicznie aktywnychna potrzeby przemysłu farmaceutycznego i kosmetycznego.

## 2.2. Zróżnicowanie gatunkowe żołędzi

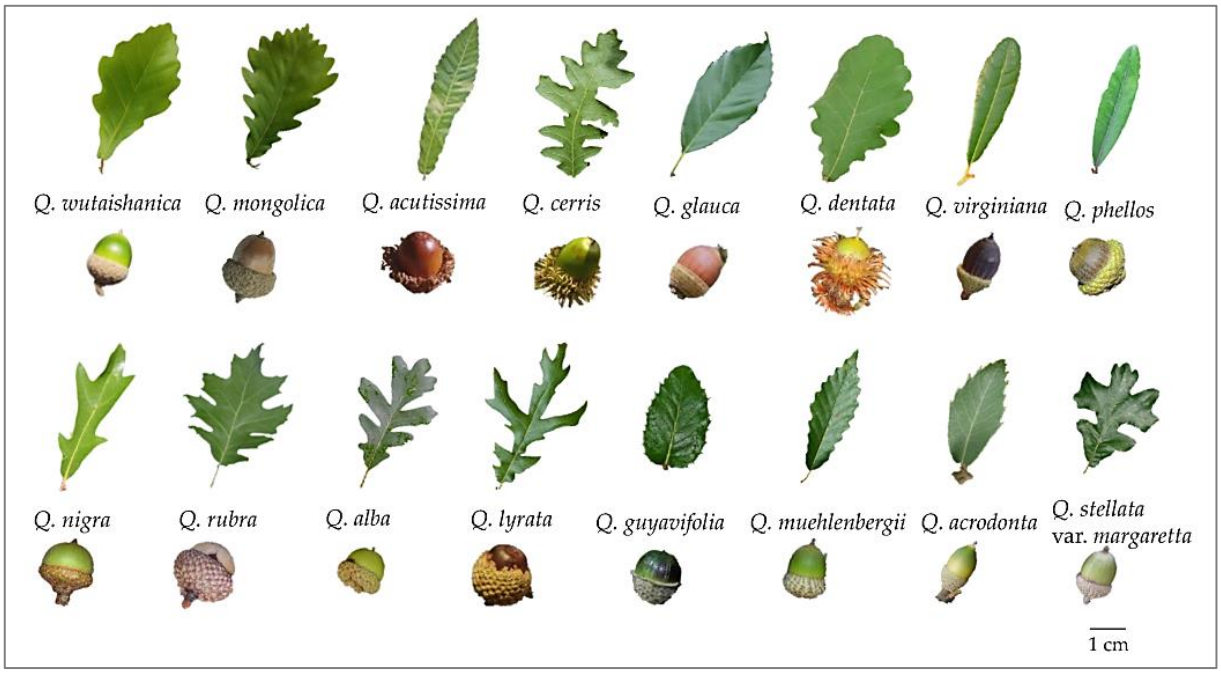
Szeroki zakres występowania na świecie oraz mnogość gatunków wpływają na zróżnicowane rozmieszczenie gatunków dębów w zależności od regionu (**rysunek 4**). Poszczególne gatunki dębów wykazują dużą zmienność morfologiczną w budowie liści oraz budowie i składzie chemicznym żołędzi. Czynnikami mającymi wpływ na zróżnicowanie morfologiczne i skład chemiczny roślin i ich owoców, w tym również dębów i żołędzi, są m.in. zmienność genetyczna wynikająca z różnic gatunkowych, czynniki środowiskowe, w tym przede wszystkim warunki klimatyczne oraz procesy adaptacyjne i współzależność z innymi gatunkami i mikroorganizmami (Koenig i Knops, 2014; O'Reilly-Wapstra i in., 2013; Wang i in., 2023).




**Rysunek 4.** Zróżnicowanie gatunkowe dębów na świecie.
Źródło: Stavi i in. (2022).

Wśród cech, które odróżniają żołędzie poszczególnych gatunków dębów wymienić można budowę miseczki, kształt, masę (wraz z procentowym udziałem stwardniałej owocni)

oraz wymiary (długość i średnica) (Gea-Izquierdo i in., 2006; Vinha i in., 2016a). Na **rysunku 5** przedstawiono przykładowe różnice w budowie liści i żołędzi wybranych gatunków dębów.




**Rysunek 5.** Różnice morfologiczne liści i żołędzi różnych gatunków dębów.
Źródło: Wang i in. (2023).

Różnice pomiędzy gatunkami dębów dotyczą również składu chemicznego żołędzi. Biorąc pod uwagę zainteresowanie żołędziami jako potencjalnym surowcem spożywczym, w niniejszej pracy zestawiono dane dotyczące podstawowego składu chemicznego wewnętrznej części żołędzia, właściwego nasiona, pozbawionego stwardniałej owocni (**tabela 1**).

Dominującym składnikiem żołędzi są węglowodany, a wśród nich skrobia. Zróżnicowanie zawartości skrobi w żołędziach jest bardzo duże i wynosi od 22,03 do 68,15 g/100 g s.m., do czego w dużej mierze przyczynia się stopień dojrzałości żołędzi, co wykazali w badaniach Ferraz de Oliveira i in. (2012). Jak podają Taib i in. (2021), skrobia żołędziowa cechuje się zawartością amylozy w przedziale 15-39%, a wielkość granulek skrobiowych podlega wahaniom w przedziale od 2 do 24 μm. Istotny jest również udział skrobi opornej, wynoszący do 41,4% (Taib i in., 2021).

Żołędzie, w zależności od gatunku, zawierają od 1,05 do 14,95% tłuszczu. Na zawartość tłuszczu, obok różnic gatunkowych, wpływać może także pochodzenie i związane z nim czynniki środowiskowe, które znacząco zmieniają zawartość tłuszczu w żołędziach

gatunku *Q. ilex* (Valero Galván i in., 2012). W przypadku składu kwasów tłuszczowych, Charef i in. (2008) w żołędziach gatunków *Q. ilex i Q. suber*, Tejerina i in. (2011) w żołędziach gatunku *Q. rotundifolia* oraz Lassoued i in. (2022) w żołędziach gatunków *Q. ilex* i *Q. coccifera* wykazali, że dominującym kwasem tłuszczowym był kwas oleinowy, którego udział w sumie kwasów tłuszczowych, w zależności od gatunku wynosił ok. 50-60%. Z kolei Özcan (2007) przedstawił wyniki badań, w których udział kwasu oleinowego był zbliżony lub niższy od udziału kwasu linolowego w żołędziach gatunków sklasyfikowanych do sekcji taksonomicznej *Quercus*, natomiast w żołędziach gatunków sekcji *Cerrus* dominującym pozostawał kwas oleinowy, z maksymalnym udziałem 54,3% w żołędziach gatunku Q. *brantii*. Niezależnie od udziału poszczególnych kwasów tłuszczowych, potwierdzono, że w oleju żołędziowym dominującą grupę stanowią nienasycone kwasy tłuszczowe (Charef i in., 2008; Özkan, 2007; Tejerina i in., 2011).

**Tabela 1.** Podstawowy skład chemiczny żołędzi różnych gatunków dębów.

| Gatunek dębu | Składniki [g/100 g s.m.] | | | | | Źródło |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tłuszcz | Białko | Węglowodany | Skrobia | Popiół | |
| *Q. brantii* | 0,72 | 3,37 | b.d. | 63,00 | 2,09 | Kaya i Kamalak (2012) |
| *Q. calliprinos* | 2,31 | 4,94 | 77,86 | b.d. | 1,78 | Rababah i in. (2008) |
| *Q. cerris* | 1,05 | 4,3 | b.d. | 64,55 | 1,75 | Kaya i Kamalak (2012) |
| *Q. coccifera* | 2,67 | 2,54 | b.d. | 66,2 | 1,81 | Kaya i Kamalak (2012) |
| *Q. ilex* | 9,14-14,95 | 3,90-5,94 | 8,95-12,47* | b.d. | 1,34-2,02 | Valero Galván i in. (2012) |
| *Q. infectoria* | 1,55 | 4,37 | b.d. | 68,15 | 1,95 | Kaya i Kamalak (2012) |
| *Q. ithaburensis* | 0,76 | 2,84 | 58,94 | b.d. | 3,21 | Rababah i in. (2008) |
| *Q. rotundifolia* | 8,38-13,51 | 3,56-4,34 | b.d. | 47,98-59,95 | 1,94-2,19 | Ferraz de Oliveira i in. (2012) |
| *Q. suber* | 2,09-8,22 | 6,19-9,38 | b.d. | 22,03-60,00 | 2,12-2,98 | Ferraz de Oliveira i in. (2012), Kaya i Kamalak (2012) |

* zawartość cukrów; b.d. – brak danych

Zawartość białka w żołędziach wynosi od 2,54 do 9,38 mg/100 g s.m. Przedstawione w **tabeli 1** wyniki wskazują na istotne zróżnicowanie zawartości białka w zależności od gatunku dębu, z którego pozyskano żołędzie. Ferraz de Oliveira i in. (2012) wykazali także różnice zawartości białka w żołędziach w zależności od ich stopnia dojrzałości (*Q. rotundifolia*), a Valero Galván i in. (2012) w zależności od pochodzenia (*Q. ilex*). Özcan

(2007), dokonując analizy dojrzałych żołędzi z 20 różnych gatunków dębów, zidentyfikował 14 różnych aminokwasów: 8 egzogennych i 6 endogennych. Głównymi aminokwasami były kwas asparaginowy i kwas glutaminowy, których zawartości wykazywały jednocześnie największe różnice między gatunkami. Natomiast najniższą zawartość cytowany autor stwierdził w przypadku metioniny. Najwyższą zawartość kwasu asparaginowego i glutaminowego potwierdzili również Lassoued i in. (2022) w żołędziach gatunków *Q. ilex* i *Q. coccifera*. Cytowani autorzy wykazali również wysoką zawartość leucyny w żołędziach.

Zawartość popiołu w żołędziach podlega stosunkowo niedużym wahaniom, osiągając maksymalnie wartość 3,21 g/100 g s.m. w żołędziach gatunku *Q. ithaburensis* z dominacją sodu, potasu i fosforu (Rababah i in., 2008). Lassoued i in. (2022) również stwierdzili najwyższą zawartość potasu i fosforu w żołędziach gatunków *Q. ilex* i *Q. coccifera*, ale istotną była również zawartość wapnia i magnezu (wynosząca odpowiednio 118,78 i 135,10 mg/100 g s.m. w *Q. ilex* oraz 67,51 i 69,63 mg/100 g s.m. w *Q. coccifera*). Bardzo duże zróżnicowanie zawartości składników mineralnych w zależności od gatunku dębu wykazali Özcan i Bayçu (2005). W badaniach tych autorów zawartość żelaza wahała się od 1,9 mg/100 g s.m. w żołędziach gatunku *Q. hartwissiana* do 202,0 mg/100 g s.m. w żołędziach gatunku *Q. petraea*, zawartość cynku od 0,69 (*Q. hartwissiana*) do 36,75 mg/100 g s.m. (*Q. infectoria*), a zawartość miedzi od 0,9 (*Q. infectoria*) do 10,49 mg/100 g s.m. (*Q. petraea*). Nikolić i in. (2006) dowiedli, że zawartość składników mineralnych w żołędziach zależała nie tylko od genotypu, ale także od powszechnie znanych czynników takich jak koncentracja pierwiastków w glebie, systemy ich pobierania przez korzenie, przemieszczania i redystrybucji w obrębie rośliny oraz zdolności do kumulacji w nasionach.

## 2.3. Składniki bioaktywne w żołędziach

Żołędzie od pokoleń znajdowały zastosowanie w tradycyjnych, ludowych metodach leczenia jako narzędzie w walce, m.in., z niestrawnością, biegunkami czy stanami zapalnymi (Karimian i in., 2020; Stavi i in., 2022; Taib i in., 2021). Współcześnie żołędziom przypisuje się działanie przeciwzapalne, przeciwbakteryjne, przeciwnowotworowe, przeciwcukrzycowe i gastroprotekcyjne, będące wynikiem zawartości fitoskładników, wśród których wymienia się związki fenolowe, triterpeny, sterole, tokoferole i karotenoidy (Burlacu i in., 2020; Taib i in., 2021). Charakterystyka składników bioaktywnych w żołędziach zależna

jest od ich gatunku, a dostępne opracowanie wskazują na zróżnicowanie ilościowe i jakościowe substancji aktywnych biologicznie (**tabela 2**).

Głównymi związkami fenolowymi, identyfikowanymi w ekstraktach z żołędzi, są kwasy fenolowe (przede wszystkim kwas galusowy, kwas elagowy i ich pochodne), flawonoidy (m.in. kwercetyna, katechina, naringina) oraz taniny (głównie elagotaniny i galotaniny). Przedstawione w literaturze wyniki najczęściej dotyczą zawartości ogółem wybranych grup związków oraz jakościowej oceny profilu (np. Bursal i Boğa, 2018; Cantos i in., 2003; Mezni i in., 2022; Molina-García i in., 2018). Istotnym jest zatem prowadzenie badań, które wskazywałyby na ilościowe oznaczenie poszczególnych kwasów fenolowych, flawonoidów i tanin.

**Tabela 2.** Zawartość składników bioaktywnych w żołędziach różnych gatunków.

| Gatunek | Grupa | Profil/podgrupa | Zawartość | Źródła |
|---|---|---|---|---|
| *Q. coccifera* | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 0,95 | Akcan i in. (2017), Kaya i Kamalak (2012), Lassoued i in. (2022) |
| | | γ-tokoferol | 4,51 | |
| | | δ-tokoferol | 0,18 | |
| | Sterole [%] | cholesterol | 0,37 | |
| | | campesterol | 2,53 | |
| | | stigmasterol | 2,66 | |
| | | β-sitosterol | 93,77 | |
| | | Δ 5-24stigmastadienol | 0,37 | |
| | | Δ 7-stigmastenol | 0,15 | |
| | | Δ 7-abvenasterol | 0,12 | |
| | Taniny [mg/100 g s.m.] | skondensowane | 2670 | |
| *Q. faginea* | Chlorofile [mg/100 g s.m.] | chlorofil a | 400 | Akcan i in. (2017), Vinha i in. (2016b) |
| | | chlorofil b | 0,2 | |
| | Karotenoidy [mg/100 g s.m.] | likopen | 18,3 | |
| | | β-karoten | 131,2 | |
| | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 1,15 | |
| | | γ-tokoferol | 4,03 | |
| | | δ-tokoferol | 0,09 | |
| *Q. ilex* | Chlorofile [mg/100 g s.m.] | chlorofil a | 200 | Akcan i in. (2017), Lassoued i in. (2022), Setti i in. (2020), Vinha i in. (2016b) |
| | | chlorofil b | 0,1 | |
| | Karotenoidy [mg/100 g s.m.] | likopen | 14,8 | |
| | | β-karoten | 47,3 | |
| | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 1,89 | |
| | | γ-tokoferol | 5,22 | |
| | | δ-tokoferol | 0,23 | |
| | Sterole [%] | cholesterol | 0,42 | |
| | | campesterol | 2,95 | |
| | | Stigmasterol | 4,53 | |
| | | β-sitosterol | 91,31 | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Δ 5-24stigmastadienol | 0,38 | |
| | | Δ 7-stigmastenol | 0,21 | |
| | | Δ 7-avenasterol | 0,19 | |
| | Flawonoidy [mg QE/100 g s.m.] | ogółem | 4392 | |
| | Związki fenolowe [mg GAE/100 g s.m.] | ogółem | 1100,17-5692 | |
| | Taniny [mg CE/100 g s.m.] | ogółem | 903 | |
| *Q. pyreneica* | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 1,74 | Akcan i in. (2017) |
| | | γ-tokoferol | 3,63 | |
| | | δ-tokoferol | 0,10 | |
| *Q. robur* | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 0,52-1,27 | Górnaś (2019), Rakić i in. (2007) |
| | | β-tokoferol | 0,01-0,14 | |
| | | γ-tokoferol | 18,86-42,30 | |
| | | δ-tokoferol | 0,40-1,14 | |
| | Związki fenolowe [mg GAE/100 g s.m.] | ogółem | 22300 | |
| | Taniny [mg GAE/100 g s.m.] | ogółem | 20400 | |
| *Q. rotundifolia* Lam. | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 1,24-1,33 | Ferraz de Oliveira i in. (2012), Tejerina i in. (2011) |
| | | γ-tokoferol | 5,75-10,79 | |
| | Związki fenolowe [mg GAE/100 g s.m.] | ogółem | 840-9163 | |
| | | skondensowane | 50-140 | |
| | Taniny [mg CE/100 g s.m.] | hydrolizujące | 950-1150 | |
| | | galotaniny | 740-860 | |
| | | elagotaniny | 210-290 | |
| *Q. rubra* | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 1,16-2,98 | Górnaś (2019) |
| | | β-tokoferol | 13,26-22,37 | |
| | | γ-tokoferol | 0,07-0,43 | |
| | | δ-tokoferol | 0,13-0,37 | |
| Q. *suber* | Chlorofile [mg/100 g s.m.] | chlorofil a | 300 | Akcan i in. (2017), Ferraz de Oliveira i in. (2012), Kaya i Kamalak (2012), Vinha i in. (2016) |
| | | chlorofil b | 0,1 | |
| | Karotenoidy [mg/100 g s.m.] | likopen | 7,9 | |
| | | β-karoten | 130,1 | |
| | Tokoferole [mg/100 g s.m.] | α-tokoferol | 1,71 | |
| | | γ-tokoferol | 3,80 | |
| | | δ-tokoferol | 0,17 | |
| | Związki fenolowe [mg GAE/100 g s.m.] | ogółem | 13290-23350 | |
| | Taniny [mg/100 g s.m.] | skondensowane | 2090 | |

Najwyższą zawartość związków fenolowych ogółem w żołędziach (do 23350 mg/100 g s.m.) przedstawili Ferraz de Oliveira i in. (2012) w przypadku gatunku *Q. suber*. Tejerina i in. (2011) w żołędziach gatunku *Q. rotundifolia* oznaczyli stosunkowo niską zawartość związków fenolowych ogółem (840-9163 mg/100 g s.m.), która zależna

była od okresu zbioru nasion w ciągu roku oraz na przestrzeni dwóch lat, wskazując na zmienność składu żołędzi w zależności od stopnia dojrzałości oraz sugerując ciągłe dojrzewanie żołędzi, zarówno na drzewie, jak i po zbiorze. Najczęściej występującymi kwasami fenolowymi w żołędziach są kwas galusowy i elagowy (Burlacu i in., 2020). W badaniach Rakić i in. (2006) kwas galusowy stanowił do 0,27% suchego ekstraktu z żołędzi (uprzednio poddanych obróbce termicznej). Molina-García i in. (2018) w profilu fenolowym żołędzi gatunku *Q. coccifera* zidentyfikowali 28 różnych związków, z czego 14 sklasyfikowano jako pochodne kwasu galusowego, w tym galusan metylu, pochodne galoilu, galusan galoilometylu i tetragalloilo-heksozyd.

Zawartość kwasu elagowego i galusowego w żołędziach wiąże się bezpośrednio z zawartością tanin, z których są uwalniane na drodze zachodzących procesów, m.in., na skutek działania temperatury, enzymów oraz kwasów i zasad (Pleszczyńska i Szczodrak, 2005). Taniny to spolimeryzowane pochodne polifenoli, o wysokiej reaktywności chemicznej i aktywności biologicznej (Pleszczyńska i Szczodrak, 2005; Łuczaj i in., 2014). Taniny powodują gorzki smak produktu oraz wykazują zdolność kompleksowania z białkami, polisacharydami i jonami metali, przez co traktowane są jako substancje antyodżywcze (Migaskó i Ecseri, 2020; Pleszczyńska i Szczodrak, 2005). W żołędziach dominującą grupą są taniny hydrolizujące, a przede wszystkim elagotaniny i galotaniny. W badaniach Rakić i in. (2007) zawartość tanin ogółem w żołędziach gatunku *Q. robur* wynosiła 22400 mg/100 g s.m. Tejerina i in. (2011) podali zawartość tanin hydrolizujących w żołędziach gatunku *Q. rotundifolia* na poziomie 950-1150 mg/100 g s.m. (a tanin skondensowanych 50-140 mg/100 g s.m.), z czego galotaniny stanowiły do 860 mg/100 g s.m., a elagotaniny do 290 mg/100 g s.m. Burlacu i in. (2020), wśród związków tworzących profil elagotanin w żołędziach, wymieniają weskalaginę, kastalaginę i roburyny.

Ze względu na zainteresowanie żołędziami jako surowcem do pozyskiwania oleju na cele spożywcze, kosmetyczne i farmaceutyczne, prowadzone badania oleju żołędziowego obejmują nie tylko profil kwasów tłuszczowych, ale również profil i zawartość tokoferoli oraz steroli (Al-Rousan i in., 2013; Makhlouf i in., 2018; Taib i Bouyazza, 2020). Dominującym homologiem tokoferolu w żołędziach jest γ-tokoferol (**tabela 2**), którego zawartość wynosi nawet do 42,30 mg/100 g s.m. w żołędziach gatunku *Q. robur*. Wyjątkiem jest gatunek *Q. rubra,* w którym najwyższą zawartość, wynoszącą 13,26-22,37 mg/100 g s.m., oznaczono dla β-tokoferolu (Górnaś, 2019). Badania przeprowadzone przez Al-Rousan i in. (2013) potwierdzają dominującą zawartość γ-tokoferolu w oleju żołędziowym. Taib i Bouyazza (2020) wskazują na olej żołędziowy, jako doskonałe źródło tokoferoli, w którym zawartość

tych bioaktywnych składników w zależności od gatunku żołędzi, z których pochodzi, może wahać się od 1440 do 1783 mg/kg oleju, co stanowi wartość zacznie wyższą niż w przypadku powszechnie znanych olejów, jak np. oliwa z oliwek (240 mg/kg oleju), olej słonecznikowy (737 mg/kg oleju) czy olej arachidowy (540 mg/kg oleju). Wysoka zawartość tokoferoli w oleju żołędziowym stanowi zabezpieczenie przed zachodzącymi w nim podczas przechowywania zmianami oksydacyjnymi (Seçmeler i Galanakis, 2019).

Drugą, obok tokoferoli, istotną grupą niezmydlających się substancji, wchodzących w skład tłuszczowej frakcji żołędzi, są sterole (León-Camacho i in., 2004). Jak podają Al-Rousan i in. (2013), zawartość steroli w oleju żołędziowym wynosić może do 8563 mg/kg oleju. Lassoued i in. (2020) zidentyfikowali w żołędziach gatunków *Q. coccifera* i *Q. ilex* siedem różnych steroli, wśród których dominującym był β-sitosterol (**tabela 2**). Al-Rousan i in. (2013), dokonując oceny oleju żołędziowego gatunków *Q. aegilops, Q. infectoria* i *Q. calliprinos*, zidentyfikowali 10 różnych steroli w każdym z gatunków, wśród których dominującym również był β-sitosterol, a następnie Δ 5-avenasterol, campesterol i stigmasterol.

Dostępne badania, dotyczące zawartości składników bioaktywnych w żołędziach oraz ich aktywności biologicznej wskazują na pozytywny wpływ tych substancji bioaktywnych na zdrowie człowieka, co może sugerować użyteczność żołędzi w opracowywaniu środków farmaceutycznych. Należy zwrócić uwagę na fakt, że konieczne jest prowadzenie kompleksowych badań, które ocenią szczegółowo profil i zawartość związków bioaktywnych w żołędziach oraz wyjaśnią mechanizmy ich oddziaływania na organizm (Burlacu i in., 2020; Taib i in., 2021).

## 2.4. Potencjalne zagrożenia związane ze spożyciem żołędzi

Charakterystyka fitochemiczna żołędzi, niezależnie od gatunku, wskazuje na stosunkowo wysoką zawartość tanin (**tabela 2**). Taniny to związki fenolowe o wysokiej masie molekularnej, wynoszącej od 500 do 3000 Da, będące wtórnymi metabolitami roślin. Taniny występują w różnych częściach roślin: nasionach, owocach, liściach, korzeniach i korze i pełnią funkcję ochronną – stanowią zabezpieczenie przed roślinożernymi zwierzętami i ptakami oraz insektami (Das i in., 2020; Hassanpour i in., 2011; Thakur i in., 2019). Ze względu na budowę i właściwości chemiczne taniny dzieli się na skondensowane (proantocyjanidyny) i hydrolizujące, a w tej grupie z kolei rozróżnia się elagotaniny i galotaniny (Hassanpour i in., 2011; Sharma i in., 2021). Taniny pozostają kontrowersyjną grupą

składników bioaktywnych w roślinach, ze względu na właściwości antyodżywcze i niekorzystne skutki zdrowotne, jakie mogą być obserwowane przy zwiększonym spożyciu tanin z jednej strony (Sharma i in., 2021; Thakur i in., 2019), a z drugiej – coraz częściej dokumentowany profilaktyczny i terapeutyczny wpływ na zdrowie człowieka (Das i in., 2020; Javaid i in., 2021; Serrano i in., 2009; Smeriglio i in., 2017).

Podstawowym działaniem antyodżywczym, przypisywanym taninom, jest ograniczenie strawności i biodostępności składników z pożywienia, ze względu na ich kompleksowanie. Taniny tworzą kompleksy zarówno z podstawowymi składnikami pokarmowymi (węglowodanami i białkami), jak i ze składnikami mineralnymi, np. fosforem, wapniem, magnezem czy żelazem. Wartość odżywcza pożywienia zostaje również obniżona przez kompleksowanie przez taniny enzymów trawiennych, biorących udział w trawieniu białek, węglowodanów i pektyn (Sharma i in., 2021).

Taninom przypisuje się często działanie antyoksydacyjne (Das i in., 2020; Serrano i in., 2009). Tymczasem Barbehenn i Constabel (2011) wskazują, że w zależności od struktury chemicznej oraz czynników fizykochemicznych środowiska (pH, potencjał redoks, stężenie utleniaczy i przeciwutleniaczy oraz działania enzymów: peroksydazy i katalazy), garbniki mogą wykazywać również działanie proutleniające. Z kolei Awad i in. (2001) podają, że taniny mogą same podlegać utlenianiu enzymatycznemu, co również zwiększa ich toksyczność.

Obok negatywnych aspektów związanych ze spożyciem tanin i ich wpływem na organizm człowieka, pojawiają się jednak nowe doniesienia podkreślające prozdrowotne właściwości produktów rozkładu garbników. Na przykład elagotaniny, jedna z grup garbników obecnych w żołędziach, ulegają hydrolizie w jelicie cienkim człowieka, a produkty ich hydrolizy, przede wszystkim kwas elagowy, wykazują działanie przeciwutleniające, przeciwzapalne i neuroprotekcyjne (Javaid i in., 2021). Ponadto kwas elagowy jest wykorzystywany przez mikroflorę jelitową człowieka jako substrat do produkcji urolityn, które zostały zidentyfikowane jako czynniki w walce z rakiem okrężnicy (Espín i in., 2013; García-Villalba i in., 2016; Giménez-Bastida i in., 2020; Kang i in., 2016). Podczas gdy wcześniejsze badania koncentrowały się na elagotaninach pochodzących z granatów, truskawek i orzechów (Espín i in., 2013), produkty z dodatkiem żołędzi mogą być nowym źródłem tych związków w diecie.

## 2.5. Historyczne i współczesne wykorzystanie żołędzi w żywności

Niezależnie od regionu występowania oraz gatunku dębu, na przestrzeni dziejów żołędzie stanowiły jeden z częściej występujących składników diety, a historyczne doniesienia o ich spożyciu dotyczą takich regionów i krajów jak: Basen Morza Śródziemnego (Pinna, 2013; Rakić i in., 2006; Silva i in., 2016), Azja Mniejsza i Bliski Wschód, Ameryka Środkowa, Wschodnia i Północna (Bainbridge, 1987) oraz Polska (Łuczaj, 2011) i sięgają czasów epoki kamienia gładzonego (neolitu) oraz epoki brązu (Migaskó i Ecseri, 2020). Opracowania dotyczące spożywania żołędzi w przeszłości, od czasów prehistorycznych do XIX-XX w. wskazują na stosunkowo proste formy ich przygotowywania, zależne od uwarunkowań kulturowych i tradycji regionalnych regionu (Stavi i in., 2022; Zocchi i in., 2022).

Opracowania archeologiczne przedstawiają wykorzystanie żołędzi w potrawkach, przyjmujących formę gulaszu oraz w przygotowaniu posiłków przypominających współcześnie gotowane kasze. Wymienia się również rolę naparów z żołędzi jako substytutów kawy (Bainbrigdge, 1987; Pignone i Laghetti, 2010; Zocchi i in., 2022). Od czasów prehistorycznych po współczesne znajduje się również zastosowanie dla żołędzi jako surowca w wypieku pieczywa. Na przestrzeni dziejów zmieniały się formy jego wypieku: doniesienia historyczne wskazują na przygotowywanie chlebków w formie płaskich placków i podpłomyków, których ciasto przygotowywano bez dodatku drożdży, a „pieczenie" prowadzono na patelni, a nie w piecach. Mąkę żołędziową stosowano samodzielnie lub w połączeniu z mąkami zbożowymi lub mąkami z nasion roślin strączkowych (Zocchi i in., 2022). Na Sardynii chleb żołędziowy, znany lokalnie pod nazwą „*Pan'Ispeli"*, przygotowywany był z mąki żołędziowej mieszanej z gliną i popiołem, a jego przygotowywanie wiązało się z ceremoniałem, któremu przypisywano religijne znaczenie (Pinna, 2013). Pignone i Laghetti (2010) wskazują również na tradycję wypieku chleba z żołędzi na Sardynii o nazwie „*pane di ghiande*", którego przygotowanie było bardzo złożone i rozpoczynało się od zbioru żołędzi w okresie jesiennym, suszenia i prażenia, specjalnej metody usuwania owocni poprzez uderzanie żołędziami zamkniętymi w woreczku z koziej skóry, a następnie obejmowało przygotowanie nasion poprzez gotowanie w wodzie wymieszanej z czerwoną gliną. Chleb wypiekano z ciasta z rozgotowanych żołędzi, przypominających owsiankę, w formie placków, które spożywano bezpośrednio po upieczeniu lub obsuszano w celu dalszego przechowywania.

W krajach azjatyckich w tradycji kulinarnej wykorzystuje się do czasów współczesnych skrobię żołędziową, z której przygotowuje się potrawę pod nazwą „*dotorimuk*", tłumaczoną

jako galaretka żołędziowa lub żołędziowe tofu. Ze sproszkowanych żołędzi połączonych z wodą wytwarza się również makaron żołędziowy („*dotori guksu*"), który przypomina makaron soba (Overstreet i in., 2015).

Współcześnie żołędzie straciły na znaczeniu jako samodzielny produkt spożywczy lub nawet jako składnik i są najczęściej kojarzone z paszami dla zwierząt (Vinha i in., 2016a). Wraz ze wzrostem znaczenia trendów dotyczących zdrowego stylu życia, powiązanego ze zmianą sposobu żywienia i wynikającego z tego spożywania surowców/produktów ekologicznych, naturalnego pochodzenia, o właściwościach funkcjonalnych, umacnia się także rola żołędzi jako alternatywnego i konkurencyjnego surowca spożywczego (Saccheli i in., 2021).

O ile w przeszłości zastosowanie żołędzi wiązane było przede wszystkim z wysoką zawartością skrobi, a tym samym wykorzystaniem żołędzi jako składnika wysokoenergetycznego i substytutu dla tradycyjnie stosowanych surowców wysokoskrobiowych (Migaskó i Ecseri, 2020), współczesne zastosowania dotyczą nie tylko wykorzystania żołędzi jako bazowego lub wzbogacającego składnika recepturowego, ale obejmują również możliwości zastosowania jako dodatków technologicznych, np. ze względu na stabilizujące właściwości skrobi żołędziowej (**tabela 3**). Zastosowanie żołędzi jako surowca w produkcji olejów i kawy czy przetwarzanie na mąkę i skrobię to tylko niektóre z przykładów kierunków wykorzystania żołędzi, którymi zajmują się obecnie zarówno naukowcy w swoich badaniach, jak i producenci żywności w przygotowywaniu oferty rynkowej (Akcan i in., 2017; Al- Rousan i in., 2013; García-Gómez i in., 2017; Makhlouf i in., 2018; Makhlouf i in., 2020; Pinna, 2013; Taib i Bouyazza, 2020).

Najpopularniejszym kierunkiem pozostaje wykorzystanie żołędzi do przygotowania pieczywa i wyrobów cukierniczych jako składnika wzbogacającego, wprowadzanego do współcześnie znanych form wypieków. W prowadzonych badaniach dąży się do uzyskania pieczywa, ciast i ciastek, w których mąka żołędziowa stanowić będzie źródło składników bioaktywnych i tym samym wpływać będzie pozytywnie na wartość odżywczą, a jednocześnie cechy gotowych wyrobów będą zbliżone do tych, które wytwarza się z surowców konwencjonalnych (Korus i in., 2015; Makhlouf i in., 2020).

**Tabela 3.** Wykorzystanie żołędzi w produkcji spożywczej i niespożywczej.

| Gatunek dębu | Cele spożywcze | Cele niespożywcze | Źródło |
|---|---|---|---|
| *Q. aegilops* | produkcja mąki i oleju, wypiek ciast i pieczywa, | cele paszowe | Abdel-Tawwab i in. (2021), Ajo (2018), |

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Q. brantii* | produkcja skrobi, wypiek ciast, ciastek i pieczywa | produkcja biosorbentów substancji czynnych | Al-Rousan i in. (2013), Papoti i in. (2018), Skendi i in. (2018) Molavi i in. (2015; 2018), Nourmoradi i in. (2018), Parsaei i in. (2018), Shishehbor i in. (2020) |
| *Q. calliprinos* | produkcja oleju | | Al-Rousan i in. (2013) |
| *Q. cerris* | | cele paszowe | Pugliese i in. (2009) |
| *Q. coccifera* L. | produkcja oleju i kawy, wypiek ciastek | | Makhlouf i in. (2018), Pasqualone i in. (2019), Sekeroglu i in. (2017) |
| *Q. fabri* | produkcja skrobi | | Lin i in. (2018) |
| *Q. glandulifera* Bl. | produkcja skrobi | | Li i in. (2015) |
| *Q. ilex* L. | produkcja mąki i skrobi, oleju, kawy i napojów, wykorzystanie w roli stabilizatorów dla przemysłu mleczarskiego, wypiek pieczywa i ciastek | cele paszowe | Amina i Djamel (2018), Amina i in. (2018), Coelho i in. (2018), Makhlouf i in. (2018), Martins i in. (2020), Mekki i in. (2019), Pasqualone i in. (2019), Sardão i in. (2021), Silva I in. (2016), Zarroug i in. (2020) |
| *Q. infectoria* | produkcja oleju | | Al-Rousan i in. (2013) |
| *Q. ithaburensis* | | produkcja kwasu elagowego na cele farmaceutyczne | Huang i in. (2007) |
| *Q. persica* | wypiek pieczywa | | Puradbdolah i in. (2020) |
| *Q. pubescens* | | cele paszowe | Pugliese i in. (2009) |
| *Q. robur* L. | produkcja mąki, wypiek ciastek | produkcja ekstraktu polifenolowego oraz tokoferoli na potrzeby przemysłu kosmetycznego i farmaceutycznego, cele paszowe | Belkova i in. (2023), Górnaś (2019), Kyriakidou i in. (2016), Migaskó i in. (2020), Polimac i in. (2015), Rakić i in. (2006), Šálková i in. (2011) |
| *Q. rotundifolia* | produkcja mąki i skrobi, wypiek pieczywa | | Correia i in. (2009), Correia i Beirão-da-Costa (2010; 2011), Gonzaga i in. (2015), Silva i in. (2016) |
| *Q. rubra* | produkcja oleju | ekstrakcja tokoferoli na potrzeby przemysłu kosmetycznego i farmaceutycznego | Górnaś (2019), Özcan (2008) |
| *Q. suber* L. | produkcja mąki, skrobi, oleju i kawy, wypiek ciast i ciastek | wykorzystanie na cele kosmetyczne | Coelho i in. (2018), Correia i in. (2009), Correia i Beirão-da-Costa (2010; 2011), Makhlouf i in. (2018), Masmoudi i in. (2020), Mota i in. (2022), Pasqualone i in. (2019) |

Doniesienia historyczne i współcześnie podejmowane prace nad wykorzystaniem żołędzi w produkcji żywności wskazują na różnice nie tylko w samych kierunkach wykorzystania żołędzi, ale również w ich odpowiednim spreparowaniu i obróbce wstępnej, przede wszystkim w celu zmniejszenia zawartości tanin. Bainbridge (1987) podaje, że Indianie, rdzenni mieszkańcy Ameryki Północnej, prowadzili odgoryczanie żołędzi poprzez mieszanie z bogatą w żelazo czerwoną ziemią lub popiołem drzewnym. Pinna (2013) podaje, że na Sardynii chleb żołędziowy przygotowywano z mąki żołędziowej mieszanej z gliną i popiołem, co również może wskazywać na zastosowanie tych składników w celu odgoryczenia surowców żołędziowych. Pignone i Laghetii (2010) przedstawili procedurę wypieku „chlebów" żołędziowych, w których żołędzie uprzednio poddawane były prażeniu i wymywaniu w wodzie z dodatkiem czerwonej gliny. Zocchi i in. (2022) przygotowali zestawienie tradycyjnych metod przetwarzania i wykorzystania żołędzi w krajach śródziemnomorskich i na Bliskim Wschodzie. Niezależnie od regionu żołędzie poddawano procesowi odgoryczania, a stosowane etapy i ich złożoność zależały prawdopodobnie od odmiany dębu, z którego pozyskiwano żołędzie i związanego z tym stężenia tanin w surowcu. Odgoryczanie obejmowało najczęściej prażenie (Włochy – Kalabria), gotowanie (Algieria, Afganistan, Irak i Syria) lub moczenie żołędzi w zimnej wodzie (Iran), a następnie suszenie nasion.

Odgoryczanie żołędzi, prowadzone współcześnie, opiera się na podobnych metodach i procesach, jakie stosowano w przeszłości, a mianowicie wymywanie tanin w wodzie, suszenie czy prażenie (Amina i in.,2018; Correia i in.,2009; Correia i Beirão-da-Costa, 2011). Większą uwagę przykłada się jednak do skuteczności prowadzonych zabiegów i możliwości ich modyfikacji pod kątem zwiększenia efektywności.

Dostępne dane literaturowe, obok żywieniowej roli żołędzi i możliwości wykorzystania w przemyśle spożywczym, wskazują również na niespożywcze ich zastosowanie (**tabela 3**). Liczne opracowania traktują o wykorzystaniu żołędzi na cele paszowe, co może korzystnie wpływać na zdrowotność zwierząt oraz cechy sensoryczne mięsa z nich pozyskiwanego (Martín-Gómez i in., 2019; Mekki i in., 2019; Pugliese i in., 2009; Tejerina i in., 2011). Potencjał fitochemiczny stanowi przyczynę do zainteresowania żołędziami w kontekście produkcji ekstraktów na cele kosmetyczne i farmaceutyczne (Belkova i in., 2023; Górnaś, 2019; Kyriakidou i in., 2016; López-Hortas i in., 2019). Karabas (2013a; 2013b; 2014) prowadził natomiast badania nad możliwością wykorzystania żołędzi w produkcji biopaliw. Wskazuje się również na możliwość wykorzystania żołędzi w produkcji biosorbentów (Nourmoradi i in., 2018).

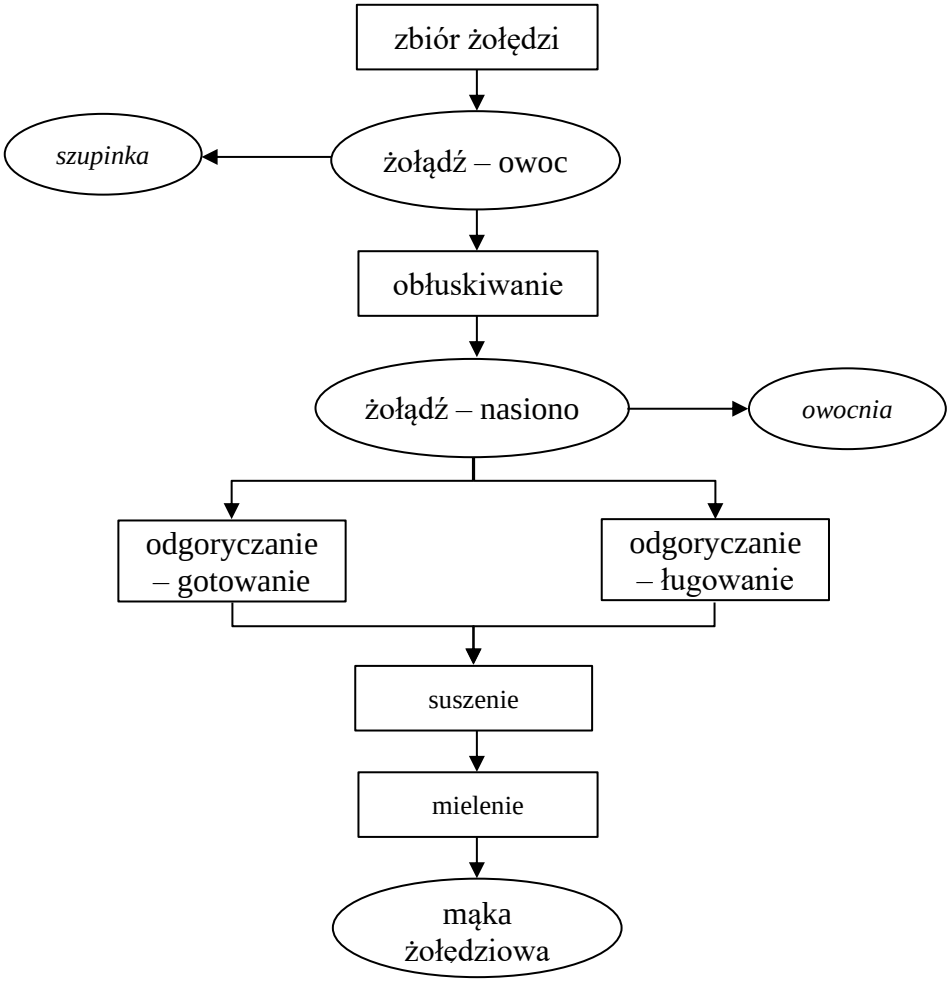
## 2.6. Produkcja mąki żołędziowej

Żołędzie, ze względu na specyfikę budowy morfologicznej oraz skład chemiczny, w przetwarzaniu na mąkę wymagają zastosowania odmiennych procesów niż standardowe metody produkcji tradycyjnych mąk zbożowych. Mąkę żołędziową uzyskuje się (**rysunek 6**) po usunięciu szupinki (miseczki) oraz stwardniałej owocni, poddając dalszemu przetwarzaniu wewnętrzne nasiono, określane również orzechem (Amina i in., 2018; Correia i in., 2009; Correia i Beirão-da-Costa, 2011). Wysoka wilgotność żołędzi powoduje pominięcie procesu kondycjonowania (nawilżania surowca), prowadzonego w produkcji mąk zbożowych, wymaga natomiast zastosowania procesu suszenia. Autorzy badań nad wytwarzaniem mąki żołędziowej przedstawiają różnorodne podejście do prowadzenia procesu suszenia żołędzi na różnych etapach produkcji mąki żołędziowej. Correia i in. (2009) oraz Gonzaga i in. (2015) prowadzili proces suszenia dwuetapowo, poddając działaniu temperatury całe żołędzie wraz z owocnią oraz zmielone nasiona. Amina i in. (2018) zastosowali suszenie jednoetapowe, które prowadzono w ostatniej fazie produkcji mąki, bezpośrednio przed rozdrabnianiem. Stosowany proces suszenia, a przede wszystkim działanie temperatury, wpływa na cechy uzyskiwanej mąki, przy czym im wyższa temperatura suszenia tym ciemniejsza mąka żołędziowa (Correia i in., 2009). Końcowym etapem produkcji mąki żołędziowej pozostaje rozdrabnianie surowca poprzez jego zmielenie (Amina i in., 2018; Correia i in., 2009; Correia i Beirão-da-Costa, 2011).

Jak już wcześniej wspomniano, żołędzie cechują się wysokim udziałem związków garbnikowych w swoim składzie, dlatego aby zmniejszyć gorzkość produktu końcowego, proponuje się dodatkowe etapy produkcji, prowadzące do wymywania tanin. Obecnie, usuwanie tanin z żołędzi najczęściej prowadzi się poprzez wymywanie w wodzie lub ługu (Hanson i in, 2019, Papoti i in., 2018; Šálková i in., 2011) lub stosując metody kombinowane, w których wymywanie łączy się z dodatkową obróbką termiczną, np. poprzez prażenie (Šálková i in., 2011).

Nowe dane literaturowe wskazują, że w prowadzonych badaniach poszukuje się również procesów, które zastosowane w przetwarzaniu żołędzi na mąkę wpłyną nie tylko na zmniejszenie w niej zawartości tanin, ale poprawią jej właściwości fizykochemiczne i funkcjonalne. Amina i in. (2018) zastosowali proces fermentacji z udziałem drożdży nasion żołędzi pozbawionych okrywy nasiennej oraz proces kiełkowania żołędzi poddanych uprzednio wypłukiwaniu wodą. Na drodze przeprowadzonych procesów uzyskano mąkę żołędziową o jaśniejszej barwie, większej chłonności wody i oleju, większej zdolności emulgującej

i zdolności pienienia w porównaniu z typową mąką żołędziową. Po zastosowanych procesach obróbki żołędzi, zmniejszeniu uległa również ogólna zawartość związków fenolowych w mące.




**Rysunek 6**. Schemat technologiczny produkcji mąki żołędziowej.
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Amina i in. (2018), Correia i in. (2009), Correia i Beirão-da-Costa (2011), Sacchelli i in. (2021).

Badania nad zastosowaniem żołędzi i mąki żołędziowej w produkcji żywności prowadzone są najczęściej z wykorzystaniem mąki produkowanej w warunkach laboratoryjnych. Jednakże obecnie obserwuje się coraz większe zainteresowanie mąkami niechlebowymi, w tym również mąką żołędziową, co sprawia, że jej wytwarzanie na skalę przemysłową jest coraz większe w krajach europejskich. W Polsce, w sklepach ze zdrową żywnością oraz za pośrednictwem stron internetowych, zakupić można mąkę żołędziową firmy Dary Natury, która jest obecnie jedynym producentem tej mąki w kraju. Za pośrednictwem Internetu możliwy jest również zakup mąki żołędziowej bezpośrednio od producentów z Grecji, Słowenii, Portugalii, Włoch czy Niemiec. Na **rysunku 7** przedstawiono handlowe mąki

żołędziowe oferowane przez producentów europejskich jako dodatek lub alternatywa mąki pszennej w produktach i daniach mącznych, w tym głównie do wypieku chleba oraz ciast i ciastek. Warto zwrócić uwagę, że chociaż dostępność mąki żołędziowej staje się coraz łatwiejsza, a także na stronach internetowych pojawia się coraz więcej pomysłów na jej wykorzystanie w warunkach domowych, to jednak do tej pory w Polsce nie znalazła ona zastosowania w przemyśle piekarniczym i ciastkarskim. Wydaje się, że lepsze poznanie właściwości mąki żołędziowej, w tym zwłaszcza fizycznych i wypiekowych, może pozwolić na opracowanie nowych technologii produkcji wyrobów z jej udziałem.




A B C

D E F

**Rysunek 7**. Dostępne na rynku mąki żołędziowe: A – polska; B – grecka; C – słoweńska; D – portugalska; E – włoska; F – niemiecka.

Źródła: https://darynatury.pl/; https://www.oakmeal.com/; https://www.zelod.si/; https://terrius.pt/; https://biowebstore.scontrinoshop.com/; https://www.naturkraftwerke.de/

# 3. Hipoteza badawcza, cel główny i cele szczegółowe rozprawy doktorskiej

## 3.1. Hipoteza badawcza

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury postawiono następującą hipotezę badawczą:

***Zastosowanie mąki żołędziowej w produkcji wyrobów piekarskich i ciastkarskich może poprawić ich wartość odżywczą i biodostępność zawartych w nich związków fenolowych, a ograniczenie niekorzystnego oddziaływania tej mąki na cechy fizyczne i sensoryczne produktów finalnych jest możliwe poprzez ustalenie odpowiedniego jej dodatku, zastosowanie odpowiedniej jej obróbki i/lub dobór metody wytwarzania produktu.***

## 3.2. Cel główny

Głównym celem rozprawy doktorskiej była ocena możliwości zastosowania mąki żołędziowej do wytwarzania wyrobów piekarskich i ciastkarskich o akceptowalnych cechach fizycznych i sensorycznych oraz o podwyższonej zawartości biodostępnych związków fenolowych.

## 3.3. Cele szczegółowe

W ramach rozprawy doktorskiej realizowano następujące cele szczegółowe:

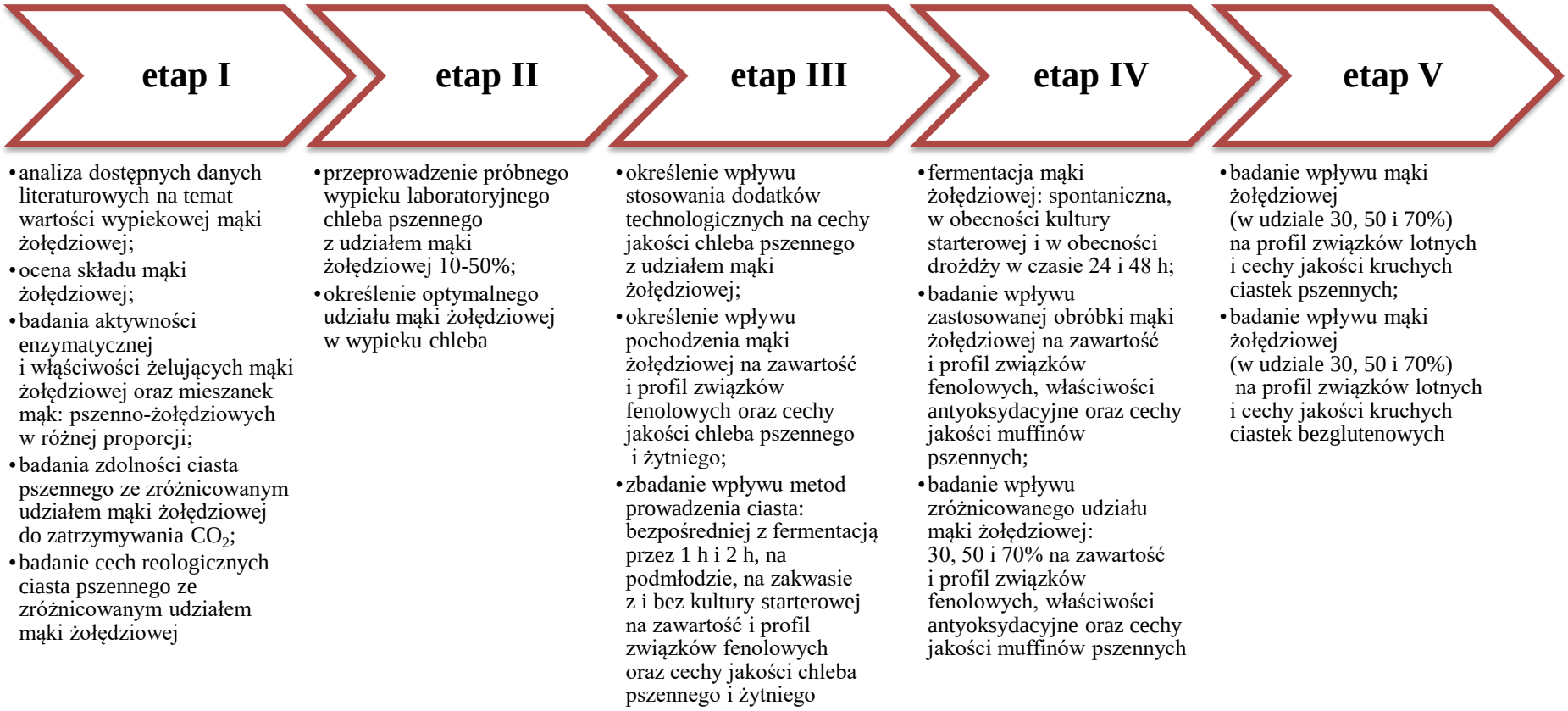
1) Ocena zmienności jakości i właściwości wypiekowych mąk żołędziowych produkowanych w różnych krajach.
2) Ocena jakości dostępnej na rynku polskim mąki żołędziowej w porównaniu do mąki żołędziowej innego pochodzenia oraz mąk chlebowych.
3) Ocena właściwości wypiekowych dostępnej na runku polskim mąki żołędziowej w porównaniu do wybranej mąki chlebowej.
4) Określenie wpływu pochodzenia i dodatku mąki żołędziowej oraz metody prowadzenia ciasta na jakość chleba pszennego i żytniego oraz biodostępność związków fenolowych.
5) Określenie wpływu dodatku i metody fermentacji mąki żołędziowej na jakość muffinów pszennych oraz biodostępność związków fenolowych.
6) Określenie wpływu pochodzenia i dodatku mąki żołędziowej na jakość ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych oraz profil związków lotnych.

# 4. Plan badań

Zaplanowane w ramach rozprawy doktorskiej badania zorganizowano w następujące zadania badawcze:

- **etap I:**
  ocena wartości wypiekowej mąki żołędziowej, dostępnej na polskim rynku – wykorzystanie pośrednich metod instrumentalnych w ocenie wartości technologicznej stosowanej mąki żołędziowej przy zróżnicowanym udziale względem mąki pszennej;
- **etap II:**
  ocena możliwości wykorzystania mąki żołędziowej, dostępnej na polskim rynku, w produkcji chleba pszennego w oparciu o próbny wypiek laboratoryjny metodą bezpośrednią;
- **etap III:**
  zbadanie wpływu składu recepturowego oraz metod prowadzenia ciasta na skład, właściwości przeciwutleniające oraz cechy jakości produktów piekarskich – badania wypieku chleba pszennego i żytniego, z użyciem mąki żołędziowej różnego pochodzenia (polskiej i greckiej) oraz dostępnych dodatków technologicznych (gluten witalny) w wypieku laboratoryjnym z zastosowaniem różnych metod fermentacji;
- **etap IV:**
  zbadanie wpływu metod wstępnej obróbki mąki żołędziowej poprzez fermentację różnymi metodami na uwalnianie kwasów fenolowych, właściwości przeciwutleniające oraz cechy jakości produktów cukierniczych – muffinów pszennych;
- **etap V:**
  zbadanie wpływu mąki żołędziowej na cechy jakości oraz profil związków lotnych ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych.

Organizację zadań badawczych przedstawiono na schemacie 1.




**Schemat 1.** Organizacja zadań badawczych, zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej.

# 5. Materiał i metodyka badań

## 5.1. Materiał badań

Materiałem do badań laboratoryjnych były handlowe mąki żołędziowe:

- mąka żołędziowa firmy Dary Natury (Koryciny, Polska), dostępna na polskim rynku, zakupiona w sklepie internetowym,
- mąka żołędziowa firmy Oakmeal (Kea, Grecja), greckiego pochodzenia, zakupiona bezpośrednio od producenta.

Obok mąk żołędziowych, stanowiących główny materiał do badań, w pracy wykorzystywano dostępne na polskim rynku mąki:

- mąka pszenna chlebowa typ 750 (Młyny Stoisław, Stoisław), zastosowana w wypieku chleba (gluten mokry = 1%, rozpływalność glutenu = 2 mm, wskaźnik sedymentacji = 35,67, liczba opadania = 373,60, kwasowość = 5,56 $cm^3$ NaOH/100 g, oznaczenia wykonano zgodnie z PN-EN ISO 21415-2:2015, PN-EN ISO 5529:2010, PN-EN ISO 3093:2010, PN-A-79011-9:1998);
- mąka żytnia typ 720 (Młyny Szczepanki, Szczepanki), zastosowana w wypieku chleba (liczba opadania = 252,60, kwasowość = 4,56 $cm^3$ NaOH/100 g, oznaczenia wykonano zgodnie z PN-EN ISO 3093:2010, PN-A-79011-9:1998);
- mąka pszenna typ 480 (Polskie Młyny S.A., Teresin), zastosowana w wypieku muffinów i ciastek kruchych;
- uniwersalna mąka bezglutenowa (skład: skrobia kukurydziana, mąka ryżowa, mąka sorgo, skrobia ryżowa, dekstroza, błonnik roślinny (psyllium), białko grochu, substancja zagęszczająca (hydroksypropylometyloceluloza), sól; Dr. Schär AG/SPA, Leifers, Włochy), zastosowana w wypieku ciastek kruchych.

W składzie recepturowym wypiekanych chlebów, obok mąk zbożowych i żołędziowych, w zależności od prowadzonego eksperymentu, znalazły się również: sól (Cenos, Września), drożdże piekarskie prasowane (Lesaffre Polska SA, Wołczyn), kultura starterowa LV1 (*Lactobacillus brevis* i *L. casei* 2%; *Saccharomyces cerevisiae* 98%; Livendo, Cérences, Francja), gluten pszenny witalny (Green Essence, Pyrzyce).

Mąka żołędziowa polska, zastosowana w wypieku muffinów, poddawana była fermentacji spontanicznej (bez dodatków) oraz fermentacji w obecności kultury

starterowej LV1 (*L. brevis* i *L. casei* (2 %); *Saccharomyces cerevisiae* (98 %); Livendo, Cérences, Francja) i fermentacji w obecności drożdży piekarskich prasowanych (Lesaffre Polska SA, Wołczyn). Obok mąki pszennej i mąki żołędziowej polskiej w składzie recepturowym muffinów znalazły się również: cukier (Polski Cukier, Krajowa Grupa Spożywcza S.A., Toruń), olej rzepakowy (Zakłady Tłuszczowe Kruszwica, Bunge Polska Sp. z o.o., Kruszwica), jaja kurze całe (Jantex, Środa Wielkopolska), mleko świeże 3,2% tłuszczu (OSM Piątnica, Piątnica), proszek do pieczenia (Delecta, FoodWell Sp. z o.o., Włocławek), cukier wanilinowy (Delecta, FoodWell Sp. z o.o., Włocławek), sól (Cenos, Września).

W składzie recepturowym wypiekanych ciastek, obok mąki pszennej, bezglutenowej oraz żołędziowej, znalazły się również: jaja kurze całe (Jantex, Środa Wielkopolska), mleko świeże 3,2% tłuszczu (OSM Piątnica, Piątnica), masło extra 82% tłuszczu (Mlekovita, Wysokie Mazowieckie), cukier puder (Polski Cukier, Krajowa Grupa Spożywcza S.A., Toruń), cukier wanilinowy (Delecta, FoodWell Sp. z o.o., Włocławek), proszek do pieczenia (Delecta, FoodWell Sp. z o.o., Włocławek), sól (Cenos, Września).

## 5.2. Procedury otrzymywania wyrobów piekarskich i ciastkarskich

### 5.2.1. Wypiek chleba pszennego i żytniego z dodatkiem mąki żołędziowej

Wypiek chleba przeprowadzono z ciasta prowadzonego następującymi metodami: bezpośrednią (z fermentacją 1 h i 2 h), na podmłodzie oraz na zakwasie (z kulturą starterową – metodą 2-fazową i bez kultury starterowej – metodą 5-fazową). Mąkę pszenną stosowano do przygotowania chlebów wszystkimi metodami, a mąkę żytnią do wypieku chleba metodą bezpośrednią oraz na zakwasie z kulturą starterową i bez kultury starterowej. Chleby pszenne i żytnie przygotowano w trzech wariantach: bez dodatku mąki żołędziowej, z mąką żołędziową polską i mąką żołędziową grecką. We wszystkich wariantach chleba z dodatkiem mąki żołędziowej substytucja mąki zbożowej mąką żołędziową wynosiła 30%. Składy recepturowe otrzymanych chlebów przedstawiono w **tabeli 4**. Etapy wytwarzania chlebów, w zależności od metody prowadzenia ciasta, przedstawiono na **rysunku 8**.

W bezpośredniej metodzie prowadzenia ciasta mąkę, wodę, sól i drożdże mieszano w mikserze uniwersalnym, wyposażonym w hak do wyrabiania ciasta (JAZ S.R.O., Nové Mesto nad Váhom, Słowacja) przez 6 min. Po wymieszaniu ciasto umieszczono w komorze rozrostowej pieca piekarniczego (Quail Mini Piccolo 4; Wachtel, Hilden, Niemcy)

i fermentowano w temperaturze 35°C przy wilgotności względnej 85% (RH) przez 60 min lub 120 min, z przebijaniem ciasta odpowiednio po 30 i 60 min (tylko warianty ciasta pszennego).

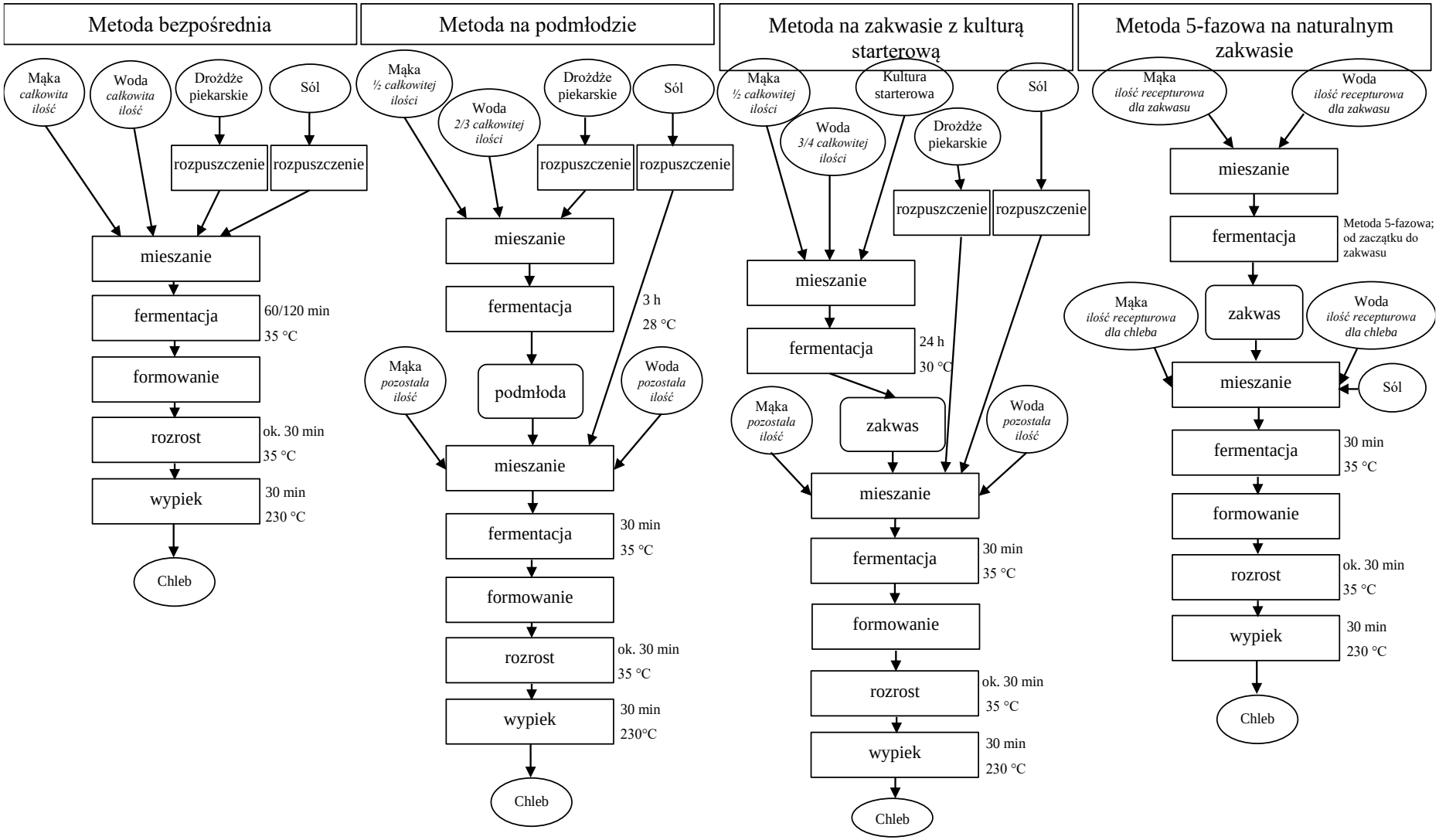
W metodzie prowadzenia ciasta na podmłodzie połowę ogólnej ilości mąki mieszano z drożdżami i wodą w proporcji pozwalającej na uzyskanie 180% wydajności podmłody. Podmłodę fermentowano w temperaturze 28°C przy wilgotności względnej 85% przez 3 h w komorze rozrostowej. Następnie mieszano przez 6 min z pozostałą ilością mąki i wody oraz solą. Po wymieszaniu ciasto umieszczono w komorze rozrostowej i fermentowano w temperaturze 35°C przy wilgotności względnej 85% przez 30 min.

**Tabela 4.** Skład recepturowy wypiekanego chleba.

| Składniki | Metoda bezpośrednia | | Metoda na podmłodzie | | Metoda na zakwasie z kulturą starterową | | Metoda 5-fazowa na naturalnym zakwasie | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | g | % ciasta | g | % ciasta | g | % ciasta | g | % ciasta |
| Mąka | 400 | 57,14 /51,28* | 400 | 57,14 /51,28* | 400 | 57,67 /51,71* | 789,54 | 60,92 /56,56* |
| Woda | 280/360* | 40 /46,15* | 280/360* | 40 /46,15* | 280/ 360* | 40,37 /46,53* | 490,46 /590,46* | 37,85 /42,29* |
| Drożdże piekarskie | 12 | 1,72 /1,54* | 12 | 1,72 /1,54* | 4 | 0,58 /0,52* | – | – |
| Kultura Starterowa | – | – | – | – | 1,6 | 0,23 /0,21* | – | – |
| Sól | 8 | 1,14 /1,03* | 8 | 1,14 /1,03* | 8 | 1,15 /1,03* | 16 | 1,23 /1,15* |
| Razem | 700/780* | 100 | 700/780* | 100 | 693,6/ 773,6* | 100 | 1296 /1396* | 100 |

* Warianty z mąką żołędziową.

W metodzie na zakwasie z kulturą starterową (2-fazowej) połowę ogólnej ilości mąki mieszano z kulturą starterową i 75% ogólnej ilości wody. Zakwas fermentowano w temperaturze 30°C przy wilgotności względnej 85% przez 24 h w komorze rozrostowej. Kwasowość zakwasu po 24 h fermentacji, wyrażona jako pH, wynosiła 3,89 i 3,54, odpowiednio dla zakwasu pszennego i żytniego. Następnie zakwas mieszano z pozostałą ilością mąki i wody, drożdży i soli. Dalsze postępowanie było takie same jak dla ciasta na podmłodzie.




**Rysunek 8.** Schemat procesu wypieku chleba dla każdej metody prowadzenia ciasta.

W prowadzeniu ciasta na zakwasie bez kultury starterowej zastosowano metodę 5-fazową. Wszystkie etapy wytwarzania zakwasu i fermentacji ciasta prowadzono w komorze rozrostowej przy wilgotności względnej 85%. Faza I (wytworzenie zaczątku): 100 g mąki wymieszano z 200 g wody i fermentowano w temperaturze 28°C przez 24 h. Następnie 100 g zaczątku mieszano ze 100 g mąki i 100 g wody i fermentowano w tych samych warunkach. Kolejno 100 g zaczątku zmieszano ze 100 g mąki i 100 g wody i fermentowano w temperaturze 35°C przez 8 h. Na koniec 100 g zaczątku zmieszano ze 100 g mąki i 100 g wody i fermentowano w temperaturze 28°C przez 16 h. Faza II (wytworzenie przedkwasu): 100 g zaczątku zmieszano ze 160 g wody i 130 g mąki i fermentowano w temperaturze 26°C przez 8 h. Faza III (wytworzenie półkwasu): 100 g przedkwasu wymieszano z 35 g wody i 85 g mąki i fermentowano w temperaturze 28°C przez 10 h. Faza IV (wytworzenie zakwasu): całość półkwasu zmieszano z 250 g wody i 280 g mąki i fermentowano w temperaturze 30°C przez 5 h. Kwasowość dojrzałego zakwasu, wyrażona jako pH, wynosiła 3,80 i 3,71, odpowiednio dla zakwasu pszennego i żytniego. Faza V (wytworzenie ciasta): zakwas mieszano z pozostałą ilością mąki i wody, drożdży i soli. Dalsze postępowanie było takie same jak dla ciasta na podmłodzie.

Po zakończonym prowadzenia ciasta wszystkimi metodami, uformowano 300 g kęsy ciasta i pozostawiono do fermentacji w temperaturze 35°C przy wilgotności względnej 85% przez około 30 min do uzyskania optymalnej objętości. Na koniec uformowane kęsy wypiekano w piecu Quail Mini Piccolo 4 w temperaturze 230°C przez 30 min. Dla każdego rodzaju ciasta przeprowadzono trzy niezależne, powtarzalne próby wypiekowe. Łącznie uzyskano 16 wariantów chlebów.

Jedną część próbek chlebów z każdego wariantu schłodzono i poddano analizie po 24 h (analizy fizyczne i sensoryczne), a drugą część próbek chlebów schłodzono przez 2 h w temperaturze pokojowej i zliofilizowano (liofilizator Gamma 2-16 LSC; Christ, Osterode am Harz, Niemcy) do analiz chemicznych. Wszystkie liofilizaty zmielono (Büchi Mixer B-400; Büchi Labortechnik, Flawil, Szwajcaria) i przechowywano w temperaturze 20 ± 2°C do momentu przeprowadzenia analiz, ale nie dłużej niż przez 3 tygodnie.

### 5.2.2. Wypiek muffinów

Muffiny wypiekane były z ciasta biszkoptowo-tłuszczowego, wytwarzanego z mąki pszennej (próbka kontrolna) i mąki żołędziowej polskiej, zarówno nie poddanej obróbce

jak fermentowanej: spontanicznie, w obecności kultury starterowej i w obecności drożdży piekarskich.

Fermentacja mąki żołędziowej, niezależnie od typu, prowadzona była w tych samych warunkach: 400 g mąki żołędziowej wymieszano z 600 ml wody i poddawano inkubacji w szklanym naczyniu w temperaturze 27°C w czasie 12, 24, 36 i 48 h w komorze klimatycznej HPP 110 (Memmert GmbH&Co, Büchenbach, Niemcy). W przypadku fermentacji spontanicznej do mąki nie wprowadzono dodatkowych składników, w przypadku fermentacji w obecności kultury starterowej zastosowano dodatek 1,6 g kultury LV1, a w przypadku fermentacji w obecności drożdży zastosowano dodatek 6 g drożdży piekarskich. Kwasowość mąki po 48 h fermentacji, wyrażona jako pH, wynosiła: 4,52; 4,36 i 4,60, odpowiednio dla próbki poddanej fermentacji spontanicznej, z dodatkiem kultury starterowej i z dodatkiem drożdży piekarskich.

Proporcje składników, wykorzystywanych w przygotowaniu ciasta biszkoptowo-tłuszczowego, były następujące: próbkę kontrolną przygotowano poprzez połączenie 100 g mąki pszennej z 50 g cukru, 40 ml oleju, 30 ml mleka, 30 g całych jaj, 4 g cukru wanilinowego, 4 g proszku do pieczenia i 0,5 g soli. W wariantach z mąką żołędziową nie poddaną obróbce 30, 50 i 70 g mąki pszennej zastąpiono mąką żołędziową (próbki odpowiednio 30, 50 i 70% mąki żołędziowej). Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej nie poddanej obróbce, zwiększano ilość mleka odpowiednio do 45, 55 i 65 ml. W wariantach z mąką żołędziową fermentowaną, niezależnie od typu fermentacji, 30, 50 i 70 g mąki pszennej zastąpiono mąką żołędziową fermentowaną w ilości 75, 125 i 175 g (próbki odpowiednio z 30, 50 i 70% mąki żołędziowej).

Wszystkie rodzaje muffinów przygotowano w ten sam sposób. W pierwszej kolejności składniki suche połączono ze sobą. Jajka ubijano z cukrem (mikser uniwersalny wyposażony w rózgę do ubijania, JAZ S.R.O., Nové Mesto nad Váhom, Słowacja) do uzyskania puszystej masy cukrowo-jajecznej przez 5 min. Po tym czasie do masy wlewano cienką strużką olej, nie przerywając ubijania. Dodano mleko i suche składniki i wymieszano masę na jednolite ciasto, prowadząc mieszanie do momentu połączenia składników. Ciasto rozlano do silikonowej formy do wypiekania muffinów (jedna porcja ciasta wynosiła 30 g). Wypiek prowadzono w temperaturze 180°C przez 25 min w modułowym piecu piekarniczo-cukierniczym Quail Mini Piccolo 4 (Wachtel, Hilden, Niemcy). Łącznie wypieczono 40 wariantów muffinów, z których na podstawie wstępnej oceny (m.in. oceny sensorycznej i cech fizycznych) do dalszych badań wybrano 22 warianty z mąką żołędziową

niefermentowaną oraz fermentowaną przez 24 h i 48 h spontanicznie, z kulturą starterową i z drożdżami.

Jedną część próbek muffinów schłodzono i poddano analizie po 24 h (analizy fizyczne i sensoryczne), a drugą część próbek muffinów schłodzono przez 2 h w temperaturze pokojowej i zliofilizowano (liofilizator Gamma 2-16 LSC; Christ, Osterode am Harz, Niemcy) do analiz chemicznych. Wszystkie liofilizaty zmielono (Büchi Mixer B-400; Büchi Labortechnik GA, Flawil, Szwajcaria) i przechowywano w temperaturze 20 ± 2°C do momentu przeprowadzenia analiz, ale nie dłużej niż 3 tygodnie.

### 5.2.3. Wypiek ciastek kruchych

Ciastka kruche wypiekano z ciasta bazującego na mące pszennej lub mące bezglutenowej (próbki kontrolne), do których wprowadzano mąkę żołędziową polską i grecką. Poszczególne warianty ciastek kruchych charakteryzowały się trzema różnymi stopniami zastąpienia mąki bazowej mąką żołędziową: 30%, 50% i 70%. Łącznie uzyskano 14 wariantów ciastek kruchych.

Proporcje składników, wykorzystywanych w przygotowaniu ciasta kruchego, były następujące: próbkę kontrolną przygotowano poprzez połączenie 200 g mąki pszennej lub bezglutenowej z 75 g cukru pudru, 50 ml mleka, 100 g masła, 100 g całych jaj, 4 g proszku do pieczenia i 1 g soli. W wariantach z mąką żołędziową 60, 100 i 140 g mąki pszennej lub bezglutenowej zastąpiono mąką żołędziową (próbki z odpowiednio 30, 50 i 70% mąki żołędziowej). Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej, zwiększano ilość mleka odpowiednio do 75, 100 i 125 ml.

Wszystkie rodzaje ciastek kruchych przygotowano w ten sam sposób: składniki umieszczano w misie miksera i zagniatano przez 3 min (mikser uniwersalny wyposażony w hak do zagniatania, JAZ S.R.O., Nové Mesto nad Váhom, Słowacja). Po połączeniu składników w jednolitą masę ciasto odstawiono do schłodzenia w temperaturze 4°C przez 1 h. Po schłodzeniu ciasto rozwałkowano i wykrojono okrągłe, kruche ciasteczka o równej wielkości i kształcie. Kruche ciasteczka wypieczono w temperaturze 200°C przez 20 min w modułowym piecu piekarniczo-cukierniczym Quail Mini Piccolo 4 (Wachtel, Hilden, Niemcy).

## 5.3. Metody analityczne

### 5.3.1. Analiza podstawowego składu chemicznego mąk zbożowych i żołędziowych

- **Zawartość wody** oznaczono metodą odwoławczą, zgodnie z PN-ISO 712:2012. Próbki suszono w temperaturze 130°C do momentu uzyskania stałej masy, przy pomiarze co 1 h.
- **Zawartość białka** oznaczono zgodnie z PN-ISO 20483:2014-02. Zawartość białka obliczono mnożąc wyznaczoną analitycznie zawartość azotu przez mnożnik białkowy 6,25.
- **Zawartość tłuszczu** oznaczono zgodnie z PN-A-79011-4:1998. Ekstrakcję przeprowadzono w aparacie Soxhleta, wykorzystując heksan jako rozpuszczalnik.
- **Zawartość błonnika pokarmowego** oznaczono zgodnie z PN-A-79011-15:1998.
- **Zawartość popiołu** oznaczono zgodnie z PN-EN ISO 2171:2010.
- **Zawartość węglowodanów** wyznaczono matematycznie, obliczając jako różnicę pomiędzy 100% a zawartością wody, białka, tłuszczu, błonnika pokarmowego ogółem i składników mineralnych.

### 5.3.2. Oznaczenie cech fizycznych mąk żołędziowych

- Oznaczanie **kąta nasypu** mąk wykonano zgodnie z metodą podaną przez Świtalskiego i in. (2021) z niewielkimi modyfikacjami. Mąkę przesypywano swobodnie, małymi porcjami przez lejek o średnicy wewnętrznej szyjki wynoszącej 14,3 mm, umieszczony 25 mm nad płaską, wypoziomowaną powierzchnią. Przesypywanie zakończono w momencie uzyskania stożka, którego wierzchołek stykał się z szyjką lejka. Kąt nasypu ($K_n$) obliczono ze wzoru:

$$K_n = arctg\frac{2h}{d-a} \quad (1)$$

gdzie:

$K_n$ – kąt nasypu [°];
h – wysokość stożka utworzonego przez mąkę [mm];
d – średnica podstawy stożka [mm];
a – średnica wewnętrzna szyjki lejka [mm].

- Oznaczanie **kąta zsypu** mąk wykonano zgodnie z metodą podaną przez Świtalskiego i in. (2021), wykorzystując urządzenie pomiarowe, wyposażone w metalową i szklaną

płytę, przymocowaną do poziomej powierzchni. Stałą objętość mąki (uformowaną w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 50x50x5 mm) umieszczano kolejno na szklanej i metalowej płytce, którą unoszono do osiągnięcia nachylenia, przy którym mąka zsuwała się z powierzchni. Kąt zsypu oznaczano jako kąt nachylenia płytki do podłoża, przy którym produkt zsuwał się z powierzchni.

- Oznaczanie **gęstości nasypowej luźnej i utrzęsionej** mąk wykonano zgodnie z metodą podaną przez Ruszkowską i Wiśniewską (2017). Próbkę mąki o masie 100 g (± 0,05 g) przeniesiono do cylindra miarowego o pojemności 500 $cm^3$. Ze skali cylindra odczytano objętość mąki. Cylinder z zawartością poddano utrząsaniu poprzez 100-krotne postukiwanie. Ponownie odczytano objętość mąki. Gęstość wyznaczono jako stosunek masy do objętości, przyjmując objętość przed utrząsaniem do obliczenia gęstości luźnej, a objętość po utrząsaniu – do obliczenia gęstości utrzęsionej.
- Na podstawie oznaczonych gęstości luźnej i nasypowej wyznaczono **współczynnik Hausner'a** oraz **indeks Carr'a** dla badanych mąk (Ruszkowska i Wiśniewska, 2017):

$$I_H = \frac{\rho_T}{\rho_L} \tag{2}$$

gdzie:

$I_H$ – współczynnik Hausner'a;

$\rho_T$ – gęstość utrzęsiona [$g/cm^3$];

$\rho_L$ – gęstość luźna [$g/cm^3$].

$$I_{carr} = \frac{\rho_T - \rho_L}{\rho_T} \times 100 \tag{3}$$

gdzie:

$I_{carr}$ – indeks Carr'a;

$\rho_T$ – gęstość utrzęsiona [$g/cm^3$];

$\rho_L$ – gęstość luźna [$g/cm^3$].

### 5.3.3. Ocena właściwości sorpcyjnych mąk żołędziowych

Ocenę właściwości sorpcyjnych przeprowadzono metodą statyczno-eksykatorową, poprzez wyznaczanie izoterm sorpcji, określając równowagę wilgotnościową pomiędzy badaną próbką a atmosferą o założonej wilgotności względnej, którą regulowano za pomocą nasyconych roztworów soli.

Założony czas ustalania równowagi układu wynosił 60 dni, a oznaczenie wykonano w zakresie aktywności wody środowiska $a_w$ = 0,07-0,93, w temperaturze 20°C ± 1°C.

Do naczynka wagowego (o średnicy 15 mm) o znanej masie odważano ok. 3 g surowca i umieszczano w eksykatorach. Higrostaty o aktywności wody wyższej niż 0,69, zawierały naczynka z tymolem krystalicznym, zabezpieczającym badany produkt przed zepsuciem mikrobiologicznym. Równowagową zawartość wody wyznaczono na podstawie początkowej masy produktu oraz przyrostów lub ubytków zawartości wody, wykreślając izotermy sorpcji.

Opisu empirycznie wyznaczanych izoterm sorpcji dokonano na podstawie przekształcenia równania Brunauera, Emmeta i Tellera (BET) (równanie 4) (Paderewski, 1999), przyjmując zakres aktywności wody $0{,}07 \leq a_w \leq 0{,}33$. Równanie scharakteryzowano na podstawie wartości współczynnika determinacji ($R^2$) oraz dopasowania błędu standardowego (FitStdErr).

$$V = \frac{V_m C a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]} \tag{4}$$

gdzie:

$a_w$ – aktywność wody [-];

V – równowagowa zawartość wody [$H_2O$/100 g s.m.];

$V_m$ – zawartość wody w monowarstwie [g $H_2O$/100 g s.m.];

C – stała energetyczna.

Przydatność modelu do opisu uzyskanych izoterm adsorpcji oceniono na podstawie analizy średniego błędu kwadratowego (RMS), który obliczono zgodnie z równaniem (Lewicki, 1998):

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \frac{(zw_e - zw_p)^2}{zw_e}}{N} \cdot 100} \tag{5}$$

gdzie:

$zw_e$ – empiryczna, równowagowa zawartość wody [g $H_2O$/100 g s.m.];

$zw_p$ – prognozowana, równowagowa zawartość wody [g $H_2O$/100 g s.m.];

N – liczba punktów pomiarowych.

Ponadto znając objętość pary wodnej zaadsorbowanej w temperaturze niższej od temperatury wrzenia oraz tzw. powierzchnię siadania wody, obliczono powierzchnię właściwą adsorbentu w oparciu o równanie (Paderewski, 1999):

$$a_{sp} = \omega \frac{\nu_m}{M} N \tag{6}$$

gdzie:

$a_{sp}$ – powierzchnia właściwa sorpcji [$m^2/g$];

$\nu_m$ – zawartość wody w monowarstwie [g $H_2O$/100 g s.m.];

N – liczba Avogadra [$6{,}023 \cdot 10^{23}$ cząsteczek/mol];

M – masa cząsteczkowa wody [18 g/mol];

ω – powierzchnia siadania wody [$1{,}05 \cdot 10^{-19}$ $m^2$/cząsteczkę].

Aktywność wody w mące w czasie eksperymentu oznaczono z wykorzystaniem aparatu AquaLab (AquaLab series 3TE, Decagon Decices, Inc, Pullman, USA) w temp. 20°C, wykonując 6 powtórzeń dla każdego rodzaju próbki.

### 5.3.4. Ocena właściwości wypiekowych mąk zbożowych i żołędziowych oraz ich mieszanek

- **Wodochłonność** oznaczono metodą z zastosowaniem wirówki, zgodnie z AACC Method 56-20.01 (AACC, 2014) z modyfikacjami. Analizie poddano mąkę pszenną (jako próbkę kontrolną), mąkę żołędziową oraz mieszanki mąk pszenno-żołędziowych. Udział mąki żołędziowej w analizowanych mieszankach wynosił od 5 do 50%, przy zwiększaniu co 5% (w mieszankach z udziałem mąki żołędziowej od 5 do 30%) i co 10% (w mieszankach zu działem mąki żołędziowej od 30 do 50%). Do probówek wirówkowych odważono 1 g mąki (± 0,01 g), dodano 20 ml wody destylowanej. Przygotowane próbki mieszano przy użyciu homogenizatora (czas mieszania 1 min, prędkość 1000 obr./min), a następnie wirowano przez 15 min z prędkością 9000 obr./min (wirówka MPW-350 R; MPW Med. Instruments, Warszawa). Wodę znad osadu zlano, probówki odstawiono do góry dnem na bibule filtracyjnej celem odsączenia pozostałości wody (10 min). Wodochłonność mąki wyznaczono ze wzoru:

$$wodochłonność\ mąki = \frac{(a-b)\cdot 100\%}{w} \qquad (7)$$

gdzie:

a – masa probówki z mokrym osadem [g],

b – masa pustej probówki wirówkowej [g],

w – masa próbki pobranej do oznaczenia [g].

- **Analizę fermentograficzną** przeprowadzono za pomocą fermentografu laserowego typu BZS SZ 2005 (Sadkiewicz Instruments, Bydgoszcz), zgodnie z metodyką opisaną przez Sobczyk i in. (2017). Analizie poddano mąkę pszenną (jako próbę kontrolną), mąkę żołędziową oraz mieszanki mąk pszenno-żołędziowych. Udział mąki żołędziowej w analizowanych mieszankach wynosił od 5 do 50%, przy wzroście co 5% (w mieszankach

z udziałem mąki żołędziowej od 5 do 30%) i co 10% (w mieszankach z udziałem mąki żołędziowej od 30 do 50%). Ciasto do analizy fermentograficznej przygotowano ze 140 g mąki, 2,5 g drożdży, 2 g soli i 80 $cm^3$ wody. Składniki mieszano przez 7 min, po czym poddano fermentacji w komorze rozrostowej fermentografu w temperaturze 35°C. Czas fermentacji wynosił 90 min, z pomiarem co 2 min. Na podstawie uzyskanego fermentogramu wyznaczono następujące wartości: ilość gazów zatrzymanych ($cm^3$), ilość gazów wydzielonych ($cm^3$), objętość ciasta w punkcie krytycznym ($cm^3$).

- **Analizę amylograficzną** wykonano zgodnie z PN-EN ISO 7973:2016-01 z użyciem aparatu Micro Visco-Amylo-Graph (Brabender® GmbH & Co. KG, Duisburg, Niemcy). Analizie poddano mąkę pszenną (jako próbę kontrolną), mąkę żołędziową oraz mieszanki mąk pszenno-żołędziowych. Udział mąki żołędziowej w analizowanych mieszankach wynosił od 5 do 50%, przy wzroście co 5% (w mieszankach z udziałem mąki żołędziowej od 5 do 30%) i co 10% (w mieszankach z udziałem mąki żołędziowej od 30 do 50%). 15 g mąki/mieszanki mąk łączono z 100 ml wody i przenoszono ilościowo do czaszy pomiarowej. Zawiesinę poddawano pomiarom bezpośrednio po przygotowaniu: ogrzewanie rozpoczynano w temperaturze 30°C i prowadzono do temperatury 92°C (utrzymywanej przez 1 min) z przyrostem 7,5°C/min. Prędkość mieszania wynosiła 250 obr./min. Na podstawie uzyskanych amylogramów wyznaczono następujące parametry: temperaturę początkową kleikowania i lepkość początkową kleiku oraz temperaturę końcową kleikowania i maksymalną lepkość kleiku.
- **Ocenę farinograficzną** przeprowadzono w aparacie Brabender Farinograph® (Brabender® GmbH & Co. KG, Duisburg, Niemcy), zgodnie z PN-EN ISO 5530-1:2015-01. Analizie poddano mąkę pszenną (jako próbkę kontrolną), mąkę żołędziową oraz mieszanki mąk pszenno-żołędziowych. Udział mąki żołędziowej mieszankach wynosił od 5 do 25%, przy wzroście co 5%. Ocena farinograficzna nie pozwoliła na uzyskanie miarodajnych wyników dla mąk mieszanych z udziałem mąki żołędziowej większym niż 25%. Wielkość próbki poddawanej ocenie wynosiła 300 g (± 0,5 g). Wodochłonność ustalano dla uzyskania ciasta o konsystencji 500 ± 20 BU. Czas mieszania wynosił 15 min z prędkością 63 obr./min. Ocenę wyników przeprowadzono w standardzie Brabender®/ICC/BIPEA, określając: absorpcję wody, konsystencję ciasta, czas rozwoju oraz czas stałości ciasta, stopień rozmiękczenia (po 10 min od rozpoczęcia mieszania), liczbę jakości.

- **Ocenę właściwości reologicznych** ciasta wykonano z użyciem aparatu Brabender Extensograph®-E (Brabender® GmbH & Co. KG, Duisburg, Niemcy), zgodnie z PN-EN ISO 5530-2:2015-01. Analizie poddano ciasto pszenne (jako próbkę kontrolną) oraz ciasto pszenno-żołędziowe. Udział mąki żołędziowej w analizowanych próbkach ciasta wynosił od 5 do 25%, przy wzroście co 5%. Próbki ciasta do analizy ekstensograficznej sporządzono z mąki, wody i soli (2% względem całkowitej ilości mąki) w miesiarce farinografu. Dodatek wody ustalano dla uzyskania ciasta o konsystencji 500 ± 20 BU. Z tak przygotowanego ciasta odważono porcje o masie 150 ± 0,5 g, które uformowano w formiarce ekstensografu. Uformowane walce ciasta, umieszczone w kasetach, poddawano fermentacji w komorze aparatu w temperaturze 30°C. Pomiar (rozciąganie) prowadzono po 30, 60 i 90 min, oznaczając następujące parametry ciasta: energię niezbędną do rozciągania, opór na rozciąganie, maksymalny opór w momencie przerwania ciasta, rozciągliwość oraz współczynnik oporu.
- **Próbny wypiek laboratoryjny** wykonano metodą bezpośredniego prowadzenia ciasta z 1-godzinną fermentacją. Jako próbkę kontrolną przygotowano chleb pszenny jasny. W wariantach chleba pszenno-żołędziowego udział mąki żołędziowej wynosił od 10% do 50%, przy wzroście co 10%. Proporcje składników w wypieku chleba były następujące: na każde 200 g mąki dodawano 6 g drożdży i 4 g soli. Dodatek wody był zmienny, określony w zależności od oznaczonej wodochłonności próbek mąki. Drożdże i sól rozpuszczono w niewielkiej ilości wody. Mąki, roztwory soli i drożdży oraz pozostałą ilość wody mieszano w mikserze uniwersalnym, wyposażonym w hak do wyrabiania ciasta (JAZ S.R.O., Nové Mesto nad Váhom, Słowacja) przez 5 min. Po wymieszaniu ciasto umieszczono w komorze rozrostowej pieca piekarniczego (Quail Mini Piccolo 4; Wachtel, Hilden, Niemcy) i fermentowano w temperaturze 35°C przy wilgotności względnej 85% przez 60 min z przebijaniem po 30 min fermentacji (tylko dla próbki pszennej – kontrolnej). Z ciasta po fermentacji uformowano kęsy o masie 300 g, które poddano rozrostowi końcowemu w temperaturze 35°C przy wilgotności względnej 85%, prowadzonemu do uzyskania optymalnej objętości. Następnie chleb wypiekano w modułowym piecu z komorą rozrostową (piec piekarniczy Quail Mini Piccolo 4; Wachtel, Hilden, Niemcy) w temperaturze 230°C przez 30 min. Przeprowadzono trzy niezależne powtórzenia dla każdego z rodzajów wypiekanego chleba. Dodatkowo, oprócz chleba o podstawowym składzie wykonano wypiek chleba pszenno-żołędziowego z dodatkiem glutenu w celu sprawdzenia możliwości poprawienia cech fizycznych chleba z dodatkiem mąki żołędziowej. W wariantach z dodatkiem glutenu

zastosowano częściowe zastąpienie mąki żołędziowej pszennym glutenem witalnym na poziomie: 10% dla próbek z udziałem mąki żołędziowej od 10 do 30%; 15% dla chleba z 40% udziałem mąki żołędziowej i 20% dla chleba z 50% udziałem mąki żołędziowej. Przeprowadzono również eksperyment z dodatkiem podwojonej ilości glutenu, w którym dodatkowa porcja glutenu wprowadzona była zamiast części mąki pszennej. Postępowanie przy prowadzeniu ciasta i wypieku chleba w wariantach z dodatkiem glutenu było takie same jak w wariantach bez tego dodatku.

### 5.3.5. Ocena jakości technologicznej chleba

- **Wydajność ciasta chlebowego i chleba**, **stratę piecową** (tzw. „upiek") oraz **stratę wypiekową całkowitą** wyznaczono matematycznie, posługując się następującymi wzorami:

$$wydajność\ ciasta = \frac{\mathrm{a} \cdot 100}{m} \tag{8}$$

gdzie:

a – masa ciasta po fermentacji [g];

m – masa mąki użytej do wypieku [g].

$$strata\ piecowa = \frac{(\mathrm{a} - b) \cdot 100}{\mathrm{a}} \tag{9}$$

gdzie:

a – masa ciasta uformowanego do wypieku [g];

b – masa chleba gorącego (bezpośrednio po wyjęciu z pieca) [g].

$$strata\ wypiekowa\ całkowita = \frac{(\mathrm{a} - c) \cdot 100}{\mathrm{a}} \tag{10}$$

gdzie:

a – masa ciasta uformowanego do wypieku [g];

c – masa chleba wystudzonego (24 h po wypieku) [g].

$$wydajność\ pieczywa = \frac{c \cdot w}{\mathrm{a}} \tag{11}$$

gdzie:

a – masa ciasta uformowanego do wypieku [g];

c – masa chleba wystudzonego (24 h po wypieku) [g];

w – wydajność ciasta [%].

- **Objętość bochenków chleba** wyznaczono instrumentalnie z wykorzystaniem urządzenia TexVol BVM 6630 (Perten Instruments, Hägersten, Szwecja). Oznaczono objętość całych bochenków chleba, które umieszczono na obrotowym wsporniku wewnątrz maszyny. Pomiar dokonany został w technologii topografii laserowej: czujnik laserowy zamieszczony na końcu ruchomego, poruszającego się w po półokręgu ramienia dokonywał skanowania bochenków. Analogiczną metodę **oznaczenia objętości** wykorzystano w analizie **muffinów**.
- **Porowatość miękiszu chleba** oceniono metodą Jacobiego: ze środkowej części bochenków wykrojono kostki sześcienne o boku 3 cm. Kostkę miękiszu podzielono na mniejsze części, które zgnieciono w dłoniach do uzyskania zbitych kuleczek miękiszu pozbawionych powietrza. Do cylindra miarowego o pojemności 100 $cm^3$ wprowadzono po ściance 30 $cm^3$ oleju, wrzucono kuleczki i wyznaczono ich objętość na podstawie różnicy poziomów przed i po wrzuceniu zgniecionego miękiszu. Porowatość miękiszu obliczono matematycznie, określając procentową zawartość porów w strukturze miękiszu ze wzoru:

$$porowatość\ miękiszu = \frac{m_p - m_{bp}}{m_p} \cdot 100\% \qquad (12)$$

gdzie:

$m_p$ – objętość miękiszu porowatego [$cm^3$];

$m_{bp}$ – objętość miękiszu ugniecionego (bez porów) [$cm^3$].

### 5.3.6. Pomiar parametrów barwy mąk oraz wyrobów piekarskich i ciastkarskich

Mąki oraz wypiekane produkty: chleb, muffiny i ciastka poddano ocenie barwy, w której zastosowano spektrofotokolorymetr Hunter ColorFlex EZ (HunterLab, Reston, USA). Barwa została zarejestrowana w modelu CIE L*a*b*, gdzie L* oznacza jasność od 0 (najciemniejsza) do 100 (najjaśniejsza), a* oznacza barwę od zielonej (wartości ujemne) do czerwonej (wartości dodatnie), a b* oznacza barwę od niebieskiej (wartości ujemne) do żółtej (wartości dodatnie).

Na podstawie uzyskanych wartości, obliczono całkowite różnice barwy (ΔE) pomiędzy próbkami produktów z dodatkiem mąki żołędziowej a próbkami kontrolnymi oraz nasycenie (chroma, C*):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (13)$$

gdzie:

ΔL*, Δa*, Δb* – różnice parametrów barwy pomiędzy próbkami bez i z dodatkiem mąki żołędziowej;

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (14)$$

gdzie:

a*, b* – zmierzone parametry barwy.

W przypadku chleba odrębnie oceniono barwę miękiszu i skórki (10 pomiarów dla każdego wariantu). W celu określenia barwy miękiszu chleby pokrojono na plastry o grubości 15 mm i poddano analizie kromki ze środkowej części bochenków. W celu określenia barwy skórki analizowano górna skórkę bochenków.

W ocenie barwy muffinów odrębnie określono parametry barwy miękiszu i skórki (10 pomiarów dla każdego wariantu). W celu określenia barwy miękiszu muffiny przekrojono na pół i poddano analizie miękisz ze środkowej części w przekroju podłużnym. W celu określenia barwy skórki analizowano górną skórkę muffinów.

W przypadku pomiaru barwy ciastek kruchych ocenie poddano powierzchnię produktu, którą uprzednio oczyszczono szczoteczką, w celu usunięcia ewentualnych pozostałości mąki (10 pomiarów dla każdego wariantu).

### 5.3.7. Pomiar właściwości teksturalnych wyrobów piekarskich i ciastkarskich

W ocenie właściwości teksturalnych wypiekanych produktów wykorzystano metody instrumentalne, pozwalające na liczbowe wyznaczenie takich wartości jak: elastyczność miękiszu chlebów i muffinów oraz twardość i kruchość ciastek.

Elastyczność miękiszu chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem mąki żołędziowej oceniano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 4301 (Instron Corp., Canton, MA, USA). Ze środkowej części bochenka wycięto kostki o boku 25 mm i poddawano je ściskaniu nasadą roboczą (*flat pin*) o średnicy 35 mm, poruszającą się ze stałą prędkością 50 mm/min. Maksymalną siłę, potrzebną do ściśnięcia próbki zmierzono przy założonym 50% odkształceniu miękiszu (10 pomiarów dla każdego wariantu).

Elastyczność miękiszu chleba, wypieczonego w próbnym wypieku laboratoryjnym, oraz miękiszu muffinów oceniono za pomocą analizatora tekstury TA.HDplus

(Stable Microsystem Ltd., Godalming, Wielka Brytania). Elastyczność wyrażono jako wartość siły niezbędnej do ściskania miękiszu. Ze środkowej części bochenka wycięto kostki miękiszu o boku 25 mm i poddano je ściskaniu za pomocą nasady roboczej teksturometru (*compression platen*, średnica 100 mm) jako elementu ściskającego, poruszającego się z prędkością testową 2 mm/s. Maksymalną siłę, potrzebną do ściśnięcia próbki zmierzono przy założonym 50% odkształceniu miękiszu (10 pomiarów dla każdego wariantu).

Twardość ciastek kruchych oznaczono w teście trójpunktowego łamania (3-point bending test), przeprowadzonego z wykorzystaniem analizatora tekstury TA.HDplus (Stable Micro System Ltd., Godalming, Wielka Brytania). Próbki ciastek umieszczono na klinowych podporach przystawki teksturometru, rozstawionych w odległości 45 mm. Prędkość głowicy podczas testu wynosiła 3 mm/min, ruch kontynuowano do złamania kruchego ciastka. W teście łamania wyznaczono następujące parametry: wartość siły niezbędnej do przełamania ciastek, odnoszącą się do twardości produktu oraz wielkość odkształcenia próbki do przełamania, odnoszącą się do kruchości. Analizie poddano co najmniej sześć ciastek kruchych z każdego wariantu.

### 5.3.8. Ocena wartości odżywczej wyrobów piekarskich i ciastkarskich

W ocenie wartości odżywczej wypiekanych produktów dokonano matematycznego wyliczenia zawartości węglowodanów, białka, tłuszczu, popiołu i błonnika pokarmowego, w oparciu o zawartość tych składników w stosowanych surowcach. Zawartość składników pokarmowych w mąkach żołędziowych polskiej i greckiej oraz mąkach zbożowych pszennej i żytniej, wykorzystywanych w wypieku chleba, uwzględniono na podstawie dokonanych oznaczeń analitycznych. Zawartość składników pokarmowych w pozostałych mąkach i surowcach, stosowanych w wypieku, uwzględniono w oparciu o deklarację producenta i/lub dane podane przez Kunachowicz i in. (2018). W obliczeniach uwzględniono straty masowe w trakcie wypieku: dla pieczywa – zgodnie z wyliczoną stratą wypiekową całkowitą, dla muffinów – zgodnie z wartościami podanymi przez Ureta i in. (2014), a dla ciastek kruchych zgodnie z wartościami podanymi przez Amina i Djamel (2018). Wyniki wyrażono w g składnika/100 g produktu.

### 5.3.9. Ocena sensoryczna wyrobów piekarskich i ciastkarskich

Ocenę sensoryczną chleba, muffinów i ciastek kruchych przeprowadzono wykonano zgodnie z metodą podaną przez Zdybel i in. (2019) z modyfikacjami. Ocenę przeprowadzono w pracowni sensorycznej Akademii Łomżyńskiej: w jasnym pomieszczeniu z naturalnym oświetleniem, w temperaturze otoczenia 22°C i wilgotności względnej powietrza 65%. Zespół osób oceniających każdorazowo rekrutowany był spośród studentów i pracowników, po wcześniejszym przeszkoleniu w zakresie ocen sensorycznych. Warunkiem, który musieli spełniać oceniający, było niepalenie. Wypieki oceniano w 5-stopniowej skali hedonicznej, gdzie: 5 = „bardzo lubię"; 4 = „lubię umiarkowanie"; 3 = „ani lubię, ani nie lubię"; 2 = „nie lubię umiarkowanie"; a 1 = „bardzo nie lubię". Zespół oceniający każdorazowo otrzymywał ogólne informacje na temat celów badania, a oceny zaznaczano na papierowych arkuszach oceny.

Do oceny chleba pszennego i żytniego bez i z dodatkiem mąki żołędziowej zrekrutowano zespół 22 uczestników (w wieku 20-45 lat; 16 kobiet i 6 mężczyzn). Do przeprowadzenia oceny około 50 g każdej próbki chleba ułożono w losowej kolejności na białej płytce zakodowanej 3-cyfrową liczbą losową. Do płukania jamy ustnej przed i po każdym badaniu próbki używano zwykłej wody. Oceniono następujące cechy chleba: barwę, zapach, smak, teksturę (elastyczność i chrupkość miękiszu) oraz wygląd zewnętrzny (kształt i stopień wyrośnięcia).

Do oceny muffinów zrekrutowano zespół 20 osób w wieku 20-60 lat. Muffiny do oceny ułożono na białych, zakodowanych płytkach. Pomiędzy próbami oceniający przepłukiwali usta wodą. Ocenie poddano następujące wyróżniki jakości muffinów: barwę, zapach, smak, teksturę (elastyczność), ogólną akceptację.

Do oceny ciastek kruchy zrekrutowano zespół 15 osób, w wieku 20-60 lat, które mogły być potencjalnymi konsumentami ciastek kruchych. Ciasteczka do oceny (1 szt. dla każdego oceniającego) umieszczono na białych, zakodowanych płytkach. Pomiędzy próbami oceniający przepłukiwali usta wodą. Oceniono następujące wyróżniki jakości ciastek kruchych: barwę, smak, zapach, słodkość, kruchość, twardość i kształt.

### 5.3.10. Oznaczenie profilu związków lotnych wybranych produktów ciastkarskich

Oznaczenie profilu związków lotnych ciastek kruchych wykonano metodą chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią mas. Zmielone ciastka (1,5 g) przeniesiono do szklanej fiolki o pojemności 20 ml i przetrzymywano w temperaturze 40°C

przez 30 min. Do ekstrakcji składników lotnych z przestrzeni nad próbką zastosowano włókno 50/30 μm DVB/CAR/PDMS SPME (Supleco Sigma Aldrich, Wielka Brytania). Absorpcję związków prowadzono przez 5 min w temperaturze pokojowej, a desorpcję w komorze nastrzykowej chromatografu przez 2 min. Rozdział substancji lotnych prowadzono w chromatografie Shimadzu GCMS-QP2010 z pojedynczym kwadrupolowym spektrometrem masowym, wyposażonym w kolumnę Stabilwax (30 m x 0,25 mm x 0,25 μm, 100% faza glikolu polietylenowego; Restek, USA). Temperatura pieca wynosiła 40°C (5 min. const.), a następnie zwiększana z szybkością 5°C/min do 250°C. Gazem nośnym był hel w przepływie 5 ml/min. Temperatura źródła jonów wynosiła 200°C, a temperatura portu nastrzykowego: 250°C. Spektrometr pracował w trybie pełnego skanowania w zakresie 30 – 300 m/z, energia jonizacji wynosiła 70 eV. Identyfikację związków lotnych prowadzono poprzez porównanie czasów retencji poszczególnych pików na uzyskanych chromatogramach z czasem retencji widm masowych w referencyjnej bibliotece (Wiley/NIST Mass Spectral Library). Oznaczenie wykonano w dwóch powtórzeniach dla każdej próbki.

### 5.3.11. Oznaczenie ogólnej zawartości wolnych związków fenolowych w mąkach oraz wyrobach piekarskich i ciastkarskich

- Ekstrakcję wolnych związków fenolowych z próbek mąki i produktów przeprowadzono zgodnie z metodą podaną przez Konopkę i in. (2014). Próbkę o masie 100 mg (± 0,01 g) ekstrahowano trzykrotnie 1,0 ml 80% metanolu. Mieszaninę wytrząsano z szybkością 1400 obr./min przez 10 min w temperaturze 30°C w urządzeniu Thermomixer (Eppendorf AG, Hamburg, Niemcy) i odwirowano przy 25000 *g* w wirówce Eppendorf typu 5417R (Eppendorf AG, Hamburg, Niemcy). Połączone supernatanty odparowano do sucha w temperaturze 45°C w próżniowej wyparce obrotowej typu Büchi R-210 (BÜCHI Labortechnik AG, Flawil, Szwajcaria). Suchy ekstrakt rozpuszczono w 5 ml metanolu.
- Oznaczenie całkowitej zawartości wolnych związków fenolowych przeprowadzono zgodnie z metodą podaną przez Konopkę i in. (2014). Mieszaninę reakcyjną przygotowano przez zmieszanie 0,5 ml metanolowego roztworu ekstraktu, 0,5 ml odczynnika Folina-Ciocalteu w wodzie dejonizowanej (1:2, v:v), 3,5 ml 14% węglanu sodu oraz wody dejonizowanej do uzyskania objętości 10 ml. Następnie roztwór mieszano i pozostawiono na 60 min w zaciemnionym miejscu. Po inkubacji mieszaninę odwirowano i zmierzono absorbancję przy długości fali 720 nm wobec próbki odczynnikowej (przygotowanej

z metanolem zamiast roztworu ekstraktu) przy użyciu wielofunkcyjnego czytnika mikropłytek (FLUOstar Omega, BMG LABTECH, Offenburg, Niemcy). Całkowitą zawartość wolnych związków fenolowych obliczono na podstawie krzywej kalibracyjnej sporządzonej dla kwasu ferulowego i wyrażono w mg/100 g s.m. Analizę przeprowadzono w trzech powtórzeniach.

### 5.3.12. Oznaczenie ogólnej zawartości wolnych flawonoidów w mąkach oraz wybranych wyrobach ciastkarskich

- Ekstrakcję wolnych flawonoidów z muffinów przeprowadzono w następujący sposób: 500 mg zliofilizowanej próbki ekstrahowano trzykrotnie 80% roztworem metanolu (3 x 1 ml), każdorazowo poddając mieszaninę działaniu ultradźwięków przez 10 min i odwirowując przy 4700 *g* w wirówce Eppendorf typu 5910R (Eppendorf AG, Hamburg, Niemcy). Połączone supernatanty odparowano do sucha w temperaturze 45°C w próżniowej wyparce obrotowej typu Büchi R-210 (BÜCHI Labortechnik AG, Flawil, Szwajcaria). Suchy ekstrakt rozpuszczono w 5 ml metanolu.
- Całkowitą zawartość wolnych flawonoidów w muffinach oznaczono spektrofotometrycznie według Makhlouf et al. (2019) z modyfikacjami. 100 µl ekstraktu zmieszano z 400µl wody dejonizowanej i 30 µl 5% roztworu $NaNO_2$. Próbki odstawiono na 6 min, po czym dodano 30 µl 10% roztworu $AlCl_3$ i pozostawiono na kolejne 6 min. Następnie do mieszaniny dodano 400 µl 2 M roztworu NaOH i uzupełniono wodą destylowaną (40 µl) do uzyskania końcowej objętości 1 ml. Próbki inkubowano w temperaturze pokojowej przez 15 min, po czym dokonano pomiaru absorbancji mieszaniny reakcyjnej przy długości fali 510 nm wobec próbki odczynnikowej przy użyciu wielofunkcyjnego czytnika mikropłytek (FLUOstar Omega, BMG LABTECH, Offenburg, Niemcy). Całkowitą zawartość flawonoidów w muffinach obliczono na podstawie krzywej kalibracyjnej sporządzonej dla D-katechiny i wyrażono w mg/100 g s.m.

### 5.3.13. Oznaczenie profilu związków fenolowych metodą chromatografii cieczowej w mąkach oraz wyrobach piekarskich i ciastkarskich

#### 5.3.13.1. Oznaczenie profilu kwasów fenolowych

- Ekstrakcję wolnych kwasów fenolowych przeprowadzono trzykrotnie, zgodnie z metodą podaną przez Skrajdę-Brdak i in. (2019). Próbkę 1 g mąki lub liofilizowanego produktu

połączono z 10 ml 80% metanolu i poddano działaniu ultradźwięków przez 15 min (InterSonic, Olsztyn, Polska). Po ekstrakcji próbkę odwirowano przy 25000 g w wirówce Eppendorf typu 5810R (Eppendorf AG, Hamburg, Niemcy). Supernatanty zebrano i odparowano do sucha w temperaturze 45°C w wyparce próżniowej Büchi typu R-210 (BÜCHI Labortechnik AG, Flawil, Szwajcaria). Pozostały osad rozpuszczono w 30 ml dejonizowanej wody i zakwaszono do pH 2. Kwasy fenolowe wymywano prowadząc czterokrotną ekstrakcję 20 ml eteru etylowego. Połączone ekstrakty odparowano w wyparce próżniowej i ponownie rozpuszczono w 1 ml metanolu.

- Zawartość wolnych kwasów fenolowych oznaczono według Mäkilä i in. (2016) metodą chromatografii cieczowej przy użyciu Shimadzu LC-10AVP HPLC (Shimadzu, Kioto, Japonia) z pompą LC-10AT, autosamplerem SIL-10A i detektorem diodowym SDP-M10AVP połączonym ze stacją obsługi danych SCL-M10AVP. Separację związków przeprowadzono na kolumnie Aeris PEPTIDE XB-C18 (150 mm x 4,60 mm średnicy wewnętrznej, 3,6 µm, z kolumną ochronną 2,00 mm x 4,60 mm średnicy wewnętrznej z tego samego materiału; Phenomenex, Torrance, CA, USA). Faza ruchoma zawierała dwa eluenty: rozpuszczalnik A stanowił 1% kwas mrówkowy, a rozpuszczalnik B stanowił 0,1% kwas mrówkowy w acetonitrylu. Szybkość przepływu wynosiła 1,0 ml/min. Objętość nastrzyku próbki wynosiła 10 µl. Program elucji gradientowej był następujący: 2-18% B (15 min); 18% B (5 min); 18-20% B (10 min); 20-0% B (5 min); 60-2% B (5 min); 2% B (5 min). Detekcję przeprowadzono przy długości fali 190-600 nm. Zawartość kwasów fenolowych obliczono z krzywych kalibracyjnych dla wzorców kwasów fenolowych i wyrażono w mg/100 g s.m. próbki. Analizę przeprowadzono w trzech powtórzeniach.

### 5.3.13.2. Oznaczenie profilu kwasów fenolowych i flawonoidów

- Ekstrakcję wolnych kwasów fenolowych przeprowadzono trzykrotnie, zgodnie z metodą podaną przez Skrajdę-Brdak i in. (2019). Próbkę 1 g liofilizowanego chleba połączono z 10 ml 80% metanolu i poddano działaniu ultradźwięków przez 15 min (InterSonic, Olsztyn, Polska). Po ekstrakcji próbkę odwirowano przy 25000 *g* w wirówce Eppendorf typu 5810R. Supernatanty zebrano i odparowano do sucha w temperaturze 45°C w wyparce próżniowej Büchi typu R-210. Pozostały osad rozpuszczono w 30 ml dejonizowanej wody i zakwaszono do pH 2. Kwasy fenolowe wymywano prowadząc czterokrotną ekstrakcję 20 ml eteru etylowego. Połączone ekstrakty odparowano w wyparce próżniowej i ponownie rozpuszczono w 1 ml metanolu.

- Analizę jakościową i ilościową związków fenolowych w próbkach muffinów wykonano zgodnie z metodą opisaną przez Topkę i in. (2022) przy użyciu systemu ultrawysokosprawnej chromatografii cieczowej (UHPLC) (Nexera XR, Shimadzu, Japonia) sprzężonego z diodowym detektorem powierzchniowym (DAD) i spektrometrem masowym (LCMS-2020, Shimadzu, Japonia). Do oznaczenia wykorzystano ekstrakt związków fenolowych, którego przygotowanie opisano w podrozdziale 5.2.8. Separację związków przeprowadzono na kolumnie Kinetex (wielkość cząstek 2,6 μm; 100 × 4,6 mm; Phenomenex, Torrance, CA, USA). Temperatura pieca wynosiła 40°C, wielkość przepływu: 0,37 ml/min. Faza ruchoma zawierała dwa eluenty: rozpuszczalnik A stanowił roztwór 0,01% kwasu mrówkowego w wodzie z 1 mM mrówczanu amonu, a rozpuszczalnik B stanowił roztwór 0,01% kwasu mrówkowego w acetonitrylu z 1 mM mrówczanu amonu. Objętość nastrzyku próbki wynosiła 10 μl. Analizę przeprowadzono w trybie monitorowania jonów (SIM). Analizowane związki zidentyfikowano na podstawie ich jakościowych jonów, czasów retencji i długości fali (λmax). Zawartość kwasów fenolowych obliczono na podstawie powierzchni pików względem standardów i wyrażono w mg/100 g s.m. próbki. Analizę przeprowadzono w dwóch powtórzeniach.

### 5.3.14. Oznaczenie pojemności przeciwutleniającej mąk oraz wyrobów piekarskich i ciastkarskich

- Ekstrakcję związków przeciwutleniających (głównie wolnych związków fenolowych) z próbek mąki lub produktów przeprowadzono zgodnie z metodą podaną przez Konopkę i in. (2014). Próbkę o masie 100 mg (± 0,01 g) ekstrahowano trzykrotnie 1,0 ml 80% metanolu. Mieszaninę wytrząsano z szybkością 1400 obr./min przez 10 min w temperaturze 30°C w urządzeniu Thermomixer (Eppendorf AG, Hamburg, Niemcy) i odwirowano przy 25000 g w wirówce Eppendorf typu 5417R (Eppendorf AG, Hamburg, Niemcy). Połączone supernatanty odparowano do sucha w temperaturze 45°C w próżniowej wyparce obrotowej typu Büchi R-210 (BÜCHI Labortechnik AG, Flawil, Szwajcaria). Osad rozpuszczono w 5 ml metanolu.
- Pojemność przeciwutleniająca oznaczono spektrofotometrycznie, zgodnie z metodą podaną przez Skrajdę-Brdak i in. (2019). Do analizy użyto ekstraktu wolnych związków fenolowych, którego przygotowanie opisano powyżej. 50 μl ekstraktu umieszczono w studzience przezroczystej, 96-studzienkowej płytki i dodano 250 μl metanolowego

roztworu DPPH (2,2-difenylo-1-pikrylohydrazyl; 0,2 mM). Mieszaninę wytrząsano i inkubowano w ciemności w temperaturze pokojowej przez 30 min. Następnie zmierzono absorbancję przy długości fali 517 nm wobec metanolu przy użyciu wielofunkcyjnego czytnika mikropłytek (FLUOstar Omega, BMG LABTECH, Offenburg, Niemcy). Zdolność przeciwutleniającą obliczono na podstawie krzywej kalibracyjnej, odnoszącej się do procentowej redukcji rodników DPPH dla różnych stężeń Troloxu w metanolu i wyrażono jako mM ekwiwalentu Troloxu (mM TE/100 g s.m.). Analizę przeprowadzono w trzech powtórzeniach.

### 5.4. Analiza statystyczna wyników

Uzyskane wyniki badań poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem programu Statistica 13.3 PL (StatSoft, Kraków, Polska). Przeprowadzono następujące testy statystyczne: jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA) z testem Tukey'a na poziomie istotności $p \leq 0,05$ (w celu wskazania istotności różnic próbek mąk, ciasta oraz wyrobów pod względem analizowanych cech); dwuczynnikową lub trzyczynnikową analizę wariancji (ANOVA) z testem Wilksa na poziomie istotności $p \leq 0,05$ (do oceny wpływu parametrów prowadzenia ciasta lub obróbki mąki oraz pochodzenia i/lub dodatku mąki żołędziowej na cechy otrzymanych wyrobów); analizę głównych składowych (PCA) z pełną walidacją krzyżową (w celu wykrycia możliwych trendów i skupień wśród próbek wyrobów).

# 6. Rezultaty badań

## 6.1. Zmienność jakości i właściwości wypiekowych mąki żołędziowej w zależności od gatunku żołędzi i metody produkcji mąki

W **publikacji przeglądowej P1** przedstawiono osiągnięcia naukowe w zakresie metod wytwarzania i składu chemicznego mąki żołędziowej oraz możliwości jej wykorzystania w produkcji piekarskiej i ciastkarskiej z uwzględnieniem wpływu na jakość chleba, ciast i ciastek. Publikacja ta prezentuje stan wiedzy w momencie podjęcia tematyki pracy doktorskiej.

### 6.1.1. Właściwości fizyczne i funkcjonalne mąki żołędziowej

Dokonany przegląd literatury w **publikacji P1** wykazał, że skład chemiczny i właściwości fizyczne oraz wartość wypiekowa mąki żołędziowej są zależne od metody jej wytwarzania (**tabela 5**). Mąka żołędziowa różnić się może barwą, gęstością nasypową, wodochłonnością, zdolnością do pęcznienia czy wielkością granulek skrobiowych (Amina i in., 2018; Correia i in., 2009; Correia i Beirão-da-Costa, 2011; Masmoudi i in., 2020). Jednym z najbardziej istotnych elementów, mających wpływ na właściwości mąki, jest temperatura, której działaniu żołędzie są poddawane w procesie suszenia przy przetwarzaniu na mąkę (Silva i in., 2016).

Ze względu na fakt, że wysoka zawartość tanin w mące żołędziowej powoduje gorzkość produktów wytworzonych z jej udziałem, ważnym procesem jest również wymywanie tych składników, mające prowadzić do zmniejszenia ich zawartości w mące. Z tego powodu prowadzone badania w dużej mierze skupiają się na możliwych ulepszeniach procesu wymywania, co ma na celu zwiększenie jego skuteczności (Papoti i in., 2018; Šalková i in., 2011). Poszukiwane są również nowe, alternatywne metody obróbki żołędzi, które pozwoliłyby na modyfikację składu mąki z nich wytworzonej, wśród których wymienia się m.in. kiełkowanie i fermentację (Amina i in., 2018; Papoti i in., 2018). Zastosowane procesy obróbki żołędzi i/lub uzyskanej z nich mąki prowadzą do zmian składu chemicznego, przede wszystkim zawartości i profilu związków fenolowych, ale także zawartości i stopnia uszkodzenia skrobi oraz zawartości popiołu (Amina i in., 2018; Papoti i in., 2018). Zmianie ulegają również właściwości funkcjonalne mąki żołędziowej, związane ze zdolnością wiązania wody i oleju oraz zdolnością do pienienia i emulgowania (**tabela 5**). Amina i in. (2018)

wskazują, że zmiany właściwości funkcjonalnych mąki żołędziowej na skutek fermentacji i kiełkowania związane mogą być ze zmianami układu białkowego (m.in. na skutek dysocjacji i niszczenia struktury polipeptydów) oraz niszczenia struktury polisacharydów. W dotychczasowych doniesieniach brakuje jednak bezpośredniego powiązania pomiędzy zmianami w zawartości i strukturze składników chemicznych tworzących mąkę żołędziową a właściwościami fizycznymi i funkcjonalnymi mąki, a podejmowanie badań w tym zakresie może pozwolić wyjaśnić wpływ dodatku mąki na proces produkcyjny i cechy jakościowe wyrobów piekarskich i ciastkarskich.

**Tabela 5.** Wpływ procesów przetwarzania na właściwości mąki żołędziowej. Opracowanie własne na podstawie danych z **publikacji P1**.

| **Zastosowane procesy przetwarzania żołędzi** | **Właściwości mąki** | |
|---|---|---|
| | **fizyczne** | **funkcjonalne** |
| suszenie żołędzi w temperaturze 50°C przez 16-18 h | ciemna barwa (L* = 72), niska gęstość nasypowa (0,64 g/cm$^3$) | wysoka zdolność absorpcji wody (1,03 g/g) i oleju (0,76 g/g), niska aktywność emulgowania (41,28%) i zdolność pienienia (7,63%) |
| kiełkowanie żołędzi, suszenie w temperaturze 50°C przez 16-18 h, płukanie, namaczanie w roztworze podchlorynu sodu i wodzie destylowanej, odsączanie | jaśniejsza barwa (L* = 67,3), niższa gęstość nasypowa (0,48 g/cm$^3$) w porównaniu do mąki wytwarzanej bez kiełkowania i wypłukiwania w podchlorynie sodu | większa zdolność absorpcji wody (1,1 g/g) i oleju (0,9 g/g), większa aktywność emulgująca (42,09%) i zdolność pienienia (8,09%) w porównaniu do mąki wytwarzanej bez kiełkowania i wypłukiwania w podchlorynie sodu |
| suszenie żołędzi w temperaturze 50°C przez 16-18 h, łuskanie, mielenie, fermentacja z dodatkiem drożdży, wstępne suszenie w temperaturze 40°C przez 16-18 h z przepływem powietrza 300 m$^3$/h, łuskanie, siekanie i suszenie w temperaturze 40-70°C do uzyskania aktywności wody $a_w$ = 0,2 | jaśniejsza barwa (L* = 67,03), niższa gęstość nasypowa (0,58 g/cm$^3$) w porównaniu do mąki niefermentowanej ciemna barwa (im wyższa temperatura suszenia, tym ciemniejsza barwa, zmiany wartości L* w zakresie od 75,2 do 67,3), mały rozmiar granulek skrobi (dominacja granulek o wymiarach od 2 do 8 µm długości i szerokości) | większa aktywność emulgująca (41,72%), mniejsza zdolność pienienia (6,83%) w porównaniu do mąki niefermentowanej |
| wstępne suszenie powietrzem całych owoców przez 12 h, łuskanie, suszenie powietrzem obłuskanych żołędzi przez 48 h | jasnobrązowa barwa (L* = 68,3) | wysoka zdolność zatrzymywania wody (1,16 g/g) i zdolność pęcznienia (5 ml/g), niska zdolność zatrzymywania oleju (0,85 g/g) i zdolność emulgowania (5,25%) |

### 6.1.2. Skład chemiczny mąki żołędziowej

W **publikacji P1** zebrano również dane literaturowe, dotyczące składu i wartości odżywczej mąki żołędziowej w porównaniu z konwencjonalnymi mąkami zbożowymi.

W porównaniu do typowych mąk chlebowych jasnych (wyciągowych), pszennych i żytnich (**tabela 6**), uwagę zwraca niższa zawartość białka oraz znacząco wyższa zawartość tłuszczu i błonnika pokarmowego, a także wyższa zawartość popiołu, przekładająca się na wysoką zawartość wybranych składników mineralnych, zwłaszcza wapnia, żelaza i miedzi.

**Tabela 6.** Porównanie składu chemicznego mąki żołędziowej i typowych mąk zbożowych. Opracowanie własne na podstawie danych z **publikacji P1**.

| Składnik chemiczny | Mąka żołędziowa | Mąka pszenna | | Mąka żytnia | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | wyciągowa | razowa | wyciągowa | razowa |
| Woda [%] | 5,4-22,05 | 13,7-14,5 | 6,55-11,7 | 11,1-14,5 | 11,5-14,5 |
| Węglowodany [%] | 75,22-84,09 | 71-71,3 | 69,5-73,03 | 76,68-77,40 | 74-77 |
| Cukry [%] | b.d. | 1,7 | 2,10 | 0,93 | 2,31 |
| Białko [%] | 4,32-5 | 7,8-12,6 | 9,5-13,9 | 5,90-6,28 | 7,31-9,60 |
| Tłuszcz [%] | 8,44-13,86 | 1,33-1,80 | 1,3-3,60 | 1,70-1,90 | 1,28-2,30 |
| Główne kwasy tłuszczowe [% sumy kwasów tłuszczowych] | | | | | |
| Kwas palmitynowy | 14,09-14,98 | 18,17-19,74 | 14,2-27,50 | 15,43-15,99 | 15,95-19,41 |
| Kwas stearynowy | 2,33-3,27 | 1,04-10,41 | 0,75-2,3 | 0,56-0,58 | 0,52-0,56 |
| Kwas oleinowy | 59,85-60,92 | 15,50-31,14 | 12,73-24,0 | 16,48-18,05 | 16,39-17,34 |
| Kwas linolowy | 15,34-15,91 | 23,74-61,00 | 49,1-61,36 | 56,09-56,17 | 54,58-56,22 |
| Kwas linolenowy | 0,63-0,84 | 1,74-3,71 | 3,94-5,04 | 7,93-9,30 | 7,15-9,19 |
| Błonnik [%] | 10,89-17,90 | 2,90-3,90 | 4,5-12,82 | 6,40-8,0 | 16,71-12,80 |
| Popiół [%] | 1,81-2,04 | 0,49-0,92 | 1,32-1,9 | 0,50-0,69 | 1,20-1,91 |
| Taniny [%] | 7,76-10,9 | b.d. | b.d. | b.d. | b.d. |
| Ważniejsze witaminy [/100 g mąki] | | | | | |
| B1 [mg] | 0,02 | 0,12-0,25 | 0,445-0,661 | 0,183-0,331 | 0,235-0,42 |
| B2 [mg] | 0,13 | 0,04-0,062 | 0,095-0,324 | 0,100-0,09 | 0,128-0,251 |
| B3 [mg] | b.d. | 1,250-2,29 | 5,809-6,54 | 0,66-0,8 | 1,030-4,27 |
| B6 [mg] | 0,03 | 0,044-0,170 | 0,31-0,754 | 0,140-0,234 | 0,3-0,443 |
| Kwas foliowy [µg] | 114 | 18-64 | 27-109 | 23-49 | 44-82 |
| Ważniejsze składniki mineralne [mg/100 g mąki] | | | | | |
| Wapń | 164 | 16,9-179,77 | 30,77-35,1 | 21-26,1 | 33-37 |
| Miedź | 1,04 | 0,12-0,15 | 0,4-2,4 | 0,17-0,24 | 0,32-0,35 |
| Żelazo | 18,61 | 0,63-1,6 | 2,69-3,5 | 1,4-1,8 | 2,07-3,4 |
| Magnez | 54,2 | 18,69-31 | 78,27-126 | 29,00-53,1 | 89-90 |
| Mangan | 3,65 | 0,38-0,83 | 2,34-3,33 | 1,24-1,98 | 2,16-4,24 |
| Potas | 379 | 89,89-165 | 324-399,77 | 190-252 | 396-420 |
| Cynk | 0,83 | 0,66-1,36 | 1,75-3,51 | 1,50-1,89 | 2,7-3,84 |

b.d. – brak danych

Udział białka w mące żołędziowej, według dostępnych danych literaturowych, sięgał 5% (Silva i in., 2016), podczas gdy w mące pszennej razowej wynosił do 13,9% (Kunachowicz i in., 2018). Istotnym w kontekście białka pozostaje brak białek glutenowych, co czyni mąkę żołędziową bezpieczną do spożycia dla osób nietolerujących glutenu. W dostępnej literaturze

brakuje jednak badań nad profilem aminokwasowym mąki żołędziowej. Nieliczne opracowania dotyczą jedynie żołędzi nie poddawanych obróbce (Özcan, 2006).

Mąkę żołędziową w opublikowanych badaniach cechował wysoki udział tłuszczu, wynoszący do 13,86%. W profilu kwasów tłuszczowych dominującą grupą były nienasycone kwasy tłuszczowe, a głównym kwasem tłuszczowym był kwas oleinowy stanowiący do 60,92% sumy kwasów tłuszczowych, następnie kwas linolowy stanowiący do 15,91% sumy kwasów tłuszczowych (Silva i in., 2016). Mąki pszenne i żytnie nie dorównują mące żołędziowej zawartością tłuszczu, a dominującym kwasem tłuszczowym w tych mąkach jest kwas linolowy.

Zawartość błonnika w mące żołędziowej była wyższa nawet w porównaniu do mąk pełnoziarnistych, pszennej i żytniej, uznawanych za mąki wysokobłonnikowe. W zależności od źródła danych, zawartość błonnika w mące żołędziowej była 2-, 3-krotnie wyższa i wynosiła od 10,89 do 17,9% porównując do mąki pszennej razowej, w które oznaczono 4,5-12,82% tego składnika (Rakić i in., 2006; Silva i in., 2016). Dominującą frakcją błonnika w żołędziach i mące z nich wytwarzanej był błonnik neutralny detergentowy (Kaya i Kamalak, 2012).

Mąkę żołędziową cechowała zawartość popiołu porównywalna z mąkami z pełnego przemiału ziarna. Dominującymi składnikami mineralnymi były potas (379 mg/100 g mąki) i wapń (164 mg/100 g mąki), co stanowiło wartość ok. 5-krotnie wyższą niż w mąkach razowych pszennej i żytniej). Istotną była również wysoka zawartość żelaza (18,61 mg/100 g mąki), ok. 6-krotnie wyższa niż w mąkach razowych pszennej i żytniej (Rybicka i Gliszczyńska-Świgło, 2017a).

### 6.2.2. Właściwości wypiekowe mąki żołędziowej

W wielu pracach badawczych podejmowano próby wprowadzenia mąki żołędziowej do produktów piekarskich różnego typu: chlebów pszennych, chleba bezglutenowego czy wypieków regionalnych (zgodnie z zestawieniem w **publikacji P1**). Dostępne opracowania dotyczące wpływu mąki żołędziowej na cechy chleba oparte były na próbkach wypiekowych ze zróżnicowanym udziałem mąki żołędziowej na poziomie od 5 do 100% (**tabela 7**). Już przy najniższym dodatku mąki żołędziowej, obserwowano obniżenie jakości uzyskanego chleba. Naturalnym następstwem było uzyskanie ciemniejszej barwy chlebów, miękiszu i skórki, ze względu na ciemną, brązową barwę mąki żołędziowej. Konsumenci często ciemną barwę chleba kojarzyli z chlebem razowym, wypiekanym z mąk z pełnego przemiału ziarna, dlatego w tym kontekście ciemniejszą barwę wypieków żołędziowych odbierano jako zaletę,

szczególnie w przypadku chleba bezglutenowego. Największe zmiany, negatywnie wpływające na ocenę produktów, dotyczyły tekstury chleba. Na skutek wprowadzenia mąki żołędziowej zwiększała się twardość, żujność i gumowatość chleba, a zmniejszała się jego spoistość. Rezultaty dotyczące porowatości miękisza chleba z mąką żołędziową pozostawały jednak niespójne. Gonzaga i in. (2015) w chlebie pszennym oraz Skendi i in. (2018) w chlebie bezglutenowym stwierdzili zmniejszenie porowatości i wielkości porów, podczas gdy Purabdolah i in. (2020) oraz Korus i in. (2015) stwierdzili zwiększenie porowatościi wielkości porów, również w chlebie, odpowiednio, pszennym i bezglutenowym. Niespójne pozostają również wyniki dotyczące oceny sensorycznej, wskazujące zarówno na akceptację produktów z udziałem mąki żołędziowej przez konsumentów (Gonzaga i in., 2015; Korus i in., 2015; Park i in., 2017; Purabdolah i in., 2020), jak i na pogorszenie ocen w zakresie wyróżników sensorycznych takich jak smak, zapach czy tekstura miękiszu opisywana w zakresie gumowatości i kleistości (Ajo, 2018; Hrušková i in., 2019; Švec i in., 2018).

Zestawione w **publikacji P1** doniesienia dotyczące przeprowadzonych dotychczas badań nad możliwością wprowadzenia mąki żołędziowej do wyrobów cukierniczych sugerują, że najbardziej efektywne może być zastosowanie tej mąki w składzie recepturowym herbatników. Uzyskane produkty cechowały się wyższą wartością żywieniową, związaną z wyższą zawartością związków fenolowych, błonnika pokarmowego i popiołu oraz zwiększoną pojemnością przeciwutleniającą (Korus i in., 2017; Parsaei i in., 2018; Pasqualone i in., 2019; Torabi i in., 2020). Wpływ mąki żołędziowej na cechy jakości technologicznej dotyczył natomiast różnic barwy oraz zachowania ciastek w trakcie wypieku, w tym przyrostu grubości i idącej za tym objętości oraz zmian wielkości (średnicy) i deformacji kształtu (Amina i Djamel, 2018; Korus i in., 2017; Pasqualone i in., 2019; Torabi i in., 2020). Ciastka z wprowadzoną mąką żołędziową cechowały się mniejszą grubością i średnicą, natomiast większą twardością. Wskazane różnice jakości przełożyły się na ocenę sensoryczną wyrobów, która jak w przypadku chleba, pozostawała niejednoznaczna. Z jednej strony wskazywano, że jakość sensoryczna ciastek pszennych i bezglutenowych z mąką żołędziową może być porównywalna do jakości sensorycznej próbek kontrolnych (bez dodatku mąki żołędziowej), z drugiej wykazywano pogorszenie ocen w zakresie tekstury, smaku czy zapachu. W przypadku pszennych ciast biszkoptowo-tłuszczowych, najczęściej w postaci muffinów, na skutek wprowadzenia mąki żołędziowej obserwowano zmiany tekstury, przejawiające się zwiększeniem twardości oraz obniżeniem elastyczności, a także, w zależności od źródła, zwiększeniem lub zmniejszeniem gumowatości i żujności (Kim i in., 2012; Masmoudi i in., 2020; Molavi i in., 2015).

**Tabela 7.** Porównanie składu chemicznego mąki żołędziowej i typowych mąk zbożowych. Opracowanie własne na podstawie danych z **publikacji P1**.

| Produkt | Udział mąki żołędziowej | Zmiany cech fizykochemicznych |
|---|---|---|
| Chleby pszenne | 5-50% | wyższa zawartość błonnika pokarmowego i związków fenolowych; mniejsza objętość, ciemniejsza barwa, większa twardość miękiszu, różnice w porowatości, zmienność wyników oceny sensorycznej |
| Chleby bezglutenowe | 5-35% | wyższa zawartość białka, tłuszczu, błonnika pokarmowego i związków fenolowych, ciemniejsza barwa, większa twardość i żujność miękiszu, różnice w porowatości, spowolnienie czerstwienia, wzrost akceptacji konsumenckiej |
| Pieczywo pszenne typu pita (*flatbread*) | 5-15% | mniejsza wilgotność i zawartość białka, wyższa zawartość błonnika i popiołu, ciemniejsza barwa, niższa miękkość miękiszu, zmienność wyników oceny sensorycznej |
| Pieczywo ekstrudowane bezglutenowe | 10% | wyższa zawartość wody, mniejsza porowatość, wyższa chrupkość, zmniejszenie współczynnika ekspansji |
| Kulicha (ciasto kurdyjskie) | 15-45% | wyższa akceptacja konsumencka (smak, tekstura, barwa i zapach) |
| Herbatniki pszenne | 10-100% | wyższa zawartość związków fenolowych, niższa wartość liczby nadtlenkowej, ciemniejsza barwa, zmienność objętości i przyrostu wymiarów w czasie wypieku, zmienność wyników oceny sensorycznej |
| Herbatniki bezglutenowe | 10-60% | wyższa wilgotność i zawartość błonnika pokarmowego, popiołu i związków fenolowych, wyższa twardość, ciemniejsza barwa, mniejsza objętość, zmniejszenie wyników oceny sensorycznej |
| Ciasta biszkoptowo-tłuszczowe | 5-100% | niższe straty masowe, ciemniejsza barwa, mniejsza objętość, wyższa twardość, mniejsza elastyczność, zmienność wyników oceny sensorycznej |

Warto zauważyć, że wyniki uzyskiwane przez autorów badań nad wykorzystaniem mąki żołędziowej w przemyśle piekarskim i ciastkarskim pozostają sprzeczne w zakresie jakości uzyskanych wypieków, co wynikać może prawdopodobnie z zastosowania mąki żołędziowej różnego pochodzenia. Autorzy wykorzystywali w swoich badaniach mąki dostępne w danym kraju lub wytwarzali laboratoryjnie mąkę z żołędzi tych gatunków dębów, które są charakterystyczne dla danego regionu. W **publikacji P1** dokonano zestawienia 58 różnych prac badawczych, dotyczących żołędzi oraz mąki żołędziowej w kontekście ich przetwórstwa, składu i wykorzystania, w których materiał do badań stanowiły żołędzie/mąka żołędziowa pochodzące z 32 różnych gatunków dębów. Tymczasem gatunek dębu, a także miejsce występowania i związane z nim warunki środowiskowe są czynnikami w istotny sposób wpływającymi na skład i właściwości żołędzi i produktów z nich wytwarzanych (Kaya i Kamalak, 2012; Silva i in., 2016). Pomimo licznych prac potwierdzających duże zróżnicowanie gatunkowe żołędzi, brakuje badań, w których

porównywano właściwości wypiekowe mąk wyprodukowanych z różnych gatunków czy różnego pochodzenia żołędzi.

**Podsumowanie**

Skład chemiczny mąki żołędziowej odróżnia się od typowych mąk zbożowych przede wszystkim wysoką zawartością tłuszczu, błonnika pokarmowego i popiołu, dominacją kwasu linolowego w profilu kwasów tłuszczowych, dominacją γ-tokoferolu w profilu tokoferoli (Akcan i in., 2017; Al-Rousan i in., 2013; Rakić i in., 2006; Silva i in., 2016; Rybicka i Gliszczyńska-Świgło, 2017a, 2017b). Ponadto mąka żołędziowa odznacza się wyższym zróżnicowaniem w zawartości poszczególnych składników chemicznych. Zmienność składu chemicznego mąki żołędziowej może być zależna od oddziaływania czynników środowiskowych, wśród których wymienić należy m.in. gatunek dębu, z którego pochodzą żołędzie, miejsce występowania (w tym warunki klimatyczne i środowiskowe, stres środowiskowy), dojrzałość żołędzi i związane z tym różnice w procesach metabolicznych (Kaya i Kamalak, 2012; Li i in., 2015; Migaskó i Ecseri, 2020; Rakić i in., 2006; Silva i in., 2016). Ponadto na zmiany w składzie mąki żołędziowej wpływać będą stosowane w procesie produkcyjnym operacje i zabiegi technologiczne oraz ich parametry, a przede wszystkim metody wymywania związków taninowych (Molavi i in., 2015). Na podstawie przeglądu literatury dokonanego w **publikacji P1** można stwierdzić, że do tej pory nie usystematyzowano i ustandaryzowano warunków procesów wytwarzania mąki żołędziowej, co z pewnością utrudnia uzyskiwanie produktów o powtarzalnych cechach.

Wpływ mąki żołędziowej na cechy wyrobów piekarskich i ciastkarskich zależy w dużej mierze od rodzaju wyrobów, stosowanych metod wytwarzania i składu recepturowego, w tym przede wszystkim udziału mąki żołędziowej. Istotnym jest, aby osiągnąć kompromis pomiędzy najwyższą wartością odżywczą wyrobów a najmniejszym wpływem mąki żołędziowej na ich właściwości sensoryczne i jakościowe.

## 6.2. Jakość mąki żołędziowej polskiej w porównaniu do mąki żołędziowej greckiej oraz mąk chlebowych

W ramach porównawczej analizy jakości handlowych mąk żołędziowych i mąk chlebowych, dokonano oceny składu chemicznego mąki żołędziowej polskiej i mąki żołędziowej greckiej oraz mąki chlebowej pszennej jasnej oraz mąki chlebowej żytnie jasnej,

odnosząc się zarówno do zawartości podstawowych składników odżywczych (węglowodanów, białka, tłuszczu, błonnika pokarmowego i popiołu), jak i zawartości wybranych składników bioaktywnych (związków fenolowych ogółem i wolnych kwasów fenolowych). W badaniach jakości mąk żołędziowych i zbożowych uwzględniono również pojemność przeciwutleniającą, przygotowując ekstrakty metanolowo-wodne, najczęściej wykorzystywane przez badaczy do oceny tego wyróżnika w mąkach. Dodatkowo w pracy oceniono cechy fizyczne mąk żołędziowych i ich właściwości sorpcyjne, które często są pomijane w badaniach naukowych, a ich wpływ na cechy jakościowe również może być znaczący, na co wskazują badania m.in. Ayala-Aponte (2016), Bogoeva i Durakova (2020), Purohit i Rao (2017) czy Sato i in. (2010).

### 6.2.1. Skład chemiczny mąk żołędziowych i mąk chlebowych

Skład chemiczny i pojemność przeciwutleniającą mąk żołędziowych (greckiej i polskiej) oraz mąki pszennej jasnej (typ 750) i mąki żytniej jasnej (typ 720) przedstawiono w **tabeli 8**.

Użyte do badań mąki zbożowe były dość podobne pod względem zawartości wody, węglowodanów, tłuszczu i popiołu. Stwierdzono jednak różnice w zawartości białka (około 2-krotnie więcej w mące pszennej), błonnika (ponad 2-krotnie więcej w mące żytniej) i wolnych związków fenolowych (około 2-krotnie więcej w mące żytniej) oraz pojemności przeciwutleniającej (ponad 3-krotnie wyższa w mące żytniej).

Porównując mąki żołędziowe stwierdzono, że grecka mąka żołędziowa wyróżniała się wyższą zawartością białka, tłuszczu i kwasu elagowego, natomiast polska mąka żołędziowa była bogatsza w węglowodany, związki fenolowe ogółem i kwas galusowy.

Chociaż producenci mąki żołędziowej nie deklarowali gatunku żołędzi, z których została wyprodukowana, generalnie mąka żołędziowa grecka jest wytwarzana z żołędzi dębu *Q. ithaburensis* ssp. *macrolepis* (dąb tabor) (Abdalla i in., 2015), natomiast mąka żołędziowa polska wytwarzana jest z żołędzi *Q. robur* (dąb szypułkowy) (Eaton i in., 2016). Dokonując przeglądu dostępnej literatury zauważono, że niewiele jest danych dotyczących porównania składu chemicznego mąk żołędziowych wyprodukowanych z tych gatunków. Özcan i in. (2012) wykazali różnice w zawartości białka i popiołu w żołędziach dębów różnych rosnących w Turcji, w tym również *Q. ithaburensis* ssp. *Macrolepis* oraz *Q. robur*. Autorzy stwierdzili wyższą zawartość białka w żołędziach *Q. ithaburensis* ssp. *macrolepis*, natomiast zawartość popiołu była porównywalna dla tych gatunków. Ponadto w literaturze podaje się, że żołędzie

*Q. robur* charakteryzowały się stosunkowo wysoką zawartością tanin (hydrolizujących i skondensowanych), stanowiących przeważającą część związków fenolowych w tych surowcach (Łuczaj i in., 2014; Vinha i in., 2016b). Z kolei w żołędziach dębu tabor badanych przez Abdalla i in. (2015) dominowały taniny hydrolizujące.

**Tabela 8.** Skład chemiczny i pojemność przeciwutleniająca mąki żołędziowej polskiej i greckiej oraz mąk zbożowych: pszennej i żytniej.

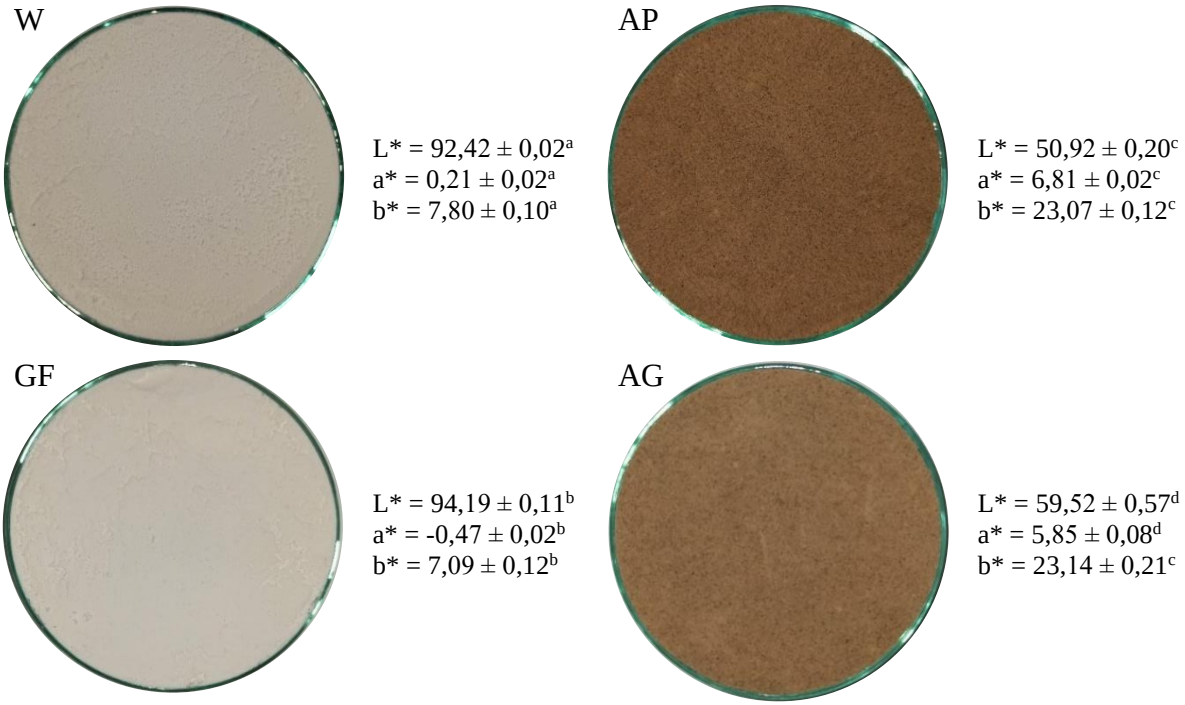
| Skład chemiczny/pojemność przeciwutleniająca | Mąka pszenna (W) | Mąka żytnia (R) | Mąka żołędziowa polska (AP) | Mąka żołędziowa grecka (AG) |
|---|---|---|---|---|
| Zawartość wody [g/100 g] | 13,5 ± 0,73$^{a}$ | 13,6 ± 0,53$^{a}$ | 11,6 ± 0,48$^{b}$ | 11,4 ± 0,13$^{b}$ |
| Zawartość węglowodanów [g/100 g] | 68,7 ± 0,47$^{a}$ | 71,3 ± 1,02$^{a}$ | 61,8 ± 0,58$^{b}$ | 53,5 ± 0,32$^{c}$ |
| Zawartość białka [g/100 g] | 12,6 ± 0,21$^{a}$ | 6,4 ± 0,06$^{b}$ | 4,1 ± 0,02$^{c}$ | 6,1 ± 0,03$^{b}$ |
| Zawartość tłuszczu [g/100 g] | 1,8 ± 0,02$^{a}$ | 1,7 ± 0,01$^{a}$ | 3,7 ± 0,14$^{b}$ | 9,5 ± 0,33$^{c}$ |
| Zawartość błonnika ogółem [g/100 g] | 2,9 ± 0,13$^{a}$ | 6,4 ± 0,21$^{b}$ | 16,8 ± 0,47$^{c}$ | 17,7 ± 0,62$^{c}$ |
| Zawartość popiołu [g/100 g] | 0,5 ± 0,03$^{a}$ | 0,6 ± 0,05$^{a}$ | 2,0 ± 0,17$^{b}$ | 1,8 ± 0,13$^{b}$ |
| Zawartość wolnych związków fenolowych ogółem [mg/100 g s.m.] | 5,02 ± 0,31$^{a}$ | 9,44 ± 0,43$^{b}$ | 611,27 ± 20,37$^{c}$ | 601,71 ± 17,63$^{c}$ |
| Zawartość wolnych kwasów fenolowych [mg/100 g s.m.] | | | | |
| Kwas kawowy | n.o. | 0,03 ± 0,02$^{a}$ | 0,14 ± 0,04$^{b}$ | 0,04 ± 0,01$^{a}$ |
| Kwas ferulowy | 0,12 ± 0,02$^{a}$ | 0,34 ± 0,08$^{b}$ | 0,09 ± 0,01$^{a}$ | 0,15 ± 0,04$^{a}$ |
| Kwas sinapowy | n.o. | n.o. | 0,11 ± 0,03$^{a}$ | 0,23 ± 0,02$^{b}$ |
| Kwas wanilinowy | n.o. | 0,10 ± 0,02 | n.o. | n.o. |
| Kwas galusowy | n.o. | n.o. | 19,06 ± 0,12$^{a}$ | 1,79 ± 0,2$^{b}$ |
| Kwas 4-OH-benzoesowy | n.o. | n.o. | 0,22 ± 0,02$^{a}$ | 0,12 ± 0,01$^{b}$ |
| Kwas p-kumarowy | n.o. | 0,08 ± 0,02$^{a}$ | n.o. | 0,07 ± 0,01$^{a}$ |
| Kwas elagowy | n.o. | n.o. | 188,57 ± 1,12$^{a}$ | 234,51 ± 0,36$^{b}$ |
| Pojemność przeciwutleniająca [mM TE/100 g s.m.] | 0,19 ± 0,02$^{a}$ | 0,65 ± 0,05$^{b}$ | 106,50 ± 1,15$^{c}$ | 100,59 ± 0,89$^{d}$ |

s.m. – sucha masa; n.o. – nie oznaczono; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-c – wartości średnie w wierszach oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

### 6.2.2. Właściwości fizyczne mąk żołędziowych

Użytą w badaniach mąkę żołędziową, zarówno polską jak i grecką, cechowała brązowa barwa, znacznie ciemniejsza niż w przypadku mąki zbożowej (pszennej) (**rysunek 9**). Zauważono, że barwa mąki żołędziowej zależna była od jej pochodzenia, przy czym mąka żołędziowa polska cechowała się ciemniejszą barwą niż mąka żołędziowa grecka. Jasność mąk żołędziowych (parametr L*) była znacząco niższa w porównaniu do mąki pszennej, ale także mąki bezglutenowej użytej do przygotowania ciastek kruchych (maksymalnie o 45,9%, porównując mąkę żołędziową polską i mąkę bezglutenową). Różnice w barwie dotyczyły również wartości parametrów a* i b*, które dla mąk żołędziowych były wyższe niż dla mąki

pszennej. Porównując mąkę żołędziową polską i grecką można stwierdzić, że mąka polska odznaczała się niższą wartością parametru L* oraz wyższą wartością parametru a* względem mąki greckiej. Wyniki przedstawione przez Correia i in. (2009) oraz Correia i Beirão-da-Costa (2011) sugerują, że na barwę mąki żołędziowej wpływać mogą parametry procesów stosowanych w procesie produkcji mąki, w tym szczególnie temperatura suszenia żołędzi. Amina i in. (2018) wykazali natomiast różnice barwy mąki w zależności od zastosowanych procesów odgoryczania. Oceniane mąki żołędziowe polska i grecka pochodzą z produkcji przemysłowej i nie są znane technologie ich wytwarzania, w związku z czym nie można potwierdzić związku pomiędzy różnicami barwy a parametrami procesów technologicznych.




W – mąka pszenna; GF – mąka bezglutenowa; AP – mąka żołędziowa polska; AG – mąka żołędziowa grecka; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-d – wartości średnie poszczególnych parametrów barwy oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

**Rysunek 9.** Wygląd mąk użytych w badaniach oraz parametry barwy zmierzone za pomocą spektrofotokolorymetru.

Istotnym elementem odnoszącym się do jakości materiałów sypkich, związanym z ich zachowaniem w trakcie transportu, pakowania, przetwarzania i mieszania z innymi składnikami, są cechy fizyczne określające zdolność płynięcia (Khan i Saini, 2016; Manikantan i in., 2015). W **tabeli 9** przedstawiono cechy fizyczne mąki żołędziowej polskiej i greckiej,

w tym parametry masowe (gęstość luźna i utrzęsiona) oraz wskaźniki sypkości (wskaźnik Hausner'a i indeks Carr'a oraz kąt nasypu i kąt zsypu).

**Tabela 9.** Cechy fizyczne mąki żołędziowej polskiej i greckiej.

| Parametry fizyczne | Mąka żołędziowa polska | Mąka żołędziowa grecka |
|---|---|---|
| Kąt nasypu [°] | 65,57 ± 3,62[a] | 62,47 ± 5,75[a] |
| Kąt zsypu – powierzchnia gładka [°] | 61,17 ± 1,60[a] | 60,00 ± 7,46[a] |
| Kąt zsypu – powierzchnia chropowata [°] | 75,67 ± 2,50[a] | 81,00 ± 2,61[b] |
| Gęstość luźna [g/cm$^3$] | 0,55 ± 0,01[a] | 0,41 ± 0,01[b] |
| Gęstość utrzęsiona [g/cm$^3$] | 0,89 ± 0,04[a] | 0,67 ± 0,03[b] |
| Współczynnik Hausner'a [-] | 1,61 ± 0,09[a] | 1,65 ± 0,07[a] |
| Index Carr'a [%] | 37,78 ± 3,63[a] | 39,31 ± 2,77[a] |

Wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 6); a, b – wartości średnie w wierszach oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że mąka żołędziowa polska odznaczała się większą gęstością nasypową luźną i utrzęsioną, odpowiednio o 34,1 i 32,8% w porównaniu do mąki żołędziowej greckiej. Wskazana różnica wynikać może z wielkości cząstek, ponieważ jak wskazują wyniki innych badaczy, im większy udział cząstek o małych rozmiarach w materiale sypkim, tym większe upakowanie (Jan i in., 2017). Na różnice w gęstości nasypowej wpływać może również wilgotność i skład chemiczny (Manikantan i in., 2015). Kaur i in. (2013) wykazali pozytywną korelację pomiędzy gęstością nasypową a zawartością węglowodanów oraz negatywną korelację pomiędzy gęstością nasypową a zawartością popiołu i białka w mące taro. Rola wskazanych składników na gęstość nasypową mąki może być związana z różnicami w wielkości ich cząstek (Bolade i in., 2009). Gęstość nasypowa mąki żołędziowej polskiej, uzyskana w badaniach, była zbieżna z rezultatami uzyskanymi przez Amina i in. (2018).

Na podstawie gęstości nasypowej luźnej i utrzęsionej wyznaczono współczynnik Hausner'a oraz indeks Carr'a dla analizowanych mąk żołędziowych, jako parametry sypkości. Przyjmuje się, że im wyższa wartość tych parametrów, tym wyższa kohezyjność i niższa sypkość produktu (Ruszkowska i Wiśniewska, 2017; Samborska i in., 2011). Mąki żołędziowe polska i grecka cechowały się zbliżoną wartością współczynnika Hausner'a (**tabela 9**), przekraczającą wartość 1,6. Uzyskane wartości świadczą o oddziaływaniu sił międzycząsteczkowych, związanych z siłami kohezji (wysoka kohezyjność), a co za tym idzie dużej spójności (Jan i in., 2017; Ruszkowska i Wiśniewska, 2017). O dużej spójności analizowanych mąk świadczą również wysokie wartości wyznaczonego indeksu Carr'a (37,78% i 39,31% odpowiednio dla mąki żołędziowej polskiej i greckiej), na podstawie

których, zgodnie z klasyfikacją przedstawioną przez Samborską i in. (2011), mąki żołędziowe należy uznać za produkty o złej sypkości. Wskazuje to, że wykorzystanie mąki żołędziowej w przemysłowej produkcji piekarskiej i cukierniczej może powodować problemy na różnych etapach procesu technologicznego. Landillon i in. (2008) wykazali związek pomiędzy właściwościami fizycznymi mąki a ich zachowaniem w czasie mieszania. Cuq i in. (2006) wskazują ponadto, że podatność mąki do aglomeracji przekładać się może na energochłonność procesu mieszania (konieczność przyłożenia większej energii z zewnątrz), a to może wpływać na kosztochłonność procesu.

Kąt nasypu i kąt zsypu to kolejne parametry wskazujące na sypkość materiałów w proszku oraz określające ich zdolność do płynięcia (Ruszkowska i Wiśniewska, 2017). Mąka żołędziowa polska i grecka cechowały się kątem nasypu przekraczającym 60°, co świadczyło o niskiej sypkości produktu. Na uzyskane wartości i niską sypkość mąk wpływać może stosunkowo wysoka wilgotność oraz zawartość tłuszczu w analizowanych produktach (**tabela 8**). Taką zależność potwierdzili w swoich badaniach Khan i Saini (2016). Na zwiększenie wartości kąta nasypu wpływać może również duże zróżnicowanie wielkości cząstek materiału sypkiego. Przestrzenie pomiędzy większymi cząstkami mąki zostają wypełnione przez mniejsze cząstki, co zwiększa spoistość materiału i ogranicza jego zdolność do płynięcia (Jan i in., 2017).

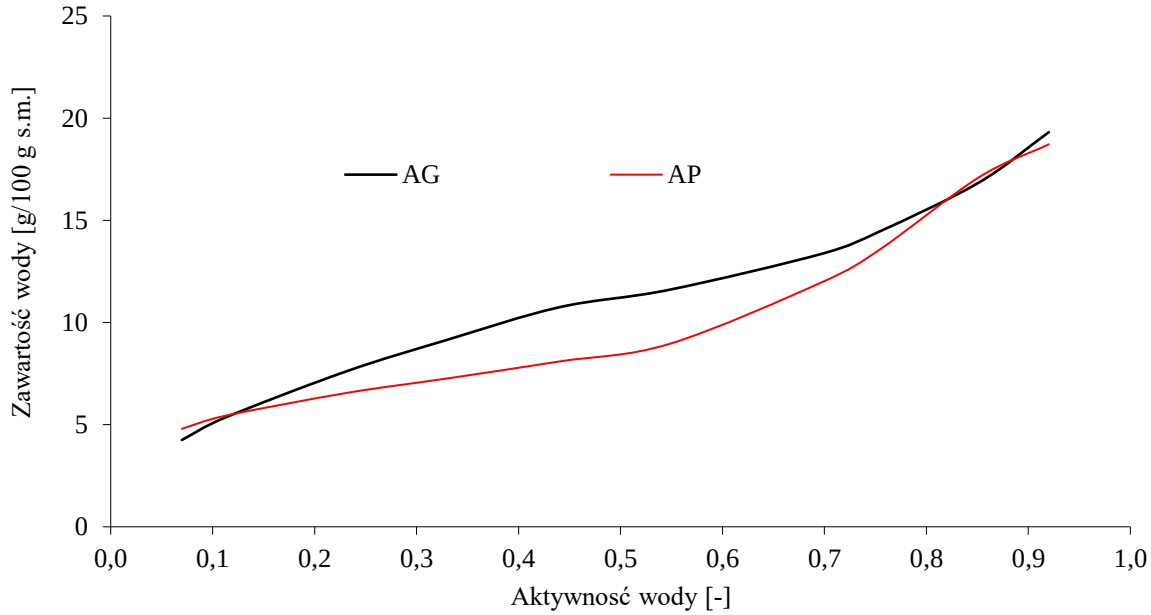
Jak wynika z przeglądu literatury, dokonanego w pierwszej części niniejszej rozprawy oraz w **publikacji P1**, mąka żołędziowa produkowana jest na świecie domowymi sposobami lub w manufakturach, które nie dysponują ustandaryzowanymi technologiami produkcji ani maszynami. Poznanie właściwości fizycznych oraz zachowania mąki w czasie przetwarzania i pakowania pozwalana opracowanie odpowiedniego sprzętu, który w przypadku mąk o złej sypkości (a do takich należy mąka żołędziowa, co stwierdzono w niniejszej rozprawie) musi zapewniać właściwy przepływ produktu, np. poprzez odpowiednio dopasowane otwory rozładunku czy zsypu (Barretto i in., 2021).

### 6.2.3. Właściwości sorpcyjne mąk żołędziowych

Izotermy sorpcji wykorzystywane są do oceny stanu wody w żywności (Pałacha, 2007). Izoterma sorpcji to graficznie przedstawiona zależność między masą wody przypadającą na masę suchej substancji a aktywnością wody w określonej stałej temperaturze. Na podstawie oceny kształtu izoterm sorpcji określić można wrażliwość produktów na wilgoć i zdolność

do chłonięcia wody, co tym samym umożliwia prognozowanie trwałości i optymalizację warunków przechowywania produktów spożywczych (Ocieczek, 2012).

Wyznaczone izotermy sorpcji badanych mąk żołędziowych (**rysunek 10**) przedstawiały proces sorpcji fizycznej zachodzący na ciałach porowatych i cechowały się kształtem sigmoidalnym wykazując podobieństwo do izoterm typu II w klasyfikacji Brunauera i in. (1938). Tym samym, sigmoidalny przebieg krzywych izoterm sorpcji wskazywał na proces tworzenia wielkocząsteczkowych warstw wody na powierzchni badanych produktów (Limousin i in., 2007; Ocieczek, 2012). Sigmoidalny kształt izoterm sorpcji, charakterystyczny dla izoterm typu II, uzyskali również Doporto i in. (2012) dla mąki z kłębianu i mąki z manioku, Pałacha i Rasiński (2020) dla mąki kukurydzianej, jaglanej, owsianej i ryżowej, Ruszkowska (2018) dla mąk pełnoziarnistych żytniej i orkiszowej oraz Xu i in. (2019) dla mąk z nasion roślin strączkowych. Jak podają Pałacha i Rasiński (2020) oraz Xu i in. (2019), izotermy typu II są charakterystyczne dla produktów bogatych w skrobię i/lub białko, do których zaliczyć należy wszystkie z produktów poddawanych ocenie w przytoczonych badaniach, a także badaną w niniejszej pracy mąkę żołędziową.




**Rysunek 10**. Izoterma sorpcji badanych mąk żołędziowych (AG – grecka, AP – polska), wyznaczona w środowisku o $a_w$ = 0,07-0,92, w czasie 60 dni, w temperaturze 20°C.

Jak podaje Ocieczek (2012) za Arêas i Cassiano (2001) oraz Roman-Gutierrez i in. (2002), sigmoidalne izotermy mogą służyć opisowi trzyzakresowego procesu sorpcji: monomolekularnej ($a_w$ < 0,3), wielowarstwowej (0,3 < $a_w$ < 0,7) i kondensacji kapilarnej

($a_w$ > 0,7). W pierwszym zakresie grupy polarne o wysokiej energii wiązania składników hydrofilowych (skrobie, białka, pentozany) są nasycane cząsteczkami wody. W drugim zakresie dodatkowe cząsteczki wody są wiązane przez zapełnioną już monowarstwę, a woda zaczyna formować grona. W trzecim zakresie następuje akumulacja wody w wewnątrzcząsteczkowych przestrzeniach w rezultacie, czego dochodzi do częściowego pęcznienia, które na skutek rozluźnienia struktury może powodować odsłanianie dodatkowych miejsc hydrofilowych.

Izotermy sorpcji badanych mąk żołędziowych charakteryzowały się ciągłością przebiegu w całym zakresie aktywności wody otoczenia $a_w$ = 0,07-0,93, co wskazywało, że w ocenianych mąkach nie dochodziło do zmiany struktury determinowanej zwiększeniem stopnia uporządkowania poszczególnych składników.

Oceniając przebieg wyznaczonych izoterm sorpcji badanych mąk stwierdzono, że w mące greckiej, w obszarze I izotermy sorpcji, w zakresie aktywności wody $a_w$ = 0,07-0,33 zachodził proces desorpcji wody. W mące żołędziowej polskiej proces desorpcji przebiegał w szerszym zakresie aktywności wody $a_w$ = 0,07-0,55 (**rysunek 10**). Najwyższą zawartością wody w I obszarze sorpcji ($a_w$ = 0,07-0,33), wynoszącą 9,1545 g/100 g. s.m., charakteryzowała się mąka żołędziowa grecka. Analiza graficznego przebiegu izoterm sorpcji wykazała, że w przypadku II i III obszaru izotermy sorpcji wyższą równowagową zawartością wody charakteryzowała się mąka żołędziowa grecka (**rysunek 10**).

Na podstawie przeprowadzonej oceny przebiegu izoterm sorpcji przypuszczać można, że różnice w higroskopijności badanych mąk uwarunkowane były przede wszystkim ich składem chemicznym (**tabela 8**). Mąka żołędziowa grecka charakteryzowała się wyższą zawartością białka i tłuszczu w porównaniu z mąką żołędziową polską. W tym przypadku wyższa zawartość tłuszczu, będącego składnikiem hydrofobowym nie wpłynęła na obniżenie sorpcyjności mąki żołędziowej greckiej. W związku z tym przypuszczać można, że pochłanianie wilgoci z otoczenia uwarunkowane było znaczną ilością skrobi i białka w badanych mąkach żołędziowych. Składniki te są makrocząsteczkami bogatymi w miejsca polarne (grupy -OH, -SH), umożliwiającymi znaczną adsorpcję wilgotności. Pojemność adsorpcyjna produktów mącznych zależy istotnie od rozmieszczenia grup polarnych, dostępności tych grup dla wody, stopnia krystalizacji matrycy, względnej siły oddziaływania typu woda-woda oraz woda-makrocząsteczka, jak również warunków wilgotności względnej (Ocieczek, 2007). Powstawanie centrów aktywnych, w których następuje adsorpcja wody związane może być również z działaniem wysokiej temperatury na surowce, prowadzące do procesów kleikowania skrobi i denaturacji białka (Erbaş i in., 2005; Pałacha i Meus, 2009).

Ma to szczególne znaczenie w przypadku mąki żołędziowej, ponieważ jej wytwarzanie może obejmować procesy termiczne, takie jak suszenie i prażenie surowca (Amina i in., 2018; Correia in., 2009; Correia i Beirão-da-Costa, 2011; Šálková i in., 2011).

Kolejnym elementem badań była ocena aktywności wody badanych mąk żołędziowych po 60 dniach przechowywania w higrostatach o stałej wilgotności względnej w zakresie aktywności wody środowiska $a_w$ = 0,07-0,93 (**tabela 10**). Ocena aktywności wody mąk żołędziowych po 60 dniach przechowywania w zakresie aktywności wody, obejmującym proces desorpcji $a_w$ = 0,07-0,44 wykazała, że badane mąki nie osiągnęły poziomu aktywności wody środowiska. Podobną zależność stwierdzono w obszarze obejmującym proces adsorpcji $a_w$ = 0,75-0,92. Natomiast w zakresie aktywności środowiska $a_w$ = 0,55-0,69 badane mąki uzyskały zbliżony poziom aktywności wody środowiska.

**Tabela 10.** Aktywność wody w mąkach żołędziowych przechowywanych w środowisku o aktywności wody $a_w$ = 0,07-0,92.

| **Aktywność wody środowiska $a_w$ [-]** | **Aktywność wody po procesie przechowywania [-]** | |
|---|---|---|
| | **mąka żołędziowa polska (AP)** | **mąka żołędziowa grecka (AG)** |
| 0,07 | 0,1183 | 0,0930 |
| 0,11 | 0,1552 | 0,1218 |
| 0,23 | 0,2612 | 0,2428 |
| 0,33 | 0,3490 | 0,3360 |
| 0,44 | 0,4641 | 0,4419 |
| 0,55 | 0,5550 | 0,5471 |
| 0,69 | 0,6840 | 0,6914 |
| 0,75 | 0,7320 | 0,7402 |
| 0,85 | 0,8283 | 0,8202 |
| 0,92 | 0,9310 | 0,8862 |

W celu matematycznego opisu zależności między aktywnością wody w żywności a jej zawartością, opracowano modele, których parametry zostały określone za pomocą współczynników regresji częściowej, opisujących każdą z trzech stref, charakterystycznych dla izotermy sorpcji. Istnieje bardzo wiele modeli matematycznych służących opisowi izoterm sorpcji, jednak najczęściej stosowanymi są równania: Langmuira'a, BET, GAB, Oswina'a, Smith'a, Hendersona'a i Pelega'a.

Opracowany przez Brunauera, Emmetta i Tellera model (BET) zakłada, że sigmoidalny przebieg izoterm sorpcji jest wywołany adsorpcją wielowarstwową. Zgodnie z tym założeniem, każda zaadsorbowana cząsteczka staje się potencjalnym centrum adsorpcyjnym dla następnej cząsteczki adsorbatu. Tym samym siły występujące

przy tworzeniu kolejnych warstw są analogiczne do sił powodujących skraplanie pary do cieczy. Za pomocą tego modelu można obliczyć zawartość wody związanej w warstwie monomolekularnej przy założeniu jednorodności powierzchni adsorpcyjnej oraz braku oddziaływań między zaadsorbowanymi cząsteczkami wody. Model BET dobrze charakteryzuje niektóre typy izoterm przy aktywności wody $a_w$ = 0,5 (Ruszkowska, 2018).

W celu oszacowania wybranych parametrów mikrostruktury powierzchni oraz przebiegu zjawiska sorpcji, empirycznie wyznaczone izotermy sorpcji wody poddano transformacji zgodnie z modelem BET, w zakresie $a_w$ = 0,07-0,33. Parametry równania BET: pojemność monowarstwy $v_m$, stałą energetyczną $c_e$, sumę kwadratów odchyleń wartości teoretycznych od wartości empirycznych (SKO), średni błąd kwadratowy (RMS) oraz wartości błędów standardowych (FitStdErr) przedstawiono w **tabeli 11**.

**Tabela 11.** Parametry równania BET.

| Produkt | $v_m$ [g/100 g. s. m.] | $c_e$ | $a_w$ [-] | $R^2$ | SKO | RSM [%] | FitStdErr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mąka żołędziowa grecka | 6,84 | 18,33 | 0,2183 | 0,9997 | 0,55 | 0,69 | 0,1038 |
| mąka żołędziowa polska | 4,98 | 19,49 | 0,1505 | 0,9982 | 1,70 | 1,42 | 0,4138 |

Na podstawie pojemność monowarstwy ($v_m$) określa się pojemność sorpcyjną adsorbentów, traktując ten parametr jako wskaźnik dostępności miejsc polarnych dla pary wodnej niezależnie od tego, który ze składników jest źródłem grup hydrofilowych. O pojemności $v_m$ decyduje liczba i stan fizyczny składników bogatych w miejsca polarne, które determinują ilość wody silnie związanej z matrycą żywności (Mathlouthi, 2001; Ocieczek, 2012). Wyższe wartości pojemności monowarstwy $v_m$ stwierdzono w przypadku mąki żołędziowej greckiej. Prawdopodobnie parametrem decydującym o właściwościach hydrofilowych determinujących wartość pojemności monowarstwy $v_m$ była wyższa zawartość białka w surowcu (**tabela 8**). Ponadto wyniki te wskazują na istnienie zróżnicowania stanu suchej matrycy badanych mąk. Struktura granul skrobiowych mąki żołędziowej była zróżnicowana w zależności od jej pochodzenia i mogła dodatkowo ulegać zmianom na skutek ich dezagregacji w czasie rozdrabniania lub interakcji pomiędzy granulami skrobi i innymi składnikami mieszaniny na co wskazuje wiele badań naukowych (np. Erbas i in., 2005; Jurga, 2005; Raeker i in., 1998; Roman-Gutierrez i in., 2002; Saad i in., 2009). Jednocześnie biorąc pod uwagę wyższe położenie izotermy mąki żołędziowej greckiej w zakresie aktywności wody ($a_w$ = 0,23-0,33) zakładać można, że wraz ze zwiększeniem zawartości wody w otoczeniu,

na cząsteczkach rozdrobnionej mąki żołędziowej greckiej dochodziło do zmian mikrostrukturalnych. Proces dotyczył szczególnie obszarów amorficznych na skutek pochłaniania wody, co powodowało odsłanianie kolejnych miejsc polarnych. Skuteczne otwieranie się mikrostruktury uzależnione jest od jej amorficzności, sprzyjającej lokalnemu zwiększeniu higroskopijności i „amplifikacji" działania wody, co opisał Buckton (1997).

Na podstawie oceny pojemności warstwy monomolekularnej przypuszczać można, że mąka żołędziowa grecka cechowała się wyższą trwałością przechowalniczą w porównaniu z mąką żołędziową polską. Znaczne rozwinięcie powierzchni warstwy monomolekularnej chroni bowiem produkty żywnościowe przed obniżeniem jakości w wyniku pochłaniania określonej ilości wody (Ocieczek i Ruszkowska, 2018). Mąka żołędziowa, niezależnie od pochodzenia, cechuje się jednak niższą pojemnością mononuklearną w porównaniu do mąk pełnoziarnistych żytniej i orkiszowej badanymi przez Ruszkowską (2012).

Stała energetyczna $c_e$ odzwierciedla różnicę pomiędzy entalpią desorpcji monowarstwy i entalpią parowania ciekłego adsorbentu. Uzyskane wyniki stałej $C \leq 2$ (**tabela 11**) potwierdzały sigmoidalny kształt krzywej sorpcji.

Na podstawie porównania wartości SKO i RMS stwierdzono, że parametry modelu BET oszacowane z zastosowaniem metody analitycznej dobrze opisywały pod względem matematycznym proces sorpcji mąk żołędziowych (**tabela 11**). Wartość średniego błędu kwadratowego (RMS) dla tych produktów nie przekraczała 10%, wskazując na dobrą zgodność dopasowania modelu do danych sorpcyjnych w badanym zakresie aktywności wody ($a_w$ = 0,07-0,33) (**tabela 11**).

Na podstawie pojemności warstwy monomolekularnej $v_m$ obliczono powierzchnię właściwą sorpcji (**tabela 12**), definiowaną jako powierzchnia przypadającą na jednostkę masy ($m^2/g$). Jest to jeden ważniejszych parametrów, charakteryzujących zdolności adsorbentów do adsorpcji gazów, par oraz jonów (Sokołowska i in., 2016). Na podstawie przeprowadzonej charakterystyki strukturalnej badanych mąk stwierdzono, że większą powierzchnią właściwą sorpcji cechowała się mąka żołędziowa grecka, która uzyskała wartość 240,28 $m^2/g$. Przypuszczać można, iż było to determinowane wyższą zawartością białka (**tabela 8**), która warunkowała rozwinięcie powierzchni właściwej sorpcji w ocenianych mąkach. Większa pojemność monowarstwy oraz powierzchnia właściwa sorpcji, stwierdzone dla mąki żołędziowej greckiej, mogą mieć znaczenie dla przebiegu procesu kleikowania skrobi w trakcie wypieku pieczywa (Purohit i Rao, 2017). Sato i in. (2010) w przeprowadzonych badaniach stwierdzili dodatnią korelację pomiędzy właściwościami sorpcyjnymi mąki a jej zdolnością do kleikowania.

**Tabela 12.** Charakterystyka strukturalna badanych produktów oszacowana na podstawie parametrów równania BET.

| Produkt | Powierzchnia właściwa sorpcji [$m^2/g$] |
|---|---|
| mąka żołędziowa grecka | 240,28 |
| mąka żołędziowa polska | 174,84 |

**Podsumowanie**

Pochodzenie mąki żołędziowej wpływa różnicująco na cechy jakości, zarówno skład chemiczny jak i cechy fizyczne. Różnice w składzie chemicznym dotyczyły przede wszystkim białka, tłuszczu i węglowodanów oraz związków fenolowych ogółem, kwasu elagowego i kwasu galusowego. Zaobserwowane różnice w zawartości składników chemicznych przekładać się mogą na stwierdzone różnice właściwości fizycznych: barwę oraz gęstość luźną i nasypową oraz różnice właściwości sorpcyjnych (higroskopijności oraz pojemności monowarstwy). Konieczne jest prowadzenie dalszych badań, które pozwolą na scharakteryzowanie mąki żołędziowej m.in. pod kątem granulacji czy charakterystyki skrobi, jako czynników mających znaczenie dla sypkości, właściwości sorpcyjnych i trwałości przechowalniczej.

## 6.3. Wpływ dodatku mąki żołędziowej polskiej na właściwości wypiekowe mąki pszennej

Wartość wypiekowa mąki to istotny element ogólnej jakości mąki, który determinuje dobór parametrów procesu technologicznego, konieczność modyfikacji składu recepturowego, a w konsekwencji jakość produktu końcowego (Czubaszek i in., 2021; Finnie i Atwell, 2016). Z tego względu, planując badania dotyczące wpływu mąki żołędziowej na cechy ciasta i pieczywa z jej udziałem, dążąc do ustalenia receptury pieczywa, ciast i ciastek, dokonano badań mających na celu określenie wpływu mąki żołędziowej na właściwości wypiekowe mąki pszennej.

### 6.3.1. Właściwości fermentograficzne i amylograficzne

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że mąka żołędziowa zmieniała właściwości fermentograficzne i amylograficzne mąki pszennej, i nawet niewielki udział mąki

żołędziowej (5%) wpływał na ilość gazów wydzielonych podczas fermentacji oraz temperaturę kleikowania skrobi.

Wyniki ilości gazów wydzielonych podczas fermentacji oraz proporcje między objętością gazów wydzielonych a objętością gazów zatrzymanych w masie ciasta otrzymanego z mąki pszennej, żołędziowej oraz ich mieszanek przedstawiono w **tabeli 13**. Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej w cieście zwiększała się objętość gazów wydzielonych (maksymalnie o 140% dla próbki z 30% udziałem mąki żołędziowej), a zmniejszała się objętość gazów zatrzymanych (maksymalnie o 92% dla próbki z 50% udziałem mąki żołędziowej). Dodatek mąki żołędziowej co najmniej 25% wpływał istotnie statystycznie ($p \leq 0,05$) na zmniejszenie objętości ciasta w punkcie krytycznym. Skróceniu uległ również czas od rozpoczęcia fermentacji do osiągnięcia punktu krytycznego (z 32,67 min do 18,67 min), rozumianego jako moment, w którym ciasto uzyskuje optymalny rozrost (dane nie przedstawione).

**Tabela 13.** Właściwości fermentograficzne mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych.

| Próba | Ocean fermentograficzna | | |
|---|---|---|---|
| | **Gazy zatrzymane [cm$^3$]** | **Gazy wydzielone [cm$^3$]** | **Objętość w punkcie krytycznym [cm$^3$]** |
| W-C | 177,00 ± 3,61$^{a}$ | 146,33 ± 7,57$^{a}$ | 59,67 ± 6,66$^{a}$ |
| W-AP-5% | 175,00 ± 18,52$^{ab}$ | 201,33 ± 25,01$^{b}$ | 58,67 ± 5,51$^{a}$ |
| W-AP-10% | 172,33 ± 9,71$^{ab}$ | 256,33 ± 29,67$^{c}$ | 58,00 ± 10,54$^{a}$ |
| W-AP-15% | 163,00 ± 5,57$^{b}$ | 275,33 ± 14,57$^{cd}$ | 63,00 ± 7,00$^{a}$ |
| W-AP-20% | 113,33 ± 2,52$^{c}$ | 279,67 ± 35,57$^{cd}$ | 53,33 ± 5,51$^{a}$ |
| W-AP-25% | 86,33 ± 6,51$^{d}$ | 339,67 ± 27,06$^{ef}$ | 42,00 ± 4,36$^{b}$ |
| W-AP-30% | 64,00 ± 4,00$^{e}$ | 351,33 ± 29,57$^{f}$ | 37,00 ± 2,00$^{bc}$ |
| W-AP-40% | 50,00 ± 1,00$^{f}$ | 309,33 ± 9,07$^{de}$ | 31,67 ± 1,53$^{c}$ |
| W-AP-50% | 13,33 ± 1,53$^{g}$ | 167,67 ± 5,86$^{ab}$ | 4,67 ± 1,15$^{d}$ |
| AP-100% | 66,30 ± 2,52$^{e}$ | 15,67 ± 3,21$^{g}$ | 57,00 ± 4,36$^{a}$ |

W – mąka pszenna, AP – mąka żołędziowa, C – próbka kontrolna, 5-100% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-g – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Kleikowanie skrobi w przypadku ciast bezglutenowych lub wytwarzanych z udziałem surowców bezglutenowych jest procesem szczególnie ważnym ze względu na zdolność kleiku skrobiowego do wychwytywania i zatrzymywania pęcherzyków gazu we własnej matrycy, co dodatkowo przekłada się na objętość i porowatość miękiszu chleba (Martínez i Gómez, 2017). Z tego powodu analiza amylograficzna odgrywa ważną rolę w ocenie właściwości fermentacyjnych mąki. Z technologicznego punktu widzenia najbardziej znaczącą zmianą

właściwości amylograficznych mąki pszennej w wyniku wprowadzenia mąki żołędziowej było obniżenie maksymalnej lepkości otrzymanych żeli skrobiowych (**tabela 14**). Maksymalna lepkość żeli skrobiowych zmniejszyła się istotnie ($p \leq 0,05$) przy udziale mąki żołędziowej powyżej 30%. W badaniach przedstawionych przez Correia i in. (2013) skrobia żołędziowa charakteryzowała się ograniczoną zdolnością pęcznienia, co może przekładać się na przebieg procesu kleikowania i cechy uzyskiwanych żeli. Mniejszą lepkość próbek z mąką żołędziową w stosunku do lepkości próbki mieszanej z mąki ryżowej, ziemniaczanej i gryczanej stwierdzono w badaniach Beltrão Martins i in. (2020). Różnice w kleikowaniu skrobi w poszczególnych mąkach mogą wynikać z różnic w zawartości amylozy, tworzącej skrobię oraz w zawartości tłuszczu (Singh i in., 2003). Jak podaje Berski (2010), pomiędzy cząsteczkami amylozy a cząsteczkami lipidów dochodzić może do powstawania inkluzyjnych kompleksów, które zmniejszają zdolność ziarenek skrobiowych do pęcznienia oraz rozpuszczalność skrobi w wodzie. Dodatek mąki żołędziowej do mąki pszennej podwyższał końcową temperaturę kleikowania. Końcowa temperatura kleikowania próbek z wprowadzoną mąką żołędziową nie różniła się istotnie statystycznie ($p > 0,05$) w zależności od udziału mąki żołędziowej. Średnie zwiększenie temperatury końcowego kleikowania próbek pszenno-żołędziowych w porównaniu z próbką kontrolną wynosiło 3,5%. Wynik ten był porównywalny z wynikami przedstawionymi przez Beltrão Martins i in. (2020).

**Tabela 14.** Właściwości amylograficzne mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych.

| Próba | Ocena amylograficzna | | | |
|---|---|---|---|---|
| | początek kleikowania skrobi | | koniec kleikowania skrobi | |
| | temperatura [°C] | lepkość [jB] | temperatura [°C] | lepkość [jB] |
| W-C | $58,63 \pm 0,21^{a}$ | $17,67 \pm 0,58^{ab}$ | $85,30 \pm 0,56^{a}$ | $744,67 \pm 6,03^{a}$ |
| W-AP-5% | $58,63 \pm 0,25^{a}$ | $17,33 \pm 0,58^{ab}$ | $86,73 \pm 0,15^{b}$ | $730,67 \pm 8,50^{a}$ |
| W-AP-10% | $59,63 \pm 0,67^{ab}$ | $17,33 \pm 0,58^{ab}$ | $88,60 \pm 1,06^{c}$ | $726,33 \pm 16,01^{ab}$ |
| W-AP-15% | $60,70 \pm 2,17^{b}$ | $16,33 \pm 2,08^{b}$ | $88,23 \pm 0,12^{c}$ | $722,00 \pm 12,00^{ab}$ |
| W-AP-20% | $59,27 \pm 0,21^{ab}$ | $18,33 \pm 0,58^{a}$ | $88,60 \pm 0,85^{c}$ | $720,00 \pm 5,29^{a,}$ |
| W-AP-25% | $60,50 \pm 0,46^{b}$ | $17,67 \pm 0,58^{ab}$ | $88,80 \pm 0,62^{c}$ | $719,33 \pm 17,01^{ab}$ |
| W-AP-30% | $60,67 \pm 0,45^{b}$ | $16,67 \pm 0,58^{ab}$ | $88,47 \pm 0,06^{c}$ | $694,00 \pm 6,24^{b}$ |
| W-AP-40% | $60,53 \pm 0,60^{b}$ | $16,33 \pm 0,58^{b}$ | $88,33 \pm 0,42^{c}$ | $661,00 \pm 7,81^{c}$ |
| W-AP-50% | $61,30 \pm 0,53^{b}$ | $17,33 \pm 1,53^{ab}$ | $88,47 \pm 0,49^{c}$ | $638,67 \pm 30,75^{c}$ |
| AP-100% | $69,67 \pm 1,21^{c}$ | $16,67 \pm 0,58^{ab}$ | $99,87 \pm 0,06^{d}$ | $531,00 \pm 42,46^{d}$ |

W – mąka pszenna, AP – mąka żołędziowa, C – próbka kontrolna, 5-100% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-d – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

### 6.3.2. Właściwości farinograficzne

Określenie wartości wypiekowej mąki i jej przydatności do obróbki mechanicznej z wykorzystaniem oceny farinograficznej pozwala na zbadanie ciasta w warunkach zbliżonych do warunków produkcyjnych, i jest metodę bardziej użyteczną niż ocena ilości i jakości białka (Cacak-Pietrzak i in., 2019). Dodatek mąki żołędziowej do mąki pszennej wpływa na jej wodochłonność oraz zachowanie ciasta w czasie mieszania (**tabela 15**). Należy zaznaczyć, że ocena farinograficzna próbek mieszanych, pszenno-żołędziowych, nie była możliwa przy udziale mąki żołędziowej powyżej 25%. Uzyskiwane rezultaty nie były miarodajne i prowadziły do uzyskania rozbieżności pomiędzy wskazaniami Farinografu® a rzeczywistą strukturą i konsystencją ciasta. Zgodnie z powiązaniem pomiędzy cechami sypkości, wielkością cząstek oraz zachowaniem mąk w czasie mieszania w miesiarce Farinografu®, przedstawionym przez Landillon i in. (2008), za zachowanie mąki żołędziowej w trakcie analizy i problemy w ocenie cech farinograficznych przy udziale tej mąki powyżej 25% odpowiadać mogą jej właściwości fizyczne, w tym zła sypkość.

Mąka żołędziowa charakteryzowała się znacznie wyższą (prawie 3-krotnie) wodochłonnością w porównaniu z mąką pszenną. Jak podają Mousavi i in. (2021), przyczyną różnic w wodochłonności mąki pszennej i żołędziowej mogą być różnice w składzie chemicznym i właściwościach obu mąk, w szczególności wyższa zawartość białka i błonnika pokarmowego w mące żołędziowej (co potwierdzają dane w **tabeli 8**), granulacji mąki czy wielkości i stopniu degradacji ziaren skrobi. Wysoka wodochłonność mąki żołędziowej zwiększała wodochłonność próbek mieszanych; im wyższy udział stanowiła mąka żołędziowa w mieszance, tym wyższa była wodochłonność. Zwiększenie wodochłonności wyniosło od 8% do 92%, odpowiednio dla próbek z 5% i 50% udziałem mąki żołędziowej. Jak podają Cacak-Pietrzak i in. (2023), zwiększona wodochłonność mąki może wpływać na zwiększenie wydajności chleba oraz jego cechy tekstury.

Dodatek mąki żołędziowej wpłynął na wydłużenie czasu rozwoju i czasu stałości ciasta. Czas rozwoju ciasta dla mąki pszennej wynosił 4,68 min i wydłużał się wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej do 22,38 min (zwiększenie o 378%) dla próbki z 25% udziałem mąki żołędziowej. Z kolei czas stałości ciasta wydłużył się z 9,23 min (próbka pszenna) do 36,10 min (zwiększenie o 291%) dla próbki z 25% udziałem mąki żołędziowej. Uzyskane wyniki były zgodne z wynikami przedstawionymi przez Mousavi i in. (2021), którzy odnotowali wydłużenie czasu rozwoju ciasta i czasu stałości ciasta po wprowadzeniu 10-50% mąki żołędziowej.

**Tabela 15.** Ocena farinograficzna mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych.

| Próbka | Wodochłonność [%] | Konsystencja [FU] | Czas rozwoju ciasta [min] | Czas stałości ciasta [min] | Stopień rozmiękczenia [FU] | Liczba jakości |
|---|---|---|---|---|---|---|
| W-C | $71{,}09 \pm 1{,}81^{a}$ | $499{,}33 \pm 10{,}50^{ab}$ | $4{,}68 \pm 0{,}08^{a}$ | $9{,}23 \pm 0{,}17^{a}$ | $34{,}33 \pm 1{,}15^{a}$ | $94{,}33 \pm 2{,}08^{a}$ |
| W-AP-5% | $77{,}05 \pm 2{,}65^{ab}$ | $483{,}00 \pm 4{,}58^{ab}$ | $5{,}75 \pm 0{,}23^{a,b}$ | $11{,}88 \pm 0{,}57^{b}$ | $21{,}33 \pm 2{,}52^{b}$ | $113{,}33 \pm 6{,}51^{ab}$ |
| W-AP-10% | $79{,}59 \pm 0{,}76^{bc}$ | $491{,}67 \pm 3{,}21^{ab}$ | $6{,}97 \pm 0{,}45^{b}$ | $13{,}53 \pm 0{,}28^{c}$ | $13{,}33 \pm 1{,}53^{c}$ | $123{,}00 \pm 1{,}00^{b}$ |
| W-AP-15% | $85{,}68 \pm 0{,}81^{cd}$ | $513{,}00 \pm 24{,}52^{c}$ | $7{,}52 \pm 0{,}40^{b}$ | $10{,}62 \pm 0{,}60^{ab}$ | $12{:}33 \pm 2{,}52^{c}$ | $119{,}67 \pm 4{,}51^{b}$ |
| W-AP-20% | $89{,}37 \pm 1{,}19^{de}$ | $494{,}67 \pm 23{,}71^{ab}$ | $12{,}52 \pm 1{,}05^{c}$ | $29{,}88 \pm 2{,}40^{d}$ | $5{,}67 \pm 1{,}53^{d}$ | $236{,}33 \pm 32{,}56^{c}$ |
| W-AP-25% | $95{,}44 \pm 0{,}22^{ef}$ | $476{,}00 \pm 47{,}47^{a}$ | $22{,}38 \pm 3{,}72^{d}$ | $36{,}10 \pm 0{,}25^{e}$ | $34{,}33 \pm 10{,}21^{a}$ | $319{,}67 \pm 17{,}56^{d}$ |
| W-AP-30% | $100{,}18 \pm 3{,}18^{f}$ | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| W-AP-40% | $116{,}06 \pm 3{,}86^{g}$ | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| W-AP-50% | $136{,}77 \pm 2{,}96^{h}$ | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| AP-100% | $201{,}78 \pm 10{,}69^{i}$ | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |

W – mąka pszenna, AP – mąka żołędziowa, C – próbka kontrolna, 5-100% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); n.a. – nie analizowano; a-i – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$.

Zwiększenie wartości badanych wyróżników uzyskane przez cytowanych wyżej autorów było jednak mniejsze niż w niniejszej pracy i wyniosło maksymalnie 109% dla czasu rozwoju ciasta i 153% dla czas stałości ciasta w próbce z 50% udziałem mąki żołędziowej. W badaniach przeprowadzonych przez Švec i in. (2018) dodatek mąki żołędziowej na poziomie 5% wydłużył czas rozwoju ciasta o 209%, natomiast czas stałości ciasta skrócił się o 59%. Natomiast Rashid i in. (2014) odnotowali skrócenie czasu rozwoju ciasta i czasu stałości ciasta wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej w próbce. Z kolei Ajo (2018) przedstawił badania, w których wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej skracał się czas rozwoju ciasta, natomiast wydłużał się czas stałości ciasta.

Różnice jakości mąki, przekładające się na zróżnicowanie parametrów oceny farinograficznej, wynikają w dużej mierze ze składu chemicznego mąki, w tym zawartości glutenu, błonnika pokarmowego, białka i składników mineralnych (Biel i in., 2021; Nikolić i in., 2013). Dokonując oceny jakości mąki w oparciu o analizę farinograficzną należy poszczególne parametry rozpatrywać nie jako pojedyncze elementy, ale sumaryczną całość. Korzystną dla jakości mąki jest ocena, w której wysoka wodochłonność mąki idzie w parze z niską wartością stopnia rozmiękczenia (Aydoğan i in., 2015) oraz wydłużonym czasem stałości (Torbica i in., 2021), co zaobserwowano w przeprowadzonych badaniach w przypadku wprowadzenia mąki żołędziowej do 20%.

### 6.3.3. Właściwości ekstensograficzne

Przeprowadzona analiza ekstensograficzna pozwoliła na ocenę zmian właściwości reologicznych ciasta pszennego, w tym jego rozciągliwości i odporności na rozciąganie, wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej w próbce (**tabela 16**).

Wraz z udziałem mąki żołędziowej w próbkach, niezależnie od czasu fermentacji (leżakowania) ciasta w komorze ekstensografu, zmniejszała się wartość energii, przykładanej do rozciągnięcia ciasta oraz rozciągliwość ciasta. 25% udział mąki żołędziowej w cieście powodował zmniejszenie energii o 68%, 77% i 71% oraz rozciągliwości ciasta o 54%, 55% i 46% odpowiednio dla 30, 60 i 90 min fermentacji.

Dodatek mąki żołędziowej do ciasta pszennego na poziomie od 5% do 15% zwiększył opór ciasta na rozciąganie. W przypadku czasu fermentacji 30 min maksymalny opór na rozciąganie uzyskano dla próbki z 10% udziałem mąki żołędziowej, w przypadku czasów fermentacji 60 i 90 min – dla próbki z 5% udziałem mąki żołędziowej. Dalsze zastępowanie mąki pszennej mąką żołędziową powodowało zmniejszenie oporu względem próbki kontrolnej.

**Tabela 16.** Ocena ekstensograficzna mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych.

| Próbka | Energia [cm$^2$] | | | Opór na rozciąganie [EU] | | | Rozciągliwość [mm] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 min | 60 min | 90 min | 30 min | 60 min | 90 min | 30 min | 60 min | 90 min |
| W-C | 122,33 ± 11,37$^{a}$ | 185,00 ± 8,72$^{a}$ | 154,00 ± 3,46$^{a}$ | 573,00 ± 64,47$^{a}$ | 942,33 ± 4,16$^{a}$ | 990,00 ± 5,29$^{a}$ | 128,67 ± 0,58$^{a}$ | 125,00 ± 3,61$^{a}$ | 104,67 ± 2,08$^{a}$ |
| W-AP-5% | 84,00 ± 4,58$^{b}$ | 132,00 ± 5,00$^{b}$ | 121,33 ± 20,26$^{b}$ | 651,33 ± 26,08$^{ab}$ | 1105,33 ± 15,28$^{b}$ | 1166,00 ± 108,81$^{b}$ | 95,67 ± 1,15$^{b}$ | 93,33 ± 4,16$^{b}$ | 88,67 ± 3,51$^{b}$ |
| W-AP-10% | 74,67 ± 7,57$^{bc}$ | 82,33 ± 7,02$^{c}$ | 70,00 ± 4,00$^{c}$ | 773,00 ± 54,06$^{c}$ | 1047,67 ± 27,57$^{b}$ | 618,00 ± 82,46$^{c}$ | 73,67 ± 3,06$^{c}$ | 63,67 ± 3,21$^{c}$ | 55,33 ± 0,58$^{c}$ |
| W-AP-15% | 63,67 ± 2,08$^{c,d}$ | 69,67 ± 8,50$^{d}$ | 69,33 ± 7,64$^{c}$ | 707,67 ± 25,97$^{bc}$ | 776,00 ± 40,04$^{c}$ | 609,00 ± 88,88$^{c}$ | 67,33 ± 3,21$^{d}$ | 55,33 ± 4,73$^{d}$ | 56,67 ± 1,53$^{c}$ |
| W-AP-20% | 55,67 ± 4,51$^{d}$ | 63,33 ± 4,93$^{d}$ | 57,33 ± 2,52$^{c,d}$ | 587,00 ± 60,31$^{a}$ | 529,33 ± 84,24$^{d}$ | 401,67 ± 23,63$^{d}$ | 59,33 ± 2,31$^{e}$ | 56,33 ± 1,53$^{d}$ | 53,67 ± 1,53$^{c}$ |
| W-AP-25% | 39,00 ± 3,00$^{e}$ | 43,00 ± 2,65$^{e}$ | 44,33 ± 3,21$^{d}$ | 350,33 ± 35,36$^{d}$ | 445,33 ± 43,98$^{e}$ | 329,00 ± 98,61$^{d}$ | 59,33 ± 3,51$^{e}$ | 56,00 ± 3,00$^{d}$ | 56,33 ± 3,06$^{c}$ |
| W-AP-30% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| W-AP-40% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| W-AP-50% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| AP-100% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |

| | Maksymalny opór w punkcie przerwania [EU] | | | Współczynnik oporu | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 min | 60 min | 90 min | 30 min | 60 min | 90 min |
| W-C | 713,67 ± 70,12$^{ab}$ | 1137,67 ± 22,74$^{a}$ | 1224,67 ± 6,43$^{a}$ | 4,43 ± 0,49$^{a}$ | 7,53 ± 0,15$^{a}$ | 9,47 ± 0,15$^{a}$ |
| W-AP-5% | 665,33 ± 27,39$^{a}$ | 1164,67 ± 5,51$^{a}$ | 1237,67 ± 139,29$^{a}$ | 6,80 ± 0,20$^{b}$ | 11,87 ± 0,71$^{b}$ | 13,13 ± 0,72$^{b}$ |
| W-AP-10% | 776,33 ± 54,98$^{b}$ | 1257,00 ± 19,67$^{a}$ | 1122,00 ± 95,39$^{a}$ | 10,47 ± 0,25$^{c}$ | 16,50 ± 0,52$^{c}$ | 11,13 ± 1,40$^{a}$ |
| W-AP-15% | 762,00 ± 22,34$^{ab}$ | 1103,00 ± 68,09$^{a}$ | 1064,33 ± 77,75$^{a}$ | 10,53 ± 0,90$^{c}$ | 14,07 ± 0,86$^{d}$ | 10,73 ± 1,29$^{a}$ |
| W-AP-20% | 742,67 ± 47,72$^{ab}$ | 885,33 ± 192,42$^{b}$ | 796,00 ± 209,07$^{b}$ | 9,87 ± 0,84$^{c}$ | 9,40 ± 1,68$^{e}$ | 7,33 ± 0,46$^{c}$ |
| W-AP-25% | 442,00 ± 72,17$^{c}$ | 560,67 ± 40,82$^{c}$ | 564,00 ± 26,51$^{c}$ | 5,93 ± 0,71$^{d}$ | 7,97 ± 1,03$^{ae}$ | 5,83 ± 1,57$^{c}$ |
| W-AP-30% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| W-AP-40% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| W-AP-50% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| AP-100% | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |

W – mąka pszenna, AP – mąka żołędziowa, C – próba kontrolna, 5-100% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); n.a. – nie analizowano; a-e – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Ograniczający wpływ mąki żołędziowej na rozciągliwość ciasta pszennego oraz zwiększenie oporu na rozciąganie wraz z udziałem mąki żołędziowej wykazali również Mousavi i in. (2021). W badaniach Gonzaga i in. (2015) dodatek 10% i 15% mąki żołędziowej powodował zwiększenie energii przykładanej do rozciągania, zwiększenie rozciągliwości ciasta oraz zwiększenie oporu na rozciąganie.

Jak wskazują Dapčević Hadnađev i in. (2011), energia w ocenie ekstensograficznej jest parametrem, który może służyć scharakteryzowaniu mocy mąki. Przyjmuje się, że im mocniejsza jest mąka, tym więcej energii potrzeba do rozciągnięcia ciasta. Mirza Alizadeh i in. (2022) podają, że energia pozostaje w korelacji ze zdolnością ciasta do zatrzymywania gazów, objętością chleba po wypieku oraz jego zachowaniem w trakcie formowania. Uzyskane w niniejszej pracy wyniki pozostają w zgodności z przedstawionym założeniem. Wykazano, że udział mąki żołędziowej w próbkach wpływał na zmniejszenie energii przykładanej do ciasta (**tabela 15**), powodował zmniejszenie objętości gazów zatrzymanych w cieście (**tabela 13**), a uzyskane w próbnym wypieku laboratoryjnym chleby cechowały się mniejszą objętością (**tabela 17**). Czynnikiem istotnie wpływającym na zmiany parametrów ekstensograficznych jest ilość i jakość glutenu występującego w mące, w tym stosunek gliadyny do gluteniny (Dapčević Hadnađev i in., 2011). Mąka żołędziowa jest surowcem bezglutenowym, stąd można tłumaczyć niekorzystne zmiany rozciągliwości ciasta z jej udziałem (Islam i in., 2019).

### 6.3.4. Właściwości technologiczne ciasta i chleba

Jak pokazano w **tabeli 17**, mąka żołędziowa różnicuje właściwości technologiczne ciasta i chleba pszennego. Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej, w sposób istotny statystycznie ($p \leq 0,05$), zwiększała się wydajność ciasta i chleba, a zmniejszała się objętość bochenków. Natomiast strata piecowa i strata wypiekowa całkowita przy udziale mąki żołędziowej do 40%, nie zmieniły się istotnie ($p > 0,05$). Uzyskane wyniki są spójne z wynikami przedstawionymi przez Beltrão Martins i in. (2020), którzy nie odnotowali istotnych zmian w stratach masowych chleba bezglutenowego z dodatkiem mąki żołędziowej. Dodatek mąki żołędziowej do chleba pszennego wpłynął na zwiększenie wydajności ciasta od 5% do 30%, odpowiednio dla próbki z 10% i 50% udziałem mąki żołędziowej, w porównaniu z próbką kontrolną. Statystycznie istotne zwiększenie wydajności ciasta nastąpiło wraz z każdym 10% dodatkiem mąki żołędziowej do ciasta. Średnie zwiększenie między próbkami wyniosło 5%.

**Tabela 17.** Właściwości technologiczne ciasta i chleba pszennego bez (próbka kontrolna) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej oraz glutenu pszennego.

| Rodzaj chleba | Wydajność ciasta [%] | Wydajność chleba [%] | Objętość bochenków [$cm^3$] | Porowatość miękiszu [%] | Strata piecowa [%] | Strata wypiekowa całkowita [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Chleb bez dodatku glutenu | | | | | | |
| WB-C | $181{,}14 \pm 0{,}99^{a}$ | $152{,}66 \pm 2{,}83^{a}$ | $805 \pm 7^{a}$ | $64{,}81 \pm 1{,}85^{a}$ | $7{,}24 \pm 1{,}15^{a}$ | $15{,}73 \pm 1{,}10^{a}$ |
| WB-AP-10% | $189{,}69 \pm 2{,}09^{bA}$ | $158{,}03 \pm 4{,}28^{aA}$ | $668 \pm 20^{bA}$ | $58{,}64 \pm 1{,}07^{bA}$ | $9{,}53 \pm 1{,}83^{abcA}$ | $16{,}70 \pm 1{,}77^{aA}$ |
| WB-AP-20% | $200{,}43 \pm 1{,}49^{cA}$ | $168{,}65 \pm 4{,}39^{bA}$ | $572 \pm 3^{cA}$ | $52{,}47 \pm 1{,}07^{cA}$ | $7{,}71 \pm 1{,}14^{abA}$ | $15{,}85 \pm 2{,}49^{aA}$ |
| WB-AP-30% | $208{,}68 \pm 0{,}80^{dA}$ | $173{,}98 \pm 1{,}23^{bA}$ | $485 \pm 7^{dA}$ | $40{,}74 \pm 1{,}85^{dA}$ | $10{,}29 \pm 0{,}44^{cA}$ | $16{,}63 \pm 0{,}27^{aA}$ |
| WB-AP-40% | $215{,}57 \pm 0{,}34^{eA}$ | $182{,}09 \pm 1{,}35^{cA}$ | $436 \pm 4^{eA}$ | $32{,}72 \pm 3{,}85^{eA}$ | $8{,}09 \pm 0{,}27^{abcA}$ | $15{,}53 \pm 0{,}55^{aA}$ |
| WB-AP-50% | $234{,}86 \pm 1{,}77^{fA}$ | $186{,}24 \pm 5{,}13^{cA}$ | $388 \pm 15^{fA}$ | $25{,}93 \pm 3{,}21^{fA}$ | $10{,}04 \pm 1{,}84^{bcA}$ | $20{,}69 \pm 2{,}65^{bA}$ |
| Chleb z dodatkiem glutenu | | | | | | |
| WB-C | $181{,}14 \pm 0{,}99^{a}$ | $152{,}66 \pm 2{,}83^{a}$ | $805 \pm 7^{a}$ | $64{,}81 \pm 1{,}85^{ab}$ | $7{,}24 \pm 1{,}15^{a}$ | $15{,}73 \pm 1{,}10^{a}$ |
| WB-AP-10% | $168{,}55 \pm 0{,}60^{bB}$ | $145{,}63 \pm 1{,}04^{bB}$ | $767 \pm 6^{bB}$ | $67{,}28 \pm 2{,}83^{aB}$ | $8{,}75 \pm 0{,}31^{bA}$ | $13{,}60 \pm 0{,}57^{bB}$ |
| WB-AP-20% | $173{,}72 \pm 0{,}17^{cB}$ | $146{,}96 \pm 0{,}51^{bcB}$ | $628 \pm 11^{cB}$ | $61{,}73 \pm 2{,}14^{bcB}$ | $9{,}75 \pm 0{,}38^{bcB}$ | $15{,}41 \pm 0{,}37^{abA}$ |
| WB-AP-30% | $178{,}52 \pm 0{,}27^{dB}$ | $149{,}95 \pm 3{,}13^{acB}$ | $527 \pm 0{,}6^{dB}$ | $58{,}64 \pm 1{,}07^{cB}$ | $10{,}19 \pm 0{,}06^{cA}$ | $16{,}01 \pm 1{,}65^{aA}$ |
| WB-AP-40% | $184{,}59 \pm 0{,}25^{eB}$ | $152{,}31 \pm 2{,}45^{aB}$ | $526 \pm 3^{dB}$ | $53{,}09 \pm 2{,}83^{dB}$ | $10{,}58 \pm 0{,}74^{cB}$ | $17{,}48 \pm 1{,}43^{aB}$ |
| WB-AP-50% | $191{,}07 \pm 0{,}10^{fB}$ | $157{,}74 \pm 1{,}47^{dB}$ | $484 \pm 9^{eB}$ | $54{,}34 \pm 1{,}07^{dB}$ | $10{,}31 \pm 0{,}09^{cA}$ | $17{,}44 \pm 0{,}73^{aAB}$ |
| Chleb z podwojonym dodatkiem glutenu | | | | | | |
| WB-C | $181{,}14 \pm 0{,}99^{a}$ | $152{,}66 \pm 2{,}83^{ad}$ | $805 \pm 7^{a}$ | $64{,}81 \pm 1{,}85^{a}$ | $7{,}24 \pm 1{,}15^{a}$ | $15{,}73 \pm 1{,}10^{a}$ |
| WB-AP-10% | $173{,}67 \pm 0{,}44^{bC}$ | $144{,}71 \pm 1{,}66^{bB}$ | $765 \pm 2^{bB}$ | $69{,}14 \pm 2{,}14^{bB}$ | $7{,}93 \pm 0{,}12^{aA}$ | $16{,}68 \pm 0{,}98^{aA}$ |
| WB-AP-20% | $177{,}44 \pm 0{,}18^{cC}$ | $149{,}00 \pm 1{,}50^{cB}$ | $664 \pm 8^{cC}$ | $62{,}96 \pm 3{,}70^{acB}$ | $7{,}62 \pm 0{,}64^{aA}$ | $16{,}02 \pm 0{,}83^{aA}$ |
| WB-AP-30% | $178{,}82 \pm 0{,}24^{dB}$ | $149{,}79 \pm 0{,}50^{acB}$ | $532 \pm 2^{dB}$ | $59{,}88 \pm 1{,}07^{cdB}$ | $7{,}97 \pm 0{,}02^{aB}$ | $16{,}23 \pm 0{,}18^{aA}$ |
| WB-AP-40% | $183{,}52 \pm 0{,}16^{eC}$ | $153{,}91 \pm 0{,}84^{dB}$ | $531 \pm 7^{dB}$ | $54{,}94 \pm 1{,}07^{eB}$ | $7{,}88 \pm 0{,}05^{aA}$ | $16{,}13 \pm 0{,}51^{aAB}$ |
| WB-AP-50% | $195{,}25 \pm 0{,}51^{fC}$ | $164{,}46 \pm 2{,}44^{eB}$ | $470 \pm 4^{eB}$ | $56{,}79 \pm 2{,}14^{deB}$ | $7{,}70 \pm 0{,}27^{aB}$ | $15{,}77 \pm 1{,}14^{aB}$ |

WB – chleb pszenny, AP – mąka żołędziowa, C – próbka kontrolna, 10-50% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-f – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla chleba bez i z dodatkiem glutenu oraz z podwojonym dodatkiem glutenu) oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$; A-C – wartości średnie w kolumnach dla próbek z tym samym udziałem mąki żołędziowej oznaczone różnymi dużymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$.

Wraz ze zwiększeniem wydajności ciasta zwiększała się również wydajność chleba. Dodatek mąki żołędziowej do chleba pszennego zwiększył wydajność chleba nawet o 22% (próbka z 50% udziałem mąki żołędziowej). Zwiększenie wydajności ciasta i chleba z dodatkiem mąki żołędziowej wynikało prawdopodobnie ze zwiększonej absorpcji wody przez mąkę żołędziową (Mousavi i in., 2021). Wirkijowska i in. (2018) stwierdzili zwiększenie wydajności chleba pszennego na skutek wprowadzenia mąki jęczmiennej, co argumentowali zwiększoną zawartością błonnika w surowcu jęczmiennym, a szczególnie frakcji nierozpuszczalnej, wpływającej znacząco na wodochłonność mąki i retencję wody w trakcie wypieku chleba. Wysoka zawartość błonnika pokarmowego (**tabela 8**) oraz wyższa

wodochłonność mąki żołędziowej (**tabela 15**) zostały stwierdzone w niniejszej pracy i mogą tym samym stanowić przyczynę zwiększonej wydajności chleba pszenno-żołędziowego.

Odwrotne tendencje odnotowano dla objętości chleba. Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej zmniejszała się objętość bochenków. Każde wprowadzone do chleba 10% mąki żołędziowej powodowało istotne statystycznie ($p \leq 0,05$) zmniejszenie objętości bochenków średnio o 37%. Zmniejszenie objętości chleba wraz z udziałem mąki żołędziowej w próbkach odnotowali również Park i in. (2017) i Hrušková i in. (2019) dla chleba pszennego oraz Korus (2015) i Skendi i in. (2018) dla chleba bezglutenowego. W badaniach Hruškova i in. (2019) wykazano, że zmniejszenie objętości chleba pszennego następowało już przy 5% udziale mąki żołędziowej. Park i in. (2017) wykazali zmniejszenie objętości chleba pszennego o 28% przy 25% udziale mąki żołędziowej. W badaniach Korus i in. (2015) oraz Skendi i in. (2018) objętość chleba bezglutenowego zmniejszała się w próbkach, w których udział mąki żołędziowej przekraczał 15-20%. Różnice w objętości chleba z mąką żołędziową były widoczne w wyglądzie bochenków (**rysunek 11**). Wprowadzenie mąki żołędziowej prowadziło do uzyskania chleba o małej objętości oraz o mało elastycznym, zbitym i gumowatym miękiszu. Zmieniała się również porowatość miękiszu. Zauważono, że im większy udział mąki żołędziowej wprowadzono, tym porowatość chleba była mniejsza (**tabela 17**), rozkład porów w miękiszu i ich wielkość były bardziej nierównomierne (**rysunek 11**).

Mąka żołędziowa jest surowcem bezglutenowym, a brak glutenu wywiera negatywny wpływ na porowatość i objętość chleba, co potwierdziły liczne badania (Abd-El-Khalek i in., 2021; Hu i in., 2021; Hrušková i in., 2019; Park i in., 2017). Z tego powodu przeprowadzono dodatkowy eksperyment wypieku chleba pszenno-żołędziowego z dodatkiem glutenu pszennego. Uzyskane wyniki wykazały, że częściowe zastąpienie mąki żołędziowej glutenem pszennym pozwoliło na poprawienie objętości bochenków oraz porowatości miękiszu chleba z mąką żołędziową. Objętość chleba z dodatkiem glutenu (1-10% względem całkowitej ilości mąki) zmniejszyła się od 5% do 40%, a z podwojonym dodatkiem glutenu od 5% do 42% odpowiednio dla próbek z 10% i 50% udziałem mąki żołędziowej (podczas gdy dla chleba bez dodatku glutenu objętość bochenków zmniejszyła się o 17-52%). Średnie zmniejszenie objętości bochenków chleba, przy różnicy udziału mąki żołędziowej co 10%, wyniosło odpowiednio 27% i 26% dla chleba z pojedynczym i podwojonym dodatkiem glutenu, natomiast dla chlebów bez dodatku glutenu 37%. Wskazuje to, że zastosowanie glutenu w wypieku pieczywa pszenno-żołędziowego ogranicza negatywne zmiany jego objętości, wynikające z wprowadzenia do składu recepturowego surowca bezglutenowego (mąki żołędziowej).




WB – chleb pszenny, AP – mąka żołędziowa, C – próbka kontrolna, 10-50% – udział mąki żołędziowej.

**Rysunek 11.** Wygląd chleba pszennego bez (kontrolnego) i z dodatkiem mąki żołędziowej (a), z dodatkiem glutenu pszennego (b) oraz z podwojonym dodatkiem glutenu pszennego (c); przekrój i wygląd zewnętrzny.

Hu i in. (2021), stosując dodatek glutenu w wypieku chleba pszennego i ziemniaczanego, stwierdzili, że wprowadzenie 50% mąki ziemniaczanej do chleba pszennego spowodowało zmniejszenie objętości o 11%, natomiast zastosowanie dodatkowych 10% glutenu zmniejszyło straty, które wyniosły wówczas 9%. Abd-El-Khalek (2021) zastosował 9% dodatek glutenu do pełnoziarnistego chleba jęczmiennego. Objętość chleba jęczmiennego bez dodatku glutenu w porównaniu z chlebem pszennym pełnoziarnistym (kontrolnym) była mniejsza o 40,11%, natomiast objętość chleba jęczmiennego z glutenem była mniejsza niż chleba pszennego pełnoziarnistego o 17,41%. Świadczy to o pozytywnym efekcie wprowadzenia glutenu do chleba ze składnikami bezglutenowymi i jest zgodne z wynikami prezentowanymi w niniejszej pracy.

Dodatek glutenu wpłynął również korzystnie na porowatość miękiszu chleba. Porowatość chlebów z dodatkiem 10-50% mąki żołędziowej bez dodatku glutenu wahała się od 58,64% do 25,93% (**tabela 17**). Miękisz był zwarty, wilgotny, a swoją strukturą przypominał „zakalec" (**rysunek 11**). Dodatek glutenu wpłynął pozytywnie na zwiększenie porowatości miękiszu chleba, która wahała się od 67,28% do 54,34% w chlebie pszenno-żołędziowym z pojedynczym dodatkiem glutenu i od 69,14% do 56,79% w chlebie pszenno-żołędziowym z podwójnym dodatkiem glutenu. Wielkość i rozkład porów w miękiszu chleba pszenno-żołędziowego z dodatkiem glutenu (niezależnie od jego ilości) były bardziej równomierne w porównaniu z próbkami bez dodatku glutenu, a z takim samym udziałem mąki żołędziowej.

### 6.3.5. Właściwości fizyczne chleba

Dodatek mąki żołędziowej do chleba pszennego wpłynął na barwę skórki i miękiszu. Różnice barwy były zauważalne zarówno wizualnie (**rysunek 11**), jak i znalazły odzwierciedlenie w pomiarach instrumentalnych (**tabela 18**). W badaniach wykazano, że dodatek mąki żołędziowej powodował zmniejszenie wartości parametrów barwy skórki chleba. Im większy udział mąki żołędziowej zastosowano, tym mniejsze wartości parametrów barwy uzyskano. Największe różnice odnotowano w przypadku parametru b* (udział barwy żółtej). Dodatek glutenu pszennego nie miał statystycznie istotnego wpływu ($p > 0,05$) na różnice w jasności skórki chleba z takim samym udziałem mąki żołędziowej.

Barwa miękiszu chleba również zmieniała się wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej. Podobnie jak w przypadku barwy skórki, im większa ilość mąki żołędziowej została wprowadzona, tym ciemniejszy miękisz chleba obserwowano (**rysunek 11**).

Spowodowało to zmiany wartości parametru L*, które zmieniły się z 67,44 dla próbki kontrolnej do 31,40 dla chleba z 50% udziałem mąki żołędziowej (chleby bez dodatku glutenu pszennego). Dodatek glutenu nie różnicował jasności miękiszu chleba z takim samym udziałem mąki żołędziowej. Wprowadzenie do receptury mąki żołędziowej spowodowało zwiększenie udziału barwy czerwonej (a*) oraz zmniejszenie udziału barwy żółtej (b*), niezależnie od dodatku glutenu

**Tabela 18.** Barwa chleba pszennego bez (próbka kontrolna) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej oraz glutenu pszennego.

| Rodzaj chleba | Barwa miękiszu | | | Barwa skórki | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | L* [-] | a* [-] | b* [-] | L* [-] | a* [-] | b* [-] |
| Chleb bez dodatku glutenu | | | | | | |
| WB | $67,44 \pm 0,61^{a}$ | $4,73 \pm 0,48^{a}$ | $17,23 \pm 0,79^{a}$ | $55,53 \pm 1,36^{a}$ | $13,63 \pm 0,57^{a}$ | $34,15 \pm 2,14^{a}$ |
| WB-AP-10% | $42,56 \pm 1,27^{bA}$ | $8,16 \pm 0,17^{bA}$ | $13,79 \pm 0,24^{bA}$ | $47,91 \pm 0,84^{bA}$ | $11,35 \pm 0,60^{bA}$ | $22,49 \pm 0,91^{cA}$ |
| WB-AP-20% | $37,39 \pm 0,63^{cA}$ | $7,84 \pm 0,21^{bA}$ | $14,50 \pm 0,53^{bcA}$ | $46,09 \pm 1,54^{bA}$ | $10,95 \pm 0,89^{bAB}$ | $18,55 \pm 0,62^{cA}$ |
| WB-AP-30% | $36,15 \pm 0,79^{cdA}$ | $9,49 \pm 0,59^{cA}$ | $13,84 \pm 0,28^{bA}$ | $33,78 \pm 1,40^{cA}$ | $10,55 \pm 0,54^{bA}$ | $15,89 \pm 0,42^{dA}$ |
| WB-AP-40% | $35,43 \pm 0,66^{dA}$ | $9,58 \pm 0,61^{cA}$ | $14,01 \pm 0,47^{bA}$ | $31,51 \pm 0,52^{dA}$ | $10,51 \pm 0,69^{bA}$ | $14,48 \pm 0,64^{dA}$ |
| WB-AP-50% | $31,40 \pm 0,46^{eA}$ | $10,17 \pm 0,51^{cA}$ | $15,07 \pm 0,19^{cA}$ | $30,39 \pm 0,77^{dA}$ | $10,06 \pm 0,63^{bAB}$ | $12,22 \pm 0,77^{eA}$ |
| Chleb z dodatkiem glutenu | | | | | | |
| WB | $67,44 \pm 0,61^{a}$ | $4,73 \pm 0,48^{a}$ | $17,23 \pm 0,79^{a}$ | $55,53 \pm 1,36^{a}$ | $13,63 \pm 0,57^{a}$ | $34,15 \pm 2,14^{a}$ |
| WB-AP-10% | $43,41 \pm 2,23^{bA}$ | $8,86 \pm 0,40^{bAB}$ | $13,87 \pm 0,37^{bA}$ | $49,28 \pm 1,10^{bA}$ | $10,93 \pm 0,35^{bA}$ | $22,24 \pm 0,22^{bA}$ |
| WB-AP-20% | $37,50 \pm 0,79^{cA}$ | $9,71 \pm 0,20^{cB}$ | $15,03 \pm 0,12^{cA}$ | $48,21 \pm 1,58^{bA}$ | $10,81 \pm 0,38^{bcA}$ | $19,16 \pm 0,84^{cA}$ |
| WB-AP-30% | $38,07 \pm 0,89^{cB}$ | $7,49 \pm 0,15^{dB}$ | $13,97 \pm 0,17^{bA}$ | $34,92 \pm 0,74^{cA}$ | $10,15 \pm 0,21^{cA}$ | $14,83 \pm 0,54^{dB}$ |
| WB-AP-40% | $36,35 \pm 0,99^{cA}$ | $9,85 \pm 0,52^{cA}$ | $15,50 \pm 0,56^{cB}$ | $33,71 \pm 1,05^{cB}$ | $11,61 \pm 0,31^{dB}$ | $14,59 \pm 0,27^{dA}$ |
| WB-AP-50% | $32,68 \pm 0,51^{dA}$ | $10,13 \pm 0,22^{cA}$ | $15,28 \pm 0,20^{cA}$ | $31,23 \pm 0,83^{dA}$ | $10,49 \pm 0,22^{bcA}$ | $11,82 \pm 0,48^{eA}$ |
| Chleb z podwójnym dodatkiem glutenu | | | | | | |
| WB | $67,44 \pm 0,61^{a}$ | $4,73 \pm 0,48^{a}$ | $17,23 \pm 0,79^{a}$ | $55,53 \pm 1,36^{a}$ | $13,63 \pm 0,57^{a}$ | $34,15 \pm 2,14^{a}$ |
| WB-AP-10% | $41,66 \pm 0,60^{bA}$ | $8,92 \pm 0,40^{bcB}$ | $14,17 \pm 0,43^{bcA}$ | $47,66 \pm 1,46^{bA}$ | $11,88 \pm 0,41^{bA}$ | $22,63 \pm 0,62^{bA}$ |
| WB-AP-20% | $37,85 \pm 0,90^{cA}$ | $8,59 \pm 0,44^{bC}$ | $13,74 \pm 0,21^{bdB}$ | $41,21 \pm 0,34^{cB}$ | $12,25 \pm 0,72^{bB}$ | $18,51 \pm 0,91^{cA}$ |
| WB-AP-30% | $35,69 \pm 0,34^{dA}$ | $9,62 \pm 0,38^{cdA}$ | $14,83 \pm 0,37^{ceB}$ | $35,88 \pm 0,81^{dA}$ | $12,38 \pm 0,36^{bB}$ | $16,30 \pm 0,47^{dA}$ |
| WB-AP-40% | $30,28 \pm 0,66^{eB}$ | $9,26 \pm 0,25^{bcA}$ | $13,26 \pm 0,25^{dA}$ | $32,98 \pm 1,12^{eAB}$ | $11,60 \pm 0,30^{bB}$ | $14,78 \pm 0,48^{deA}$ |
| WB-AP-50% | $32,48 \pm 1,15^{fA}$ | $10,22 \pm 0,66^{dA}$ | $15,52 \pm 0,61^{eA}$ | $37,21 \pm 0,29^{dB}$ | $9,43 \pm 0,14^{cB}$ | $13,44 \pm 0,03^{eB}$ |

WB – chleb pszenny, AP – mąka żołędziowa, C – próbka kontrolna, 10-50% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 10); a-e – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla chleba bez i z dodatkiem glutenu oraz z podwojonym dodatkiem glutenu) oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$; A-C – wartości średnie w kolumnach dla próbek z tym samym udziałem mąki żołędziowej oznaczone różnymi dużymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Dostępne dane literaturowe, odnoszące się do barwy chleba z dodatkiem mąki żołędziowej, są niejednoznaczne. Spójnym jest jedynie wykazanie, że wprowadzenie mąki żołędziowej spowodowało uzyskanie chleba o ciemniejszej barwie, co przejawiało się spadkiem wartości parametru L*, niezależnie od rodzaju użytej do wypieku mąki bazowej

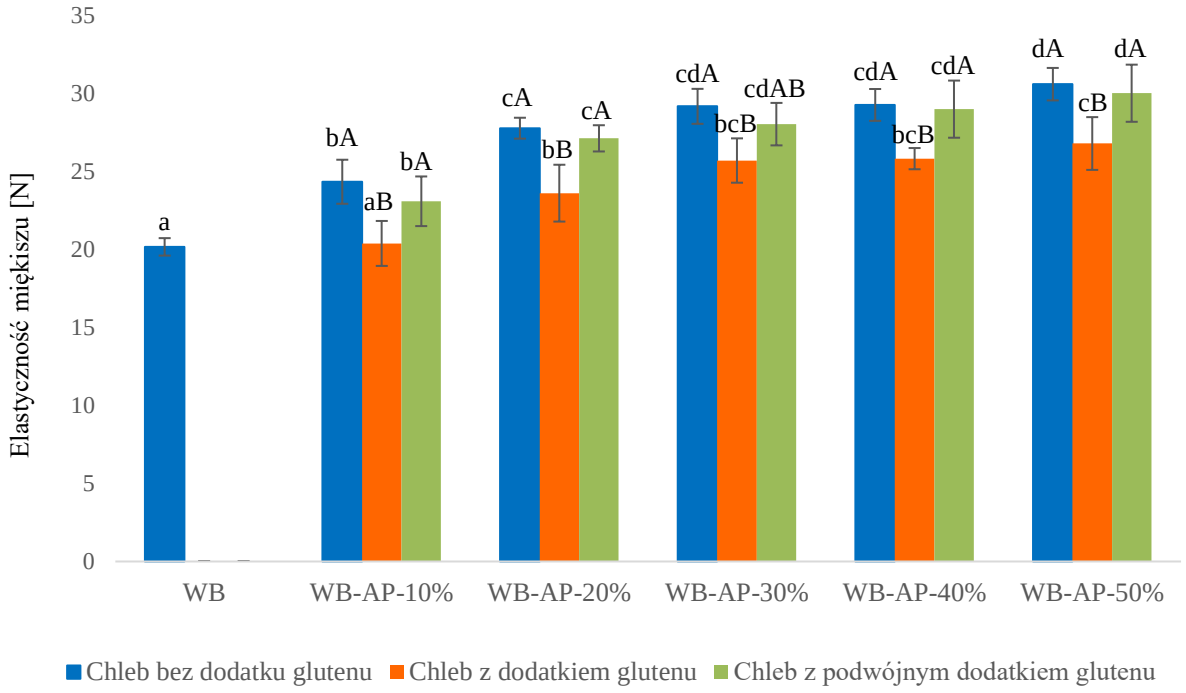
(mąki pszenne i bezglutenowe) (Beltrão Martins i in., 2020; Korus i in., 2015; Park i in., 2017; Shiri i in., 2021; Skendi i in., 2018). Sereti i in. (2021), jako przyczynę ciemnej barwy chleba z udziałem mąki żołędziowej, podają wysoką zawartość związków fenolowych w tej mące. Rozbieżności w danych literaturowych dotyczyły jednak wartości parametrów a* i b*, uzyskanych dla chleba z udziałem mąki żołędziowej. W badaniach Park i in. (2017) wartość parametru a* zwiększyła się po dodaniu mąki żołędziowej do chleba pszennego, co jest zgodne z wynikami przedstawionymi w niniejszej pracy, natomiast parametr b* nie różnił się istotnie statystycznie pomiędzy próbkami badanymi przez cytowanych autorów. W badaniach Beltrão Martins i in. (2020), Korus i in. (2015), Shiri i in. (2021) oraz Skendi i in. (2018), w których mąkę żołędziową dodawano do chleba bezglutenowego, wartości parametrów a* i b* zwiększały się. Warto zwrócić uwagę, że w cytowanych badaniach autorzy stosowali mąki żołędziowe różnego pochodzenia. Zdaniem Amina i in. (2018) oraz Correia i Beirão-da-Costa (2011) barwa mąki żołędziowej może różnić się w zależności od gatunku dębu lub warunków przetwarzania podczas produkcji, co mogło przekładać się na różnice barwy chleba.

W przeprowadzonych badaniach elastyczność miękiszu była parametrem, którego wartość istotnie ($p \leq 0,05$) zależała od udziału mąki żołędziowej (**rysunek 12**). Wartość siły potrzebnej do ściskania miękiszu chleba była tym większa, im większy był udział mąki żołędziowej. Zastosowanie dodatku glutenu w recepturze chleba pszenno-żołędziowego spowodowało obniżenie wartości siły ściskania miękiszu średnio o 13,46% względem próbek bez dodatku glutenu, ale z takim samym udziałem mąki żołędziowej.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że mąka żołędziowa w istotnym stopniu wpływa na właściwości wypiekowe mąki pszennej, wpływając na cechy fermentograficzne, amylograficzne, fermentograficzne i ekstensograficzne, a także determinując właściwości technologiczne i fizyczne ciasta i chleba pszennego.

Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę zoptymalizowania parametrów prowadzenia ciasta i wypieku pieczywa z dodatkiem mąki żołędziowej w porównaniu do tradycyjnie stosowanej technologii. Ciasto z dodatkiem mąki żołędziowej cechowało się wydłużonym czasem rozwoju i stałości w ocenie farinograficznej, co wskazuje na konieczność wydłużenia czasu miesienia. Z kolei uzyskanie najwyższych wartości oporu na rozciąganie przy najkrótszym czasie fermentacji w ocenie ekstensograficznej oraz skrócenie czasu do uzyskania maksymalnej objętości w ocenie fermentograficznej wskazywać mogą na potrzebę skrócenia czasu fermentacji ciasta.




WB – chleb pszenny, AP – mąka żołędziowa, 10-50% – udział mąki żołędziowej; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n =10); a-d – wartości średnie oznaczone różnymi małymi literami, dla próbek bez i z dodatkiem glutenu oraz z podwojonym dodatkiem glutenu, różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$; A, B – wartości średnie dla próbek z tym samym udziałem mąki żołędziowej oznaczone różnymi dużymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

**Rysunek 12**. Elastyczność miękiszu chleba pszennego bez (próbki kontrolne) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej oraz glutenu pszennego.

Na podstawie przeprowadzonego próbnego wypieku laboratoryjnego stwierdzono, że mąka żołędziowa, mimo wysokiej wartości odżywczej, nie powinna być samodzielnym surowcem w produkcji piekarniczej, ale może stanowić dodatek wzbogacający w składniki odżywcze. Wyniki badań wskazują, że dodatek mąki żołędziowej do chleba pszennego nie powinien przekraczać 30%. Sposobem na poprawę jakości otrzymanego chleba z dodatkiem żołędzi oraz parametrów technologicznych i fizycznych może być wprowadzenie do mieszanki wypiekowej glutenu pszennego. Taki dodatek pozwala na uzyskanie chleba o objętości i porowatości zbliżonej do chleba pszennego, co może być istotne z punktu widzenia akceptacji konsumenckiej.

## 6.4. Wpływ pochodzenia mąki żołędziowej i metody prowadzenia ciasta na jakość chleba pszennego i żytniego

Dążąc do uzyskania pieczywa wzbogaconego mąką żołędziową o jak najlepszych cechach jakości, podjęto eksperyment, w którym głównym celem było określenie wpływu mąki żołędziowej różnego pochodzenia na cechy jakości chleba pszennego i żytniego z uwzględnieniem wpływu metody prowadzenia ciasta. Kierując się przeprowadzoną oceną wpływu różnych dodatków mąki żołędziowej na właściwości wypiekowe mąki pszennej ustalono udział mąki żołędziowej w recepturze chleba na poziomie 30%. W eksperymencie wypieczono chleby pszenne i żytnie z mąką żołędziową polską i grecką z ciasta prowadzonego metodami bezpośrednimi oraz pośrednimi z wykorzystaniem podmłody lub zakwasów (spontanicznego i kierowanego).

### 6.4.1. Właściwości technologiczne ciasta i chleba

W przeprowadzonych badaniach wykazano, że dodatek mąki żołędziowej różnego pochodzenia istotnie wpłynął ($p \leq 0,05$) na właściwości technologiczne chleba pszennego i żytniego, wytwarzanego różnymi metodami prowadzenia ciasta (**tabela 19**). Wydajność chleba pszennego z dodatkiem mąki żołędziowej zwiększyła się od 6,8% do 13,7% dla próbek z mąką żołędziową polską i od 5,6 do 12,1% dla próbek z mąką żołędziową grecką, w porównaniu z próbami kontrolnymi (bez mąki żołędziowej). Podobnie wydajność chleba żytniego zwiększyła się dla próbek z mąką żołędziową polską od 5,4 do 13,0% i od 5,2 do 9,7% dla próbek z mąką żołędziową grecką. Metoda prowadzenia ciasta na naturalnym zakwasie spowodowała uzyskanie chleba o najwyższej wydajności, natomiast zastosowanie kultury starterowej do przygotowania zakwasu zmniejszyło wydajność chleba. Zwiększenie wydajności chleba dla próbek z dodatkiem mąki żołędziowej mogło wynikać z wysokiej zawartości błonnika (do 17,7 g/100 g) (**tabela 8**), który wykazuje duże powinowactwo do wody, zwiększając tym samym wodochłonność mąki (Skendi i in., 2018). Ambrosewicz-Walacik i in. (2016) również stwierdzili wysoką wydajność chleba pszennego i żytniego na naturalnym zakwasie, porównywalną z wydajnością chleba przygotowanego metodą bezpośrednią.

**Tabela 19.** Cechy jakości technologicznej chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

| Rodzaj chleba | Wydajność ciasta [%] | Wydajność chleba [%] | Objętość chleba [$cm^3$/100 g] | Strata piecowa [%] | Strata wypiekowa całkowita [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| WB-F1h | $173,92 \pm 0,89^{a}$ | $141,4 \pm 0,52^{ad}$ | $309 \pm 4^{a}$ | $10,70 \pm 0,06^{abc}$ | $14,96 \pm 0,55^{ab}$ |
| WB-F2h | $170,90 \pm 0,75^{b}$ | $139,4 \pm 1,24^{ab}$ | $321 \pm 3^{b}$ | $10,43 \pm 1,15^{ab}$ | $14,76 \pm 0,42^{ab}$ |
| WB-DF | $176,08 \pm 1,02^{c}$ | $142,0 \pm 1,48^{ad}$ | $260 \pm 7^{c}$ | $11,33 \pm 0,45^{cde}$ | $15,50 \pm 0,07^{b}$ |
| WB-CF | $155,08 \pm 0,34^{d}$ | $129,4 \pm 0,68^{c}$ | $258 \pm 5^{c}$ | $9,76 \pm 0,23^{f}$ | $13,26 \pm 0,08^{c}$ |
| WB-SF | $174,47 \pm 1,74^{ac}$ | $143,7 \pm 2,04^{d}$ | $233 \pm 4^{d}$ | $11,89 \pm 0,47^{deg}$ | $14,13 \pm 0,47^{bc}$ |
| Średnia | $170,09^{AB}$ | $139,16^{AB}$ | $276,20^{C}$ | $10,82^{AB}$ | $14,52^{B}$ |
| *CV (%)* | *5,05* | *4,08* | *13,48* | *7,58* | *5,90* |
| WB-PA-F1h | $190,06 \pm 0,15^{e}$ | $153,1 \pm 1,12^{e}$ | $178 \pm 9^{ef}$ | $11,10 \pm 0,34^{bcd}$ | $15,55 \pm 0,18^{b}$ |
| WB-PA-F2h | $190,90 \pm 1,03^{e}$ | $154,9 \pm 2,03^{eh}$ | $186 \pm 7^{f}$ | $10,20 \pm 0,24^{af}$ | $15,08 \pm 0,32^{ab}$ |
| WB-PA-DF | $199,45 \pm 0,47^{f}$ | $161,4 \pm 1,14^{f}$ | $170 \pm 3^{g}$ | $10,12 \pm 0,41^{af}$ | $15,28 \pm 0,41^{ab}$ |
| WB-PA-CF | $170,39 \pm 0,17^{b}$ | $138,1 \pm 0,52^{b}$ | $156 \pm 11^{h}$ | $11,04 \pm 0,27^{bcd}$ | $15,14 \pm 0,26^{ab}$ |
| WB-PA-SF | $194,79 \pm 1,14^{g}$ | $162,7 \pm 0,98^{f}$ | $178 \pm 12^{ef}$ | $11,06 \pm 0,32^{bcd}$ | $13,18 \pm 1,07^{c}$ |
| Średnia | $189,12^{E}$ | $154,05^{D}$ | $172,20^{AB}$ | $10,71^{AB}$ | $14,85^{B}$ |
| *CV (%)* | *5,87* | *6,35* | *5,67* | *4,66* | *6,38* |
| WB-GA-F1h | $190,27 \pm 0,25^{e}$ | $149,3 \pm 0,52^{g}$ | $176 \pm 3^{eg}$ | $12,27 \pm 0,51^{g}$ | $17,22 \pm 1,21^{d}$ |
| WB-GA-F2h | $182,13 \pm 0,32^{e}$ | $148,7 \pm 0,89^{g}$ | $188 \pm 4^{f}$ | $11,45 \pm 0,38^{de}$ | $14,68 \pm 0,54^{ab}$ |
| WB-GA-DF | $198,25 \pm 1,02^{f}$ | $156,6 \pm 1,04^{h}$ | $173 \pm 4^{eg}$ | $11,53 \pm 0,61^{deg}$ | $16,82 \pm 0,62^{d}$ |
| WB-GA-CF | $170,54 \pm 0,14^{b}$ | $140,2 \pm 1,45^{ab}$ | $146 \pm 7^{h}$ | $11,02 \pm 0,02^{bcd}$ | $14,26 \pm 0,23^{abc}$ |
| WB-GA-SF | $195,71 \pm 1,36^{g}$ | $161,1 \pm 0,47^{f}$ | $175 \pm 5^{eg}$ | $12,21 \pm 0,78^{eg}$ | $14,15 \pm 0,48^{bc}$ |
| Średnia | $187,38^{DE}$ | $151,17^{CD}$ | $169,20^{A}$ | $11,70^{C}$ | $15,43^{B}$ |
| *CV (%)* | *6,01* | *5,31* | *8,10* | *4,55* | *9,58* |
| RB-F1h | $159,73 \pm 1,04^{a}$ | $136,2 \pm 0,87^{a}$ | $188 \pm 4^{a}$ | $9,42 \pm 0,62^{a}$ | $11,80 \pm 0,52^{a}$ |
| RB-CF | $143,21 \pm 0,36^{b}$ | $122,9 \pm 0,96^{b}$ | $174 \pm 2^{b}$ | $9,07 \pm 0,45^{a}$ | $11,35 \pm 0,47^{a}$ |
| RB-SF | $180,52 \pm 0,48^{c}$ | $145,0 \pm 1,14^{c}$ | $206 \pm 10^{c}$ | $10,40 \pm 0,13^{b}$ | $13,34 \pm 0,09^{b}$ |
| Średnia | $161,15^{A}$ | $134,69^{A}$ | $189,33^{B}$ | $9,63^{A}$ | $12,17^{A}$ |
| *CV (%)* | *11,60* | *8,26* | *8,47* | *7,14* | *8,59* |
| RB-PA-F1h | $192,58 \pm 0,78^{d}$ | $153,9 \pm 0,67^{d}$ | $161 \pm 3^{d}$ | $11,98 \pm 0,37^{ce}$ | $16,06 \pm 0,67^{c}$ |
| RB-PA-CF | $164,22 \pm 0,23^{d}$ | $134,8 \pm 1,15^{a}$ | $157 \pm 5^{d}$ | $10,90 \pm 0,08^{bd}$ | $14,31 \pm 1,03^{bd}$ |
| RB-PA-SF | $189,52 \pm 0,42^{ef}$ | $152,9 \pm 0,89^{d}$ | $190 \pm 20^{a}$ | $11,50 \pm 0,43^{cd}$ | $15,47 \pm 0,78^{cd}$ |
| Średnia | $182,11^{DE}$ | $147,20^{CD}$ | $169,33^{A}$ | $11,46^{BC}$ | $15,28^{B}$ |
| *CV (%)* | *8,55* | *7,29* | *10,64* | *4,76* | *5,83* |
| RB-GA-F1h | $190,76 \pm 0,12^{fg}$ | $149,4 \pm 0,23^{e}$ | $174 \pm 5^{b}$ | $11,60 \pm 0,19^{cd}$ | $15,76 \pm 0,63^{e}$ |
| RB-GA-CF | $154,49 \pm 1,13^{h}$ | $129,3 \pm 2,13^{f}$ | $157 \pm 11^{d}$ | $10,37 \pm 0,29^{b}$ | $13,06 \pm 0,42^{b}$ |
| RB-GA-SF | $187,92 \pm 0,48^{e}$ | $154,4 \pm 0,78^{d}$ | $188 \pm 7^{a}$ | $10,61 \pm 0,32^{b}$ | $14,28 \pm 0,87^{bd}$ |
| Średnia | $177,72^{CD}$ | $144,34^{BC}$ | $173,00^{AB}$ | $10,86^{AB}$ | $14,37^{B}$ |
| *CV (%)* | *11,35* | *9,21* | *8,97* | *6,01* | *9,40* |

WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa); CV – współczynnik zmienności; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3), a-h – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla chleba pszennego i żytniego) oznaczone różnymi małymi literami w indeksie górnym różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$; A-E – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi dużymi literami w indeksie górnym różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Odwrotną tendencję zaobserwowano w przypadku objętości bochenków chleba, która była zmniejszana (zarówno dla chlebów pszennych i żytnich) wraz z dodatkiem mąki żołędziowej w porównaniu z próbkami kontrolnymi (**tabela 19**). Objętość chleba pszennego zmniejszyła się aż o 43% dla chleba z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej i greckiej, wypiekanego z ciasta prowadzonego metodą bezpośrednią z 1-godzinną fermentacją, natomiast zmiany objętości chleba żytniego były mniejsze i wynosiły od 7,5% dla metody bezpośredniej z 1-godzinną fermentacją do 9,8% dla metody na zakwasie z kulturą starterową, niezależnie od użytej mąki żołędziowej. Uzyskane wyniki są zgodne z wynikami Hruškova i in. (2019), Korus i in. (2015), Park i in. (2017) oraz Skendi i in. (2018), którzy stwierdzili zmniejszenie objętości chleba pszennego (do 28%) i bezglutenowego (do 33%) na skutek wprowadzenia do receptury chleba 25% mąki żołędziowej. W badaniach prowadzonych w niniejszej pracy stwierdzono również, że zastosowanie metody na zakwasie z kulturą starterową spowodowało uzyskanie chleba o najmniejszej objętości. Jest to zgodne z wynikami przedstawionymi przez Xu i in. (2019), którzy wykazali, że większa objętość chleba przygotowanego z użyciem drożdży piekarskich jest prawdopodobnie wynikiem zwiększonej produkcji $CO_2$ podczas fermentacji. Romankiewicz i in. (2015), stosując w wypieku pieczywa pszennego zakwasy różnego pochodzenia (handlowe i produkowane w skali laboratoryjnej) i o różnej formie (płynne i sypkie) wykazali różnice w objętości uzyskanych bochenków, zależne od zastosowanego zakwasu, przy czym istotne statystycznie zwiększenie objętości nastąpiło tylko w jednej próbie wypiekowej, z zakwasem handlowym sypkim o średniej kwasowości, wprowadzonym w udziale 2% w stosunku do ogólnej ilości mąki, zmniejszenie objętości nastąpiło w pięciu różnych próbach wypiekowych, a dla czterech prób nie odnotowano zmian istotnych statystycznie.

Strata piecowa i strata wypiekowa całkowita były parametrami jakościowymi o stosunkowo małej zmienności (**tabela 19**). Średnie współczynniki zmienności (CV) wyniosły odpowiednio 6,7% i 7,5% dla chleba pszennego oraz 9,2% i 12,1% dla chleba żytniego. W przypadku chleba pszennego dodatek mąki żołędziowej greckiej wykazywał większy wpływ na straty piecowe niż dodatek mąki żołędziowej polskiej (strata piecowa wyniosła średnio 11,7% względem 10,7%, a strata wypiekowa całkowita wyniosła średnio 15,4% względem 14,9%). Z kolei dla chleba żytniego zaobserwowano odwrotną zależność; dodatek mąki żołędziowej polskiej powodował zwiększenie straty piecowej oraz straty wypiekowej całkowitej, odpowiednio o 10,3-27,2% i 16-36,1% w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Stwierdzono, że zastosowanie metody na zakwasie z dodatkiem kultury starterowej do produkcji chleba z udziałem mąki żołędziowej powodowało generalnie mniejsze straty

w porównaniu z innymi metodami prowadzenia ciasta. Moore i in. (2004) wykazali, że straty wypiekowe w chlebie bezglutenowym mogą być większe niż w chlebie pszennym, co może sugerować, że włączenie bezglutenowej mąki żołędziowej do chleba będzie wpływało na zwiększenie strat wypiekowych. Z kolei Beltrão Martins i in. (2020) nie stwierdzili istotnych zmian w stratach wypiekowych chleba bezglutenowego po wprowadzeniu mąki żołędziowej na poziomie do 35%.

### 6.4.2. Właściwości fizyczne chleba

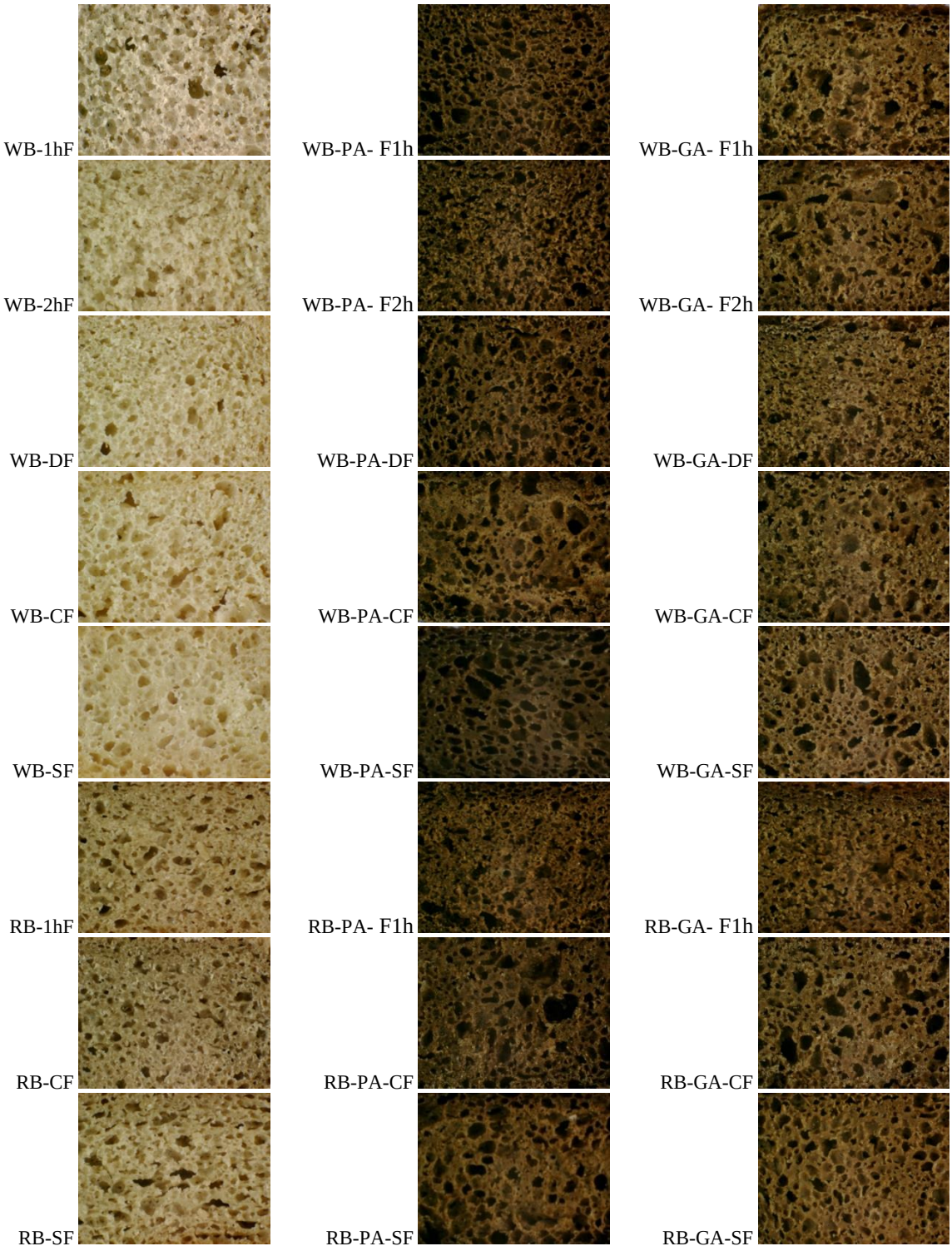
Dodatek mąki żołędziowej powodował obniżenie wartości parametrów barwy skórki chleba, niezależnie od rodzaju mąki bazowej (pszennej lub żytniej) (**tabela 20**). Największe różnice odnotowano dla parametru b* (udział barwy żółtej), który został zmniejszony maksymalnie o 79,5% i 66,5% w chlebie pszennym odpowiednio z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej i greckiej. W przypadku chleba żytniego dodatek mąki żołędziowej polskiej spowodował bardziej zauważalne zmniejszenie wartości b* niż dodatek mąki żołędziowej greckiej (maksymalnie o 65,6% względem 56,6%). Wartości a* (udział barwy czerwonej) chlebów z dodatkiem mąki żołędziowej obniżyły się o 24,5-63,1% dla chleba pszennego i o 29,0-57,6% dla chleba żytniego, natomiast zmiany były bardziej znaczące po wprowadzeniu mąki żołędziowej polskiej. Wartości L* (jasność) zostały zmniejszone w próbkach chleba pszennego i żytniego maksymalnie o 51,4% (chleb pszenny z mąką żołędziową polską otrzymany metodą na zakwasie) i 49,0% (chleb żytni z mąką żołędziową polską otrzymany metodą bezpośredniego wypieku). Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic ($p > 0,05$) w średnich wartościach parametrów barwy między chlebami z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej i greckiej. Zauważono jednak, że metoda prowadzenia ciasta wpływała na zmiany barwy skórki chleba z mąką żołędziową grecką w mniejszym stopniu niż chleba z mąką żołędziową polską. Ponadto największe zróżnicowanie barwy skórki zaobserwowano dla chlebów otrzymanych metodą na zakwasie z kulturą starterową, niezależnie od rodzaju mąki zbożowej i pochodzenia mąki żołędziowej.

Warianty chleba bez i z dodatkiem mąki żołędziowej, pszenne i żytnie, wyraźnie różniły się barwą miękiszu, co widoczne jest na **rysunku 13**. Barwa miękiszu chleba pszennego zmieniała się wraz z rodzajem wprowadzonej mąki żołędziowej (**tabela 20**). Najciemniejszy miękisz cechował chleb z mąką żołędziową polską, w przypadku którego średnia wartość L* była niższa o 58,3% w porównaniu z próbkami kontrolnymi i o 22,1% w porównaniu z chlebami z mąką żołędziową grecką.

**Tabela 20.** Charakterystyka barwy skórki i miękiszu (model CIEL*a*b*) chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

| Rodzaj chleba | Barwa skórki | | | Barwa miękiszu | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | L* [-] | a*[-] | b* [-] | L* [-] | a*[-] | b* [-] |
| WB-F1h | $47,76 \pm 0,19^{a}$ | $12,45 \pm 0,35^{a}$ | $26,83 \pm 0,63^{a}$ | $60,35 \pm 0,17^{a}$ | $3,80 \pm 0,19^{a}$ | $12,75 \pm 0,13^{a}$ |
| WB-F2h | $55,68 \pm 0,83^{b}$ | $13,27 \pm 0,41^{b}$ | $34,72 \pm 0,24^{b}$ | $68,84 \pm 1,19^{b}$ | $2,82 \pm 0,09^{b}$ | $17,77 \pm 0,25^{b}$ |
| WB-DF | $73,28 \pm 0,51^{c}$ | $8,25 \pm 0,04^{c}$ | $21,53 \pm 0,54^{c}$ | $66,49 \pm 0,51^{c}$ | $2,55 \pm 0,24^{b}$ | $17,59 \pm 0,42^{b}$ |
| WB-CF | $67,09 \pm 0,37^{d}$ | $7,81 \pm 0,47^{d}$ | $29,15 \pm 0,64^{d}$ | $62,58 \pm 0,31^{d}$ | $2,56 \pm 0,17^{b}$ | $18,57 \pm 0,29^{c}$ |
| WB-SF | $57,57 \pm 1,02^{e}$ | $11,68 \pm 0,69^{e}$ | $33,28 \pm 0,68^{e}$ | $61,71 \pm 1,01^{d}$ | $2,63 \pm 0,28^{b}$ | $18,44 \pm 0,55^{c}$ |
| Średnia | $60,28^{C}$ | $10,69^{B}$ | $29,10^{C}$ | $63,99^{D}$ | $2,87^{A}$ | $17,02^{C}$ |
| *CV (%)* | *16,60* | *23,37* | *18,14* | *5,54* | *18,45* | *14,25* |
| WB-PA-F1h | $50,64 \pm 0,23^{f}$ | $6,18 \pm 0,11^{fk}$ | $18,35 \pm 0,16^{f}$ | $28,68 \pm 0,36^{e}$ | $6,26 \pm 0,11^{ce}$ | $13,36 \pm 0,22^{d}$ |
| WB-PA-F2h | $46,68 \pm 0,31^{g}$ | $6,34 \pm 0,14^{fk}$ | $18,51 \pm 0,27^{f}$ | $26,52 \pm 0,23^{f}$ | $5,83 \pm 0,22^{cd}$ | $12,27 \pm 0,15^{e}$ |
| WB-PA-DF | $42,97 \pm 0,20^{h}$ | $4,73 \pm 0,07^{g}$ | $13,68 \pm 0,15^{g}$ | $26,16 \pm 0,30^{f}$ | $6,35 \pm 0,33^{eh}$ | $12,47 \pm 0,56^{e}$ |
| WB-PA-CF | $33,95 \pm 0,50^{i}$ | $5,50 \pm 0,06^{h}$ | $10,96 \pm 0,22^{hi}$ | $26,34 \pm 0,30^{f}$ | $5,39 \pm 0,29^{fg}$ | $10,55 \pm 0,26^{f}$ |
| WB-PA-SF | $28,00 \pm 0,45^{j}$ | $4,31 \pm 0,24^{i}$ | $6,82 \pm 0,15^{i}$ | $25,54 \pm 0,13^{f}$ | $5,67 \pm 0,12^{dg}$ | $11,53 \pm 0,29^{g}$ |
| Średnia | $40,45^{A}$ | $5,41^{A}$ | $13,66^{A}$ | $26,65^{A}$ | $5,90^{C}$ | $12,04^{A}$ |
| *CV (%)* | *23,00* | *16,37* | *36,52* | *4,48* | *6,83* | *8,77* |
| WB-GA-F1h | $31,85 \pm 0,33^{k}$ | $7,07 \pm 0,07^{j}$ | $13,49 \pm 0,12^{g}$ | $33,91 \pm 0,36^{g}$ | $6,78 \pm 0,08^{h}$ | $16,25 \pm 0,19^{h}$ |
| WB-GA-F2h | $32,65 \pm 0,40^{l}$ | $7,31 \pm 0,11^{dj}$ | $12,57 \pm 0,27^{j}$ | $32,90 \pm 0,30^{h}$ | $6,76 \pm 0,09^{h}$ | $15,43 \pm 0,04^{i}$ |
| WB-GA-DF | $43,83 \pm 0,15^{m}$ | $5,43 \pm 0,09^{h}$ | $14,42 \pm 0,44^{k}$ | $34,58 \pm 0,85^{g}$ | $6,62 \pm 0,16^{eh}$ | $15,37 \pm 0,19^{i}$ |
| WB-GA-CF | $32,77 \pm 0,42^{l}$ | $5,90 \pm 0,12^{fh}$ | $10,74 \pm 0,38^{h}$ | $35,14 \pm 0,14^{g}$ | $5,33 \pm 0,17^{f}$ | $13,21 \pm 0,27^{ad}$ |
| WB-GA-SF | $31,73 \pm 0,34^{n}$ | $6,50 \pm 0,32^{k}$ | $11,14 \pm 0,32^{i}$ | $34,58 \pm 0,16^{g}$ | $6,75 \pm 0,29^{h}$ | $14,94 \pm 0,42^{fj}$ |
| Średnia | $34,57^{A}$ | $6,44^{A}$ | $12,47^{A}$ | $34,22^{B}$ | $6,43^{CD}$ | $15,04^{B}$ |
| *CV (%)* | *15,04* | *12,20* | *12,43* | *2,51* | *9,58* | *7,50* |
| RB-F1h | $54,83 \pm 0,10^{a}$ | $9,28 \pm 0,11^{a}$ | $27,76 \pm 0,05^{a}$ | $52,68 \pm 1,14^{a}$ | $4,68 \pm 0,18^{a}$ | $17,54 \pm 0,12^{a}$ |
| RB-CF | $50,25 \pm 0,33^{b}$ | $9,22 \pm 0,77^{a}$ | $22,94 \pm 0,97^{b}$ | $50,08 \pm 0,55^{b}$ | $4,41 \pm 0,32^{b}$ | $15,95 \pm 0,29^{b}$ |
| RB-SF | $48,08 \pm 0,32^{c}$ | $10,66 \pm 0,28^{b}$ | $24,58 \pm 0,42^{c}$ | $54,51 \pm 0,29^{c}$ | $5,19 \pm 0,21^{a}$ | $18,89 \pm 0,21^{c}$ |
| Średnia | $51,05^{B}$ | $9,72^{B}$ | $25,09^{B}$ | $52,42^{C}$ | $4,76^{B}$ | $17,46^{C}$ |
| *CV (%)* | *6,75* | *8,38* | *9,77* | *4,25* | *8,32* | *8,43* |
| RB-PA-F1h | $27,98 \pm 0,45^{a}$ | $6,59 \pm 0,11^{c}$ | $9,56 \pm 0,22^{d}$ | $29,70 \pm 0,08^{d}$ | $6,08 \pm 0,41^{c}$ | $12,97 \pm 0,22^{d}$ |
| RB-PA-CF | $51,39 \pm 0,23^{e}$ | $5,33 \pm 0,14^{d}$ | $17,45 \pm 0,48^{e}$ | $27,03 \pm 0,81^{e}$ | $6,32 \pm 0,56^{c}$ | $12,53 \pm 0,52^{d}$ |
| RB-PA-SF | $32,24 \pm 0,68^{f}$ | $4,52 \pm 0,31^{e}$ | $9,42 \pm 0,23^{d}$ | $27,59 \pm 0,19^{e}$ | $6,73 \pm 0,35^{c}$ | $14,44 \pm 0,23^{e}$ |
| Średnia | $37,20^{A}$ | $5,48^{A}$ | $12,14^{A}$ | $28,11^{A}$ | $6,38^{D}$ | $13,31^{B}$ |
| *CV (%)* | *12,47* | *19,04* | *37,85* | *5,01* | *5,15* | *7,51* |
| RB-GA-F1h | $33,38 \pm 0,50^{g}$ | $6,51 \pm 0,25^{c}$ | $15,64 \pm 0,09^{f}$ | $35,42 \pm 0,34^{f}$ | $7,22 \pm 0,21^{d}$ | $16,26 \pm 0,28^{b}$ |
| RB-GA-CF | $44,06 \pm 0,15^{h}$ | $5,61 \pm 0,49^{d}$ | $15,09 \pm 0,11^{g}$ | $38,94 \pm 0,68^{g}$ | $6,54 \pm 0,15^{c}$ | $16,23 \pm 0,41^{b}$ |
| RB-GA-SF | $33,18 \pm 0,69^{g}$ | $6,52 \pm 0,27^{c}$ | $10,70 \pm 0,25^{g}$ | $35,25 \pm 0,27^{f}$ | $7,72 \pm 0,52^{d}$ | $17,37 \pm 0,25^{a}$ |
| Średnia | $36,87^{A}$ | $6,21^{A}$ | $13,81^{A}$ | $36,54^{B}$ | $7,16^{E}$ | $16,62^{BC}$ |
| *CV (%)* | *16,88* | *8,41* | *19,60* | *5,70* | *8,27* | *3,91* |

WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa), CV – współczynnik zmienności; Wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 10); a-n – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla chleba pszennego i żytniego) oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$; A-E – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi dużymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.




WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa).

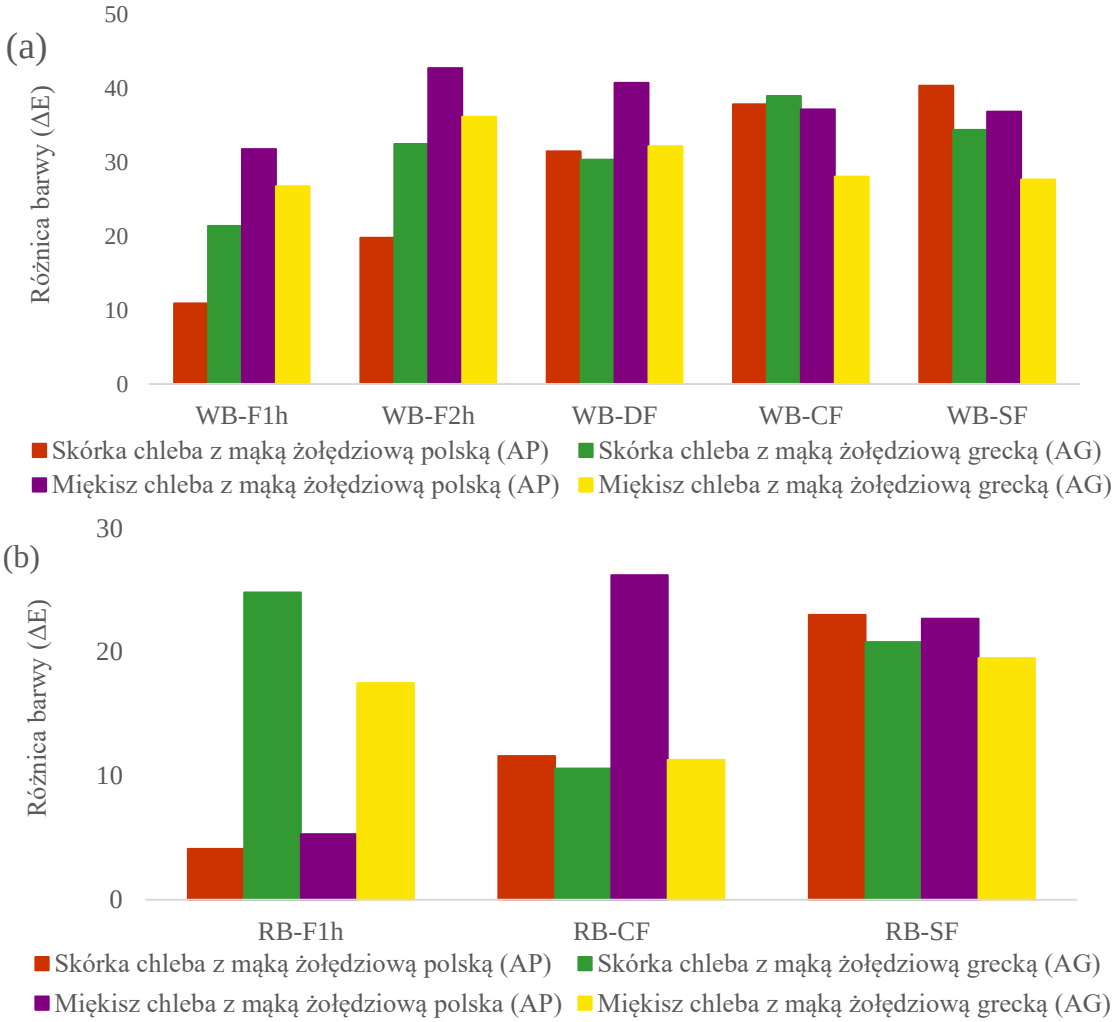
**Rysunek 13.** Wygląd miękiszu chleba pszennego i żytniego bez (próbki kontrolne) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej i greckiej, otrzymanego różnymi metodami prowadzenia ciasta.

Metoda prowadzenia ciasta nie różnicowała jasności miękiszu chleba pszennego z mąką żołędziową, natomiast różnice były zauważalne dla próbek kontrolnych. Mniejsze różnice odnotowano dla chleba żytniego, gdzie średnia L* była niższa odpowiednio o 46,4% i 30,3% dla chleba z mąką żołędziową polską i grecką. Wprowadzenie do receptury mąki żołędziowej spowodowało zwiększenie wartości parametru a* i zmniejszenie wartości parametru b*, przy większym wpływie mąki żołędziowej polskiej niż greckiej. Wyższe wartości tych parametrów uzyskano generalnie dla chleba żytniego, niezależnie od metody prowadzenia ciasta, natomiast najniższe wartości (z wyłączeniem próbek kontrolnych) uzyskano dla chlebów z mąką żołędziową polską i grecką, wytwarzanych metodą na zakwasie.

Zmiany parametrów L*, a* i b* miękiszu znalazły odzwierciedlenie w różnicy barwy ΔE (**rysunek 14**). Wartości ΔE dla próbek z dodatkiem mąki żołędziowej były znaczące i wahały się od 5,3 do 42,8, co wskazywało na różnicę zauważalną dla ludzkiego oka. Większe różnice odnotowano w przypadku chleba pszennego (od 26,8 do 42,8) niż w przypadku chleba żytniego (od 5,3 do 26,2). Zmiany barwy dla chlebów z mąką żołędziową polską (odpowiednio do 42,8 i 26,2 dla chleba pszennego i żytniego) były większe niż dla chlebów z mąką żołędziową grecką (odpowiednio do 36,2 i 19,5 dla chleba pszennego i żytniego).

Zmiany barwy pieczywa mogą zależeć nie tylko od surowców, stosowanych w trakcie wypieku, co wykazano w przypadku chleba pszennego wypiekanego z mąką żołędziową polską (wyniki przedstawiono w rozdz. 6.3.5), ale również od metody prowadzenia ciasta i parametrów wypieku. Jak podają Troaded i in. (2022), w zależności od zastosowanej metody fermentacji (fermentacja bezpośrednia z drożdżami lub fermentacja na zakwasie z kulturą starterową) dochodzi do różnic w metabolizmie cukrów przez drobnoustroje (drożdże i bakterie fermentacji mlekowej), co skutkuje powstawaniem innych prekursorów reakcji Maillarda, a to z kolei przekłada się na różnice w przebiegu tej reakcji w trakcie wypieku pieczywa. W cytowanych badaniach w chlebie z ciasta prowadzonego na zakwasie dominowały produkty degradacji Streckera, a w chlebie na drożdżach: produkty melanoidyzacji. Melanoidyny są główną grupą produktów reakcji Maillarda, odpowiedzialnych za barwę produktów, powstałą podczas obróbki termicznej (Starowicz i Zieliński, 2019). Pejcz i in. (2020) wykazali różnice barwy skórki i miękiszu chleba żytniego w zależności od metody prowadzenia ciasta oraz czasu fermentacji. Chleb wypiekany z ciasta prowadzonego metodą fermentacji w obecności kultury starterowej cechował się mniejszą jasnością (mniejsza wartość parametru L*) oraz większą wartością parametrów a* i b*, co zaobserwowano zarówno dla miękiszu, jak i skórki. Na większą jasność skórki i miękiszu wpływał również czas fermentacji; im dłuższa była fermentacja, tym ciemniejsze chleby uzyskiwano. Cytowane rezultaty

są zbieżne z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy dla chleba żytniego, ale odmienne od wyników dla chleba pszennego.

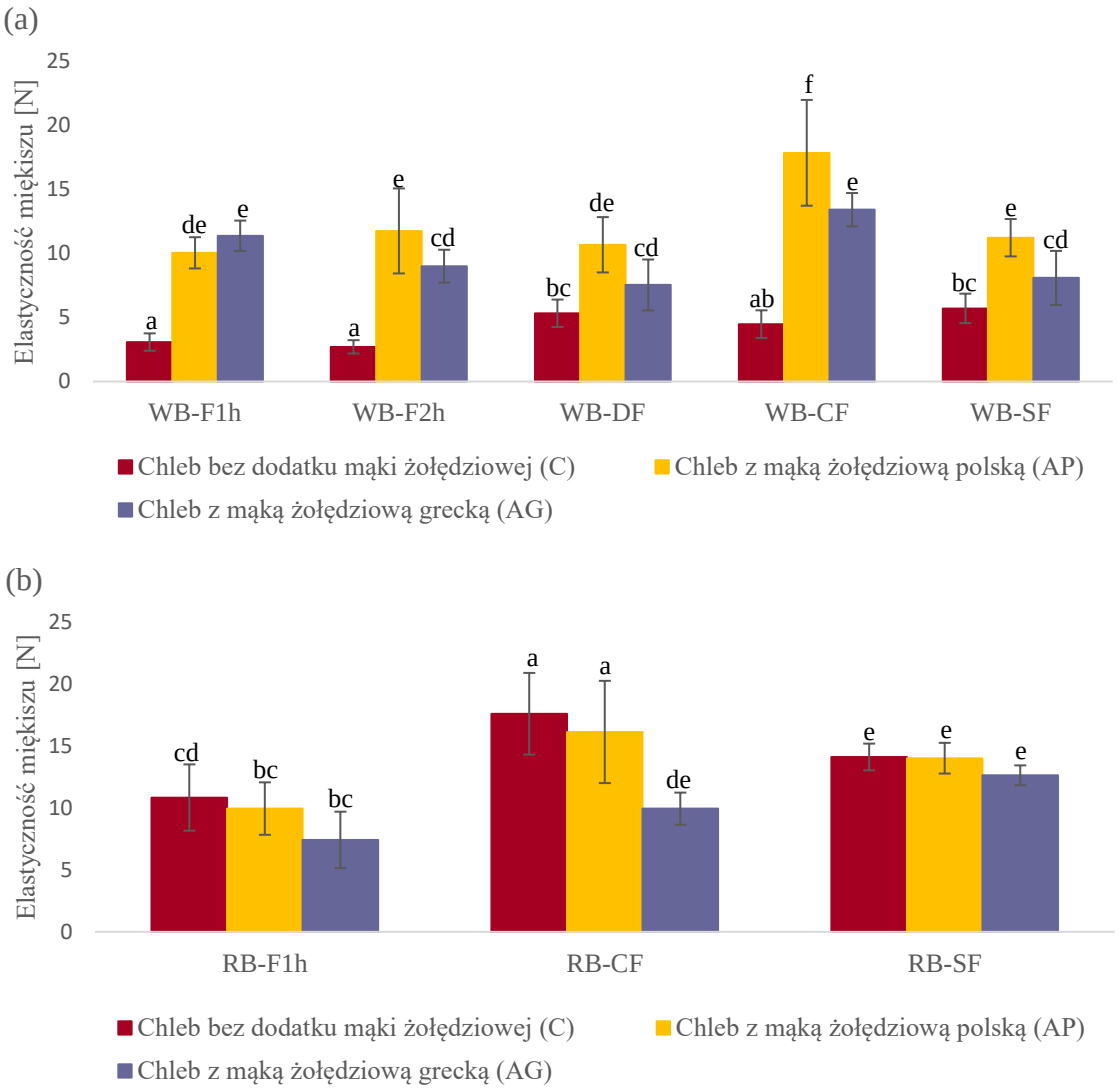



WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa).

**Rysunek 14.** Całkowita różnica barwy skórki i miękiszu chlebów pszennych (a) i żytnich (b) bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

W chlebie pszennym dodatek mąki żołędziowej zmniejszył elastyczność miękiszu (**rysunek 15**). Wartość siły, potrzebnej do zgniecenia próbki miękiszu chleba pszennego z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej, w porównaniu z próbkami kontrolnymi, zwiększyła się od 97% dla chleba z metody na zakwasie do 334% dla chleba wypiekanego z ciasta prowadzonego metodą bezpośrednią z 2-godzinną fermentacją. Dodatek mąki żołędziowej greckiej zmniejszył elastyczność miękiszu, w porównaniu z próbkami kontrolnymi, od 41,5% dla chleba na podmłodzie do 269,5% dla chleba wypiekanego z ciasta prowadzonego

metodą bezpośrednią z 1-godzinną fermentacją. Wraz z dodatkiem mąki żołędziowej zmieniła się również porowatość chleba. Dodatek mąki żołędziowej, niezależnie od jej pochodzenia, obniżył ogólną porowatość chleba pszennego; w miękiszu chleba zwiększyła się wielkość porów i grubość ścianek porów (**rysunek 13**).




WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa), wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 10), a-f – wartości średnie oznaczone różnymi małymi literami (oddzielnie dla chlebów pszennych i żytnich) różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$.

**Rysunek 15**. Elastyczność miękiszu chlebów pszennych (a) i żytnich (b) bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

Zaobserwowane zmiany są odmienne w porównaniu do wyników uzyskanych przez Hruškovą i in. (2019), którzy stwierdzili bardziej jednorodną porowatość z mniejszymi porami w miękiszu chleba pszennego z dodatkiem mąki żołędziowej i kasztanowej. Z kolei Mousavi i in. (2021) wykazali, że wprowadzenie 30% mąki żołędziowej do irańskiego pszennego chleba tostowego zwiększyło elastyczność miękiszu o 90%. Natomiast Park i in. (2017) oraz Purabdolah i in. (2020) potwierdzili, podobnie jak w niniejszej pracy, że dodatek mąki żołędziowej miał wpływ na twardość chleba, ale nie różnicował jego sprężystości ani spoistości. Dodatek mąki żołędziowej nie wpłynął istotnie statystycznie na zmiany elastyczności miękiszu chleba żytniego (**rysunek 15**). Miał jednak wpływ ograniczający na porowatość miękiszu, który był bardziej zbity i dominowały pory o dużej średnicy, nierównomiernie rozmieszczone w miękiszu (**rysunek 13**). Jednakże po wprowadzeniu mąki żołędziowej nastąpiła niewielka poprawa elastyczności miękiszu; odnotowano zmniejszenie siły zgniatania maksymalnie o 43,5% w chlebie z dodatkiem mąki żołędziowej greckiej wytwarzanym na zakwasie z kulturą starterową. Ambrosewicz-Walacik i in. (2016) stwierdzili, że chleb żytni prowadzony na zakwasie charakteryzował się mniejszą elastycznością miękiszu w porównaniu z chlebem z ciasta prowadzonego na zakwasie z kulturą starterową, co jest zgodne z rezultatami przedstawionymi w niniejszej pracy. Shiri i in. (2021) stwierdzili, że rodzaj fermentacji różnicował twardość, sprężystość i spoistość chleba bezglutenowego zawierającego mąkę żołędziową i ryżową, wprowadzone w tej samej proporcji. W badaniach Beltrão Martins i in. (2022b), chleb bezglutenowy z dodatkiem mąki żołędziowej, z ciasta prowadzonego na zakwasie, cechował się większą twardością niż chleb wypiekany metodą bezpośrednią. W cytowanych badaniach sposób prowadzenia ciasta nie miał jednak istotnego wpływu na spójność, sprężystość i żujność chleba.

### 6.4.3. Jakość sensoryczna chleba

Zmiany jakości chleba znalazły odzwierciedlenie w ocenie sensorycznej produktów (**tabela 21**). Dodatek mąki żołędziowej do chleba spowodował jego mniejszą akceptację przez zespół oceniających. Wyniki dla chleba pszennego odpowiadały ocenie „bardzo lubię" (około 4,5) i były wyższe niż wyniki dla chleba żytniego (średnia 3,64-4,42; co odpowiada ocenie pomiędzy „ani lubię, nie lubię" i „lubię umiarkowanie"), niezależnie od ocenianych cech. Wprowadzenie do chleba pszennego mąki żołędziowej polskiej spowodowało obniżenie wyników oceny wynoszących średnio od 3,36 do 3,82 (sklasyfikowane odpowiednio jako „ani lubię, nie lubię" i „lubię umiarkowanie"). Dodatek mąki żołędziowej polskiej wpłynął

natomiast pozytywnie na oceny wyglądu zewnętrznego i tekstury chleba żytniego, które zostały sklasyfikowane jako „lubię umiarkowanie" (średnia odpowiednio 4,00 i 4,07). Zaobserwowano natomiast zmniejszenie średnich ocen barwy, zapachu i smaku (średnie oceny od 3,58 do 3,71). Wpływ dodatku mąki żołędziowej greckiej na cechy chleba był również zależny od mąki bazowej. Średnie wyniki ocen chleba pszenno-żołędziowego z mąką grecką dla wyglądu zewnętrznego i tekstury (odpowiednio 3,82 i 3,20) były niższe od średnich wyników dla próbek pszenno-żołędziowych z mąką polską. Średnie oceny za smak (3,50) i barwę (4,07) chlebów pszenno-żołędziowych były natomiast wyższe dla próbek z mąką grecką niż polską. Dodatek mąki żołędziowej greckiej nie wpłynął istotnie statystycznie ($p > 0,05$) na ocenę wyglądu zewnętrznego i barwy chleba żytniego (średnio odpowiednio 3,80 i 4,09), natomiast oceny zapachu (3,91) i smaku (3,69) były niższe w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Pozytywny efekt odnotowano dla tekstury (zwiększenie ocen z 3,64 do 3,98), którą uczestnicy określili jako „lubię umiarkowanie".

Metoda prowadzenia ciasta miała zróżnicowany wpływ na cechy sensoryczne chleba pszennego i żytniego. Niższe oceny uzyskano dla chleba pszennego wytwarzanego metodą na zakwasie, bliskie „lubię umiarkowanie", podczas gdy metody bezpośrednie dały wyniki bliskie „bardzo lubię". Z kolei oceny chleba żytnio-żołędziowego prowadzonego na zakwasie, niezależnie od pochodzenia mąki żołędziowej, odpowiadały klasyfikacji „lubię umiarkowanie" i były wyższe w porównaniu z wariantami otrzymanymi z zastosowaniem pozostałych metod prowadzenia ciasta, które zostały sklasyfikowane jako „ani lubię, ani nie lubię". Niezależnie od ocen przyznanych za poszczególne cechy chleba, ogólną akceptowalność oceniono na co najmniej 3,5, co generalnie świadczy o dobrej jakości otrzymanego chleba.

Przedstawione wyniki są zgodne z uzyskanymi przez Park i in. (2017) oraz Švec i in. (2018), którzy zwrócili uwagę na negatywny wpływ dodatku mąki żołędziowej na ocenę sensoryczną. Švec i in. (2018) wykazali, że mąka żołędziowa zmieniała głównie smak i zapach chleba pszennego. Park i in. (2017) wykazali zmniejszenie punktacji dla wszystkich ocenianych wyróżników (barwa, smak, gorzki posmak, miękkość, żujność) po dodaniu mąki żołędziowej do chleba pszennego. Z kolei Purabdolah i in. (2020) nie wykazali statystycznie istotnych różnic w ogólnej akceptacji między chlebem pszennym a wariantami chleba z 10% dodatkiem mąki żołędziowej. Pozytywny wpływ mąki żołędziowej na akceptację chleba zaobserwowali natomiast Korus i in. (2015), którzy stwierdzili, że dodatek mąki żołędziowej (do 40%) do chleba bezglutenowego spowodował zwiększenie jego atrakcyjności sensorycznej, zwłaszcza pod względem barwy, smaku i tekstury.

**Tabela 21.** Ocena sensoryczna (metoda 5-punktowa) chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

| Rodzaj chleba | Wygląd zewnętrzny | Barwa | Zapach | Smak | Tekstura | Ogólna akceptacja* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| WB-F1h | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $4{,}73 \pm 0{,}46^{ab}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{a}$ | $4{,}87 \pm 0{,}35^{a}$ | $4{,}77^{a}$ |
| WB-F2h | $4{,}73 \pm 0{,}46^{a}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{a}$ | $4{,}93 \pm 0{,}26^{b}$ | $4{,}87 \pm 0{,}35^{a}$ | $4{,}87 \pm 0{,}35^{a}$ | $4{,}87^{a}$ |
| WB-DF | $4{,}40 \pm 0{,}51^{ab}$ | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $4{,}73 \pm 0{,}46^{ab}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{b}$ | $4{,}60 \pm 0{,}51^{ab}$ | $4{,}70^{a}$ |
| WB-CF | $4{,}00 \pm 0{,}65^{bc}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{ab}$ | $3{,}80 \pm 0{,}56^{cd}$ | $3{,}73 \pm 0{,}59^{b}$ | $3{,}87 \pm 0{,}35^{cd}$ | $3{,}98^{b}$ |
| WB-SF | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $4{,}07 \pm 0{,}59^{cd}$ | $4{,}47 \pm 0{,}52^{a}$ | $4{,}60 \pm 0{,}51^{a}$ | $4{,}47 \pm 0{,}52^{be}$ | $4{,}40^{c}$ |
| Średnia | $4{,}49^{D}$ | $4{,}55^{C}$ | $4{,}53^{C}$ | $4{,}56^{D}$ | $4{,}54^{E}$ | $4{,}54^{D}$ |
| *CV (%)* | *6,77* | *6,24* | *9,72* | *10,41* | *9,06* | *7,89* |
| WB-PA-F1h | $4{,}07 \pm 0{,}59^{bc}$ | $3{,}80 \pm 0{,}41^{cde}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{cdef}$ | $3{,}40 \pm 0{,}51^{bcd}$ | $3{,}80 \pm 0{,}56^{cd}$ | $3{,}63^{d}$ |
| WB-PA-F2h | $4{,}07 \pm 0{,}59^{bc}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{e}$ | $3{,}33 \pm 0{,}62^{ef}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{bd}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{cf}$ | $3{,}52^{d}$ |
| WB-PA-DF | $4{,}20 \pm 0{,}68^{b}$ | $4{,}27 \pm 0{,}46^{bd}$ | $3{,}93 \pm 0{,}46^{d}$ | $3{,}47 \pm 0{,}52^{bcd}$ | $4{,}13 \pm 0{,}64^{de}$ | $3{,}95^{b}$ |
| WB-PA-CF | $3{,}67 \pm 0{,}49^{cd}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{e}$ | $3{,}33 \pm 0{,}49^{ef}$ | $3{,}27 \pm 0{,}59^{bcd}$ | $3{,}73 \pm 0{,}59^{c}$ | $3{,}47^{d}$ |
| WB-PA-SF | $3{,}07 \pm 0{,}70^{e}$ | $3{,}73 \pm 0{,}59^{cde}$ | $3{,}47 \pm 0{,}74^{cde}$ | $3{,}13 \pm 0{,}83^{cd}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{cf}$ | $3{,}47^{d}$ |
| Średnia | $3{,}82^{BC}$ | $3{,}79^{A}$ | $3{,}52^{A}$ | $3{,}36^{A}$ | $3{,}76^{BC}$ | $3{,}61^{A}$ |
| *CV (%)* | *12,11* | *7,67* | *7,00* | *4,79* | *6,21* | *5,67* |
| WB-GA-F1h | $2{,}67 \pm 0{,}49^{f}$ | $3{,}80 \pm 0{,}56^{cd}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{cdef}$ | $3{,}00 \pm 0{,}53^{c}$ | $2{,}80 \pm 0{,}41^{g}$ | $3{,}30^{d}$ |
| WB-GA-F2h | $3{,}33 \pm 0{,}62^{de}$ | $3{,}87 \pm 0{,}41^{cd}$ | $3{,}27 \pm 0{,}26^{e}$ | $3{,}13 \pm 0{,}35^{cd}$ | $3{,}93 \pm 0{,}59^{cd}$ | $3{,}55^{d}$ |
| WB-GA-DF | $3{,}73 \pm 0{,}46^{cd}$ | $4{,}73 \pm 0{,}70^{a}$ | $4{,}47 \pm 0{,}64^{a}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{a}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{cf}$ | $4{,}33^{ce}$ |
| WB-GA-CF | $3{,}67 \pm 0{,}49^{cd}$ | $4{,}00 \pm 0{,}38^{cd}$ | $3{,}73 \pm 0{,}49^{cdf}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{bd}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{cf}$ | $3{,}72^{d}$ |
| WB-GA-SF | $2{,}60 \pm 0{,}51^{f}$ | $3{,}93 \pm 0{,}59^{cd}$ | $3{,}80 \pm 0{,}68^{cd}$ | $3{,}33 \pm 0{,}72^{bcd}$ | $3{,}27 \pm 0{,}59^{f}$ | $3{,}58^{d}$ |
| Średnia | $3{,}20^{A}$ | $4{,}07^{B}$ | $3{,}77^{B}$ | $3{,}50^{AB}$ | $3{,}44^{A}$ | $3{,}70^{A}$ |
| *CV (%)* | *16,83* | *9,31* | *11,64* | *17,34* | *12,42* | *10,45* |
| RB-F1h | $3{,}93 \pm 0{,}59^{abc}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{a}$ | $4{,}93 \pm 0{,}26^{a}$ | $4{,}87 \pm 0{,}35^{a}$ | $4{,}07 \pm 0{,}59^{a}$ | $4{,}60^{a}$ |
| RB-CF | $3{,}40 \pm 0{,}51^{d}$ | $4{,}00 \pm 0{,}76^{b}$ | $3{,}93 \pm 0{,}70^{bcd}$ | $3{,}47 \pm 0{,}52^{bc}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{b}$ | $3{,}73^{b}$ |
| RB-SF | $3{,}60 \pm 0{,}63^{abc}$ | $4{,}00 \pm 0{,}65^{b}$ | $4{,}40 \pm 0{,}51^{d}$ | $4{,}33 \pm 0{,}49^{d}$ | $3{,}33 \pm 0{,}62^{b}$ | $4{,}02^{cd}$ |
| Średnia | $3{,}64^{B}$ | $4{,}18^{B}$ | $4{,}42^{C}$ | $4{,}22^{C}$ | $3{,}64^{AB}$ | $4{,}12^{C}$ |
| *CV (%)* | *7,35* | *7,33* | *11,32* | *16,72* | *10,51* | *10,75* |
| RB-PA-F1h | $4{,}07 \pm 0{,}53^{bcf}$ | $3{,}87 \pm 0{,}41^{bc}$ | $3{,}87 \pm 0{,}41^{bc}$ | $3{,}47 \pm 0{,}62^{bc}$ | $4{,}07 \pm 0{,}59^{a}$ | $3{,}82^{bc}$ |
| RB-PA-CF | $3{,}47 \pm 0{,}52^{ad}$ | $3{,}67 \pm 0{,}49^{c}$ | $3{,}47 \pm 0{,}64^{d}$ | $3{,}27 \pm 0{,}59^{b}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{bc}$ | $3{,}50^{b}$ |
| RB-PA-SF | $4{,}47 \pm 0{,}52^{e}$ | $3{,}60 \pm 0{,}63^{c}$ | $3{,}67 \pm 0{,}49^{bc}$ | $4{,}00 \pm 0{,}65^{de}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{d}$ | $3{,}95^{c}$ |
| Średnia | $4{,}00^{C}$ | $3{,}71^{A}$ | $3{,}67^{AB}$ | $3{,}58^{AB}$ | $4{,}07^{D}$ | $3{,}76^{AB}$ |
| *CV (%)* | *12,57* | *3,77* | *5,45* | *10,54* | *11,43* | *6,13* |
| RB-GA-F1h | $3{,}20 \pm 0{,}77^{d}$ | $4{,}07 \pm 0{,}70^{ab}$ | $4{,}13 \pm 0{,}64^{cd}$ | $3{,}80 \pm 0{,}65^{ce}$ | $3{,}60 \pm 0{,}51^{bc}$ | $3{,}90^{c}$ |
| RB-GA-CF | $3{,}93 \pm 0{,}59^{abc}$ | $4{,}27 \pm 0{,}70^{ab}$ | $3{,}47 \pm 0{,}52^{d}$ | $3{,}13 \pm 0{,}74^{b}$ | $4{,}00 \pm 0{,}65^{ac}$ | $3{,}72^{bc}$ |
| RB-GA-SF | $4{,}27 \pm 0{,}70^{ce}$ | $3{,}93 \pm 0{,}70^{bc}$ | $4{,}13 \pm 0{,}64^{cd}$ | $4{,}13 \pm 0{,}74^{de}$ | $4{,}33 \pm 0{,}62^{ad}$ | $4{,}13^{d}$ |
| Średnia | $3{,}80^{BC}$ | $4{,}09^{B}$ | $3{,}91^{B}$ | $3{,}69^{B}$ | $3{,}98^{CD}$ | $3{,}92^{BC}$ |
| *CV (%)* | *14,39* | *4,18* | *9,75* | *13,82* | *9,19* | *5,28* |

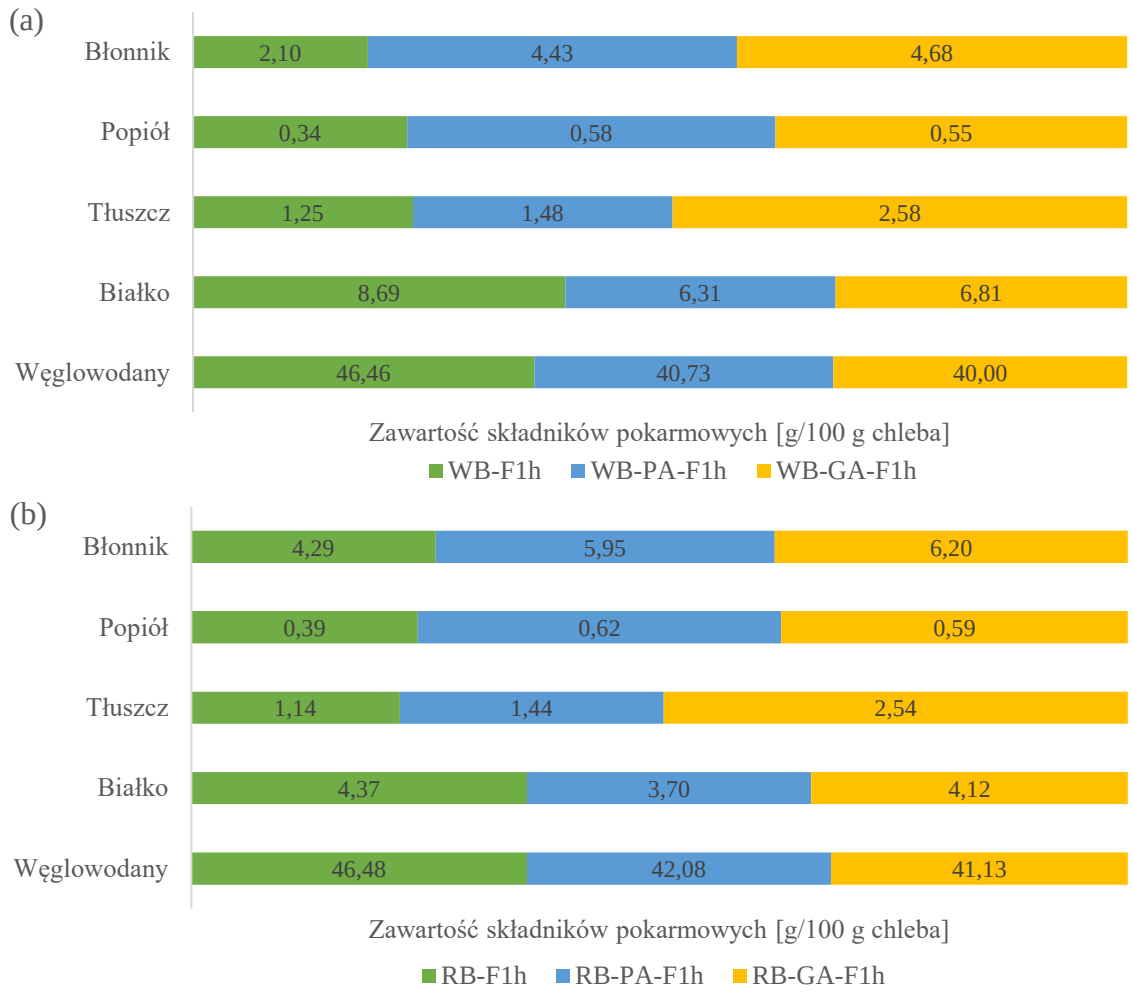
WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa), CV – współczynnik zmienności; pw kolumnach (oddzielnie dla chleba pszennego i żytniego) oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$; A-E – wartości średnie w kolumnach oznaczonych różnymi dużymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$. *Ogólna akceptacja została obliczona jako średnia ocen dla cech chleba.

### 6.4.4. Wartość odżywcza chleba

Wpływ mąki żołędziowej na wartość odżywczą chleba pszennego i żytniego został przedstawiony na przykładzie chleba wypiekanego metodą bezpośrednią z 1-godzinną fermentacją. Dodatek mąki żołędziowej do chleba wpływał na jego wartość odżywczą i zawartość podstawowych składników pokarmowych (**rysunek 16**). Różnice dotyczyły wszystkich ocenianych składników: węglowodanów, białka, tłuszczu, popiołu i błonnika. Zmiany te zależne były od pochodzenia mąki żołędziowej i wynikały bezpośrednio ze składu chemicznego mąk stosowanych w wypieku (**tabela 8**). Mąka żołędziowa, niezależnie od pochodzenia oraz bez względu na rodzaj mąki zbożowej, powodowała zmniejszenie zawartości węglowodanów i białka, a zwiększenie zawartości tłuszczu, popiołu i błonnika w chlebie.

Zawartość węglowodanów w chlebach pszennych zmniejszyła się o 12,3% i 13,9%, odpowiednio dla chleba z mąką żołędziową polską i grecką. Zmniejszeniu ulegała również zawartość białka, natomiast zwiększyła się zawartość tłuszczu (nawet 2-krotnie więcej), popiołu (ok. 1,5-krotnie więcej) i błonnika (ponad 2-krotnie więcej). Pochodzenie mąki żołędziowej nie wpływało znacząco na różnice w zawartości węglowodanów, białka, popiołu i błonnika w chlebach pszenno-żołędziowych. Zróżnicowana była jedynie zawartość tłuszczu, która była najwyższa w chlebie pszennym z mąką żołędziową grecką (o 106,4% większa niż w próbce kontrolnej i o 74,3 % większa niż w chlebie z mąką żołędziową polską).

Chleb żytni, bez i z dodatkiem mąki żołędziowej, w porównaniu do chleba pszennego cechował się wyższą zawartością węglowodanów i błonnika pokarmowego, niższą zawartością białka oraz podobną zawartością tłuszczu i popiołu. Wpływ mąki żołędziowej na zawartość składników pokarmowych w chlebie żytnim był zbliżony do tego w chlebie pszennym: zwiększyła się zawartość tłuszczu, popiołu i błonnika pokarmowego, a zmniejszyła zawartość węglowodanów i białka. Otrzymane wyniki wskazały, że mąka żołędziowa grecka w mniejszym stopniu wpływała na zawartość białka i popiołu niż mąka polska, a w większym na zawartość węglowodanów, tłuszczu i błonnika. Największe różnice odnotowano w przypadku zawartości błonnika, którego ilość zwiększała się w porównaniu do próbki kontrolnej o 38,7% i 44,5% w chlebie żytnim odpowiednio z mąką żołędziowa polską i grecką. Natomiast zawartości tłuszczu w chlebie żytnim z mąką żołędziową grecką zwiększyła się o 122,8%.




WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa).

**Rysunek 16**. Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą – zawartość podstawowych składników odżywczych w chlebie pszennym (a) i żytnim (b).

Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą był oceniany także w badaniach innych autorów, zarówno w chlebach pszennych jak i bezglutenowych (Hrůskova i in., 2019; Korus i in., 2015; Beltrao Martins i in., 2020; Švec i in., 2018). Hrůskova i in. (2019) oraz Švec i in. (2018) odnotowali zwiększenie zawartości błonnika w chlebie pszennym z dodatkiem mąki żołędziowej już na poziomie 5-10%. Zmniejszenie zawartości białka oraz zwiększenie zawartości popiołu i błonnika wykazał w pieczywie pszennym (chleby w formie podpłomyków, *flatbread*) Ajo (2018). Korus i in. (2015) odnotowali wpływ mąki żołędziowej na zwiększenie zawartości tłuszczu i błonnika pokarmowego w chlebie bezglutenowym. Autorzy wskazali również na zwiększenie zawartości białka, co jest odmienne

w porównaniu do wyników uzyskanych w niniejszej pracy. Różnice te można prawdopodobnie tłumaczyć różnym składem mąk bazowych.

Obok zawartości podstawowych składników odżywczych istotny również będzie wpływ dodatku mąki żołędziowej na profil kwasów tłuszczowych chleba. W tłuszczu tej mąki dominują nienasycone kwasy tłuszczowe, a głównymi kwasami tłuszczowymi są kwas oleinowy (do 60,92% sumy wszystkich kwasów tłuszczowych) oraz kwas linolowy (do 15,91%) (Silva i in., 2016). Warto podkreślić, że profil kwasów tłuszczowych mąki żołędziowej odróżnia ją od profili kwasów tłuszczowych mąk zbożowych, w których dominuje kwas linolowy (do 61,00% i do 56,09% sumy wszystkich kwasów tłuszczowych w pszennej i żytniej mącewyciągowej) (Hager i in., 2012; Nikolić i in., 2008; Sujka i in., 2017). Większa zawartość tłuszczu w mące żołędziowej, zwłaszcza greckiej, będzie wywierała wpływ na profil kwasów tłuszczowych chleba, co może wpływać na przebieg procesu utleniania tłuszczu w chlebie podczas wypieku i przechowywania. Kwas linolowy jest kwasem tłuszczowym nawet 10-40-krotnie bardziej podatnym na utlenianie niż kwas oleinowy (Tańska i Rotkiewicz, 2011), dlatego można przypuszczać, że w chlebie z dodatkiem mąki żołędziowej tworzenie się produktów utlenienia będzie wolniejsze. Warto również wspomnieć, że profil kwasów tłuszczowych ma również znaczenie ze względów żywieniowych. Wskazuje się, że spożywanie kwasu oleinowego przyczyniać się może do wspomagania leczenia i profilaktyki chorób układu krążenia, zaburzeń metabolicznych, uszkodzeń skóry i nowotworów (Sales-Campos i in., 2013).

Mąka żołędziowa stanowi również surowiec wzbogacający skład pieczywa w składniki mineralne, z uwagi na wyższą niż w mąkach zbożowych wyciągowych zawartość popiołu (**tabela 8**). Wśród składników mineralnych w mące żołędziowej dominuje przede wszystkim wapń i żelazo, których zawartość jest znacząco wyższa niż w mąkach zbożowych (**tabela 6**), ale zawiera także znaczne ilości magnezu, miedzi i manganu (Ajo i in., 2020; Rybicka i Gliszczyńska-Świgło, 2017a). Mąka żołędziowa może zatem stanowić źródło wapnia i żelaza w pieczywie z jej udziałem, a tym samym zwiększać ilość tych składników w diecie.

### 6.4.5. Zawartość związków fenolowych oraz pojemność przeciwutleniająca chleba

Wysoka zawartość wolnych związków fenolowych ogółem w użytych w badaniach mąkach żołędziowych (**tabela 8**) znajduje odzwierciedlenie w wysokiej zawartości wolnych związków fenolowych ogółem w chlebie (**tabela 22**). Dodatek mąki żołędziowej do chleba

pszennego spowodował ponad 17-krotne zwiększenie zawartości wolnych związków fenolowych ogółem (dla próbek chleba pszennego prowadzonego na podmłodzie z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej i greckiej). Chleb żytni charakteryzował się wyższą zawartością tych związków w porównaniu z chlebem pszennym, ale zwiększenie ich zawartości w wyniku wprowadzenia do chlebów żytnich mąki żołędziowej był mniejszy niż w przypadku chlebów pszennych (około 8-krotnie). Metoda prowadzenia ciasta miała statystycznie istotny wpływ ($p \leq 0,05$) na zawartość wolnych związków fenolowych ogółem w chlebach z dodatkiem mąki żołędziowej. Należy zauważyć, że chleb otrzymany metodami na zakwasie (bez lub z kulturą starterową) charakteryzował się wyższą zawartością wolnych związków fenolowych niż chleb otrzymany metodami bezpośrednimi i na podmłodzie. Stwierdzono, że im dłuższy był proces fermentacji ciasta, tym wyższa była zawartość wolnych związków fenolowych w chlebie. Taką zależność potwierdzili w swoich badaniach również inni badacze (np. Dapčević Hadnađev i in., 2022; Drakula i in., 2021; Pejcz i in., 2021). Natomiast Banu i in. (2010) stwierdzili wyższą zawartość związków fenolowych ogółem w chlebie żytnim otrzymanym na zakwasie z kulturą starterową w porównaniu do metody na zakwasie bez kultury.

Purabdolah i in. (2020) zaobserwowali zwiększenie zawartości wolnych związków fenolowych ogółem w chlebie pszennym z dodatkiem mąki żołędziowej. Uzyskane różnice były jednak mniejsze w porównaniu z wynikami przedstawionymi w niniejszej pracy. Z kolei Mousavi i in. (2021) uzyskali 18-krotne zwiększenie zawartości związków fenolowych w irańskim chlebie pszennym tostowym z 30% udziałem mąki żołędziowej w porównaniu z próbką kontrolną. Skendi i in. (2018) stwierdzili, że zawartość wolnych związków fenolowych ogółem była 1,5-krotnie wyższa w chlebie bezglutenowym z 25% udziałem mąki żołędziowej w porównaniu z próbką kontrolną. Beltrão Martins i in. (2020) odnotowali 2-krotne zwiększenie zawartości związków fenolowych ogółem, 7-krotne zwiększenie orto-difenoli oraz około 1,5-krotne zwiększenie zawartości flawonoidów w chlebie bezglutenowym z 35% zawartością mąki żołędziowej w porównaniu z próbkami kontrolnymi. W badaniach Beltrão Martins i in. (2022b) w chlebie z dodatkiem mąki żołędziowej zastosowanie metody na zakwasie wpłynęło na zwiększenie zawartości związków fenolowych ogółem w porównaniu do próbki wypiekanej metodą bezpośrednią.

**Tabela 22.** Zawartość wolnych fenoli ogółem (TFP) i wolnych kwasów fenolowych oraz pojemność przeciwutleniająca (AC) w chlebie pszennym i żytnim bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

| Rodzaj chleba | TFP [mg/100 g s.m.] | Wolne kwasy fenolowe [mg/100 g s.m.] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | kwas kawowy | kwas ferulowy | kwas sinapowy | kwas wanilinowy | kwas galusowy | kwas 4-OH-benzoesowy | kwas p-kumarowy | kwas elagowy |
| WB-F1h | 13,47 ± 0,41$^{ab}$ | 0,00$^{a}$ | 0,29 ± 0,06$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,03 ± 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ |
| WB-F2h | 12,30 ± 0,62$^{ab}$ | 0,00$^{a}$ | 0,36 ± 0,04$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,04 ± 0,01$^{a}$ | 0,00$^{a}$ |
| WB-DF | 9,90 ± 0,13$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,35 ± 0,02$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,12 ± 0,02$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,15 ± 0,03$^{bc}$ | 0,03 ± 0,01$^{a}$ | 0,00$^{a}$ |
| WB-CF | 15,09 ± 0,09$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,07 ± 0,01$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,19 ± 0,02$^{d}$ | 0,00$^{b}$ | 0,00$^{a}$ |
| WB-SF | 13,59$^{a}$ ± 0,53$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,23 ± 0,05$^{ac}$ | 0,00$^{a}$ | 0,10 ± 0,01$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,17 ± 0,01$^{c}$ | 0,02 ± 0,00$^{ab}$ | 0,00$^{a}$ |
| Średnia | 12,87$^{A}$ | 0,00$^{A}$ | 0,26$^{B}$ | 0,00$^{A}$ | 0,04$^{B}$ | 0,00$^{A}$ | 0,10$^{C}$ | 0,02$^{A}$ | 0,00$^{A}$ |
| *CV (%)* | *15,02* | *0,00* | *46,38* | *0,00* | *138,17* | *0,00* | *92,23* | *59,35* | *0,00* |
| WB-PA-F1h | 167,16 ± 2,03$^{cd}$ | 0,02 ± 0,01$^{a}$ | 0,15 ± 0,02$^{c}$ | 0,04 ± 0,00$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 3,56 ± 0,11$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 31,45 ± 0,91$^{b}$ |
| WB-PA-F2h | 170,52 ± 1,09$^{d}$ | 0,02 ± 0,00$^{b}$ | 0,15 ± 0,05$^{c}$ | 0,04 ± 0,01$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 3,76 ± 0,23$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 29,71 ± 1,55$^{b}$ |
| WB-PA-DF | 175,05 ± 0,47$^{e}$ | 0,03 ± 0,00$^{c}$ | 0,21 ± 0,08$^{c}$ | 0,07 ± 0,01$^{bc}$ | 0,00$^{a}$ | 3,62 ± 0,18$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 33,91 ± 1,08$^{b}$ |
| WB-PA-CF | 185,40 ± 0,82$^{f}$ | 0,00$^{a}$ | 0,05 ± 0,02$^{b}$ | 0,05 ± 0,01$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00 | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 34,47 ± 2,43$^{b}$ |
| WB-PA-SF | 189,30 ± 1,04$^{g}$ | 0,04 ± 0,01$^{c}$ | 0,18 ± 0,06$^{c}$ | 0,03 ± 0,00$^{b}$ | 0,31 ± 0,04$^{c}$ | 3,64 ± 0,10$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,02 ± 0,01$^{ab}$ | 38,58 ± 2,07$^{bc}$ |
| Średnia | 177,49$^{D}$ | 0,02$^{B}$ | 0,15$^{A}$ | 0,04$^{B}$ | 0,06$^{B}$ | 2,91$^{C}$ | 0,00$^{A}$ | 0,00$^{A}$ | 33,63$^{B}$ |
| *CV (%)* | *5,37* | *63,19* | *40,35* | *28,90* | *223,61* | *55,96* | *0,00* | *223,61* | *10,03* |
| WB-GA-F1h | 146,07 ± 0,42$^{h}$ | 0,03 ± 0,01$^{c}$ | 0,22 ± 0,08$^{ac}$ | 0,10 ± 0,02$^{c}$ | 0,00$^{a}$ | 1,43 ± 0,11$^{c}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 47,73 ± 0,12$^{cd}$ |
| WB-GA-F2h | 152,91 ± 1,15$^{i}$ | 0,00$^{a}$ | 0,21 ± 0,04$^{c}$ | 0,15 ± 0,03$^{d}$ | 0,00$^{a}$ | 1,24 ± 0,09$^{c}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 52,35 ± 0,46$^{d}$ |
| WB-GA-DF | 168,33$^{e}$ ± 1,48$^{d}$ | 0,00$^{a}$ | 0,33 ± 0,07$^{a}$ | 0,15 ± 0,01$^{d}$ | 0,00$^{a}$ | 1,53 ± 0,02$^{d}$ | 0,00$^{a}$ | 0,05 ± 0,00$^{b}$ | 56,10 ± 0,20$^{d}$ |
| WB-GA-CF | 169,74 ± 2,01$^{cd}$ | 0,00$^{a}$ | 0,07 ± 0,02$^{b}$ | 0,08$^{b}$ ± 0,01$^{c}$ | 0,00$^{a}$ | 1,05 ± 0,04$^{c}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{b}$ | 42,00 ± 0,31$^{c}$ |
| WB-GA-SF | 165,99± 0,98$^{c}$ | 0,04 ± 0,01$^{c}$ | 0,26 ± 0,08$^{a}$ | 0,13 ± 0,02$^{cd}$ | 0,00$^{a}$ | 1,06 ± 0,01$^{c}$ | 0,00$^{a}$ | 0,03 ± 0,01$^{b}$ | 51,49 ± 0,14$^{d}$ |
| Średnia | 160,61$^{D}$ | 0,02$^{B}$ | 0,22$^{B}$ | 0,12$^{C}$ | 0,00$^{A}$ | 1,26$^{B}$ | 0,00$^{A}$ | 0,01$^{A}$ | 49,93$^{C}$ |
| *CV (%)* | *6,55* | *138,86* | *43,79* | *25,21* | *0,00* | *17,17* | *0,00* | *143,40* | *10,70* |
| RB-F1h | 21,45 ± 1,78$^{a}$ | 0,07 ± 0,02$^{a}$ | 1,15 ± 0,13$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,16 ± 0,03$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,18 ± 0,01$^{a}$ | 0,00$^{a}$ |
| RB-CF | 23,25 ± 1,06$^{a}$ | 0,05 ± 0,01$^{b}$ | 0,65 ± 0,09$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,17 ± 0,02$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ | 0,08 ± 0,03$^{b}$ | 0,00$^{a}$ |
| RB-SF | 22,59 ± 0,82$^{a}$ | 0,08 ± 0,03$^{a}$ | 0,76 ± 0,07$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,24 ± 0,02$^{b}$ | 0,00$^{a}$ | 0,14 ± 0,04$^{b}$ | 0,19 ± 0,00$^{a}$ | 0,00$^{a}$ |
| Średnia | 22,43$^{B}$ | 0,07$^{C}$ | 0,86$^{E}$ | 0,00$^{A}$ | 0,19$^{C}$ | 0,00$^{A}$ | 0,05$^{B}$ | 0,15$^{B}$ | 0,00$^{A}$ |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *CV (%)* | *4,06* | *20,96* | *30,59* | *0,00* | *22,98* | *0,00* | *173,21* | *40,41* | *0,00* |
| RB-PA-F1h | $183{,}09 \pm 1{,}15^{b}$ | $0{,}08 \pm 0{,}03^{a}$ | $0{,}46 \pm 0{,}05^{cd}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}07 \pm 0{,}02^{a}$ | $4{,}49 \pm 009^{b}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}15 \pm 0{,}02^{c}$ | $50{,}11 \pm 0{,}41^{b}$ |
| RB-PA-CF | $195{,}39 \pm 0{,}78^{c}$ | $0{,}04 \pm 0{,}00^{c}$ | $0{,}30 \pm 0{,}02^{c}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}00^{c}$ | $3{,}68 \pm 0{,}12^{c}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}05 \pm 0{,}01^{d}$ | $46{,}07^{c} \pm 0{,}32^{b}$ |
| RB-PA-SF | $209{,}76 \pm 0{,}89^{d}$ | $0{,}09 \pm 0{,}02^{ad}$ | $0{,}51 \pm 0{,}07^{d}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}11 \pm 0{,}01^{a}$ | $4{,}16 \pm 0{,}22^{b}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}10 \pm 0{,}01^{c}$ | $56{,}33 \pm 0{,}53^{b}$ |
| Średnia | $196{,}08^{E}$ | $0{,}07^{C}$ | $0{,}42^{C}$ | $0{,}00^{A}$ | $0{,}06^{B}$ | $4{,}11^{D}$ | $0{,}00^{A}$ | $0{,}11^{B}$ | $50{,}84^{C}$ |
| *CV (%)* | *6,81* | *39,77* | *25,63* | *0,00* | *92,94* | *9,91* | *0,00* | *46,69* | *10,17* |
| RB-GA-F1h | $173{,}76 \pm 1{,}02^{e}$ | $0{,}11 \pm 0{,}02^{d}$ | $0{,}79 \pm 0{,}04^{b}$ | $0{,}12 \pm 0{,}02^{b}$ | $0{,}00^{c}$ | $1{,}62 \pm 0{,}11^{d}$ | $0{,}00^{a}$ | $0{,}10 \pm 0{,}04^{c}$ | $57{,}28 \pm 0{,}23^{b}$ |
| RB-GA-CF | $178{,}17 \pm 0{,}47^{f}$ | $0{,}04 \pm 0{,}01^{c}$ | $0{,}28 \pm 0{,}02^{c}$ | $0{,}13 \pm 0{,}02^{b}$ | $0{,}00^{c}$ | $1{,}35 \pm 0{,}07^{de}$ | $0{,}17 \pm 0{,}08^{b}$ | $0{,}03 \pm 0{,}00^{d}$ | $46{,}01^{c} \pm 0{,}31^{b}$ |
| RB-GA-SF | $178{,}56 \pm 0{,}62^{f}$ | $0{,}13 \pm 0{,}02^{d}$ | $0{,}59 \pm 0{,}04^{d}$ | $0{,}15 \pm 0{,}01^{c}$ | $0{,}46 \pm 0{,}11^{d}$ | $1{,}53 \pm 0{,}14^{d}$ | $0{,}13 \pm 0{,}06^{c}$ | $0{,}12 \pm 0{,}01^{c}$ | $62{,}58 \pm 0{,}53^{c}$ |
| Średnia | $176{,}83^{C}$ | $0{,}09^{C}$ | $0{,}56^{D}$ | $0{,}13^{C}$ | $0{,}15^{C}$ | $1{,}50^{B}$ | $0{,}10^{C}$ | $0{,}10^{B}$ | $55{,}29^{D}$ |
| *CV (%)* | *1,51* | *51,41* | *46,88* | *9,37* | *173,21* | *9,35* | *88,50* | *66,54* | *15,31* |

WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa), CV – współczynnik zmienności; TFP – zawartość wolnych związków fenolowych ogółem; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-i – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla chleba pszennego i żytniego) oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$; A-E – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi dużymi literami się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$.

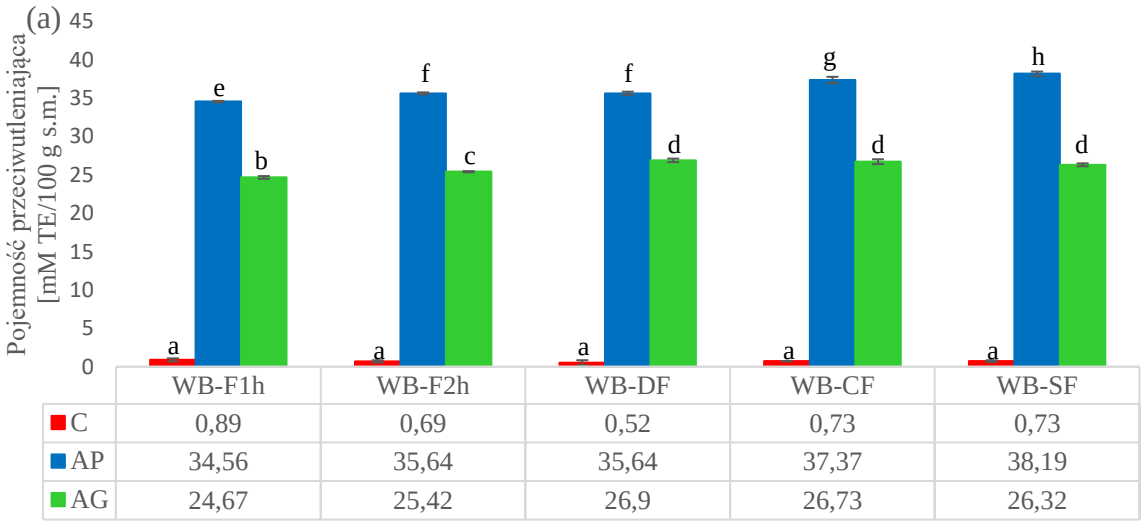
Profil i zawartość wolnych kwasów fenolowych w chlebie zmieniały się w zależności od rodzaju mąki zbożowej i żołędziowej (**tabela 22**). Chleby z dodatkiem mąki żołędziowej (polskiej oraz greckiej) były bardziej zróżnicowane i bogatsze w kwasy fenolowe niż próbki kontrolne. Dominującym kwasem fenolowym w chlebie kontrolnym pszennym i żytnim był kwas ferulowy, którego zawartość wahała się od 0,07 do 0,36 mg/100 g s.m. w chlebie pszennym i od 0,65 do 1,15 mg/100 g s.m. w chlebie żytnim, w zależności od metody prowadzenia ciasta. Zawartość kwasu ferulowego została zmniejszona w chlebie z dodatkiem mąki żołędziowej, osiągając najniższe wartości w próbkach z dodatkiem polskiej mąki żołędziowej (0,05-0,21 mg/100 g s.m. w chlebach pszennych i 0,30-0,51 mg/100 g s.m. w chlebach żytnich). Pozostałe kwasy fenolowe (kwasy wanilinowy, 4-OH-benzoesowy, p-kumarowy) w kontrolnym chlebie pszennym stanowiły nie więcej niż 10% sumy kwasów fenolowych, podczas gdy w kontrolnym chlebie żytnim ich łączna zawartość wynosiła do 0,57 mg/100 g s.m. Stwierdzono, że dodatek mąki żołędziowej powodował obniżenie zawartości tych kwasów fenolowych, w większości przypadków poniżej poziomu wykrywalności. W chlebach z dodatkiem mąki żołędziowej potwierdzono obecność kwasu elagowego (którego zawartość była dominująca), galusowego, sinapowego i kawowego. Zawartość kwasu elagowego w chlebie z mąką żołędziową grecką (42,0-56,10 mg/100 g s.m. dla próbek pszennych i 46,01-62,58 mg/100 g s.m. dla próbek żytnich) była wyższa w porównaniu z chlebami z mąką żołędziową polską (29,71-38,58 mg/100 g s.m. dla próbek pszennych i 46,07-56,33 mg/100 g s.m. dla próbek żytnich). Stężenie kwasu galusowego było 2-krotnie wyższe w chlebie z mąką żołędziową polską niż z mąką żołędziową grecką, natomiast zawartość kwasu sinapowego i kwasu kawowego nie była znacząca. Podobne wyniki uzyskali Beltrão Martins i in. (2020), którzy wykazali brak kwasu elagowego w chlebie bezglutenowym, natomiast jego zawartość w chlebie z 35% dodatkiem mąki żołędziowej wynosiła 159 mg/100 g s.m. Cytowani autorzy wykazali wysokie stężenie kwasu syringowego i rutyny, które nie zostały zidentyfikowane w niniejszej pracy.

Na zawartość kwasów fenolowych w chlebie wpływała również metoda prowadzenia ciasta (**tabela 22**). Fermentacja na zakwasie (bez i z kulturą starterową) zwiększyła uwalnianie kwasu wanilinowego i 4-OH-benzoesowego. Oba kwasy nie zostały wykryte w chlebach prowadzonych metodami bezpośrednimi i na podmłodzie, z wyjątkiem kontrolnej próbki chleba żytniego wypiekanego metodą bezpośrednią i kontrolnej próbki chleba pszennego na podmłodzie. Również zawartość kwasu elagowego była najwyższa w chlebie na zakwasie bez dodatku kultury starterowej. Jednocześnie najmniejszą zawartość kwasów ferulowego i p-kumarowego stwierdzono w chlebie na zakwasie z kulturą starterową. Średnia zawartość

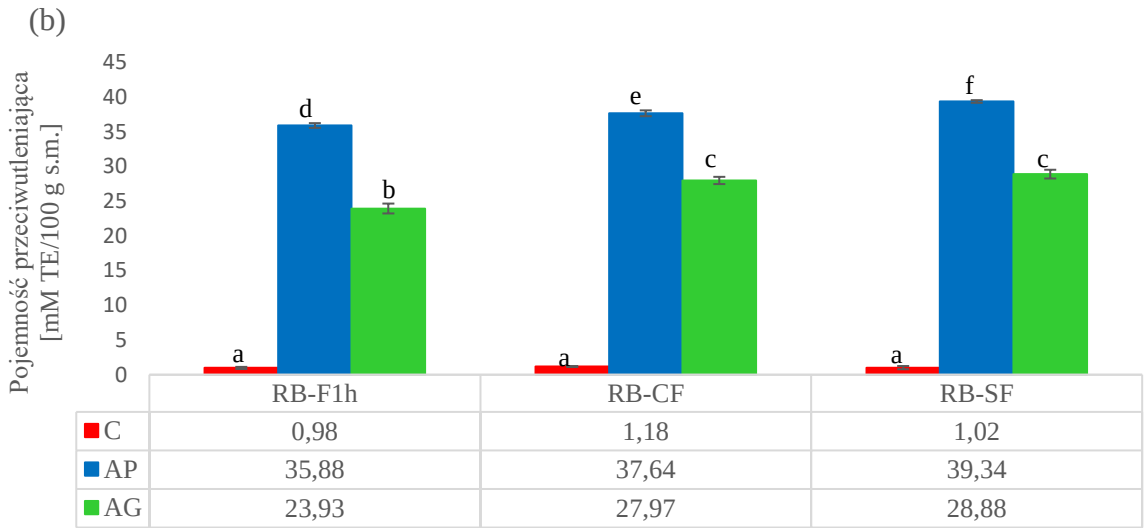
kwasu ferulowego była niższa w chlebach na zakwasie z dodatkiem kultury starterowej od 34,7% dla chleba żytniego z mąką żołędziową polską do 75,9% dla kontrolnej próbki chleba pszennego w porównaniu z chlebami prowadzonymi metodą bezpośrednią z 1-godzinną fermentacją. Z kolei zawartość kwasu p-kumarowego została obniżona nawet do 0,00 mg/100 g s.m. Skrajda-Brdak i in. (2019) wykazali, że fermentacja na zakwasie miała pozytywny wpływ na zwiększanie zawartości wolnych kwasów fenolowych w chlebie żytnim, ale zaobserwowano tendencję spadkową w chlebie pszennym (głównie kwasy ferulowy i p-kumarowy), co jest zgodne z wynikami przedstawionymi w niniejszej pracy. Na zwiększenie zawartości kwasów fenolowych na skutek prowadzonej fermentacji ciasta chlebowego, ale także na drodze rozkładu termicznego związków fenolowych, zwłaszcza pochodnych kwercytyny, wskazują wyniki badań Ziobro i in. (2022). Cytowani autorzy stwierdzili istotne zwiększenie zawartości kwasów fenolowych w chlebie pszennym z dodatkiem suszonych wytłoków z marchwi, a uzyskane wartości były wyższe niż wynikałoby to z udziału surowca wzbogacającego. Koistinen i in. (2018) w swoich badaniach porównali chleb wypiekany metodą na zakwasie i metodą bezpośrednią. Zaobserwowali zwiększenie zawartości kwasów kawowego i sinapowego oraz zmniejszenie zawartości kwasów ferulowego i p-kumarowego. Chociaż procesy fermentacji mają kluczowe znaczenie w uwalnianiu składników z matryc roślinnych, która skutecznie zwiększa stężenie wolnych związków fenolowych, to jednak pod wpływem procesów termicznych lub enzymatycznych (enzymy natywne mąki i/lub esterazy i dekarboksylazy mikroflory) mogą one ulegać degradacji i ponowne zostać związane przez inne związki chemiczne w produkcie, co jest również możliwe podczas produkcji chleba (Skrajda-Brdak i in., 2019).

Naturalną konsekwencją wysokiej zawartości związków fenolowych był wysoki poziom pojemności przeciwutleniającej, oznaczonej metodą z zastosowaniem rodnika DPPH (**rysunek 17**), co potwierdza silna korelacja między tymi parametrami, wynosząca 0,98 (dane nie przedstawione). Dodatek mąki żołędziowej do chleba zwiększył pojemność przeciwutleniającą, przy czym najwyższe wartości odnotowano w chlebie z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej (zwiększenie o 38,8-68,5% w chlebie pszennym i o 32,1-38,6% w chlebie żołędziowym). Dodatek mąki żołędziowej greckiej zwiększył pojemność przeciwutleniającą o 27,7-51,7% dla chleba pszennego i o 23,7-28,3% dla chleba żołędziowego. Może to mieć związek z wysoką zawartością kwasu elagowego i galusowego w chlebie z dodatkiem mąki żołędziowej, na co wskazują współczynniki korelacji na poziomie odpowiednio 0,85 i 0,82 (dane nie przedstawione). Podobne zwiększenie pojemności przeciwutleniającej w chlebie pszennym wzbogaconym mąką żołędziową w porównaniu z próbkami kontrolnymi

stwierdzili Purabdolah i in. (2020). Cytowani autorzy stwierdzili również najwyższą pojemność przeciwutleniającą w próbkach z mąką żołędziową poddaną fermentacji przed jej dodaniem do ciasta. Z kolei Parsaei i in. (2018) odnotowali zwiększenie pojemności przeciwutleniającej o 29% w herbatnikach pszennych z 30% dodatkiem mąki żołędziowej w porównaniu z próbkami kontrolnymi.




| | WB-F1h | WB-F2h | WB-DF | WB-CF | WB-SF |
|---|---|---|---|---|---|
| C | 0,89 | 0,69 | 0,52 | 0,73 | 0,73 |
| AP | 34,56 | 35,64 | 35,64 | 37,37 | 38,19 |
| AG | 24,67 | 25,42 | 26,9 | 26,73 | 26,32 |




| | RB-F1h | RB-CF | RB-SF |
|---|---|---|---|
| C | 0,98 | 1,18 | 1,02 |
| AP | 35,88 | 37,64 | 39,34 |
| AG | 23,93 | 27,97 | 28,88 |

WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, C – próba kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa); wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3); a-h – wartości średnie oznaczone różnymi małymi literami (oddzielnie dla chlebów pszennych i żytnich) różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

**Rysunek 17**. Pojemność przeciwutleniająca chlebów pszennych (a) i żytnich (b) bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.

Chleby z dodatkiem mąki żołędziowej przygotowane z ciasta prowadzonego na zakwasie (bez lub z kulturą starterową) charakteryzowały się istotnie statystycznie ($p \leq 0,05$) wyższą wartością pojemności przeciwutleniającej niż chleby z dodatkiem mąki żołędziowej przygotowane metodą bezpośrednią z 1- lub 2-godzinną fermentacją. Wyższą pojemność przeciwutleniającą chlebów otrzymanych z zastosowaniem metod pośrednich można prawdopodobnie tłumaczyć, podobnie jak w przypadku całkowitej zawartości wolnych związków fenolowych, dłuższym procesem fermentacji pozwalającym na uwolnienie większej ilości związków wykazujących zdolność do zmiatania rodnika DPPH. Różnice w pojemności przeciwutleniającej między chlebami przygotowanymi z ciasta prowadzonego metodą na zakwasie z kulturą starterową a chlebami z ciasta przygotowanego metodą bezpośrednią wynosiły od 3,4% do 17,1%. W próbkach kontrolnych (zarówno pszennych, jak i żytnich) nie stwierdzono istotnego statystycznie ($p > 0,05$) wpływu metody prowadzenia ciasta.

### 6.4.6. Wpływ pochodzenia i dodatku mąki żołędziowej oraz metody prowadzenia ciasta na jakość chleba pszennego i żytniego oraz biodostępność związków fenolowych

Dwuczynnikowa ANOVA potwierdziła statystycznie istotny wpływ dodatku mąki żołędziowej i metody prowadzenia ciasta na jakość chleba (**tabela 23**). W przypadku wydajności chleba stwierdzono większy wpływ metody prowadzenia ciasta (44-72% wyjaśnienia wariancji) niż dodatku mąki żołędziowej (do 34% wyjaśnienia wariancji). Z kolei objętość chlebów pszennych zależała głównie od dodatku mąki żołędziowej (> 63% wyjaśnienia wariancji), podczas gdy oba czynniki istotnie wpływały na objętość chlebów żytnich (odpowiednio 39% i 54% wyjaśnienia wariancji dla dodatku mąki żołędziowej i metody prowadzenia ciasta). Metoda prowadzenia ciasta miała większy wpływ na straty wypiekowe (> 27% wyjaśnienia wariancji) niż dodatek mąki żołędziowej, podczas gdy sumaryczny efekt interakcji obu czynników był największy w chlebach żytnich (> 37% wyjaśnienia wariancji). Wykazano, że dodatek mąki żołędziowej był głównym czynnikiem odpowiedzialnym za barwę skórki i miękiszu chlebów (35-97% wyjaśnienia wariancji). Największy wpływ dodatku mąki żołędziowej odnotowano dla parametru L* miękiszu chleba (> 75% wyjaśnienia wariancji). Z kolei twardość miękiszu chleba zależała od rodzaju mąki bazowej, przy czym za elastyczność miękiszu chleba pszennego odpowiadał głównie dodatek mąki żołędziowej (48% wyjaśnienia wariancji), a za elastyczność miękiszu chleba żytniego metoda prowadzenia ciasta (66% wyjaśnienia wariancji).

**Tabela 23.** Wpływ metody prowadzenia ciasta i dodatku mąki żołędziowej na analizowane cechy chleba pszennego i żytniego.

| Analizowane właściwości | Chleb pszenny | | | | Chleb żytni | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DM | AF | DM x AF | Inne | DM | AF | DM x AF | Inne |
| Cechy technologiczne | | | | | | | | |
| Wydajność ciasta | 44,3 | 34,6 | 3,1 | 4,4 | 65,0 | 26,8 | 7,9 | 0,3 |
| Wydajność chleba | 43,5 | 33,9 | 3,5 | 5,1 | 72,2 | 23,4 | 3,1 | 1,4 |
| Objętość chleba | 3,2 | 63,5 | 9,5 | 12,3 | 54,1 | 39,0 | 3,2 | 3,8 |
| Strata piecowa | 29,5 | 25,7 | 27,5 | 23,1 | 27,2 | 12,3 | 49,4 | 11,1 |
| Strata wypiekowa całkowita | 47,9 | 7,1 | 23,0 | 23,3 | 27,7 | 26,2 | 37,7 | 8,4 |
| Parametry barwy | | | | | | | | |
| Skórka – L* | 13,1 | 46,4 | 22,8 | 18,0 | 26,3 | 48,1 | 25,5 | 0,1 |
| Skórka – a* | 28,0 | 34,6 | 23,9 | 2,0 | 9,4 | 75,6 | 13,6 | 1,4 |
| Skórka – b* | 5,2 | 57,9 | 16,5 | 12,8 | 5,4 | 80,5 | 14,1 | 0,0 |
| Miękisz – L* | 0,7 | 75,8 | 3,7 | 7,8 | 0,1 | 97,4 | 2,2 | 0,3 |
| Miękisz – a* | 8,4 | 67,1 | 6,9 | 8,7 | 9,6 | 82,0 | 3,6 | 4,8 |
| Miękisz – b* | 1,9 | 60,1 | 24,1 | 13,6 | 16,9 | 78,4 | 3,7 | 1,1 |
| Elastyczność miękiszu | 4,6 | 47,7 | 20,5 | 18,7 | 66,0 | 11,6 | 15,7 | 6,7 |
| Cechy sensoryczne | | | | | | | | |
| Wygląd zewnętrzny | 7,7 | 38,5 | 14,4 | 39,4 | 9,3 | 4,2 | 18,1 | 68,5 |
| Barwa | 11,4 | 23,1 | 7,8 | 57,6 | 3,5 | 8,8 | 3,3 | 84,5 |
| Zapach | 10,3 | 31,5 | 10,1 | 48,1 | 15,2 | 18,6 | 3,0 | 63,1 |
| Smak | 8,4 | 37,6 | 13,3 | 40,6 | 23,0 | 12,3 | 8,1 | 56,7 |
| Tekstura | 5,5 | 38,2 | 14,1 | 42,2 | 4,7 | 7,4 | 19,9 | 68,0 |
| Zawartość związków fenolowych ogółem | 0,6 | 99,0 | 0,4 | 0,1 | 0,3 | 99,3 | 0,4 | 0,0 |
| Zawartość kwasów fenolowych | | | | | | | | |
| Kwas kawowy | 32,3 | 33,5 | 33,7 | 0,5 | 70,8 | 11,7 | 14,0 | 3,5 |
| Kwas ferulowy | 65,6 | 22,3 | 11,9 | 0,3 | 38,4 | 49,3 | 10,8 | 1,5 |
| Kwas sinapowy | 4,1 | 87,9 | 6,2 | 1,8 | 0,3 | 98,9 | 0,6 | 0,2 |
| Kwas wanilinowy | 41,0 | 10,0 | 49,0 | 0,0 | 44,9 | 15,5 | 37,1 | 2,5 |
| Kwas galusowy | 12,7 | 66,2 | 20,8 | 0,3 | 0,8 | 98,5 | 0,7 | 0,1 |
| Kwas 4-OH-benzoesowy | 16,8 | 49,5 | 33,7 | 0,0 | 28,9 | 33,7 | 37,3 | 0,0 |
| Kwas p-kumarowy | 36,8 | 26,2 | 36,9 | 0,2 | 78,7 | 18,4 | 2,6 | 0,3 |
| Kwas elagowy | 0,8 | 97,6 | 1,6 | 0,0 | 2,1 | 96,6 | 1,3 | 0,0 |
| Pojemność przeciwutleniająca | 0,2 | 99,6 | 0,2 | 0,1 | 0,6 | 99,0 | 0,3 | 0,1 |

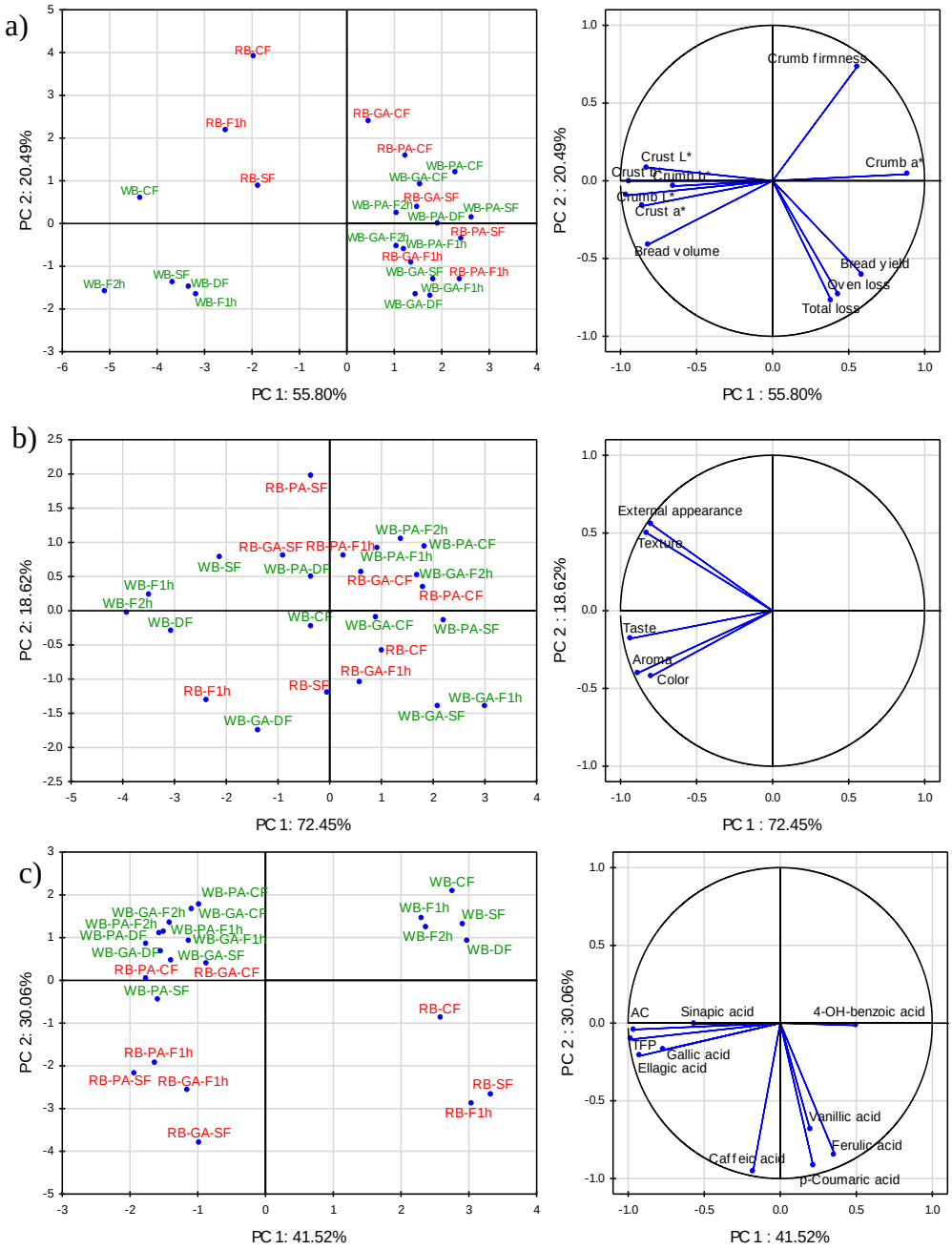
DM – metoda prowadzenia ciasta; AF – dodatek mąki żołędziowej; dane przedstawiono jako % wyjaśnienia wariancji, analiza dwuczynnikowa z testem Wilksa, $p \leq 0,05$; efekt istotny statystycznie oznaczono kolorem czerwonym.

Potwierdzono także statystycznie istotny wpływ dodatku mąki żołędziowej, metody prowadzenia ciasta oraz ich interakcji na ocenę sensoryczną. Stwierdzono jednak, że inne czynniki wywierały większy wpływ na akceptowalność sensoryczną cech otrzymanych chlebów (> 39% wyjaśnienia wariancji). Można przypuszczać, że znaczącą rolę w ocenie cech

sensorycznych chleba odgrywały indywidualne preferencje uczestników zespołu oceniającego, które są w różnych badaniach wskazywane jako istotny czynnik, wpływający na decyzje związane z wyborem spożywanego pieczywa (Guiné i in., 2016; Ilktac i in., 2021; Puerta i in., 2022).

Na zawartość wolnych związków fenolowych i pojemność przeciwutleniającą otrzymanego chleba duży wpływ wywierał dodatek mąki żołędziowej (> 99% wyjaśnienia wariancji). Znaczny wpływ dodatku mąki żołędziowej (> 66% wyjaśnienia wariancji) odnotowano również w przypadku zawartości kwasów fenolowych, których źródłem była mąka żołędziowa, tj. kwasu sinapowego, galusowego i elagowego. Metoda prowadzenia ciasta w największym stopniu determinowała zawartość kwasu ferulowego w chlebie pszennym (66% wyjaśnienia wariancji) oraz kwasu kawowego, waniliowego i p-kumarowego w chlebie żytnim (>44% wyjaśnienia wariancji). Ponadto sumaryczny wpływ interakcji obu badanych czynników na zawartość kwasu wanilinowego i p-kumarowego był największy w chlebie pszennym (odpowiednio 37 i 49% wyjaśnienia wariancji).

Modele analizy głównych składowych (PCA) stworzono w celu wizualizacji zróżnicowania próbek chleba pod względem cech fizycznych, sensorycznych i odżywczych (**rysunek 18**). Wykres pierwszych dwóch składowych głównych (które stanowiły 76,29% całkowitej zmienności) na **rysunku 18a** pokazał wyraźne grupowanie próbek chleba kontrolnego i próbek chleba z dodatkiem mąki żołędziowej, z nakładaniem się grup próbek chlebów pszennych i żytnich wzbogaconych mąką żołędziową. Na wykresie ładunków czynnikowych przedstawiono główne składowe odpowiedzialne za grupowanie próbek. Na podstawie wykresu można zauważyć, że wyraźnie większa objętość chleba oraz wyższe wartości parametrów barwy skórki (a*) i miękiszu (L*) odróżniały próbki kontrolne chleba pszennego (z wyjątkiem próbki na zakwasie z kulturą starterową) oraz nieco wyższe wartości parametrów barwy skórki (L*) i miękiszu (b*) próbki kontrolne chleba żytniego. Analiza wyników oceny sensorycznej wykazała, że dwie pierwsze składowe (PC1 i PC2) stanowiły odpowiednio 72,45% i 18,62% całkowitej zmienności (**rysunek 18b**). Chociaż potwierdzono pewne różnice w ocenie cech chleba ze względu na rodzaj mąki zbożowej lub żołędziowej oraz zastosowaną metodę prowadzenia ciasta, nie stwierdzono wyraźnego podziału badanych wariantów chleba.




WB – chleb pszenny, RB – chleb żytni, PA – mąka żołędziowa polska, GA – mąka żołędziowa grecka, F1h, F2h – metoda bezpośredniego prowadzenia ciasta z fermentacją przez 1 h i 2 h, DF – metoda na podmłodzie, CF – metoda na zakwasie z kulturą starterową, SF – metoda na zakwasie (5-fazowa).

**Rysunek 18.** Wyniki analizy PCA z uwzględnieniem dwóch pierwszych głównych składowych (po lewej – wykres rozrzutu próbek oraz po prawej – wykres ładunków czynnikowych): cech fizycznych (a); cech sensorycznych (b); oraz charakterystyki substancji bioaktywnych (c) próbek chleba pszennego (kolor zielony) i żytniego (kolor czerwony).

Istotne różnice zaobserwowane w profilu wolnych kwasów fenolowych w badanych chlebach kontrolnych i chlebach z dodatkiem mąki żołędziowej, zostały również potwierdzone w analizie PCA (**rysunek 18c**). Pierwsze dwie główne składowe (PC1 i PC2) stanowiły 71,58%

całkowitej zmienności. Na wykresie można zauważyć wpływ rodzaju mąki zbożowej i mąki żołędziowej na zawartość kwasów fenolowych (uformowały się cztery skupienia). Stwierdzono, że zawartość wolnych związków fenolowych ogółem oraz zawartości kwasu galusowego i elagowego w chlebie były ujemnie skorelowane z PC1, natomiast zawartości kwasu kawowego, ferulowego, wanilinowego i p-kumarowego były ujemnie skorelowane z PC2. Grupowanie próbek chleba pszennego z mąką żołędziową pokazuje ich podobieństwo pod względem profilu kwasów fenolowych, niezależnie od metody prowadzenia ciasta i pochodzenia mąki żołędziowej. Z kolei próbki chleba żytniego z mąką żołędziową wyróżniały się głównie wyższą zawartością kwasu p-kumarowego, ferulowego i wanilinowego. Ponadto metoda prowadzenia ciasta i rodzaj mąki żołędziowej w chlebie żytnim miały istotny wpływ na zawartość wolnych związków fenolowych.

**Podsumowanie**

Wyniki eksperymentu z wytworzeniem wzbogaconych wyrobów piekarskich wskazują, że wykorzystanie mąki żołędziowej do produkcji pieczywa pszennego i żytniego jest możliwe. Niemniej jednak dodatek mąki żołędziowej istotnie wpływa na parametry jakościowe i wartość odżywczą chleba. Chleby z dodatkiem mąki żołędziowej charakteryzowały się ciemniejszą barwą, mniejszą objętością bochenka i porowatością miękiszu oraz większą twardością miękiszu. Zmiany tych cech pieczywa znalazły odzwierciedlenie w niższych ocenach sensorycznych, w szczególności chleba pszennego. Jednak dodatek mąki żołędziowej zwiększył w pieczywie zawartość wolnych fenoli, które są potencjalnie bardziej biodostępne w organizmie człowieka.

Przeprowadzone badania wykazały, że ważny jest nie tylko rodzaj mąki bazowej, ale także metoda prowadzenia ciasta oraz pochodzenie mąki żołędziowej (m.in. gatunek żołędzi, sposób jej wytwarzania). Uzyskane wyniki pokazują, że wybór odpowiedniej metody fermentacji ciasta może ograniczać negatywny wpływ mąki żołędziowej na cechy fizyczne i sensoryczne chleba, a dodatkowo być czynnikiem determinującym jego wartość prozdrowotną, poprzez zwiększenie uwalniania składników bioaktywnych z mąki żołędziowej.

## 6.5. Wpływ dodatku i metody fermentacji mąki żołędziowej na jakość muffinów pszennych i biodostępność związków fenolowych

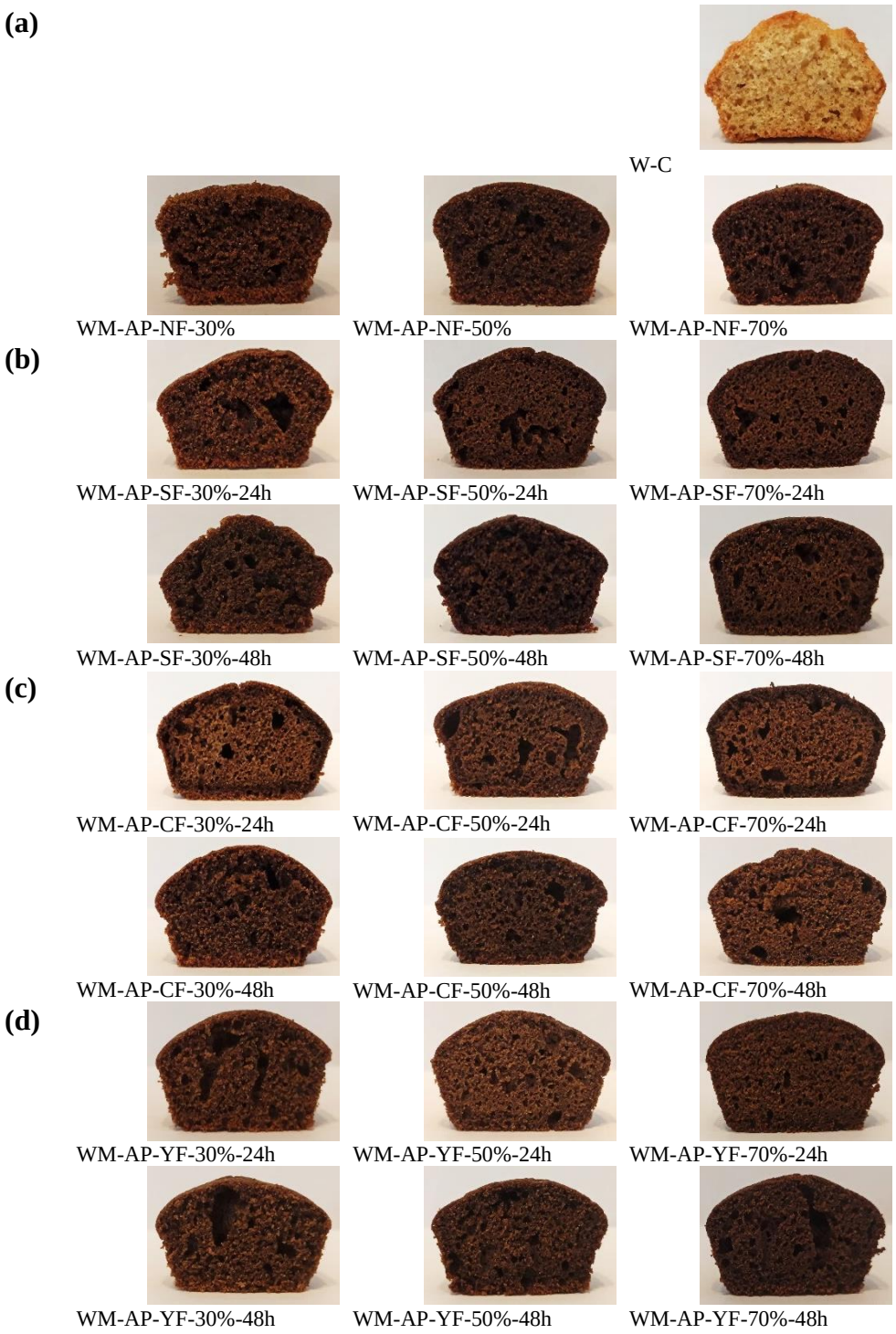
Kierując się pozytywnymi wynikami zastosowania metod fermentacji na cechy i skład chlebów pszennych i żytnich z mąką żołędziową podjęto próbę wykorzystania procesu fermentacji do obróbki mąki żołędziowej, a następnie wprowadzenie takiej mąki do wyrobu ciastkarskiego. Do badań wybrano ciastka pszenne biszkoptowo-tłuszczowe, tzw. muffiny, do których wprowadzano mąkę żołędziową uprzednio poddaną fermentacji prowadzonej spontanicznie lub kierowanej poprzez dodatek drożdży albo kultury starterowej przez 24 h i 48 h. Ze względu na zastosowanie w składzie recepturowym muffinów substancji spulchniających (proszku do pieczenia), udział mąki żołędziowej ustalono na poziomie 30, 50 i 70%. Ocenie poddano wpływ mąki żołędziowej na cechy fizyczne i jakość sensoryczną muffinów pszennych oraz wpływ zastosowanych metod fermentacji na zawartość wolnych związków fenolowych.

### 6.5.1. Właściwości fizyczne muffinów

Mąka żołędziowa, fermentowana i niefermentowana, wprowadzona do muffinów pszennych wpływała w sposób istotny ($p \leq 0,05$) na barwę ich skórki i miękiszu, co było zauważalne zarówno w wyglądzie ciastek (**rysunek 19**), jak i wynikach instrumentalnej analizy barwy w układzie CIE L*a*b* (**tabela 24**). Różnica barwy (ΔE), wyznaczona na podstawie parametrów L*, a* i b* względem pszennej próby kontrolnej wynosiła od 33,43 do 49,12 dla skórki i od 48,06 do 57,83 dla skórki muffinów i była tym większa, im większy był udział mąki żołędziowej w próbie. Największą odnotowaną zmianą było zmniejszenie jasności skórki muffinów w wyniku dodania mąki żołędziowej. Zmniejszenie wartości parametru L* następowało dla wszystkich próbek, niezależnie od udziału mąki żołędziowej, metody ani czasu fermentacji. Stwierdzono, że im większy był udział mąki żołędziowej, tym niższa była jasność skórki (zmniejszenie od 39,8% od 60,1%). Ponadto na obniżenie jasności skórki muffinów wpływała również fermentacja mąki żołędziowej. Niezależnie od sposobu jej prowadzenia, próbki z mąką żołędziową fermentowaną cechowały się niższą jasnością niż próbki z mąką niefermentowaną (najniższą jasność uzyskano dla próbek z mąką żołędziową poddaną fermentacji spontanicznej). Nie zaobserwowano jednak znaczących różnic jasności skórki muffinów wraz z wydłużeniem czasu fermentacji mąki.

Dodatek mąki żołędziowej, niefermentowanej i fermentowanej, wpływał również na zmiany parametrów a* i b* skórki, których wartości były tym mniejsze im wyższy był udział mąki żołędziowej (**tabela 24**). Wartości parametru a* (udział barwy czerwonej) nie różniły się w dużym stopniu pomiędzy poszczególnymi metodami fermentacji mąki a próbkami z mąką niefermentowaną. Jednakże wpływ czasu fermentacji mąki na zmiany wartości parametru a* zależny był od sposobu prowadzenia fermentacji. Największe różnice (zwiększenie wartości od 10,4% do 44,4% w zależności od udziału mąki) odnotowano pomiędzy próbkami z 24- i 48-godzinnej fermentacji z kulturą starterową. Podobne tendencje zaobserwowano w przypadku parametru b* (udział barwy żółtej), przy czym stwierdzono zmniejszenie wartości b* dla próbek z mąką fermentowaną (niezależnie od metody fermentacji) względem próbek z mąką niefermentowaną.

Barwa miękiszu muffinów zmieniała się, podobnie jak barwa skórki, wraz z udziałem mąki żołędziowej. Stwierdzono, że im większy był udział mąki żołędziowej, tym ciemniejszy był miękisz ciastek (**rysunek 19**). Spowodowało to zmiany wartości parametru L*, które były niższe w próbkach żołędziowych i zależały tak od udziału mąki żołędziowej, jak i metody oraz czasu fermentacji: dłuższy czas fermentacji mąki powodował zmniejszenie jasności muffinów przy takim samym udziale mąki żołędziowej. Wprowadzenie do receptury muffinów mąki żołędziowej spowodowało również zwiększenie udziału barwy czerwonej (a*) oraz zmniejszenie udziału barwy żółtej (b*) w miękiszu muffinów. Fermentacja mąki żołędziowej, niezależnie od metody, prowadziła do zmniejszenia różnic w wartości parametrów a* i b* pomiędzy próbami z różnym udziałem mąki żołędziowej. Niższa wartość parametrów L* i b* oraz wyższa wartość parametru a* cechowała pszenne muffiny z dodatkiem galaretki żołędziowej oraz ekstraktu żołędziowego w proszku w badaniach Kim i in. (2012), co jest zgodne z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy dla miękiszu muffinów pszennych z mąką żołędziową. Hoeche i in. (2014) przeprowadzili próbny wypiek muffinów pszennych z 50% dodatkiem mąki żołędziowej, które zostały poddane ocenie sensorycznej, a uzyskane wyniki dowiodły różnic barwy pomiędzy próbkami kontrolnymi i wzbogaconymi. Jak podają cytowani autorzy, oceniający wskazali, że próbki z mąką żołędziową cechowały się wyższą intensywnością barwy, która jednocześnie była mniej pożądana w porównaniu z próbkami pszennymi. Amina i Djamel (2018) prowadzili natomiast badania nad wpływem fermentacji i kiełkowania na mąkę żołędziową oraz ciastka pszenne (herbatniki) wytworzone z jej udziałem i stwierdzili, że o ile udział mąki żołędziowej wpływał na zmniejszenie jasności próbki (niższe wartości parametru L*), o tyle zastosowanie fermentacji nie miało istotnego wpływu na barwę w porównaniu do próbki z mąką niefermentowaną.




WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana, SF – fermentacja spontaniczna, CF – fermentacja z kulturą starterową, YF – fermentacja z drożdżami; 24 h, 48 h – czas fermentacji; 30-70% – udział mąki żołędziowej w próbie.

**Rysunek 19.** Wygląd w przekroju muffinów pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej: (a) próba pszenna (bez dodatku mąki żołędziowej) oraz próbki z mąką żołędziową niefermentowaną; (b) próbki z mąką żołędziową poddaną fermentacji spontanicznej; (c) próbki z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową; (d) próbki z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami.

Dodatek mąki żołędziowej, fermentowanej i niefermentowanej, wpłynął również na wygląd, objętość, porowatość i cechy tekstury muffinów pszennych. Objętość muffinów z mąką żołędziową była wyższa niż objętość próbki kontrolnej (maksymalnie o 9,57%) i nie różniła się istotnie statystycznie ($p > 0,05$) w zależności od udziału mąki (**tabela 24**), a jednocześnie ciastka cechowały się bardziej wyrównanym kształtem (**rysunek 19**). Wpływ na kształt i objętość muffinów z dodatkiem mąki żołędziowej mógł być prawdopodobnie związany z działaniem czynnika spulchniającego. Jak podaje van der Sman (2021), na przebieg i szybkość reakcji prowadzących do chemicznego spulchniania ciasta wpływ ma m.in. zawartość i dostępność wody. Ze względu na to, że mąka żołędziowa cechowała się większą wodochłonnością niż mąka pszenna (**tabela 8**), co wpłynęło na zwiększony udział składników płynnych w recepturze muffinów pszenno-żołędziowych (jak opisano w **rozdziale 5.2.2**), w trakcie wypieku mogło dojść do zmian w przebiegu procesu spulchniania. Przekłada się to również na różnice w strukturze miękiszu i rozkładzie porów (**rysunek 19**). Muffiny z 30% udziałem mąki żołędziowej cechowały się miękiszem z występowaniem dużych porów, nierównomiernie rozłożonych w całej objętości. Dalsze wprowadzanie mąki żołędziowej do muffinów (50% i 70% udział mąki żołędziowej) ograniczał te zmiany, zwiększał się udział małych, grubościennych porów.

Dodatek mąki żołędziowej do muffinów pszennych wpływał na elastyczność ich miękiszu, przy czym zmiany zależne były od zastosowanej metody fermentacji mąki (**tabela 24**). Wprowadzenie do produktu mąki żołędziowej niefermentowanej nie wpływało w sposób istotny statystycznie ($p > 0,05$) na zmiany elastyczności miękiszu muffinów, niezależnie od jej udziału. Zmiany elastyczności próbek z mąką żołędziową fermentowaną zależne były od metody i czasu fermentacji. Najwyższą elastycznością odznaczały się muffiny z mąką żołędziową poddaną fermentacji spontanicznej (zmniejszenie siły zgniatania maksymalnie o 84% względem próbki pszennej), najniższą – muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową (zwiększenie siły zgniatania maksymalnie o 63,4%). Dłuższy czas fermentacji mąki wpływał na zwiększenie elastyczności miękiszu muffinów z jej udziałem. Zmiany elastyczności miękiszu muffinów w zależności od metody i czasu fermentacji mogą być powiązane ze zmianami w zawartości wolnych związków fenolowych (**tabela 27**).

**Tabela 24.** Charakterystyka właściwości fizycznych muffinów pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej.

| Próbka | Barwa skórki | | | Barwa miękiszu | | | Różnica barwy | | Elastyczność miękiszu [N] | Objętość [cm$^3$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | L* [-] | a* [-] | b* [-] | L* [-] | a* [-] | b* [-] | skórki | miękiszu | | |
| Muffiny kontrolne – bez i z dodatkiem mąki żołędziowej niefermentowanej | | | | | | | | | | |
| WM-C | 54,28±1,49$^{a}$ | 17,35±0,38$^{a}$ | 38,68±1,98$^{a}$ | 65,98±2,67$^{a}$ | 3,70±1,29$^{a}$ | 33,63±1,61$^{a}$ | - | - | 34,88±3,67$^{a}$ | 47,73±1,45$^{a}$ |
| WM-AP-NF-30% | 32,65±0,88$^{b}$ | 8,86±0,29$^{b}$ | 14,64±0,82$^{b}$ | 20,05±1,57$^{b}$ | 7,53±0,16$^{b}$ | 13,75±0,32$^{b}$ | 33,43 | 50,19 | 35,48±3,84$^{a}$ | 52,07±1,15$^{b}$ |
| WM-AP-NF-50% | 29,20±0,75$^{bc}$ | 7,94±0,19$^{c}$ | 11,51±0,60$^{c}$ | 18,24±1,30$^{bc}$ | 7,14±0,44$^{b}$ | 11,73±0,88$^{c}$ | 38,15 | 52,63 | 37,40±5,01$^{a}$ | 52,30±1,39$^{b}$ |
| WM-AP-NF-70% | 27,87±4,45$^{c}$ | 6,04±0,16$^{d}$ | 7,51±0,37$^{d}$ | 15,47±1,01$^{c}$ | 5,81±0,16$^{c}$ | 8,32±0,35$^{d}$ | 42,39 | 56,53 | 36,86±3,54$^{a}$ | 51,77±0,91$^{b}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową poddaną fermentacji spontanicznej | | | | | | | | | | |
| WM-AP-SF-30%-24h | 29,59 ± 1,06$^{a}$ | 7,20 ± 0,15$^{a}$ | 10,99 ± 0,31$^{a}$ | 19,89 ± 0,94$^{a}$ | 7,18 ± 0,12$^{a}$ | 13,67 ± 0,36$^{a}$ | 38,46 | 50,35 | 22,64 ± 3,18$^{a}$ | 50,57 ± 1,48$^{ab}$ |
| WM-AP-SF-30%-48h | 28,81 ± 2,21$^{a}$ | 7,69 ± 0,60$^{a}$ | 9,94 ± 1,52$^{a}$ | 17,39 ± 1,69$^{b}$ | 5,80 ± 0,21$^{b}$ | 11,37 ± 1,99$^{b}$ | 39,59 | 53,49 | 10,26 ± 0,35$^{b}$ | 47,97 ± 1,46$^{a}$ |
| WM-AP-SF-50%-24h | 26,00 ± 0,27$^{b}$ | 5,39 ± 0,23$^{b}$ | 6,73 ± 0,44$^{b}$ | 18,40 ± 0,11$^{ab}$ | 6,50 ± 0,15$^{b}$ | 11,30 ± 0,46$^{b}$ | 44,31 | 52,63 | 23,91 ± 2,30$^{a}$ | 50,90 ± 0,62$^{ab}$ |
| WM-AP-SF-50%-48h | 23,86 ± 1,04$^{c}$ | 4,45 ± 0,45$^{c}$ | 4,52 ± 0,75$^{c}$ | 14,06 ± 1,17$^{c}$ | 4,81 ± 0,35$^{d}$ | 8,18 ± 0,69$^{c}$ | 47,52 | 57,83 | 5,57 ± 2,02$^{b}$ | 50,13 ± 1,07$^{ab}$ |
| WM-AP-SF-70%-24h | 23,35 ± 0,73$^{c}$ | 4,72 ± 0,24$^{cd}$ | 5,53 ± 0,43$^{bc}$ | 19,95 ± 1,08$^{a}$ | 6,92 ± 0,26$^{a}$ | 13,16 ± 0,67$^{a}$ | 47,07 | 50,48 | 24,68 ± 3,50$^{a}$ | 51,63 ± 1,17$^{b}$ |
| WM-AP-SF-70%-48h | 23,77 ± 0,79$^{c}$ | 5,26 ± 0,35$^{bd}$ | 6,16 ± 0,70$^{b}$ | 19,37 ± 0,53$^{a}$ | 6,79 ± 0,18$^{ac}$ | 13,18 ± 0,43$^{a}$ | 46,20 | 51,00 | 34,58 ± 3,65$^{c}$ | 51,33 ± 1,36$^{ab}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową | | | | | | | | | | |
| WM-AP-CF-30%-24h | 30,18 ± 1,45$^{a}$ | 7,41 ± 0,32$^{a}$ | 11,14 ± 0,68$^{a}$ | 19,31 ± 1,50$^{a,b}$ | 7,65 ± 0,32$^{a}$ | 14,43 ± 0,66$^{a}$ | 37,92 | 50,62 | 37,88 ± 5,97$^{a}$ | 50,60 ± 0,62$^{a}$ |
| WM-AP-CF-30%-48h | 29,72 ± 1,31$^{a}$ | 8,20 ± 0,61$^{b}$ | 10,75 ± 1,43$^{a}$ | 16,02 ± 0,85$^{c}$ | 6,20 ± 0,19$^{b}$ | 11,52 ± 0,45$^{b}$ | 38,30 | 54,69 | 18,39 ± 1,69$^{b}$ | 51,53 ± 0,71$^{a}$ |
| WM-AP-CF-50%-24h | 25,52 ± 0,84$^{b}$ | 5,86 ± 0,26$^{c}$ | 6,86 ± 0,37$^{b}$ | 18,26 ± 1,38$^{abc}$ | 6,88 ± 0,29$^{c}$ | 11,73 ± 1,08$^{b}$ | 44,41 | 52,60 | 56,98 ± 5,94$^{c}$ | 49,93 ± 0,96$^{a}$ |
| WM-AP-CF-50%-48h | 25,93 ± 0,75$^{b}$ | 6,47 ± 0,64$^{c}$ | 7,44 ± 1,36$^{b}$ | 19,44 ± 1,15$^{ab}$ | 6,23 ± 0,21$^{bd}$ | 11,78 ± 0,45$^{b}$ | 43,57 | 51,47 | 25,64 ± 3,72$^{b}$ | 50,37 ± 1,56$^{a}$ |
| WM-AP-CF-70%-24h | 21,67 ± 0,28$^{c}$ | 4,08 ± 0,09$^{d}$ | 4,43 ± 0,09$^{c}$ | 20,64 ± 1,27$^{b}$ | 8,15 ± 0,13$^{e}$ | 14,20 ± 0,85$^{ac}$ | 49,12 | 49,52 | 39,17 ± 3,76$^{a}$ | 49,73 ± 1,10$^{a}$ |
| WM-AP-CF-70%-48h | 24,71 ± 0,57$^{b}$ | 5,89 ± 0,22$^{c}$ | 7,83 ± 0,55$^{b}$ | 17,79 ± 1,96$^{a,c}$ | 6,70 ± 0,43$^{c,d}$ | 12,86 ± 1,10$^{bc}$ | 44,24 | 52,56 | 34,71 ± 3,22$^{a}$ | 49,60 ± 1,32$^{a}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami | | | | | | | | | | |
| WM-AP-YF-30%-24h | 30,70 ± 0,52$^{a}$ | 8,34 ± 0,14$^{a}$ | 12,17 ± 0,16$^{a}$ | 21,34 ± 1,19$^{ab}$ | 7,76 ± 0,13$^{a}$ | 13,85 ± 0,32$^{ab}$ | 36,60 | 48,99 | 27,50 ± 2,25$^{ab}$ | 50,77 ± 0,45$^{a}$ |
| WM-AP-YF-30%-48h | 30,46 ± 0,77$^{a}$ | 8,79 ± 0,43$^{a}$ | 12,30 ± 0,74$^{a}$ | 20,04 ± 0,23$^{abc}$ | 7,76 ± 0,45$^{a}$ | 16,94 ± 0,50$^{c}$ | 36,56 | 49,05 | 24,20 ± 3,15$^{a}$ | 47,87 ± 0,93$^{a}$ |
| WM-AP-YF-50%-24h | 25,72 ± 0,29$^{b}$ | 6,55 ± 0,14$^{b}$ | 8,65 ± 0,33$^{b}$ | 22,04 ± 1,97$^{b}$ | 7,90 ± 0,27$^{a}$ | 14,62 ± 0,43$^{b}$ | 42,83 | 48,06 | 26,10 ± 2,33$^{a}$ | 50,93 ± 1,05$^{a}$ |
| WM-AP-YF-50%-48h | 26,43 ± 0,56$^{b}$ | 6,57 ± 0,32$^{b}$ | 8,22 ± 0,85$^{b}$ | 19,33 ± 0,90$^{ac}$ | 6,73 ± 0,20$^{b}$ | 12,78 ± 0,53$^{a}$ | 42,66 | 51,19 | 35,04 ± 2,26$^{bc}$ | 50,30 ± 0,92$^{a}$ |
| WM-AP-YF-70%-24h | 24,45 ± 0,37$^{c}$ | 5,84 ± 0,17$^{c}$ | 6,82 ± 0,29$^{c}$ | 21,40 ± 1,77$^{ab}$ | 7,59 ± 0,36$^{a}$ | 13,41 ± 1,33$^{ab}$ | 45,13 | 49,10 | 47,34 ± 8,89$^{d}$ | 51,43 ± 1,32$^{a}$ |
| WM-AP-YF-70%-48h | 24,39 ± 0,42$^{c}$ | 4,97 ± 0,34$^{d}$ | 5,13 ± 0,57$^{d}$ | 17,69 ± 1,40$^{c}$ | 6,02 ± 0,28$^{c}$ | 10,59 ± 0,69$^{d}$ | 46,61 | 53,56 | 39,99 ± 4,55$^{cd}$ | 51,10 ± 2,71$^{a}$ |

WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana, SF – fermentacja spontaniczna, CF – fermentacja z kulturą starterową, YF – fermentacja z drożdżami; 24 h, 48 h – czas fermentacji; 30-70% – udział mąki żołędziowej w próbie; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3 dla objętości; n = 10 dla barwy i elastyczności), a-d – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla każdego rodzaju fermentacji) oznaczone różnymi małymi literami różnią się w sposób istotny statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Jak dowodzą Ou i in. (2019) oraz Pasukamonset i in. (2018), związki fenolowe mogą wchodzić w interakcje z białkami i węglowodanami. Pomiędzy cząsteczkami tych związków dochodzi do niekowalencyjnych oddziaływań hydrofobowych, które następnie stabilizowane są przez wiązania wodorowe. Zachodzące reakcje kompleksowania powodują zmiany strukturalne i konfirmacyjne składników chemicznych, co może przekładać się na teksturę wypieków (Jakobek i in., 2015; Pasukamonset i in., 2018).

Masmoudi i in. (2020) stwierdzili znacząco niższą wysokość muffinów żołędziowych w porównaniu z muffinami pszennymi, na podstawie czego można wnioskować również o mniejszej objętości próbek z mąką żołędziową. Taka tendencja nie została potwierdzona w niniejszej pracy. Cytowani autorzy scharakteryzowali również muffiny żołędziowe jako mniej spoiste i elastyczne w porównaniu do muffinów pszennych. Kim i in. (2012) stwierdzili natomiast, że muffiny pszenne z galaretką żołędziową w proszku oraz sproszkowanym ekstraktem żołędziowym cechowały się wyższą twardością, ale niższą spoistością, gumowatością i żujnością w porównaniu do próbek kontrolnych.

### 6.5.2. Jakość sensoryczna muffinów

Dodatek mąki żołędziowej do muffinów pszennych miał wpływ na akceptację wypieków przez konsumentów, wyrażoną w ocenie sensorycznej (**tabela 25**). Ogólna akceptacja wyrobów ciastkarskich, niezależnie od udziału mąki żołędziowej w próbce oraz metody jej fermentacji, była niższa niż w przypadku próbki kontrolnej. Wyniki dla muffinów pszennych (bez mąki żołędziowej) odpowiadały ocenie „bardzo lubię" (4,87) i zmniejszały się wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej, osiągając ocenę odpowiadającą „ani lubię, ani nie lubię" (minimalna uzyskana średnia ocena to 3,14 dla próbki z 70% udziałem mąki żołędziowej fermentowanej z drożdżami przez 48 h).

Na ogólną akceptację muffinów z mąką żołędziową wpływały przede wszystkim smak i zapach ciastek, dla których oceny osiągnęły najniższe wartości (**tabela 25**). Ocena zapachu próbek z 70% udziałem mąki żołędziowej była niższa od próbki pszennej średnio o 28,2%, odpowiadając ocenie pomiędzy „ani lubię, ani nie lubię" a „lubię umiarkowanie". Obniżenie ocen smaku było większe niż w przypadku zapachu, maksymalnie do 40,6%, odpowiadając ocenie „ani lubię, ani nie lubię" (2,93). Warto zauważyć, że próbki z 30% i 50% udziałem mąki żołędziowej nie różniły się istotnie statystycznie ($p > 0,05$) pod względem oceny smaku i zapachu. Dodatek mąki żołędziowej nie wpłynął istotnie statystycznie ($p > 0,05$) również

na ocenę barwy i tekstury muffinów, niezależnie od udziału mąki żołędziowej (z wyjątkiem próbki z 70% udziałem mąki żołędziowej niefermentowanej).

**Tabela 25.** Charakterystyka sensoryczna muffinów pszennych bez oraz z mąką żołędziową.

| Próba | Barwa | Zapach | Smak | Tekstura | Ogólna akceptacja |
|---|---|---|---|---|---|
| Muffiny kontrolne – bez i z dodatkiem mąki żołędziowej niefermentowanej | | | | | |
| WM-C | 4,93 ± 0,26$^{a}$ | 4,87 ± 0,35$^{a}$ | 4,93 ± 0,26$^{a}$ | 4,80 ± 0,41$^{a}$ | 4,87 ± 0,35$^{a}$ |
| WM-AP-NF-30% | 4,93 ± 0,26$^{a}$ | 4,53 ± 0,74$^{a,b}$ | 4,00 ± 0,76$^{b}$ | 4,87 ± 0,35$^{a}$ | 4,13 ± 0,74$^{b}$ |
| WM-AP-NF-50% | 4,73 ± 0,46$^{a,b}$ | 4,13 ± 0,83$^{b,c}$ | 3,67 ± 0,72$^{b}$ | 4,60 ± 0,63$^{a,b}$ | 3,73 ± 0,70b$^{,c}$ |
| WM-AP-NF-70% | 4,40 ± 0,51$^{b}$ | 3,60 ± 0,74$^{c}$ | 2,93 ± 0,80$^{c}$ | 4,20 ± 0,86$^{b}$ | 3,40 ± 0,51$^{c}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową poddaną fermentacji spontanicznej | | | | | |
| WM-AP-SF-30%-24h | 4,87 ± 0,35$^{a}$ | 4,53 ± 0,52$^{a}$ | 4,40 ± 0,63$^{a}$ | 4,33 ± 0,62$^{a}$ | 4,73 ± 0,46$^{a}$ |
| WM-AP-SF-30%-48h | 4,67 ± 0,49$^{a}$ | 4,20 ± 0,68$^{a,b}$ | 3,93 ± 0,70$^{a,b,c}$ | 4,27 ± 0,46$^{a}$ | 4,13 ± 0,64$^{a,b,c}$ |
| WM-AP-SF-50%-24h | 4,73 ± 0,46$^{a}$ | 4,13 ± 0,74$^{a,b}$ | 4,07 ± 0,70$^{a,b}$ | 4,13 ± 0,64$^{a}$ | 4,40 ± 0,63$^{a,b}$ |
| WM-AP-SF-50%-48h | 4,53 ± 0,52$^{a}$ | 4,07 ± 0,80$^{a,b}$ | 3,67 ± 0,62$^{a,b,c}$ | 4,07 ± 0,59$^{a}$ | 3,73 ± 0,59$^{b,c}$ |
| WM-AP-SF-70%-24h | 4,40 ± 0,51$^{a}$ | 3,73 ± 0,80$^{b}$ | 3,53 ± 0,64$^{b,c}$ | 3,93 ± 0,70$^{a}$ | 4,13 ± 0,83$^{a,b,c}$ |
| WM-AP-SF-70%-48h | 4,40 ± 0,63$^{a}$ | 3,60 ± 0,74$^{b}$ | 3,27 ± 0,88$^{c}$ | 4,00 ± 0,53$^{a}$ | 3,53 ± 0,92$^{c}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową | | | | | |
| WM-AP-CF-30%-24h | 4,87 ± 0,35$^{a}$ | 4,80 ± 0,41$^{a}$ | 4,47 ± 0,64$^{a}$ | 4,40 ± 0,63$^{a,b}$ | 4,67 ± 0,49$^{a}$ |
| WM-AP-CF-30%-48h | 4,60 ± 0,51$^{a,b}$ | 4,47 ± 0,52$^{a,b}$ | 4,40 ± 0,63$^{a}$ | 4,80 ± 0,41$^{a}$ | 4,40 ± 0,51$^{a,b}$ |
| WM-AP-CF-50%-24h | 4,40 ± 0,51$^{a,b}$ | 4,40 ± 0,63$^{a,b}$ | 4,27 ± 0,70$^{a,c}$ | 4,20 ± 0,68$^{a,b}$ | 4,33 ± 0,62$^{a,b}$ |
| WM-AP-CF-50%-48h | 4,33 ± 0,62$^{a,b}$ | 4,00 ± 0,76$^{b,c}$ | 4,07 ± 0,80$^{a,b,c}$ | 4,67 ± 0,49$^{a,b}$ | 3,93 ± 0,70$^{b,c}$ |
| WM-AP-CF-70%-24h | 4,67 ± 0,49$^{b}$ | 3,53 ± 0,64$^{c,d}$ | 3,33 ± 0,62$^{b}$ | 4,13 ± 0,74$^{b}$ | 3,80 ± 0,68$^{b,c}$ |
| WM-AP-CF-70%-48h | 4,07 ± 0,70$^{a,b}$ | 3,13 ± 0,83$^{d}$ | 3,53 ± 0,83$^{b,c}$ | 4,33 ± 0,62$^{a,b}$ | 3,40 ± 0,63$^{c}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami | | | | | |
| WM-AP-YF-30%-24h | 4,87 ± 0,35$^{a}$ | 4,67 ± 0,62$^{a}$ | 4,13 ± 0,74$^{a}$ | 4,53 ± 0,64$^{a}$ | 4,67 ± 0,62$^{a}$ |
| WM-AP-YF-30%-48h | 4,80 ± 0,41$^{a,b}$ | 4,40 ± 0,63$^{a}$ | 4,07 ± 0,70$^{a,b}$ | 4,13 ± 0,74$^{a,b}$ | 4,20 ± 0,68$^{a,b}$ |
| WM-AP-YF-50%-24h | 4,47 ± 0,64$^{a,b,c}$ | 4,33 ± 0,72$^{a}$ | 3,93 ± 0,96$^{a,b}$ | 4,07 ± 0,88$^{a,b}$ | 4,13 ± 0,83$^{a,b}$ |
| WM-AP-YF-50%-48h | 4,13 ± 0,74$^{c}$ | 4,00 ± 0,53$^{a,b}$ | 3,40 ± 0,83$^{a,b,c}$ | 3,80 ± 0,68$^{a,b}$ | 3,73 ± 0,59$^{b,c}$ |
| WM-AP-YF-70%-24h | 4,33 ± 0,72$^{a,b,c}$ | 3,47 ± 0,64$^{b}$ | 3,27 ± 0,70$^{b,c}$ | 3,93 ± 0,70$^{a,b}$ | 3,67 ± 0,72$^{b,c}$ |
| WM-AP-YF-70%-48h | 4,20 ± 0,56$^{b,c}$ | 3,40 ± 063$^{b}$ | 2,93 ± 0,70$^{c}$ | 3,47 ± 0,64$^{b}$ | 3,13 ± 0,74$^{c}$ |

WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana, SF – fermentacja spontaniczna, CF – fermentacja z kulturą starterową, YF – fermentacja z drożdżami; 24 h, 48 h – czas fermentacji; 30-70% – udział mąki żołędziowej w próbie; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 20), a-c – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla każdego rodzaju fermentacji) oznaczone różnymi małymi literami różnią się w sposób istotny statystycznie przy $p \leq 0,05$.

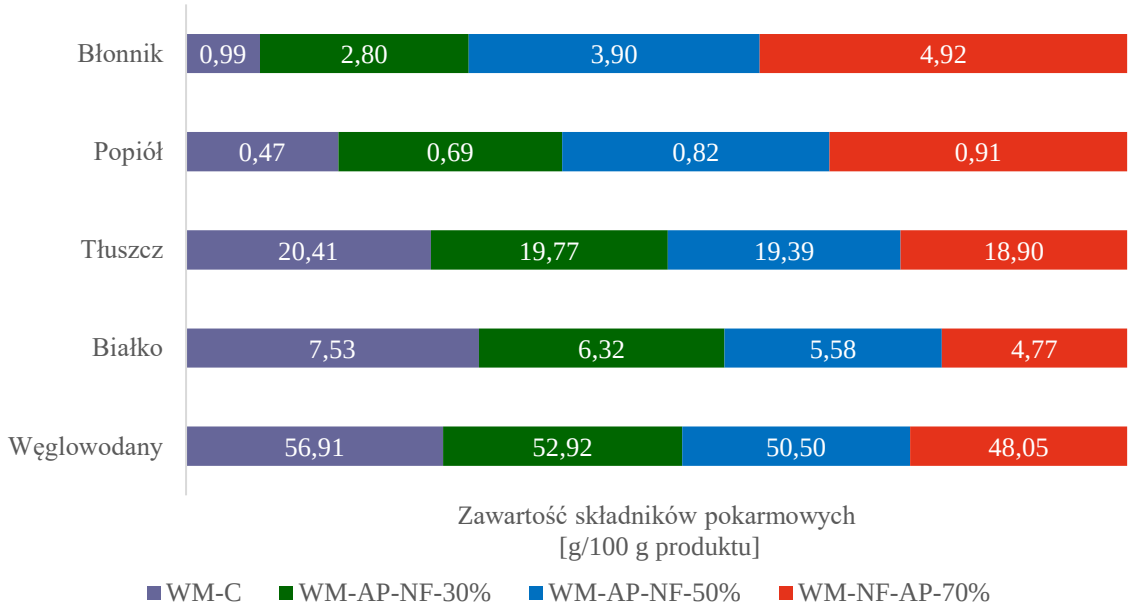
Fermentacja mąki żołędziowej, niezależnie od zastosowanej metody, nie wpływała znacząco na cechy sensoryczne muffinów pszenno-żołędziowych (**tabela 25**). Większe różnice zaobserwowano dla smaku, przy czym próbki z mąką żołędziową fermentowaną oceniono wyżej niż próbki z mąką niefermentowaną. Najwyższe oceny uzyskały muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową (zwiększenie średnio o 10,9%, 13,6% i 17,1% odpowiednio dla próbek z 30%, 50% i 70% udziałem mąki żołędziowej względem próbek

z mąką żołędziową niefermentowaną). Fermentacja mąki żołędziowej wpłynęła również na ocenę tekstury, przy czym próbki z mąką fermentowaną oceniano niżej niż próbki z mąką niefermentowaną, a najniższe oceny uzyskały muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami (zmniejszenie średnio o 11,1%, 14,5% i 11,9% odpowiednio dla próbek z 30%, 50% i 70% udziałem mąki żołędziowej względem próbek z mąką żołędziową niefermentowaną). Czas fermentacji nie wpływał istotnie statystycznie ($p > 0,05$) na ocenę sensoryczną muffinów, niezależnie od ocenianych cech, udziału mąki żołędziowej oraz metody fermentacji.

Przedstawione wyniki pozostają w sprzeczności z rezultatami przedstawionymi przez Hoeche i in. (2014), którzy wykazali negatywny wpływ dodatku mąki żołędziowej na ocenę intensywności i preferencji barwy, tekstury i smaku oraz brak różnic w ocenie zapachu muffinów pszennych z 50% udziałem mąki żołędziowej. Kim i in. (2012) przedstawili natomiast pozytywny wpływ dodatku produktu żołędziowego na wyniki oceny sensorycznej muffinów, przy czym do receptury nie wprowadzano mąki żołędziowej, a ekstrakt i galaretkę w proszku. Z kolei w badaniach Molavi i in. (2015) ciasto biszkoptowo-tłuszczowe z udziałem mąki żołędziowej uzyskało niższe oceny wszystkich ocenianych wyróżników (tekstura, barwa, smak i aromat) oraz niższą ogólną akceptację już przy 5% udziale mąki żołędziowej.

### 6.5.3. Wartość odżywcza muffin

Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą muffinów pszennych przedstawiono na przykładzie muffinów kontrolnych oraz z mąką żołędziową niefermentowaną (**rysunek 20**). Dodatek mąki żołędziowej do muffinów pszennych wpływał na zawartość składników, a w największym stopniu na zwiększenie zawartości błonnika (zmiana o 182,8-397% w zależności od udziału mąki żołędziowej w próbce) oraz popiołu (zmiana o 46,8-93,6% w zależności od udziału mąki żołędziowej w próbce). Zawartość węglowodanów i białka zmniejszała się liniowo wraz z udziałem mąki żołędziowej, maksymalnie o 15,6% i 36,7% odpowiednio dla tłuszczu i białka. Stwierdzone zmniejszenie zawartości tłuszczu nie zależało jednak od zawartości tłuszczu w surowcach, a od zwiększenia dodatku składników płynnych w recepturze, przez co uzyskiwano mniejszą koncentrację składników pokarmowych przy tej samej masie surowców bazowych.




WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana.

**Rysunek 20.** Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą – zawartość podstawowych składników odżywczych w muffinach pszennych.

Rozważenia wymaga wpływ zastosowanych w doświadczeniu metod fermentacji na wartość odżywczą muffinów pszennych. Należy zauważyć, że zastosowane metody fermentacji mąki żołędziowej miały na celu zwiększenie biodostępności fitoskładników występujących w tej mące, a przede wszystkim – uwalnianie związków fenolowych. Rezultaty związane ze zwiększeniem zawartości wolnych kwasów fenolowych przedstawiono w dalszej części pracy.

Doniesienia literaturowe wskazują również na możliwość oddziaływania procesów fermentacyjnych na zawartość innych składników w surowcach. Gobbetti i in. (2019) podają, że fermentacja, w zależności od metody i rodzaju drobnoustrojów, wpływać może na zawartość i proporcje rozpuszczalnej i nierozpuszczalnej frakcji błonnika pokarmowego. Różnice w zawartości błonnika pokarmowego, ale także wpływ zastosowanych metod fermentacji na zawartość popiołu oraz poszczególnych frakcji skrobi, w tym skrobi opornej, odnotowali Demirkesen-Bicak i in. (2021). Skrobia oporna jest istotnym elementem diety m.in. osob cierpiących na cukrzycę, ponieważ zmniejsza odpowiedź glikemiczną organizmu i zwiększa wrażliwość na insulinę, ale także obniża kaloryczność posiłku, a w długofalowym działaniu redukuje przyrosty masy ciała i tkanki tłuszczowej (Krawęcka i in., 2019). Zhang i Tan (2021) wskazują na różnice w profilu aminokwasów pieczywa, które wytwarzano z zastosowaniem fermentacji ze zróżnicowaną proporcją szczepów drobnoustrojów.

### 6.5.4. Zawartość związków fenolowych oraz pojemność przeciwutleniającą muffinów

Mąka żołędziowa cechuje się wysoką zawartością wolnych związków fenolowych ogółem (**tabela 8**), co przekłada się na wysoką zawartość tych związków w produktach wytwarzanych z jej udziałem. Tym samym, otrzymane muffiny pszenne z mąką żołędziową cechowała wysoka zawartość wolnych związków fenolowych ogółem, która była tym wyższa, im wyższy był udział mąki żołędziowej w próbce (**tabela 26**). Dodatek mąki żołędziowej niefermentowanej na poziomie 30%, 50% i 70% do muffinów pszennych spowodował odpowiednio 11-, 19- i 26-krotne zwiększenie zawartości tych związków bioaktywnych. Wpływ fermentacji mąki żołędziowej na zawartość wolnych związków fenolowych ogółem zależny był od sposobu prowadzenia fermentacji. Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami charakteryzowały się wyższą zawartością wyekstrahowanych związków fenolowych niż muffiny z mąką niefermentowaną, fermentowaną spontanicznie i fermentowaną z kulturą starterową. Ponadto stwierdzono, że im dłuższy był proces fermentacji mąki żołędziowej, tym wyższa była zawartość wolnych związków fenolowych w muffinach. Za różnice w zawartości związków fenolowych w produktach wytwarzanych różnymi metodami fermentacji odpowiadać może aktywność enzymów biorących udział uwalnianiu związanych związków fenolowych do ich formy wolnej, zależna od kwasowości (pH) środowiska. Zakwasy fermentowane w obecności kultur starterowych, w których dochodzi do namnażania bakterii fermentacji mlekowej, cechują się generalnie niższą kasowością, co ogranicza aktywność enzymatyczną, m.in. esteraz i glukozydaz, mających wpływ na uwalnianie wolnych związków fenolowych (Konopka i in., 2014). Znaczenie może mieć również zdolność niektórych bakterii fermentacji mlekowej do przekształcania kwasów fenolowych w metabolity o obniżonej aktywności, co może przekładać się na mniejsze stężenie wolnych związków fenolowych ogółem w próbkach, w których aktywność fermentacyjna tych bakterii ma największe znaczenie (Skrajda-Brdak i in., 2019).

Podobne tendencje zmiany zawartości zaobserwowano w przypadku flawonoidów (**tabela 26**). Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej zwiększała się zawartość flawonoidów (ok. 7-, 16-, i 25-krotnie odpowiednio dla próbek z 30%, 50% i 70% udziałem mąki żołędziowej niefermentowanej). Fermentacja mąki pozytywnie wpływała na uwalnianie flawonoidów, których najwyższą zawartość stwierdzono w próbkach z mąką fermentowaną z drożdżami (nawet ok. 2-krotne zwiększenie względem próbek z takim samym udziałem mąki niefermentowanej). Potwierdzono również wpływ czasu fermentacji na zawartość flawonoidów w muffinach, przy czym im dłuższy był proces fermentacji mąki żołędziowej, tym wyższa

była zawartość flawonoidów. Największe różnice i wpływ czasu fermentacji odnotowano w przypadku próbek z mąką fermentowaną spontanicznie.

**Tabela 26.** Zawartość wolnych fenoli ogółem (TFP) i flawonoidów oraz pojemność przeciwutleniająca (AC) muffinów pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej.

| Rodzaj próbki | TFP [mg/100 g s.m.] | Flawonoidy [mg/100 g s.m.] | AC [mM TE/100 g s.m.] |
|---|---|---|---|
| Muffiny kontrolne – bez i z dodatkiem mąki żołędziowej niefermentowanej | | | |
| WM-C | 409,36 ± 0,01$^{a}$ | 14,40 ± 0,00$^{a}$ | 0,56 ± 0,00$^{a}$ |
| WM-AP-NF-30% | 4584,69 ± 0,00$^{b}$ | 94,94 ± 0,10$^{a,b}$ | 12,57 ± 4,83$^{b}$ |
| WM-AP-NF-50% | 7833,43 ± 0,05$^{c}$ | 229,93 ± 0,31$^{b,c}$ | 30,67 ± 9,87$^{c}$ |
| WM-AP-NF-70% | 10659,67 ± 0,03$^{d}$ | 348,82 ± 0,61$^{c}$ | 42,40 ± 1,28$^{d}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną spontanicznie | | | |
| WM-AP-SF-30%-24h | 4034,68 ± 0,03$^{a}$ | 37,51 ± 0,15$^{a}$ | 11,28 ± 6,72$^{a}$ |
| WM-AP-SF-30%-48h | 5412,44 ± 0,02$^{b}$ | 121,64 ± 0,04$^{a,b}$ | 18,48 ± 36,94$^{b}$ |
| WM-AP-SF-50%-24h | 7192,24 ± 0,02$^{c}$ | 185,43 ± 0,10$^{b}$ | 26,17 ± 0,22$^{c}$ |
| WM-AP-SF-50%-48h | 7936,57 ± 0,02$^{d}$ | 332,50 ± 0,34$^{c}$ | 50,95 ± 5,88$^{d}$ |
| WM-AP-SF-70%-24h | 9209,36 ± 0,01$^{e}$ | 336,10 ± 0,13$^{c}$ | 42,61 ± 16,38$^{e}$ |
| WM-AP-SF-70%-48h | 11744,89 ± 0,03$^{f}$ | 417,06 ± 0,43$^{c}$ | 75,79 ± 14,49$^{f}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową | | | |
| WM-AP-CF-30%-24h | 4591,90 ± 0,00$^{a}$ | 59,55 ± 0,24$^{a}$ | 12,96 ± 0,00$^{a}$ |
| WM-AP-CF-30%-48h | 4637,54 ± 0,00$^{a}$ | 127,36 ± 0,23$^{a}$ | 15,49 ± 0,00$^{b}$ |
| WM-AP-CF-50%-24h | 9974,22 ± 0,98$^{b}$ | 317,45 ± 0,02$^{b}$ | 37,06 ± 0,00$^{c}$ |
| WM-AP-CF-50%-48h | 10810,27 ± 0,52$^{c}$ | 425,96 ± 0,74$^{b,c}$ | 46,50 ± 7,56$^{d}$ |
| WM-AP-CF-70%-24h | 9872,9 ± 0,00$^{b}$ | 505,21 ± 0,00$^{c}$ | 55,32 ± 0,00$^{e}$ |
| WM-AP-CF-70%-48h | 10458,87 ± 0,00$^{d}$ | 482,11 ± 0,12$^{c}$ | 57,52 ± 0,00$^{f}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami | | | |
| WM-AP-YF-30%-24h | 10693,44 ± 4,13$^{a}$ | 195,91 ± 0,00$^{a}$ | 16,49 ± 0,00$^{a}$ |
| WM-AP-YF-30%-48h | 11076,78 ± 3,15$^{a,c}$ | 223,57 ± 0,41$^{a}$ | 20,61 ± 0,88$^{a}$ |
| WM-AP-YF-50%-24h | 9616,43 ± 2,12$^{b}$ | 350,76 ± 0,00$^{b}$ | 39,14 ± 32,24$^{b}$ |
| WM-AP-YF-50%-48h | 10470,74 ± 1,39$^{a,b}$ | 390,89 ± 0,00$^{b}$ | 41,36 ± 1,91$^{b}$ |
| WM-AP-YF-70%-24h | 11854,42 ± 0,21$^{c}$ | 621,77 ± 0,40$^{c}$ | 55,08 ± 0,00$^{c}$ |
| WM-AP-YF-70%-48h | 12321,73 ± 0,62$^{d}$ | 680,89 ± 0,27$^{c}$ | 56,61 ± 4,98$^{c}$ |

WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana, SF – fermentacja spontaniczna, CF – fermentacja z kulturą starterową, YF – fermentacja z drożdżami, TFP – wolne związki fenolowe ogółem, AC – pojemność przeciwutleniająca, mM TE – milimole Troloxu; 24, 48h – czas fermentacji; 30, 50, 70% - udział mąki żołędziowej w próbie; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3), a-c – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla każdego rodzaju fermentacji) oznaczone różnymi małymi literami różnią się w sposób istotny statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Dodatek mąki żołędziowej do muffinów pszennych zwiększał pojemność przeciwutleniającą (**tabela 26**), co było prawdopodobnie wynikiem wysokiej zawartości związków fenolowych. Pojemność przeciwutleniająca muffinów z mąką żołędziową zależna była od udziału tej mąki oraz metody i czasu fermentacji. Pojemność przeciwutleniająca zwiększała się wraz z udziałem mąki żołędziowej ok. 22-, 55- i 76-krotnie odpowiednio

dla 30%, 50% i 70% udziału mąki żołędziowej niefermentowanej. Najwyższą pojemnością przeciwutleniającą cechowały się próbki z mąką żołędziową fermentowaną spontanicznie przez 48 h. Czas fermentacji mąki żołędziowej wpływał na pojemność przeciwutleniającą próbek z jej udziałem, a im był dłuższy, tym wyższa była pojemność przeciwutleniająca.

Tendencje zaobserwowane dla muffinów pszennych z mąką żołędziową fermentowaną różnymi metodami były zbieżne z wynikami zawartości związków fenolowych ogółem oraz pojemności przeciwutleniającej otrzymanymi w eksperymencie z wypiekiem chleba pszennego z dodatkiem mąki żołędziowej otrzymanego z ciasta prowadzonego różnymi metodami (**tabela 22**).

W badaniach Amina i Djamel (2018), mąka żołędziowa wytwarzana z żołędzi poddanych fermentacji cechowała się niższą zawartością wolnych związków fenolowych niż mąka z żołędzi niefermentowanych, co różni się od rezultatów przedstawionych w niniejszej pracy. Należy jednak stwierdzić, że fermentacja w przytoczonych badaniach oraz w badaniach własnych prowadzone były na różnych etapach otrzymywania produktów. Amina i Djamel (2018) fermentowali rozdrobnione żołędzie, które później poddano dalszym zabiegom technologicznym (suszenie), a w niniejszej pracy fermentowano mąkę żołędziową połączoną z wodą (w proporcji 2:3), którą wykorzystywano bezpośrednio po fermentacji w wypieku muffinów. Może to wskazywać na niekorzystny wpływ procesów termicznych (suszenia) na uwolnione w procesie fermentacji związki fenolowe. Dostępne badania nad wykorzystaniem mąki żołędziowej w wypieku ciast i muffinów (Hoeche i in., 2014; Kim i in., 2012; Masmoudi i in., 2020; Molavi i in., 2015) nie zawierają informacji na temat zawartości związków fenolowych i właściwości antyoksydacyjnych otrzymanych wyrobów. W dostępnych badaniach potwierdzono, że dodatek mąki żołędziowej wpływał pozytywnie na zawartość związków fenolowych ogółem, zawartość flawonoidów oraz pojemność przeciwutleniającą chleba (Beltrão Martins i in., 2020; Purabdolah i in., 2020; Skendi i in., 2018) oraz ciastek kruchych (Korus i in., 2017; Parsaei i in., 2018; Pasqualone i in., 2019; Torabi i in., 2020).

Profil i zawartość wolnych kwasów fenolowych w muffinach zmieniał się w zależności od udziału mąki żołędziowej oraz metody i czasu fermentacji (**tabela 27**). Profil fenolowy muffinów z dodatkiem mąki żołędziowej był bogatszy w kwasy fenolowe. Dominującymi kwasmi fenolowymi, charakterystycznymi dla próbek pszenno-żołędziowych były kwasy elagowy i galusowy, których zawartość wahała się odpowiednio od 172,60 do 483,91 mg/100 g s.m. i od 60,25 do 204,26 mg/100 g s.m. i zwiększała się wraz z udziałem mąki żołędziowej oraz czasem fermentacji. Największy wpływ na uwalnianie kwasu

elagowego miała fermentacja mąki z kulturą starterową (maksymalne zwiększenie o 30,4%). W przypadku kwasu galusowego największe zawartości odnotowano dla próbek z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami (maksymalne zwiększenie o 31,7%). Niezależnie od metody fermentacji, dłuższy czas jej prowadzenia powodował zwiększenie zawartości kwasów elagowego i galusowego.

Żołędzie, stanowiące surowiec do produkcji mąki żołędziowej, charakteryzują się wysoką zawartością elagotanin (Kiss i Piwowarski, 2016; Molina-García i in., 2018). Na drodze procesów przetwórczych (prażenie, suszenie) ich zawartość zmniejsza się ze względu na zachodzące procesy termicznego rozkładu, prowadzące do powstania m.in. kwasu elagowego i kwasu galusowego (Oracz i in., 2022), co przekłada się na ich wysoką zawartość w mące. Rozkład elagotanin na etapie wytwarzania mąki nie jest jednak całkowity, dlatego też zastosowanie dalszych procesów przetwórczych, w tym m.in. fermentacji, może wpływać na uwalnianie kwasu elagowego i galusowego (Aguilera-Carbo i in., 2008; Leonard i in., 2021), co potwierdza wyniki uzyskane w niniejszej pracy, wskazujące na zwiększone zawartości tych kwasów w muffinach z mąką fermentowaną.

Dodatek mąki żołędziowej do muffinów pszennych wpływał również na zawartość kwasu syringowego, kwasu rozmarynowego i mircytyny, niezidentyfikowanych w próbce pszennej. Zawartość wymienionych związków fenolowych była tym większa, im wyższy był udział mąki żołędziowej.

Wpływ fermentacji mąki żołędziowej na zawartość kwasu syringowego zależny był od metody i czasu fermentacji. Fermentacja spontaniczna prowadziła do zmniejszenia zawartości tego kwasu, a redukcja była tym większa, im dłuższy był czas fermentacji (straty od 5,6% do 47,2% dla próbek z mąką fermentowaną 24 h i od 27,2% do 82,8% dla próbek z mąką fermentowaną 48 h w zależności od udziału mąki żołędziowej, w porównaniu do próbek z mąką niefermentowaną). Fermentacja mąki z kulturą starterową i z drożdżami przez 24 h wpływała na zwiększenie zawartości kwasu syringowego, jednak dalsze prowadzenie procesu wpływało na znaczące, nawet 3-krotne zmniejszenie jego zawartości. Największy wpływ na zmniejszenie zawartości kwasu syringowego miała 48-godzinna fermentacja spontaniczna. Jak podają Leonard i in. (2021), kwas syringowy może być przekształcany do syringolu i/lub aldehydu syringowego, m.in. na skutek działania bakterii kwasu mlekowego (*Lactobacillus plantarum*). W prowadzonych badaniach w próbkach fermentowanych spontanicznie mogło dojść do rozwoju bakterii fermentacji mlekowej z uwagi na występowanie autochtonicznej mikroflory surowca.

**Tabela 27.** Zawartość wolnych kwasów fenolowych w muffinach pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej.

| Rodzaj próbki | Wolne kwasy fenolowe [mg/100 g s.m.] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kwas chlorogenowy | kwas p-kumarowy | kwas syringowy | kwas elagowy | kwas ferulowy | kwas galusowy | kwas rozmarynowy | naringenina | mircytyna |
| Muffiny kontrolne – bez i z dodatkiem mąki żołędziowej niefermentowanej | | | | | | | | | |
| W-C | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,29 ± 0,29$^{a}$ | 3,35 ± 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| WM-AP-NF-30% | 0,00 | 0,00 | 0,85 ± 0,62$^{a}$ | 198,40 ± 1,81$^{b}$ | 0,00 | 72,25 ± 6,75$^{a}$ | 5,04 ± 0,06 | 4,01 ± 0,01$^{a}$ | 4,00 ± 0,19$^{a}$ |
| WM-AP-NF-50% | 0,00 | 0,00 | 2,19 ± 1,33$^{b}$ | 280,25 ± 293,38$^{c}$ | 0,00 | 111,26 ± 28,87$^{b}$ | 5,62 ± 0,20 | 4,02 ± 0,04$^{a,b}$ | 4,50 ± 1,18$^{b}$ |
| WM-AP-NF-70% | 0,00 | 0,00 | 2,77 ± 0,01$^{c}$ | 374,82 ± 28,22$^{d}$ | 0,00 | 160,42 ± 14,37$^{c}$ | 6,70 ± 0,39 | 4,02 ± 0,01$^{b}$ | 5,14 ± 0,73$^{c}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną spontanicznie | | | | | | | | | |
| WM-AP-SF-30%-24h | 0,00 | 0,00 | 50,52 ± 0,20$^{a}$ | 172,60 ± 32,71$^{a}$ | 4,09 ± 0,04$^{a}$ | 60,25 ± 41,74$^{a}$ | 4,94 ± 0,01$^{a}$ | 4,01 ± 0,00$^{a}$ | 3,90 ± 0,24$^{a}$ |
| WM-AP-SF-30%-48h | 0,00 | 2,28 ± 0,01$^{a}$ | 0,15 ± 0,01$^{b}$ | 248,36 ± 87,74$^{b}$ | 4,11 ± 0,03$^{b}$ | 87,72 ± 47,48$^{b}$ | 0,00 | 4,01 ± 0,00$^{b}$ | 3,69 ± 0,03$^{b}$ |
| WM-AP-SF-50%-24h | 0,00 | 2,29 ± 0,01$^{b}$ | 1,16 ± 0,14$^{c}$ | 314,21 ± 0,00$^{c}$ | 0,00 | 99,32 ± 41,00$^{b,c}$ | 5,08 ± 0,02$^{b}$ | 0,00 | 4,26 ± 0,00$^{c}$ |
| WM-AP-SF-50%-48h | 0,00 | 2,28 ± 0,00$^{a}$ | 0,64 ± 0,22$^{a}$ | 375,83 ± 0,00$^{d}$ | 4,11 ± 0,00$^{b}$ | 112,44 ± 0,00$^{c}$ | 0,00 | 4,01 ± 0,01$^{a}$ | 3,88 ± 0,18$^{a}$ |
| WM-AP-SF-70%-24h | 0,00 | 0,00 | 2,61 ± 0,91$^{d}$ | 346,57 ± 60,48$^{c,d}$ | 4,09 ± 0,03$^{a}$ | 133,51 ± 17,40$^{d}$ | 5,27 ± 0,04$^{c}$ | 4,02 ± 0,01$^{c}$ | 4,72 ± 0,06$^{d}$ |
| WM-AP-SF-70%-48h | 0,00 | 2,31 ± 0,01$^{c}$ | 2,02 ± 1,07$^{e}$ | 381,49 ± 315,70$^{d}$ | 4,12 ± 0,04$^{b}$ | 203,45 ± 58,78$^{e}$ | 0,00 | 4,02 ± 0,00$^{c}$ | 3,89 ± 0,11$^{a}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową | | | | | | | | | |
| WM-AP-CF-30%-24h | 0,00 | 0,00 | 1,00 ± 0,50$^{a,b}$ | 215,02 ± 78,60$^{a}$ | 4,08 ± 0,02$^{a}$ | 84,42 ± 0,54$^{a}$ | 5,30 ± 0,05$^{a}$ | 4,01 ± 0,00$^{a}$ | 4,09 ± 0,03$^{a}$ |
| WM-AP-CF-30%-48h | 0,00 | 0,00 | 0,29 ± 0,07$^{a}$ | 249,85 ± 66,89$^{b}$ | 4,10 ± 0,01$^{b}$ | 82,12 ± 3,29$^{a}$ | 0,00 | 4,01 ± 0,00$^{b}$ | 3,71 ± 0,02$^{a}$ |
| WM-AP-CF-50%-24h | 1,05 ± 0,00$^{a}$ | 2,27 ± 0,01$^{a}$ | 2,36 ± 1,67$^{c,d}$ | 333,65 ± 334,38$^{b,c}$ | 4,06 ± 0,01$^{c}$ | 117,87 ± 10,21$^{b}$ | 5,82 ± 0,11$^{b}$ | 0,00 | 4,53 ± 0,18$^{b}$ |
| WM-AP-CF-50%-48h | 0,00 | 2,27 ± 0,01$^{b}$ | 1,15 ± 0,51$^{b,c}$ | 365,52 ± 408,13$^{c}$ | 4,08 ± 0,02$^{d}$ | 128,66 ± 20,30$^{c}$ | 0,00 | 4,01 ± 0,01$^{a}$ | 3,83 ± 0,01$^{a}$ |
| WM-AP-CF-70%-24h | 1,50 ± 0,09$^{b}$ | 2,27 ± 0,01$^{b}$ | 4,09 ± 0,00$^{e}$ | 372,00 ± 0,00$^{c}$ | 0,00 | 161,84 ± 0,00$^{d}$ | 7,01 ± 1,43$^{c}$ | 4,02 ± 0,01$^{c}$ | 5,54 ± 2,49$^{c}$ |
| WM-AP-CF-70%-48h | 0,00 | 2,27 ± 0,00$^{b}$ | 1,91 ± 4,48$^{c,d}$ | 483,91 ± 0,00$^{d}$ | 4,07 ± 0,02$^{c}$ | 174,88 ± 22,38$^{e}$ | 0,00 | 4,02 ± 0,00$^{c}$ | 3,92 ± 0,36$^{a}$ |
| Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami | | | | | | | | | |
| WM-AP-YF-30%-24h | 0,00 | 0,00 | 1,01 ± 0,18$^{a}$ | 210,46 ± 214,63$^{a}$ | 0,00 | 80,05 ± 7,75$^{a}$ | 5,29 ± 0,13$^{a}$ | 4,01 ± 0,00$^{a,b}$ | 4,05 ± 0,04$^{a}$ |
| WM-AP-YF-30%-48h | 0,00 | 2,29 ± 0,02$^{a}$ | 0,50 ± 0,27a | 242,77 ± 120,71$^{a}$ | 44,13 ± 0,01$^{a}$ | 90,08 ± 20,46$^{a}$ | 0,00 | 4,01 ± 0,00$^{a}$ | 3,67 ± 0,01$^{b}$ |
| WM-AP-YF-50%-24h | 0,71 ± 0,00$^{a}$ | 0,00 | 2,14 ± 0,00$^{b}$ | 288,29 ± 0,00$^{b}$ | 0,00 | 137,91 ± 133,03$^{b}$ | 6,09 ± 0,65$^{b}$ | 4,01 ± 0,01$^{b}$ | 4,66 ± 0,59$^{c}$ |
| WM-AP-YF-50%-48h | 0,00 | 0,00 | 1,59 ± 0,90$^{c}$ | 319,05 ± 0,00$^{b,c}$ | 4,08 ± 0,12$^{b}$ | 146,56 ± 26,32$^{b,c}$ | 0,00 | 0,00 | 3,83 ± 0,03$^{d}$ |
| WM-AP-YF-70%-24h | 1,54 ± 0,02$^{b}$ | 0,00 | 3,84 ± 2,77$^{d}$ | 351,79 ± 0,00$^{c}$ | 0,00 | 170,94 ± 131,91$^{c}$ | 6,73 ± 0,16$^{c}$ | 4,03 ± 0,01$^{c}$ | 5,46 ± 0,56$^{e}$ |
| WM-AP-YF-70%-48h | 0,00 | 2,30 ± 0,01$^{b}$ | 2,74 ± 1,77$^{e}$ | 464,02 ± 0,00$^{d}$ | 4,10 ± 0,02$^{c}$ | 204,26 ± 42,39$^{d}$ | 0,00 | 4,02 ± 0,01$^{d}$ | 4,08 ± 0,24$^{a}$ |

WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana, SF – fermentacja spontaniczna, CF – fermentacja z kulturą starterową, YF – fermentacja z drożdżami; 24 h, 48 h – czas fermentacji; 30-70% – udział mąki żołędziowej w próbie; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 3), a-e – wartości średnie w kolumnach (oddzielnie dla każdego rodzaju fermentacji) oznaczone różnymi małymi literami różnią się w sposób istotny statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Zawartość kwasu rozmarynowego zmieniała się w sposób podobny do zawartości kwasu syrigowego. Fermentacja mąki przez 24 h z kulturą oraz z drożdżami powodowała nieznaczne zwiększenie zawartości kwasu rozmarynowego, a 24-godzinna fermentacja spontaniczna wpływała na zmniejszenie zawartości tego kwasu. Niezależnie od metody fermentacji, w próbkach fermentowanych przez 48 h nie zidentyfikowano kwasu rozmarynowego. Hitl i in. (2023) wykazali, że kwas rozmarynowy może podlegać degradacji na skutek działania szczepów bakterii o charakterze probiotycznym, wśród których największy wpływ na straty tego kwasy miały bakterie *Lactobacillus helveticus*. Negatywny wpływ bakterii kwasu mlekowego na zawartość kwasu rozmarynowego wykazali również Hunaefi i in. (2013). Badania innych badaczy wskazują na możliwość syntezy kwasu rozmarynowego przez drożdże *Saccharomyces cerevisiae* (Babaei i in., 2020; Zhou i in., 2022). Jednakże w niniejszej pracy stwierdzono, że 48-godzinna fermentacja mąki żołędziowej z drożdżami doprowadziła do całkowitej redukcji tego kwasu.

### 6.5.5. Analiza statystyczna siły wpływu fermentacji mąki żołędziowej oraz jej dodatku na cechy muffinów

Dwuczynnikowa ANOVA potwierdziła statystycznie istotny wpływ fermentacji mąki żołędziowej i jej dodatku na jakość ciastek biszkoptowo-tłuszczowych (**tabela 28**). Objętość muffinów istotnie zależała od fermentacji (wspólny wpływ metody i czasu) mąki żołędziowej oraz od dodatku tej mąki po fermentacji (odpowiednio 21,6% i 5,7% wyjaśnienia wariancji). Jednak stwierdzono, że inne czynniki wywierały większy wpływ na tę cechę, co może tłumaczyć opisany wcześniej wpływ dodatku do ciasta proszku do pieczenia. W przypadku elastyczności miękiszu muffinów, analiza statystyczna wskazała na istotny wpływ wszystkich trzech analizowanych czynników i ich interakcji (5,1-28,1% wyjaśnienia wariancji).

Wykazano, że czas fermentacji mąki żołędziowej był głównym czynnikiem determinującym parametry barwy skórki muffinów (> 72% wyjaśnienia wariancji), podczas gdy wszystkie czynniki oddzielnie, jak i warunki fermentacji oraz ich interakcja z dodatkiem mąki fermentowanej wpływały na barwę miękiszu (maksymalnie 36,3% wyjaśnienia wariancji w przypadku wpływu dodatku mąki fermentowanej na parametr a*). Z kolei ocena cech sensorycznych muffinów była w większym stopniu determinowana tylko przez dodatek mąki fermentowanej (do 29,1% wyjaśnienia wariancji). Ponadto, podobnie jak w przypadku chlebów z dodatkiem mąki żołędziowej, również inne, nie analizowane w pracy czynniki wpływały

na decyzje oceniających. Zawartość wolnych związków fenolowych w mufinach zależała głównie od metody i czasu fermentacji jak również interakcji tych czynników (21,7-42,8% wyjaśnienia wariancji).

**Tabela 28.** Wpływ metody i czasu fermentacji mąki żołędziowej oraz dodatku fermentowanej mąki żołędziowej na analizowane cechy muffinów.

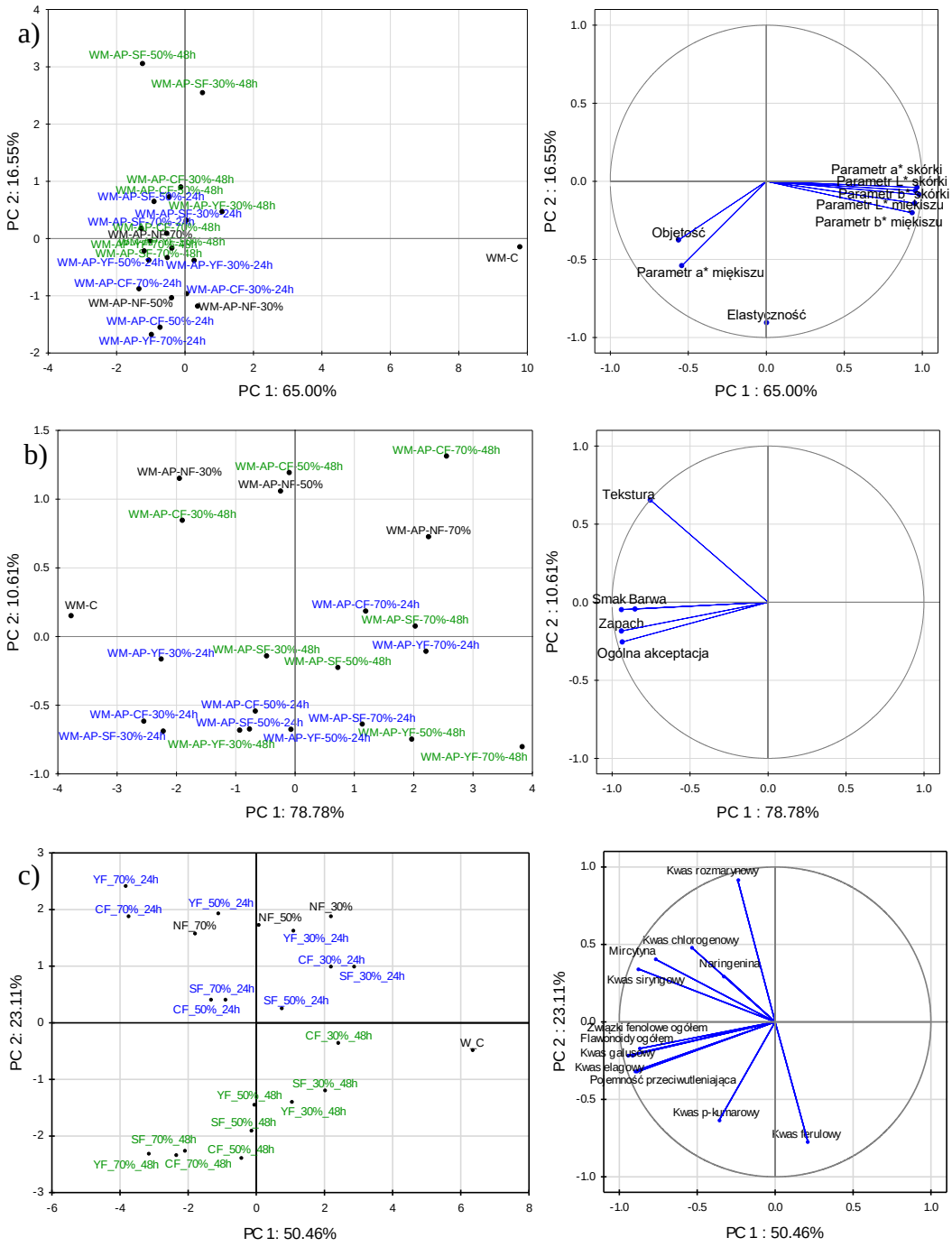
| Analizowane właściwości | M | T | D | M x T | M x D | T x D | M x T x D | Inne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cechy fizyczne | | | | | | | | |
| Objętość | 0,1 | 6,7 | 5,7 | 21,6 | 7,2 | 3,9 | 5,7 | 49,0 |
| Elastyczność | 28,1 | 18,5 | 11,6 | 8,7 | 8,5 | 5,1 | 11,3 | 8,1 |
| Skórka – L* | 2,7 | 82,6 | 0,0 | 0,6 | 1,7 | 1,6 | 1,9 | 8,8 |
| Skórka – a* | 9,5 | 72,4 | 1,3 | 3,1 | 3,6 | 1,2 | 3,3 | 5,5 |
| Skórka – b* | 6,1 | 74,8 | 0,0 | 3,2 | 3,2 | 1,5 | 4,1 | 7,1 |
| Miękisz – L* | 16,9 | 2,6 | 24,7 | 15,8 | 0,8 | 0,2 | 12,0 | 26,9 |
| Miękisz – a* | 20,8 | 8,4 | 36,3 | 14,8 | 0,4 | 0,3 | 11,0 | 8,0 |
| Miękisz – b* | 14,8 | 15,2 | 9,6 | 23,7 | 1,8 | 1,0 | 19,6 | 14,3 |
| Cechy sensoryczne | | | | | | | | |
| Barwa | 1,0 | 10,3 | 3,2 | 1,5 | 0,4 | 0,1 | 1,7 | 81,8 |
| Zapach | 0,0 | 29,1 | 2,7 | 1,8 | 0,3 | 0,1 | 0,3 | 65,8 |
| Smak | 3,6 | 20,8 | 2,0 | 0,5 | 0,9 | 0,4 | 0,5 | 71,4 |
| Tekstura | 6,8 | 6,9 | 0,0 | 0,7 | 4,7 | 0,1 | 0,3 | 80,4 |
| Ogólna ocena | 1,2 | 19,8 | 9,4 | 1,0 | 0,5 | 0,0 | 0,1 | 68,0 |
| Zawartość wolnych związków fenolowych ogółem | 30,8 | 42,8 | 2,7 | 21,7 | 0,8 | 0,2 | 0,6 | 0,2 |
| Zawartość wolnych flawonoidy | 15,3 | 74,4 | 3,3 | 4,1 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 1,2 |
| Zawartość kwasów fenolowych | | | | | | | | |
| Kwas chlorogenowy | 13,1 | 15,7 | 25,8 | 8,3 | 13,1 | 15,7 | 8,3 | 0,1 |
| Kwas p-kumarowy | 9,9 | 10,0 | 20,2 | 34,7 | 10,1 | 10,1 | 5,1 | 0,0 |
| Kwas syringowy | 8,9 | 69,0 | 14,5 | 1,1 | 2,7 | 2,0 | 1,0 | 0,8 |
| Kwas elagowy | 2,4 | 76,3 | 12,3 | 3,4 | 0,0 | 1,4 | 2,3 | 1,8 |
| Kwas ferulowy | 12,2 | 3,2 | 38,9 | 15,3 | 12,2 | 3,0 | 15,3 | 0,0 |
| Kwas rozmarynowy | 0,0 | 40,1 | 2,2 | 0,0 | 17,8 | 4,4 | 35,5 | 0,0 |
| Kwas galusowy | 0,6 | 0,7 | 97,1 | 0,2 | 0,6 | 0,7 | 0,2 | 0,0 |
| Naringenina | 4,6 | 81,9 | 5,8 | 1,4 | 2,1 | 2,3 | 1,2 | 0,7 |
| Mirycetyna | 3,7 | 31,1 | 45,6 | 1,9 | 3,1 | 12,8 | 1,1 | 0,7 |
| Pojemność przeciwutleniająca | 0,0 | 83,7 | 6,9 | 0,7 | 5,3 | 0,9 | 2,2 | 0,2 |

MF – metoda fermentacji mąki żołędziowej; TF – czas fermentacji mąki żołędziowej; DA – dodatek mąki żołędziowej; dane przedstawiono jako % wyjaśnienia wariancji, analiza trzyczynnikowa z testem Wilksa, $p \leq 0,05$; efekt istotny statystycznie oznaczono kolorem czerwonym.

Czas fermentacji mąki żołędziowej najsilniej wpływał na zawartość wolnych flawonoidów, kwasów elagowego i syringowego, naringeniny oraz pojemność

przeciwutleniającą (69,0-81,9% wyjaśnienia wariancji), natomiast dodatek mąki żołędziowej fermentowanej silnie wpływała na zawartość kwasu galusowego i mirycetyny (odpowiednio 97,1% i 45,6% wyjaśnienia wariancji). Zawartość kwasu rozmarynowego była determinowana w porównywalnym stopniu przez czas fermentacji mąki żołędziowej i interakcję wszystkich trzech czynników (35,5-40,1% wyjaśnienia wariancji), natomiast pozostałe kwasy fenolowe były zależne od wszystkich czynników i ich interakcji.

Analizę głównych składowych (PCA) przeprowadzono w celu wizualizacji zróżnicowania próbek muffinów pod względem cech fizycznych, cech sensorycznych, a także zawartości i profilu związków fenolowych oraz pojemności przeciwutleniającej (**rysunek 21**). W przypadku analizy zróżnicowania próbek pod względem cech fizycznych (**rysunek 21a**) na płaszczyźnie dwóch pierwszych składowych (PC1 i PC2, opisujące odpowiednio 65,00% i 16,55% całkowitej zmienności) nie stwierdzono wyraźnego podziału badanych wariantów ciastek w zależności od dodatku i warunków obróbki mąki żołędziowej. Można zaobserwować tylko odróżnianie się próbek z 30% i 50% dodatkiem mąki żołędziowej fermentowanej spontanicznie przez 48 h. Próbki te cechowały się znacznie ciemniejszą i mniej nasyconą żółtością i czerwonością barwą miękiszu oraz większą elastycznością w porównaniu do innych próbek z mąką żołędziową fermentowaną. Z kolei pod względem ocen cech sensorycznych, widoczne jest na płaszczyźnie zdefiniowanej przez PC1 i PC2 (łącznie stanowiły 89,39% całkowitej zmienności) duże rozproszenie próbek muffinów. Jedynie próbka kontrolna, które cechy sensoryczne zostały ocenione najwyżej (stwierdzono pozytywne korelacje) była oddalona od innych próbek (**rysunek 21b**). Pierwsze dwie składowe główne (PC1 i PC2), które wzięto pod uwagę w przypadku charakterystyki próbek pod względem zawartości i profilu związków fenolowych oraz pojemności przeciwutleniającej, stanowiły 73,57% całkowitej zmienności. Na **rysunku 21c** można zauważyć znaczne rozproszenie próbek muffinów, ale można wskazać pewne tendencje uporządkowania w dwuwymiarowej przestrzeni wybranych składowych głównych (PC1 i PC2). Generalnie badane próbki muffinów odróżniały się czasem fermentacji mąki żołędziowej oraz udziałem tej mąki w ciastkach, grupując się w różnych ćwiartkach wykresu. Wykres ładunków czynnikowych wskazuje, że próbkę kontrolną wyróżniała zawartość kwasu ferulowego, z kolei próbki muffinów z mąką żołędziową fermentowaną przez dłuższy czas, niezależnie od rodzaju ferementacji, wyróżniały się głównie wyższą zawartością kwasu galusowego, elagowego, wolnych związków fenolowych (ogółem i flawonoidów) oraz wyższą pojemnością przeciwutleniającą. Z kolei metoda fermentacji mąki żołędziowej nie wpłynęła na grupowanie próbek pod względem profilu wolnych związków fenolowych.




WM – muffiny pszenne, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, NF – mąka niefermentowana, SF – fermentacja spontaniczna, CF – fermentacja z kulturą starterową, YF – fermentacja z drożdżami; 24 h, 48 h – czas fermentacji; 30-70% – udział mąki żołędziowej w próbie

**Rysunek 21.** Wyniki analizy PCA z uwzględnieniem dwóch pierwszych głównych składowych (po lewej – wykres rozrzutu próbek oraz po prawej – wykres ładunków czynnikowych): cech fizycznych (a); cech sensorycznych (b); oraz charakterystyki substancji bioaktywnych (c) próbek muffinów (kolorem zaznaczono próbki z mąką żołędziową fermentowaną przez 24 h (kolor niebieski) oraz 48 h (kolor zielony)).

**Podsumowanie**

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie fermentacji mąki żołędziowej przed jej wprowadzeniem do ciasta może mieć pozytywny wpływ na jakość uzyskanych produktów oraz biodostępność związków fenolowych. Muffiny z mąką żołędziową fermentowaną cechowały się wyższą zawartością tych związków, przede wszystkim kwasów elagowego i galusowego, co potwierdza wpływ fermentacji na rozkład związków garbnikowych, występujących w mące żołędziowej. Wartym rozważenia jest prowadzenie badań, w których zostanie określony wpływ i skuteczność działania wybranych szczepów bakterii fermentacji mlekowej oraz drożdży na biodostępność fitoskładników występujących w żołędziach.

## 6.6. Wpływ dodatku i pochodzenia mąki żołędziowej na jakość ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych oraz profil związków lotnych

Ze względu na fakt, że mąka żołędziowa jest surowcem bezglutenowym, podjęto próbę jej wprowadzenia do ciastek kruchych, których struktura nie wymaga zapewnienia odpowiedniej elastyczności. Przeprowadzony eksperyment obejmował wypiek ciastek pszennych i bezglutenowych, z dodatkiem mąki żołędziowej na poziomie 30%, 50% i 70%. W badaniach, oprócz analizy wpływu pochodzenia i wielkości dodatku mąki żołędziowej na cechy fizyczne i sensoryczne oraz wartość odżywczą, dokonano dodatkowo oceny zmian w profilu związków lotnych, co również może mieć znaczenie w akceptowalności nowych wyrobów ciastkarskich.

### 6.6.1. Cechy fizyczne ciastek kruchych

Mąka żołędziowa, ze względu na swoją naturalnie ciemną barwę, miała istotny wpływ na barwę ciastek kruchych wyprodukowanych z jej udziałem (**tabela 29**). Niezależnie od rodzaju mąki zbożowej i pochodzenia mąki żołędziowej im większy był udział mąki żołędziowej, tym mniejsze były wartości parametru L*, przejawiające się coraz ciemniejszą barwą ciastek (**rysunek 22**). Mąka żołędziowa polska miała większy wpływ na obniżenie wartości parametru L* (zmniejszenie wartości o 34,83-55,35% dla próbek pszennych i o 25,41-38,25% dla próbek bezglutenowych) niż mąka żołędziowa grecka (obniżenie wartości o 33,61-43,31%) dla próbek pszennych i o 17,79-27,39% dla próbek bezglutenowych).

**Tabela 29.** Właściwości fizyczne (barwa i tekstura: twardość i kruchość) ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych bez oraz z mąką żołędziową.

| | WC-C | WC-AP-30% | WC-AP-50% | WC-AP-70% | WC-AG-30% | WC-AG-50% | WC-AG-70% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Próbki pszenne (WC) | | | | | | | |
| Barwa L* [%] | 65,55 ± 1,70$^{a}$ | 42,72 ± 0,23$^{b}$ | 33,20 ± 1,50$^{c}$ | 29,27 ± 0,65$^{d}$ | 43,52 ± 2,51$^{b}$ | 38,93 ± 0,71$^{e}$ | 37,16 ± 0,83$^{f}$ |
| Barwa a* [-] | 13,14 ± 0,72$^{a}$ | 9,80 ± 0,45$^{b}$ | 8,01 ± 0,24$^{c}$ | 7,27 ± 0,22$^{d}$ | 10,70 ± 0,49$^{e}$ | 10,62 ± 0,14$^{e}$ | 9,63 ± 0,24$^{b}$ |
| Barwa b* [-] | 32,09 ± 2,06$^{a}$ | 22,11 ± 0,41$^{b}$ | 15,53 ± 1,28$^{c}$ | 12,54 ± 0,63$^{d}$ | 21,20 ± 1,74$^{be}$ | 20,17 ± 0,51$^{e}$ | 18,66 ± 0,41$^{f}$ |
| Barwa ΔE [-] | - | 25,26 ± 1,05 | 36,74 ± 2,80 | 41,67 ± 1,42 | 24,77 ± 3,54 | 29,37 ± 1,70 | 31,69 ± 1,67 |
| Barwa C [-] | 34,68 ± 2,15 | 24,18 ± 0,54 | 17,49 ± 1,14 | 14,49 ± 0,60 | 23,77 ± 1,53 | 22,80 ± 0,50 | 21,00 ± 0,41 |
| Twardość [N] | 32,58 ± 2,12$^{a}$ | 34,12 ± 5,18$^{a}$ | 16,66 ± 4,66$^{bd}$ | 19,48 ± 4,10$^{bc}$ | 14,53 ± 2,51$^{d}$ | 23,21 ± 5,34$^{c}$ | 12,44 ± 2,24$^{d}$ |
| Różnica względem twardości próbki kontrolnej [%] | - | 104,73 | 51,12 | 59,78 | 44,60 | 71,25 | 38,20 |
| Kruchość [mm] | 13,71 ± 0,42$^{a}$ | 10,86 ± 1,20$^{b}$ | 9,88 ± 0,30$^{b}$ | 8,52 ± 0,42 $^{c}$ | 13,73 ± 1,26$^{a}$ | 9,87 ± 0,84$^{b}$ | 9,79 ± 1,12$^{b}$ |
| Różnica względem kruchości próbki kontrolnej [%] | - | 79,25 | 72,04 | 62,16 | 100,13 | 72,01 | 71,41 |
| Próbki bezglutenowe (GFC) | | | | | | | |
| Barwa L* [%] | 58,53 ± 3,85$^{a}$ | 43,66 ± 1,46$^{b}$ | 38,80 ± 1,40$^{c}$ | 36,14 ± 0,95$^{c}$ | 48,12 ± 2,94$^{d}$ | 43,96 ± 2,72$^{b}$ | 42,50 ± 2,16$^{b}$ |
| Barwa a* [-] | 10,00 ± 0,30$^{a}$ | 9,02 ± 0,40$^{b}$ | 8,11 ± 0,53$^{c}$ | 7,89 ± 0,36$^{c}$ | 10,23 ± 0,72$^{a}$ | 10,10 ± 0,55$^{a}$ | 10,57 ± 0,36$^{a}$ |
| Barwa b* [-] | 27,18 ± 1,24$^{a}$ | 20,83 ± 0,35$^{b}$ | 17,64 ± 0,81$^{c}$ | 17,04 ± 0,54$^{c}$ | 23,46 ± 1,14$^{d}$ | 22,74 ± 0,88$^{d}$ | 22,46 ± 0,79$^{d}$ |
| Barwa ΔE [-] | - | 16,22 ± 3,18 | 22,03 ± 3,22 | 24,69 ± 3,93 | 11,26 ± 4,09 | 15,28 ± 3,18 | 16,75 ± 5,03 |
| Barwa C [-] | 28,96 ± 1,22 | 22,70 ± 0,40 | 19,41 ± 0,92 | 18,77 ± 0,57 | 25,60 ± 1,25 | 24,89 ± 0,78 | 24,83 ± 0,62 |
| Twardość [N] | 8,80 ± 1,81$^{ab}$ | 21,03 ± 3,77$^{c}$ | 6,50 ± 2,16$^{a}$ | 22,34 ± 3,23$^{c}$ | 7,49 ± 1,35$^{ab}$ | 9,57 ± 0,79$^{b}$ | 15,71 ± 2,05$^{d}$ |
| Różnica względem twardości próbki kontrolnej [%] | - | 239,02 | 73,89 | 253,96 | 85,15 | 108,80 | 178,56 |
| Kruchość [mm] | 10,81 ± 0,64$^{ab}$ | 10,03 ± 0,62$^{abc}$ | 11,18 ± 2,03$^{b}$ | 8,54 ± 1,15$^{d}$ | 9,77 ± 0,65$^{acd}$ | 9,37 ± 0,29$^{cd}$ | 8,80 ± 0,09$^{cd}$ |
| Różnica względem kruchości próbki kontrolnej [%] | - | 92,81 | 103,41 | 79,05 | 90,35 | 86,68 | 81,45 |

WC – ciastka pszenne, GFC – ciastka bezglutenowe, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze; ΔE – różnica barwy, C – nasycenie, intensywność koloru; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 6 dla twardości i kruchości, n = 10 dla barwy); a-f – wartości średnie w wierszach, oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0,05$.

Wartości parametru a*, określającego udział barwy czerwonej, w próbkach z mąką żołędziową były niższe niż w próbkach kontrolnych (**tabela 29**). W próbkach pszennych z mąką żołędziową wartość parametru a* była niższa o 25,24-44,67% dla mąki polskiej i o 18,57-26,71% dla mąki greckiej w porównaniu z próbką kontrolną. W przypadku ciastek bezglutenowych również odnotowano zmniejszenie wartości parametru a* w próbkach z mąką żołędziową polską (o 9,80-21,10%), jednak w próbkach z mąką żołędziową grecką wartości a* nie różniły się istotnie statystycznie ($p > 0,05$).

Wartości parametru b*, odpowiadającego udziałowi barwy żółtej, wykazywały zmienność zgodną ze zmiennością parametru a*. Wykazano, że im większy był udział mąki żołędziowej polskiej i greckiej, tym mniejsze były wartości parametru b*, a w próbkach z mąką polską zaobserwowano większe zmniejszenie wartości parametru b* niż w próbkach z mąką grecką. Pasqualone i in. (2019) oraz Korus i in. (2017) przedstawili wyniki, zgodnie z którymi dodatek 20-60% mąki żołędziowej do ciastek pszennych i bezglutenowych powodował zwiększenie wartości parametru a*, co jest odmienne od wyników przedstawionych w niniejszej pracy, oraz obniżenie wartości parametru b*, co pozostaje w zgodności z omawianymi w niniejszej pracy wynikami. Warto zauważyć, że mąka żołędziowa polska i grecka cechowały się wyższymi wartościami parametrów a* i b* niż mąka pszenna i bezglutenowa (**rysunek 9**), co nie przełożyło się na zmiany parametrów barwy w ciastkach. W badaniach odnotowano zmniejszenie wartości tych parametrów wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej (**tabela 29**). Przyczyn należy prawdopodobnie doszukiwać się w procesach brązowienia nieenzymatycznego: karmelizacji cukrów oraz reakcji Maillarda, zachodzących pod wpływem temperatury, odpowiedzialnych za powstawanie polimerów o brązowym zabarwieniu (Gupta i in., 2022). Kowalski i in. (2013) wykazali dodatnią korelację pomiędzy powstawaniem HMF (5-hydroksymetolo-2furfuralu), będącego jednym z produktów reakcji Maillarda i/lub karmelizacji cukrów a różnicą barwy pszennych ciastek kruchych ($\Delta E$), ulegającej zwiększeniu, oraz jasnością (L*) i udziałem barwy żółtej (b*), których wartości zmniejszały się wraz ze zwiększeniem stężenia HMF w próbce.

Wartością zależną od parametrów a* i b* jest nasycenie (C, intensywność koloru). Uzyskane wyniki (**tabela 29**) wykazały zmniejszenie wartości C w ciastkach pszennych i bezglutenowych z mąką żołędziową polską i grecką. Mąka żołędziowa polska powodowała zmniejszenie wartości nasycenia barwy próbek w większym stopniu niż mąka żołędziowa grecka. Barwa brązowo-brunatna, charakterystyczna dla mąki żołędziowej (**rysunek 9**), a w konsekwencji wyrobów wytworzonych z jej udziałem (**rysunek 22**), może być odbierana jako mniej intensywna niż odcienie barwy żółto-złotej charakterystyczne dla próbek

kontrolnych. Z tego powodu próbki kontrolne miały wyższą wartość nasycenia niż próbki z dodatkiem żołędzi, co jest zgodne z wynikami przedstawionymi przez Korus i in. (2017).

Różnice barwy między ciastkami z dodatkiem mąki żołędziowej a próbkami kontrolnymi pszennymi i bezglutenowymi odzwierciedla parametr ΔE. Różnice barwy osiągnęły maksymalnie wartość 41,67 (ciastka pszenne z mąką żołędziową polską) i nie były mniejsze niż 11,26 (ciastka bezglutenowe z mąką żołędziową grecką). Niezależnie od rodzaju mąki bazowej i pochodzenia mąki żołędziowej, im wyższy był udział mąki żołędziowej, tym większą różnicę barwy odnotowano. Generalnie mniejsze różnice w barwie stwierdzono dla próbek z dodatkiem mąki greckiej. Zmiany barwy ciastek kruchych z udziałem mąki żołędziowej zostały potwierdzone również w badaniach Amina i Djamel (2018), Korus i in. (2017) oraz Pasqualone i in. (2019).

Twardość wyrobów ciastkarskich jest jednym z najważniejszych wyznaczników ich jakości, decydującym o ich właściwościach teksturalnych i akceptacji przez konsumentów (Mamat i Hill, 2014). W badanych ciastkach twardość, wyrażona jako siła niezbędna do przełamania ciastka, wahała się od 6,50 do 34,12 N i była zależna od rodzaju mąki bazowej oraz pochodzenia i udziału mąki żołędziowej (**tabela 29**). Dodatek mąki żołędziowej do ciastek pszennych wpływał na zmniejszenie ich twardości, a dodatek do ciastek bezglutenowych – zwiększenie twardości. Mąka żołędziowa grecka w większym stopniu oddziaływała na twardość ciastek pszennych niż bezglutenowych, powodując zmniejszenie twardości od 28,75 do 61,80%, natomiast mąka żołędziowa polska w większym stopniu wpływała na twardość ciastek bezglutenowych, powodując zwiększenie twardości nawet o 153,96%. Próbki z mąką żołędziową grecką charakteryzowały się mniejszą twardością niż próbki z mąką żołędziową polską. W badaniach Pasqualone i in. (2019) dodatek mąki żołędziowej do ciastek pszennych w ilości 30% i 60% spowodował zmniejszenie twardości odpowiednio o 38,83% i 76,33%, co jest zbieżne z wynikami przedstawionymi w niniejszej pracy. Zwiększenie twardości ciastek bezglutenowych na skutek wprowadzenia mąki żołędziowej zaobserwowali natomiast Korus i in. (2017) oraz Torabi i in. (2020). Zmiany twardości ciastek na skutek wprowadzenia mąki żołędziowej w dużym stopniu zależne są od braku glutenu w jej składzie, jednakże jak podają Mancebo i in. (2015) istotną rolę odgrywa również wielkość cząstek mąki, stopień uszkodzenia skrobi oraz zawartość białka.




WC-ciastka pszenne, GFC-ciastka bezglutenowe, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze.

**Rysunek 22**. Wygląd ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej.

Kruchość ciastek, wyrażona jako odległość (odchylenie ciastek) od poziomu do miejsca pęknięcia, obrazuje, jak bardzo próbka może się odkształcić, zanim zostanie przełamana. Wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej zmniejszała się odporność ciastek na odkształcenia (**tabela 29**). Dodatek mąki żołędziowej do ciastek pszennych spowodował zwiększenie kruchości od 20,75% do 37,84%, a dla ciastek bezglutenowych od 7,19% do 20,95%. Mąka żołędziowa polska miała większy wpływ na kruchość ciastek niż mąka żołędziowa grecka. Mniejsza kruchość ciastek z mąką żołędziową może być związana ze zwiększonym udziałem składników płynnych w składzie recepturowym, wynikającym ze zwiększonej wodochłonności tej mąki (Dupas-Langlet i in., 2019), ale także z różnicami właściwości fizycznych mąki (**tabela 9**), przekładającymi się na zachowanie mąki w czasie mieszania (Khan i Saini, 2016; Manikantan i in., 2015).

### 6.6.2. Jakość sensoryczna ciastek kruchych

Zmiany jakości ciastek kruchych znalazły odzwierciedlenie w ocenie sensorycznej wypieków (**tabela 30**). Dodatek mąki żołędziowej do ciastek w największym stopniu wpłynął na ocenę ciastek pod względem: smaku, zapachu, słodkości i twardości, powodując zmniejszenie akceptacji przez zespół oceniających. Zauważono, że im większy był udział mąki żołędziowej, tym niższe były uzyskane oceny, z wyjątkiem oceny barwy ciastek. Wpływ dodatku mąki żołędziowej polskiej i greckiej na ocenę ciastek pszennych był zbliżony, natomiast w przypadku ciastek bezglutenowych mąka grecka w większym stopniu wpływała na obniżenie przyznawanych ocen. Największą akceptację uzyskały ciastka pszenne z mąką żołędziową polską, które oceniono średnio jako „lubię umiarkowanie", a najmniejszą ciastka bezglutenowe z mąką żołędziową grecką, które oceniono pomiędzy „nie lubię umiarkowanie" i „ani lubię ani nie lubię".

Należy zauważyć, że dodatek mąki żołędziowej w udziale 50% i 70% pozytywnie wpływał na ocenę kształtu ciastek. W przypadku ciastek pszennych oceny były zbliżone do „bardzo lubię", niezależnie od pochodzenia mąki żołędziowej, natomiast w przypadku ciastek bezglutenowych z mąką żołędziową polską wyniki odpowiadały ocenie pomiędzy „lubię umiarkowanie" i „bardzo lubię", a ciastek bezglutenowych z mąką żołędziową grecką zbliżone do „lubię umiarkowanie". Próbki z 50% i 70% dodatkiem mąki żołędziowej oceniono również pozytywnie w zakresie barwy (oceny pomiędzy „lubię umiarkowanie" i „bardzo lubię").

Odnosząc się do wyników oceny sensorycznej w kontekście udziału mąki żołędziowej w składzie recepturowym ciastek można stwierdzić, że dodatek mąki żołędziowej do ciastek

pszennych i bezglutenowych nie powinien przekraczać 50%. Wyniki oceny próbek z 70% udziałem mąki żołędziowej były zbliżone nawet do ocen odpowiadających klasyfikacji „nie lubię umiarkowanie", w tym przede wszystkim w zakresie smaku i zapachu, które to cechy wskazywane są jako najsilniej wpływające na akceptację konsumencką (Porretta, 2021).

**Tabela 30.** Charakterystyka sensoryczna pszennych i bezglutenowych ciastek kruchych bez oraz z mąką żołędziową.

| | C | AP-30% | AP-50% | AP-70% | AG-30% | AG-50% | AG-70% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Próbki pszenne (WC) | | | | | | | |
| Barwa | $4{,}87 \pm 0{,}35^{a}$ | $3{,}49 \pm 0{,}66^{b}$ | $4{,}73 \pm 0{,}46^{ac}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{ac}$ | $3{,}20 \pm 0{,}68^{b}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{ac}$ | $4{,}40 \pm 0{,}63^{c}$ |
| Smak | $4{,}93 \pm 0{,}26^{a}$ | $4{,}47 \pm 0{,}52^{ab}$ | $4{,}07 \pm 0{,}88^{b}$ | $3{,}40 \pm 0{,}74^{c}$ | $4{,}33 \pm 0{,}72^{b}$ | $4{,}27 \pm 0{,}46^{b}$ | $2{,}40 \pm 0{,}83^{d}$ |
| Zapach | $4{,}93 \pm 0{,}26^{a}$ | $4{,}07 \pm 0{,}59^{b}$ | $3{,}47 \pm 0{,}64^{c}$ | $3{,}40 \pm 0{,}74^{c}$ | $4{,}13 \pm 0{,}74^{b}$ | $3{,}80 \pm 0{,}68^{bc}$ | $2{,}33 \pm 0{,}72^{d}$ |
| Słodkość | $4{,}87 \pm 0{,}35^{a}$ | $4{,}27 \pm 0{,}80^{b}$ | $3{,}73 \pm 0{,}46^{cd}$ | $3{,}20 \pm 0{,}68^{e}$ | $4{,}20 \pm 0{,}77^{bc}$ | $3{,}67 \pm 0{,}62^{de}$ | $2{,}27 \pm 0{,}70^{f}$ |
| Chrupkość | $4{,}33 \pm 0{,}62^{a}$ | $4{,}33 \pm 0{,}72^{a}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{a}$ | $4{,}60 \pm 0{,}51^{a}$ | $4{,}27 \pm 0{,}70^{a}$ | $4{,}40 \pm 0{,}51^{a}$ | $3{,}20 \pm 0{,}94^{b}$ |
| Twardość | $4{,}93 \pm 0{,}26^{a}$ | $4{,}20 \pm 0{,}68^{b}$ | $4{,}73 \pm 0{,}46^{a}$ | $3{,}40 \pm 0{,}91^{c}$ | $4{,}13 \pm 0{,}74^{b}$ | $3{,}13 \pm 0{,}74^{cd}$ | $2{,}67 \pm 0{,}82^{d}$ |
| Kształt | $4{,}40 \pm 0{,}63^{a}$ | $3{,}60 \pm 0{,}63^{b}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{c}$ | $4{,}93 \pm 0{,}26^{c}$ | $3{,}53 \pm 0{,}52^{b}$ | $4{,}73 \pm 0{,}46^{ac}$ | $4{,}67 \pm 0{,}49^{ac}$ |
| Próbki bezglutenowe (GFC) | | | | | | | |
| Barwa | $4{,}40 \pm 0{,}51^{a}$ | $3{,}33 \pm 0{,}82^{b}$ | $4{,}53 \pm 0{,}64^{a}$ | $4{,}20 \pm 0{,}68^{a}$ | $3{,}07 \pm 0{,}70^{b}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{a}$ | $4{,}40 \pm 0{,}51^{a}$ |
| Smak | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $4{,}00 \pm 0{,}65^{b}$ | $3{,}87 \pm 0{,}74^{b}$ | $2{,}27 \pm 0{,}70^{d}$ | $2{,}93 \pm 0{,}70^{c}$ | $2{,}80 \pm 0{,}68^{cd}$ | $2{,}27 \pm 1{,}03^{d}$ |
| Zapach | $4{,}27 \pm 0{,}88^{a}$ | $3{,}80 \pm 0{,}68^{a}$ | $3{,}20 \pm 0{,}68^{b}$ | $2{,}53 \pm 0{,}74^{cd}$ | $3{,}20 \pm 0{,}68^{b}$ | $3{,}07 \pm 0{,}96^{bc}$ | $2{,}33 \pm 0{,}72^{d}$ |
| Słodkość | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $4{,}20 \pm 0{,}68^{a}$ | $3{,}27 \pm 0{,}59^{b}$ | $3{,}07 \pm 0{,}88^{bc}$ | $2{,}80 \pm 0{,}56^{bc}$ | $2{,}67 \pm 0{,}72^{c}$ | $2{,}13 \pm 0{,}83^{d}$ |
| Chrupkość | $4{,}73 \pm 0{,}46^{a}$ | $4{,}20 \pm 0{,}68^{b}$ | $4{,}80 \pm 0{,}41^{a}$ | $3{,}93 \pm 0{,}80^{bc}$ | $3{,}13 \pm 0{,}83^{d}$ | $3{,}47 \pm 0{,}83^{cd}$ | $3{,}20 \pm 0{,}68^{d}$ |
| Twardość | $4{,}73 \pm 0{,}46^{a}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{a}$ | $4{,}67 \pm 0{,}49^{a}$ | $2{,}80 \pm 0{,}86^{b}$ | $3{,}73 \pm 0{,}80^{c}$ | $3{,}13 \pm 0{,}92^{b}$ | $2{,}27 \pm 0{,}59^{d}$ |
| Kształt | $3{,}93 \pm 0{,}70^{a}$ | $3{,}27 \pm 0{,}70^{b}$ | $4{,}60 \pm 0{,}51^{c}$ | $4{,}53 \pm 0{,}52^{c}$ | $3{,}13 \pm 0{,}64^{d}$ | $3{,}93 \pm 0{,}70^{a}$ | $3{,}80 \pm 0{,}77^{a}$ |

WC – ciastka pszenne, GFC – ciastka bezglutenowe, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze; wyniki przedstawiono jako wartości średnie ± odchylenie standardowe (n = 15); a-f – wartości średnie w wierszach, oznaczone różnymi małymi literami różnią się istotnie statystycznie przy $p \leq 0{,}05$.

W badaniach Amina i Djamel (2018) 10% udział mąki żołędziowej miał negatywny wpływ na ocenę sensoryczną ciastek pszennych, które uzyskały niższe noty za teksturę, barwę, smak, zapach, wygląd i ogólną akceptację. Z kolei w badaniach Parsaei i in. (2018) dodatek 15%, 30% i 45% mąki żołędziowej do ciastek pszennych nie powodował istotnych różnic w ocenie sensorycznej takich wyróżników jak smak, tekstura, posmak, barwa i akceptowalność ogólna. Korus i in. (2017) oraz Torabi i in. (2020) odnotowali negatywny wpływ mąki żołędziowej na wyniki oceny sensorycznej ciastek bezglutenowych (smaku, zapachu, tekstury lub konsystencji oraz ogólnej akceptacji), wskazując na zmniejszenie akceptacji wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej powyżej 20% i 7,5% odpowiednio.

### 6.6.3. Wartość odżywcza ciastek kruchych

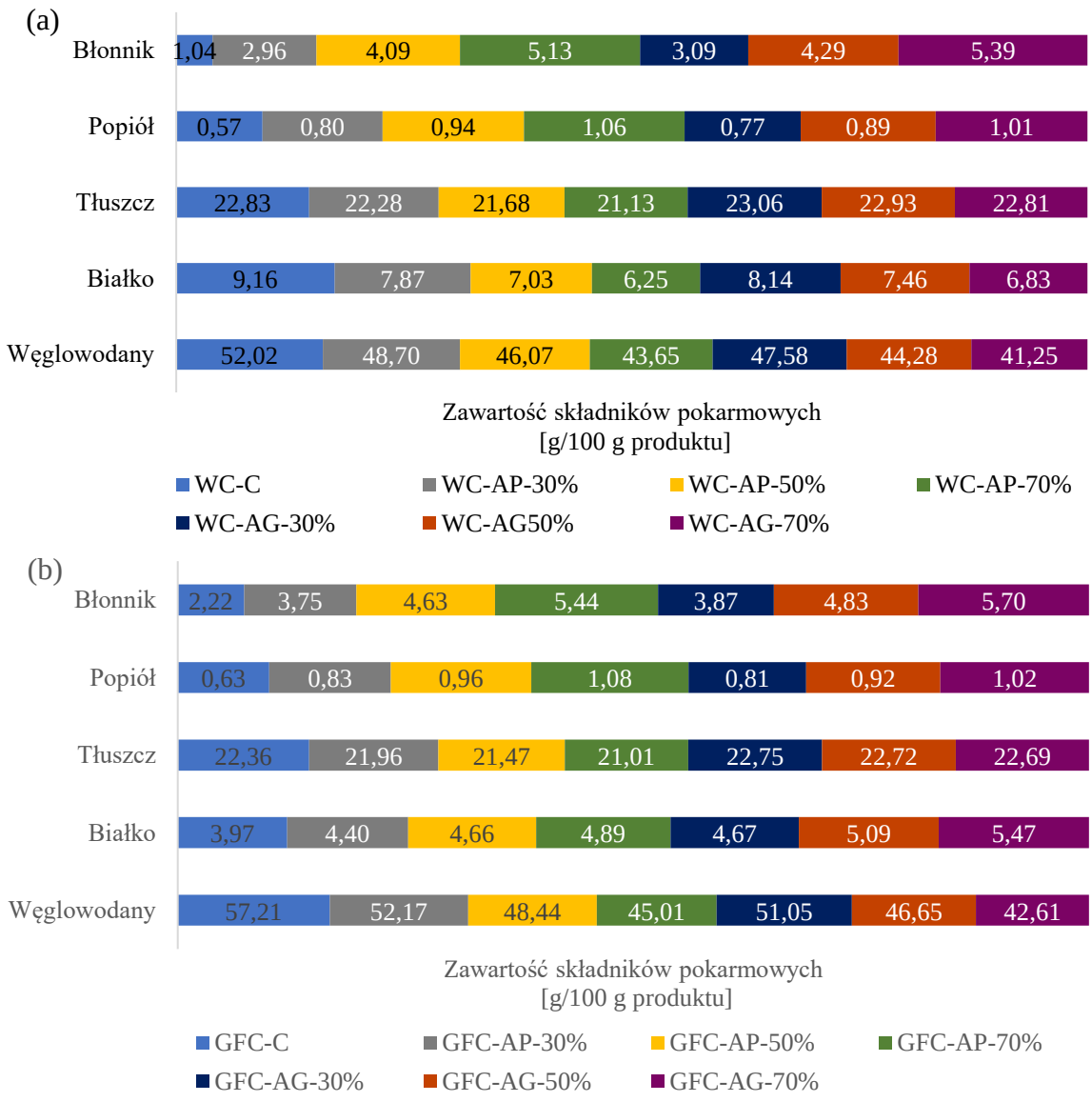
Jak podają Gumul i in. (2021), piekarskie i ciastkarskie produkty bezglutenowe bazują na skrobiach i hydrokoloidach, przez co zawartość składników odżywczych i substancji prozdrowotnych jest niewielka w ich składzie. Ważnym kierunkiem wzbogacania wartości odżywczej tych produktów jest wprowadzenie do ich składu surowców bogatych m.in. w naturalne przeciwutleniacze, a do takich surowców można zaliczyć mąkę żołędziową. Analizując wartość odżywczą otrzymanych ciastek kruchych stwierdzono, że dodatek mąki żołędziowej do ciastek pszennych i bezglutenowych wpływał na zawartość podstawowych składników (**rysunek 23**). Różnice w ich zawartości dotyczyły w największym stopniu węglowodanów, popiołu i błonnika i zależne były od rodzaju mąki bazowej oraz udziału i pochodzenia mąki żołędziowej.

Wprowadzenie mąki żołędziowej do składu recepturowego ciastek pszennych spowodowało zmniejszenie zawartości węglowodanów i białka oraz zwiększenie zawartości popiołu i błonnika pokarmowego. Zawartość węglowodanów zmieniała się proporcjonalnie do udziału mąki żołędziowej, a im większy był dodatek mąki żołędziowej tym mniejsza była zawartość węglowodanów w ciastkach, co związane było z niższą zawartością węglowodanów w mąkach żołędziowych w porównaniu do mąk zbożowych (**tabela 8**). Taka sama tendencja dotyczyła zawartości białka. Odwrotne zależności zaobserwowano w przypadku błonnika pokarmowego i popiołu, których zawartość zwiększała się wraz ze zwiększeniem dodatku mąki żołędziowej.

Pochodzenie mąki żołędziowej nie wpływało w znaczący sposób na różnice w zawartości składników pokarmowych w ciastkach pszenno-żołędziowych. Największe różnice pomiędzy ciastkami z mąką polską a ciastkami z mąką grecką zaobserwowano w zawartości tłuszczu i białka, których mniejsza koncentracja była w ciastkach z mąką polską, a różnica wynosiła odpowiednio do 7,4% i 8,5% w ciastkach z 70% udziałem mąki żołędziowej. Różnice w zawartości węglowodanów, błonnika pokarmowego i popiołu pomiędzy ciastkami pszennymi z mąką żołędziową polską i grecką na tym samym poziomie dodatku nie przekraczały 5,5%.

Tendencje dotyczące zmiany zawartości składników pokarmowych w zależności od udziału mąki żołędziowej w ciastkach bezglutenowych były zbliżone do tych zaobserwowanych w ciastkach pszennych. Różnica dotyczyła zawartości białka, która w ciastkach pszennych zwiększała się wraz ze zwiększeniem udziału mąki żołędziowej

maksymalnie o 23,2% i 37,8% odpowiednio dla ciastek z mąką żołędziową polską i grecką, porównując do próbki kontrolnej.




WC – mąka pszenna, GFC – mąka bezglutenowa, C – próbka kontrolna (bez mąki żołędziowej), AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze.

**Rysunek 23**. Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą – zawartość podstawowych składników odżywczych w ciastkach kruchych pszennych (a) oraz bezglutenowych (b).

Zwiększenie zawartości błonnika pokarmowego i popiołu w ciastkach bezglutenowych z dodatkiem mąki żołędziowej zostało potwierdzone również w badaniach Korus i in. (2017). Wyniki przedstawione przez cytowanych autorów wskazują jednak na wyższe zróżnicowanie

w zawartości popiołu i błonnika pokarmowego pomiędzy próbkami bezglutenowymi bez i z dodatkiem mąki żołędziowej niż rezultaty przedstawione w niniejszej pracy. Już 20% dodatek mąki żołędziowej w cytowanych badaniach spowodował 2-krotne zwiększenie zawartości popiołu i błonnika. Z kolei Torabi i in. (2020) nie wykazali istotnych różnic w zawartości składników pokarmowych w ciastkach bezglutenowych bez i z dodatkiem mąki żołędziowej.

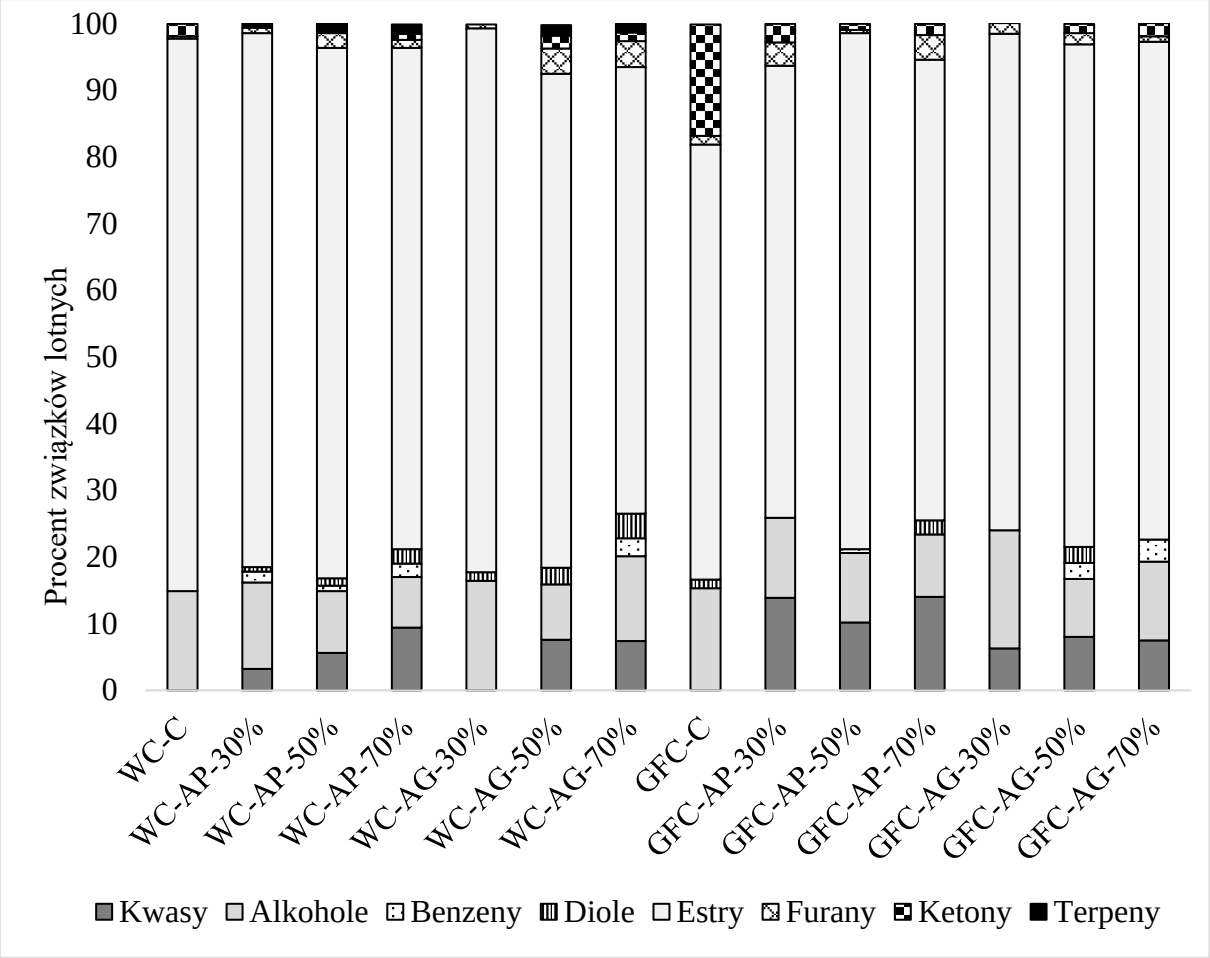
Ciastka kruche są produktami szczególnie podatnymi na niekorzystne przemiany oksydacyjne ze względu na wysoką zawartość tłuszczu, w tym stosunkowo wysoką zawartość nienasyconych kwasów tłuszczowych (Mildner-Szkudlarz i in., 2009; Reddy i in., 2005). Dodatek mąki żołędziowej do ciastek może ograniczać zmiany oksydacyjne, co w opublikowanych dotychczas rezultatach (Korus i in., 2017; Parsei i in., 2018; Pasqualone in., 2019; Torabi i in., 2020) przejawiało się obniżoną wartością liczby nadtlenkowej w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Zmiany te mogą wynikać ze zwiększonej pojemności przeciwutleniającej ciastek z dodatkiem mąki żołędziowej, będącej następstwem znacząco wyższej zawartości związków fenolowych. Dużą zawartość związków fenolowych oraz pojemność antyoksydacyjną mąk żołędziowych stwierdzono również w niniejszej pracy (**tabela 8**). Przyczyn ograniczenia procesów utleniania można upatrywać również w odmiennym składzie kwasów tłuszczowych mąki zbożowej i mąki żołędziowej. Mąka żołędziowa zawiera więcej kwasów jednonienasycownych, w tym głównie kwas oleinowy (Silva i in., 2016). Natomiast mąka pszenna w przewadze zawiera kwas linolowy z dwoma wiązaniami podwójnymi (Sujka i in., 2017), który jest znacznie bardziej podatny na utlenianie niż kwas oleinowy (Tańska i Rotkiewicz, 2011). Ponadto mąka żołędziowa odróżnia się od mąki pszennej również profilem lipofilnych przeciwutleniaczy. W tłuszczu żołędziowym dominuje γ-tokoferol (Al-Rousan i in., 2013; Górnaś, 2019; Taib i Bouyazza, 2020), który wykazuje wyższą aktywność przeciwutleniającą w produktach niż α- i β-tokoferole (Nogala-Kałucka i in., 2011; Minkowski i in., 2011) dominujące w mące pszennej (Sedej i in., 2010). Surowce żołędziowe cechują się również występowaniem likopenu i β-karotenu (Vinha i in., 2016), związków pełniących istotną rolę w hamowaniu reakcji fotoutleniania (Taib i Bouyazza, 2020). Znaczenie dla aktywności antyoksydacyjnej mąki żołędziowej mogą mieć również sterole wchodzące w skład frakcji tłuszczowej. W tłuszczu żołędziowym identyfikowane jest do 10 różnych steroli, w których dominuje β-sitosterol, ale znaczenie mają również Δ 5-avenasterol, campesterol czy stigmasterol (Al-Rousan i in., 2013).

### 6.6.4. Profil związków lotnych ciastek kruchych

Profil związków lotnych prezentowany w analizowanych ciastkach kruchych różnił się w zależności od receptury (**tabela 31**). Dominującą grupą związków lotnych, niezależnie od rodzaju mąki bazowej i pochodzenia mąki żołędziowej, były estry, których udział wynosił od 65% do 83%, ale znaczny udział miały również alkohole (udział wynoszący średnio 10-15%) i kwasy (udział do 15%) (**rysunek 24**). Pozostałe grupy zidentyfikowanych związków lotnych (diole, ketony, terpeny, furany oraz areny) reprezentowane były przez pojedyncze związki, których udział nie przekraczał 3%. Na uwagę zasługuje brak związków należących do grupy aldehydów, pochodzących m.in. z peroksydacji lipidów, których obecność w ciastkach różnego typu potwierdzono w badaniach przeprowadzonych m.in. przez Ait Ameur i in. (2008), Ayed i in. (2021) oraz Pasqualone i in. (2019). Niski udział związków będących produktami reakcji utleniania lipidów, na poziomie trudnym do określenia, można prawdopodobnie tłumaczyć wysokim udziałem związków fenolowych (**tabela 8**), naturalnych przeciwutleniaczy obecnych w mące żołędziowej, wskazywanych w literaturze jako inhibitory reakcji prowadzących do powstawania związków smakowo-zapachowych (Ou i in., 2019). Ponadto wpływ mogły wywierać inne przeciwutleniacze zawarte w mące żołędziowej, w tym lipofilne, np. tokoferole (Al-Rousan i in., 2013; Górnaś, 2019; Taib i Bouyazza, 2020).

Octan butylu i octan 2-metylo-1-butylu były dwoma estrami, które dominowały w ciastkach, niezależnie od rodzaju mąki bazowej i pochodzenia mąki żołędziowej przy czym w ciastkach wzbogacanych mąką żołędziową ich pole powierzchni było większe niż w próbkach kontrolnych. Według Pasqualone i in. (2019) udział estrów w surowcu może zależeć od jego aktywności fermentacyjnej. Na podstawie uzyskanych wyników można przypuszczać, że mąki żołędziowe cechowała wyższa aktywność fermentacyjna w porównaniu do mąki pszennej i bezglutenowej.

Typowymi związkami lotnymi dla wyrobów ciastkarskich są produkty reakcji Maillarda, nadające ciastkom karmelowy, słodki zapach (Pasqualone i in., 2019). Wśród związków lotnych zidentyfikowanych w badanych próbkach jako produkty reakcji Maillarda wymienić można 2-furanmetanol, kwas octowy i limonen. Pole powierzchni tych związków w próbkach z mąką żołędziową, niezależnie od jej pochodzenia, było większe niż w próbkach kontrolnych pszennej i bezglutenowej.




WC-ciastka pszenne, GFC-ciastka bezglutenowe, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze.

**Rysunek 24.** Procentowy udział grup związków lotnych w badanych ciastkach kruchych.

Ciastka z mąką żołędziową cechowały się bogatszym profilem związków lotnych niż próbki kontrolne (ciastka bez dodatku mąki żołędziowej) (**tabela 31**). 14 z 22 zidentyfikowanych związków lotnych nie występowało w próbkach kontrolnych, a jedynie w ciastkach z mąką żołędziową polską i/lub grecką. Porównując próbki z mąką żołędziową różnego pochodzenia można stwierdzić, że w ciastkach z mąką żołędziową polską zidentyfikowano więcej związków lotnych niż w ciastkach z mąką żołędziową polską (17 względem 12 oraz 14 względem 11, odpowiednio w próbkach pszennych i bezglutenowych). Związkami, które występowały wyłącznie w ciastkach z mąką żołędziową polską, były: 1-butoxy-2-propanol, octan 3-metylo-1-butylu, octan heksylu, octan heptylu, butanian butylu i butanian butylo-2-metylu. W ciastkach z mąką żołędziową grecką występowały octan pentylu i 2(5H)-furanon, niezidentyfikowane w próbkach z mąką żołędziową polską.

**Tabela 31.** Charakterystyka zidentyfikowanych związków lotnych w badanych ciastkach kruchych i ich pole powierzchni w próbkach kontrolnych (bez dodatku mąki żołędziowej) oraz próbkach z mąką żołędziową[1].

| Lp. | Związek | Grupa chemiczna | Charakterystyka zapachu* | Kruche ciastka pszenne | | | Kruche ciastka bezglutenowe | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | WC-C | WC-AP max. | WC-AG max. | GFC-C | GFC-AP max. | GFC-AG max. |
| 1 | Kwas octowy | kwasy | ostry, gryzący, kwaśny, octowy | - | 5201123 | 1957898 | - | 4453279 | 3350660 |
| 2 | 1-Butanol | alkohole | olejowy, słodki, balsamiczny | 2356981 | 2979436 | 2714794 | 2793925 | 2415753 | 4444209 |
| 3 | 2-Metyl-1-butanol | | eteryczny, alkoholowy, winny, whisky, kakaowy | 350425 | 293029 | 551664 | - | 383204 | 648329 |
| 4 | 1-Heksanol | | gryzący, eteryczny, olejowy, owocowy, alkoholowy, słodki | - | 710343 | 73040 | - | 201152 | 121104 |
| 5 | 1-Butoxy-2-propanol | | nd | - | 203576 | - | - | - | - |
| 6 | 1-(Dimetoksymetylo)-4-(1-metoksy-1-metyloetylu)benzen | areny | nd | - | 1110759 | 706490 | - | - | 1452371 |
| 7 | 1,3-Butanediol | diole | nd | - | 349160 | - | - | 69675 | - |
| 8 | 2,3-Butanediol | | owocowy, kremowy, maślany | - | 899776 | 985156 | 242789 | 589108 | 4552520 |
| 9 | Octan butylu | estry | eteryczny, rozpuszczalnikowy, owocowy, bananowy | 11357441 | 27435124 | 13750206 | 8061575 | 16928833 | 21639751 |
| 10 | Octan 2-metylo-1-butylu | | słodki, bananowy, owocowy, estrowy, soczysty | 3699527 | 6205968 | 3967486 | 3797535 | 4506523 | 6430016 |
| 11 | Octan 3-metylo-1-butylu | | słodki, owocowy, bananowy, rozpuszczalnikowy | - | 333971 | - | - | - | - |
| 12 | Octan pentylu | | eteryczny, owocowy, bananowy, gruszkowy, jabłkowy | - | - | - | - | - | 670240 |
| 13 | Octan 2-metylo-1-pentylu | | nd | - | - | - | 61492 | - | - |
| 14 | Octan heksylu | | owocowy, jabłkowy, bananowy, słodki | - | 6642876 | - | - | 124303 | - |
| 15 | Octan heptylu | | świeży, owocowy, gruszkowy, morelowy, drzewny | - | - | - | - | 19843 | - |
| 16 | Butanian butylu | | owocowy, bananowy, ananasowy, wiśniowy, tropikalny, soczysty | - | 918287 | - | - | 235626 | - |
| 17 | Butanian butylo-2-metylu | | owocowy, tropikalny, eteryczny, ziołowy, selerowy, kakaowy, brzoskwiniowy, trawiasty | - | 1291472 | - | - | - | - |
| 18 | 2-furanmetanol | furany | alkoholowy, słodki, karmelowy, chlebowy, kawowy | 56240 | 641512 | 732938 | 236088 | 628522 | - |
| 19 | 2(5H)-furanon | | maślany | - | - | 265575 | - | - | - |
| 20 | Dihydro-2(3H)-furanon | | kremowy, oleisty, tłusty | - | - | 39453 | - | 530662 | 344028 |
| 21 | 1-hydroksy-2-propanon | ketony | ostry, słodki, karmelowy, eteryczny | 342115 | 469490 | 353451 | 3050650 | 530791 | 877039 |
| 22 | l-Limonen | terpeny | terpenowy, sosnowy, ziołowy, pieprzowy | - | 770678 | 348982 | - | - | - |

[1]wyrażone jako maksymalne pole powierzchni dla zidentyfikowanych związków w próbkach z udziałem mąki żołędziowej polskiej i greckiej; WC-ciastka pszenne, GFC-ciastka bezglutenowe, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze; nd – brak danych; * http://www.thegoodscentscompany.com/.

Jak podają Makhlouf i in. (2020) obecność związków lotnych w żołędziach może być różnicowana w zależności gatunku i cech genetycznych, warunków środowiskowych i stopnia dojrzałości orzecha, co może tłumaczyć różnice w profilu ciastek z mąką żołędziową różnego pochodzenia. Różnice w profilu związków lotnych pomiędzy próbkami z mąką żołędziową różnego pochodzenia mogły mieć znaczenie w ocenie akceptowalności otrzymanych wyrobów ciastkarskich. Odnosząc się do wpływu związków lotnych na akceptowalność i ocenę sensoryczną wyrobów piekarskich i ciastkarskich warto zwrócić uwagę, że pojedyncze związki lotne nie powinny być uznawane za kluczowy składnik odpowiedzialny za aromat wypieków. Ich działanie w kształtowaniu aromatu produktów jest synergistyczne i zależne od wzajemnych proporcji (Heenanan i in., 2009).

### 6.5.5. Analiza statystyczna siły wpływu pochodzenia mąki żołędziowej oraz jej dodatku na cechy ciastek kruchych

Dwuczynnikowa ANOVA potwierdziła statystycznie istotny wpływ zarówno pochodzenia jak i wielkości dodatku mąki żołędziowej na cechy fizyczne i sensoryczne ciastek kruchych (**tabela 32**). Pochodzenie mąki żołędziowej okazało się czynnikiem determinującym głównie parametr b* w ciastkach pszennych (55,4% wyjaśnienia wariancji) oraz parametry a* i b* w ciastkach bezglutenowych (> 70% wyjaśnienia wariancji). Pozostałe parametry barwy, zarówno ciastek pszennych jak i bezglutenowych, w większym stopniu zależały od wielkości dodatku mąki żołędziowej niż jej pochodzenia (41,0-64,9% wyjaśnienia wariancji). W przypadku twardości ciastek, analiza statystyczna wskazała na istotny wpływ obu analizowanych czynników i ich interakcji (17,0-45,0% wyjaśnienia wariancji), przy czym w przypadku ciastek pszennych silniejszy wpływ wywierało oddziaływanie obu czynników jednocześnie, natomiast w przypadku ciastek bezglutenowych większe znaczenie miała wielkość dodatku mąki żołędziowej. Dodatek mąki żołędziowej najsilniej wpływał także na kruchość ciastek, niezależnie od ich rodzaju (28,6-53,8% wyjaśnienia wariancji). Jednakże w przypadku ciastek bezglutenowych stwierdzono, że również inne czynniki (nie analizowane w badaniach) wpływały na ich kruchość. Warto zauważyć, że użyta w badaniach mąka bezglutenowa jest mieszaniną wieloskładnikową (rozdział 5.1), w tym głównie skrobi pochodzenia zbożowego (kukurydziana, ryżowa), białka (z sorgo, ryżowego, grochowego), błonnika roślinnego (psyllium), oraz substancji zagęszczającej (hydroksypropylometylocelulozy), które mogą zmieniać właściwości teksturalne produktów. Duży wpływ będą wywierały zwłaszcza hydroksypropylometylocelulozy oraz psyllium,

które pełnią rolę substancji żelujących i emulgujących w żywności, wpływając na wiązanie wody, co pozwala na uzyskanie produktów o pożądanej spoistości i elastyczności (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

**Tabela 32.** Wpływ pochodzenia i dodatku mąki żołędziowej na analizowane właściwości ciastek kruchych.

| Analizowane cechy | Ciastka kruche pszenne | | | | Ciastka kruche bezglutenowe | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | PM | DM | PM x DM | Inne | PM | DM | PM x DM | Inne |
| Cechy fizyczne | | | | | | | | |
| L* | 21,6 | 64,9 | 8,2 | 5,3 | 38,7 | 41,0 | 0,8 | 19,5 |
| a* | 55,4 | 31,3 | 8,2 | 5,0 | 73,3 | 3,7 | 6,8 | 16,1 |
| b* | 22,5 | 51,9 | 19,0 | 6,5 | 70,6 | 16,0 | 5,7 | 7,7 |
| Twardość | 17,0 | 17,7 | 43,2 | 22,1 | 18,0 | 45,0 | 25,8 | 11,1 |
| Kruchość | 14,1 | 53,8 | 10,3 | 21,8 | 5,6 | 28,6 | 11,8 | 54,0 |
| Cechy sensoryczne | | | | | | | | |
| Barwa | 0,5 | 54,7 | 0,8 | 44,0 | 0,0 | 45,4 | 1,2 | 53,3 |
| Smak | 2,4 | 43,8 | 6,5 | 47,3 | 12,4 | 28,2 | 6,2 | 53,2 |
| Zapach | 1,5 | 32,1 | 11,4 | 54,9 | 3,2 | 25,9 | 1,4 | 69,5 |
| Słodkość | 3,5 | 43,2 | 4,7 | 48,5 | 26,9 | 15,4 | 3,0 | 54,7 |
| Chrupkość | 14,6 | 12,4 | 12,1 | 60,8 | 32,7 | 7,3 | 1,8 | 58,1 |
| Twardość | 15,9 | 23,7 | 9,8 | 50,5 | 18,3 | 39,9 | 3,6 | 38,3 |
| Kształt | 0,8 | 60,3 | 0,4 | 38,5 | 9,2 | 32,7 | 2,5 | 55,5 |

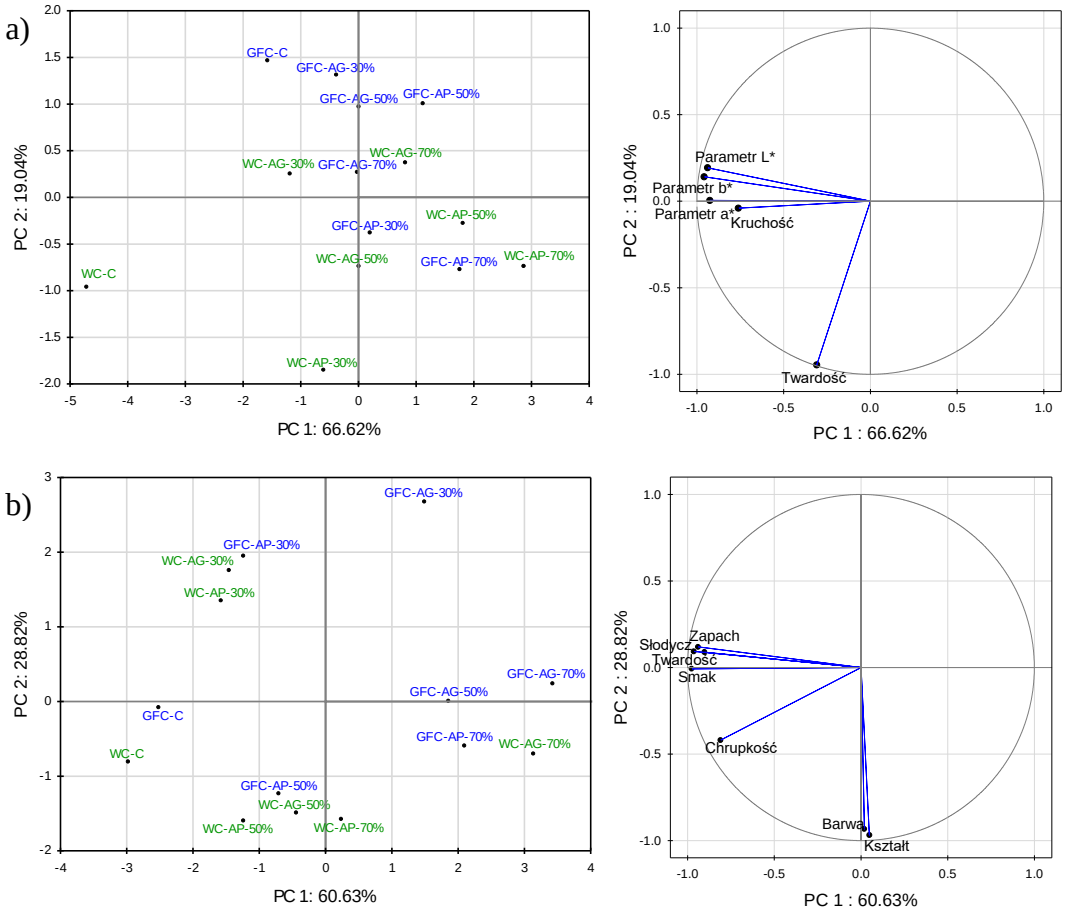
PM – pochodzenie mąki żołędziowej, DM – wielkość dodatku mąki żołędziowej; dane przedstawiono jako % wyjaśnianej wariancji, analiza dwuczynnikowa z testem Wilksa, $p \leq 0,05$; efekt istotny statystycznie oznaczono czerwonym kolorem;

Akceptowalność większości cech sensorycznych ciastek pszennych była w większym stopniu determinowana przez wielkość dodatku mąki żołędziowej (32,1-60,3% wyjaśnienia wariancji). Wyjątek stanowiły jedynie cechy związane z teksturą ciastek (chrupkość i twardość), na akceptowalność których dodatek i pochodzenie mąki oraz ich interakcja miały niewielki wpływ. W przypadku ciastek bezglutenowych wielkość dodatku mąki żołędziowej wpływała w mniejszym stopniu na akceptowalność cech sensorycznych (maksymalnie 45,4% wyjaśnienia wariancji).

W celu oceny zróżnicowania próbek ciastek kruchych pod względem cech fizycznych, cech sensorycznych oraz profilu związków lotnych stworzono modele analizy głównych składowych (PCA) (**rysunki 25, 26**).

Na **rysunku 25a** przedstawiono próbki ciastek rozmieszczone na płaszczyźnie dwóch pierwszych składowych (PC1 i PC2, które opisują łącznie 85,66% całkowitej zmienności), otrzymanych po analizie cech fizycznych. Z projekcji składowych PC1-PC2 widać słabe zróżnicowanie między próbkami, w zależności od rodzaju ciastek, pochodzenia i dodatku mąki

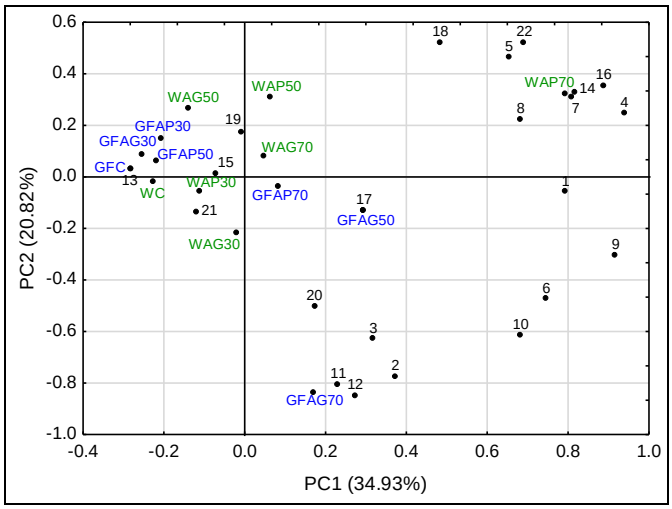
żołędziowej. Można zaobserwować jedynie niewielką różnicę między próbką ciastek pszennych kontrolnych i próbką ciastek pszennych z 30% dodatkiem mąki żołędziowej polskiej a pozostałymi próbkami ciastek. Obie próbki wyróżniały odmienne niż innych próbkach, cechy tekstury (twardość i kruchość) oraz udział barwy żółtej (parametr b*). Z kolei pod względem ocen cech sensorycznych, że rzut próbek na płaszczyznę PC1-PC2 (łącznie stanowiły 89,45% całkowitej zmienności) pozwoliła generalnie na rozróżnienie próbek ze względu na wielkość dodatku mąki żołędziowej. Jednakże dwie próbki stanowiły wyjątek, będąc w grupie próbek o większym lub mniejszym udziale mąki żołędziowej (**rysunek 25b**).




**Rysunek 25.** Wyniki analizy PCA z uwzględnieniem dwóch pierwszych głównych składowych (po lewej – wykres rozrzutu próbek oraz po prawej – wykres ładunków czynnikowych): cech fizycznych (a) oraz cech sensorycznych (b) próbek ciastek kruchych pszennych (kolor zielony) oraz bezglutenowych (kolor niebieski).

Wykres pierwszych dwóch składowych głównych (PC1 i PC2, które stanowiły 55,75% całkowitej zmienności) pokazał grupowanie pomiędzy próbkami kontrolnymi i próbkami z 30% udziałem mąki żołędziowej, z nakładaniem się próbek pszennych i bezglutenowych,

a próbkami z 50% i 70% udziałem mąki żołędziowej, z wyjątkiem próbki bezglutenowej z 50% udziałem mąki żołędziowej polskiej (**rysunek 26**). Charakterystyczna dla próbek kontrolnych i z 30% udziałem mąki żołędziowej była zawartość 1-hydroksy-2-propanonu (związek nr 21). Warto zauważyć, że próbka pszenna z 70% udziałem mąki żołędziowej polskiej cechowała się największą liczbą związków lotnych, co separowało ją od innych próbek.




W-ciastka pszenne, GF-ciastka bezglutenowe, C – próbka kontrolna, AP – mąka żołędziowa polska, AG – mąka żołędziowa grecka; 30-70% – udział mąki żołędziowej w recepturze.

**Rysunek 26.** Biplot przedstawiający rozrzut próbek ciastek kruchych pszennych (kolor czerwony) i bezglutenowych (kolor niebieski) oraz związków lotnych na płaszczyźnie utworzonej przez dwie pierwsze składowe główne (PC1 i PC2). Numery związków lotnych w ciastkach kruchych odpowiadają związkom przedstawionym w **tabeli 31**.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały wpływ mąki żołędziowej na właściwości fizyczne, profil związków lotnych oraz ocenę sensoryczną pszennych i bezglutenowych ciastek kruchych. Zmiany właściwości fizycznych, profilu związków lotnych oraz oceny organoleptycznej analizowanych ciastek zależały od poziomu dodatku i pochodzenia mąki żołędziowej oraz rodzaju mąki bazowej. Mąka żołędziowa wzbogaciła również i zróżnicowała profil związków lotnych, zwiększając ilość zidentyfikowanych związków z 7, obecnych tylko w próbkach kontrolnych, do 21 zidentyfikowanych w różnych wariantach ciastek z mąką żołędziową. Uzyskane wyniki potwierdzają potrzebę prowadzenia oceny wyróżników jakości sensorycznej produktów z dodatkiem mąki żołędziowej nie tylko w oparciu o ocenę sensoryczną, ale również z wykorzystaniem metod instrumentalnych, dowodzących różnic w składzie pomiędzy produktami konwencjonalnymi, typowymi a produktami wzbogaconymi.

# 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie wyników badań własnych oraz analizy wyników innych badaczy zawartej w publikacji przeglądowej wchodzącej w skład rozprawy doktorskiej, można potwierdzić przyjętą hipotezę badawczą, że mąka żołędziowa może stanowić cenny pod względem żywieniowym surowiec w produkcji piekarskiej i ciastkarskiej, a ewentualne niekorzystne skutki jej dodatku na jakość produktu można zmniejszyć poprzez optymalizowanie cech mąki żołędziowej (pochodzenie żołędzi, obróbka mąki) i/lub technologii produkcji (wielkość dodatku, metoda prowadzenia ciasta).

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych rezultatów wykazano:

1) Mąki żołędziowe pochodzące z różnych krajów różnią się składem chemicznym i cechami fizycznymi, co jest zależne zarówno od gatunku i miejsca uprawy żołędzi jak i metod ich wytwarzania.
2) Mąka żołędziowa produkowana w Polsce różni się od mąki żołędziowej produkowanej w Grecji składem chemicznym (wyższa zawartość węglowodanów, popiołu, sumy wolnych związków fenolowych, w tym zwłaszcza kwasu galusowego), pojemnością przeciwutleniającą (wyższa zdolność zmiatania rodnika DPPH) oraz cechami fizycznymi (ciemniejsza barwa i lepsza trwałość przechowalnicza).
3) Właściwości wypiekowe mąki żołędziowej są znacznie słabsze w porównaniu z właściwościami mąki pszennej (wprowadzenie jej do receptury zmniejsza rozciągliwość i lepkość ciasta, wydłuża czasu rozwoju ciasta, zmniejsza zatrzymywanie gazów w cieście), co wskazuje, że mąka ta może stanowić jedynie dodatek (do 30%) do mąk zbożowych w produkcji wyrobów piekarskich.
4) Wprowadzenie mąki żołędziowej do chleba pszennego i żytniego, ciastek kruchych oraz ciast biszkoptowo-tłuszczowych wpływa na ich cechy fizyczne, w tym przede wszystkim barwę, cechy tekstury, strukturę i objętość. Siła oddziaływania mąki żołędziowej zależna jest od jej pochodzenia i wielkości dodatku.
5) Fermentacja ciasta i/lub mąki żołędziowej niweluje negatywne oddziaływanie mąki żołędziowej na cechy fizyczne wyrobów o strukturze gąbczastej takich jak pieczywo (np. chleb) i ciasta biszkoptowo-tłuszczowe (np. muffiny).
6) Dodatek i pochodzenie mąki żołędziowej determinują cechy sensoryczne produktów wytwarzanych z jej udziałem, w tym profil związków lotnych oraz cechy tekstury, co przekłada się na akceptację konsumencką.

7) Zastosowanie mąki żołędziowej w produkcji chleba oraz ciastek zwiększa zawartość wolnych związków fenolowych oraz pojemność przeciwutleniającą, a także wpływa na większe zróżnicowanie profilu kwasów fenolowych.
8) Wpływ mąki żołędziowej na zawartość bioaktywnych polifenoli oraz pojemność przeciwutleniającą zależny jest od pochodzenia mąki żołędziowej oraz zastosowanych procesów technologicznych, a zwłaszcza metody prowadzenia fermentacji ciasta i/lub mąki.
9) Kwas elagowy i kwas galusowy są dominującymi kwasami fenolowymi w mące żołędziowej, a zastosowanie fermentacji z udziałem mikroflory (mąki lub ciasta) wpływa na ich uwalnianie, którego tempo jest zależne od rodzaju mikroorganizmów prowadzących fermentację oraz czasu fermentacji.

Przedstawione wyniki badań mają charakter wdrożeniowy i wskazują na możliwość zastosowania mąki żołędziowej w produkcji piekarskiej i ciastkarskiej jako surowców wzbogacających. Należy jednak zauważyć, że pomimo potwierdzenia założonych hipotez badawczych, żołędzie i mąka z nich wytwarzana, szczególnie krajowego pochodzenia, pozostają stosunkowo mało poznanym surowcem. Z tego względu konieczne jest prowadzenie kolejnych badań naukowych, m.in. w celu scharakteryzowania surowca pod względem właściwości skrobi żołędziowej i jej wpływu na wartość wypiekową mąki, składu i możliwego prebiotycznego charakteru błonnika pokarmowego czy też zastosowania mikrobiologicznej (wyselekcjonowane szczepy) lub enzymatycznej obróbki mąki żołędziowej przed jej włączeniem do ciasta w celu zwiększenia biodostępności związków bioaktywnych, głównie związków fenolowych (w tym kwasu elagowego o udowodnionym korzystnym oddziaływaniu na organizm, m.in. przeciwnowotworowym) oraz poprawy cech sensorycznych wypieków.

# 8. BIBLIOGRAFIA


1. AACC Method 56-20.01, 2014. Hydration capacity of pregelatinized cereal products. *Approved Methods of Analysis*. AACC International, St. Paul, USA.
2. Abd-El-Khalek M., 2020. Combined effect of vital wheat gluten, ascorbic acid and emulsifier addition on the quality characteristics of whole grain barley bread. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences*, 2(2), 256-277.
3. Abdalla S., Pizzi A., Bahabri F., Ganash A., 2015. Analysis of valonia oak (*Quercus aegylops*) acorn tannin and wood adhesives application. *BioResources*, 10, 7165-7177.
4. Abdel-Tawwab M., Abdulrahman N.M., Ahmad, V.M., Ramzi D.O., Hassan B.R., 2022. Effects of dietary oak (*Quercus aegilops* L.) acorn on growth performance, somatic indices, and hemato-biochemical responses of common carp, *Cyprinus carpio* L., at different stocking densities. *Journal of Applied Aquaculture*, 34(4), 877-893.
5. Aguilera-Carbo A., Augur C., Prado-Barragan L.A., Favela-Torres E., Aguilar C.N., 2008. Microbial production of ellagic acid and biodegradation of ellagitannins. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 78, 189-199.
6. Ait Ameur L., Rega B., Giampaoli P., Trystram G., Birlouez-Aragon I., 2008. The fate of furfurals and other volatile markers during the baking process of a model cookies. *Food Chemistry*, 111(3), 758-763.
7. Ajo R.Y., 2018. Effect of acorn flour substitution on Arabic Bread properties. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(4), 913-919.
8. Ajo R., Al-Rousan W.M., Rababah T.M., Maghaydah S., Angor M.M., Alomari D., Bartkute-Norkuniene V., 2020. Physiochemical properties and nutritional profile of Mediterranean oak acorn. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 20, 16371-16385.
9. Akcan T., Gökçe R., Asensio M., Estévez M., Morcuende D., 2017. Acorn (*Quercus* spp.) as a novel source of oleic acid and tocopherols for livestock and humans: discrimination of selected species from Mediterranean forest. *Journal of Food Science and Technology*, 54(10), 3050-3057.
10. Akli A., Khellaf R., Alvarez E.T., Alia R., Kheloul L., Messaoudene M., 2022. Biometry of Acorn of the Putative Oak from Akfadou Forest in North Africa (Algeria). *Forestist*, 72(3), 212-224.

11. Al-Rousan W.M., Ajo T.Y., Al-Ismail K.M., Shaker R.R., Osaili T.M., 2013. Characterization of acorn fruit oils extracted from selected Mediterranean *Quercus* Species. *Grasas y Aceites*, 64(5), 554-560.
12. Ambrosewicz-Walacik M., Tańska M., Rotkiewicz D., Piętak A., 2016. Effect of various sodium chloride mass fractions on wheat and rye bread using different dough preparation techniques. *Food Technology & Biotechnology*, 54, 172-179.
13. Amina M., Djamel F., 2018. Effect of fermentation and germination treatments on physicochemical and sensory properties of enriched biscuits with acorn flour. *Annals. Food Science and Technology*, 19(4), 667-674.
14. Amina M., Djamel F., Djamel H., 2018. Influence of fermentation and germination treatments on physicochemical and functional properties of acorn flour. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 24(4), 719-726.
15. Arêas E.P.G., Cassiano M.M., 2001. Folding interpenetration in a gliadin model: the role of the characteristic octapeptide motif. *Biophysical Chemistry*, 90, 135-146.
16. Awad H.M., Boersma M.G., Boeren S., van Bladeren P.J., Vervoort J., Rietjens I.M., 2001. Structure− activity study on the quinone/quinone methide chemistry of flavonoids. *Chemical Research in Toxicology*, 14(4), 398-408.
17. Ayala-Aponte A.A., 2016. Thermodynamic properties of moisture sorption in cassava flour. *Dyna*, 83(197), 138-144.
18. Aydoğan S., Şahin M., Akçacik A.G., Hamzaoğlu S., Taner S., 2015. Relationships between farinograph parameters and bread volume, physicochemical traits in bread wheat flours. *Crop Sciences*, 3, 14-18.
19. Ayed C., Lim M., Nawaz K., Macnaughtan W., Sturrock C.J., Hill S.E., Linforth R., Fisk I.D., 2021. The role of sodium chloride in the sensory and physico-chemical properties of sweet biscuits. *Food Chemistry*, X9, 100115.
20. Babaei M., Borja Zamfir G.M., Chen X., Christensen H.B., Kristensen M., Nielsen J., Borodina I., 2020. Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for rosmarinic acid production. *ACS Synthetic Biology*, 9(8), 1978-1988.
21. Bainbridge, D.A. 1987. The use of acorns for food in California: past, present, future. W: Plumb T.R., Pillsbury N.H. (red.), *Proceedings of the symposium on multiple-use management of California's hardwood resources*. General Technical Report PSW-100. USDA, Berkeley, USA, 453–458.
22. Ballesteros D., Pritchard H.W., 2020. The cryobiotechnology of oaks: an integration of approaches for the long-term *ex situ* conservation of *Quercus* species. *Forests*, 11, 1281.

23. Bank Danych o Lasach, https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/lasy-na-swiecie, Lasy Państwowe, dostęp z dnia 19.04.2023 r.
24. Banu I., Vasilean I., Aprodu I., 2010. Effect of lactic fermentation on antioxidant capacity of rye sourdough and bread. *Food Science and Technology Research*, 16(6), 571-576.
25. Barbehenn R.V., Constabel C.P., 2011. Tannins in plant–herbivore interactions. *Phytochemistry*, 72(13), 1551-1565.
26. Barretto R., Buenavista R.M., Pandiselvam R., Siliveru K., 2022. Influence of milling methods on the flow properties of ivory teff flour. *Journal of Texture Studies*, 53(6), 820-833.
27. Belkova J., Rozkot M., Weisbauerova E., Truneckova J., 2023. Influence of feed substitution with acorns on fattening performance, carcass characteristics, and meat composition of Prestice Black-Pied pigs finished in a conventional indoor system. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2220182.
28. Beltrão Martins R., Gouvinhas I., Nunes M.C., Alcides Peres J., Raymundo A., Barros A.I.R.N.A., 2020. Acorn flour as a source of bioactive compounds in gluten-free bread. *Molecules*, 25(16), 3568.
29. Beltrão Martins R., Gouvinhas I., Nunes M.C., Ferreira L.M., Peres J.A., Raymundo A., Barros A.I.R.N.A., 2022a. Acorn flour from holm oak (*Quercus rotundifolia*): Assessment of nutritional, phenolic, and technological profile. *Current Research in Food Science*, 5, 2211-2218.
30. Beltrão Martins R., Garzón R., Peres J.A., Barros A.I.R.N.A., Raymundo A., Rosell C. M., 2022b. Acorn flour and sourdough: an innovative combination to improve gluten free bread characteristics. *European Food Research & Technology*, 248, 1691-1702.
31. Berski W., 2010. Wybrane właściwości fizykochemiczne skrobi wyizolowanych z polskich odmian i rodów owsa nagoziarnistego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 3(70), 76-87.
32. Berton B., Scher J., Villieras F., Hardy J., 2002. Measurement of hydration capacity of wheat flour: influence of composition and physical characteristics. *Powder Technology*, 128(2-3), 326-331.
33. Biel W., Jaroszewska A., Stankowski S., Sobolewska M., Kępińska-Pacelik J., 2021. Comparison of yield, chemical composition and farinograph properties of common and ancient wheat grains. *European Food Research and Technology*, 247, 1525-1538.
34. Bogoeva, A.L., Durakova A.G., 2020. Sorption characteristics of full-fatted grape seeds flour of Bulgarian origin. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100026.

35. Bolade M.K., Adeyemi I.A., Ogunsua A.O., 2009. Influence of particle size fractions on the physicochemical properties of maize flour and textural characteristics of a maize-based nonfermented food gel. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(3), 646-655.
36. Brunauer S., Emmet P.H., Teller E., 1938. Adsorption of gases in multilayer's. *Journal of the American Chemical Society*, 60, 309-319.
37. Buckton G., 1997. Characterization of small changes in the physical properties of powders of significance for dry powder inhaler formulations. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 26, 17-27.
38. Burlacu E., Nisca A., Tanase C., 2020. A comprehensive review of phytochemistry and biological activities of *Quercus* species. *Forests*, 11(9), 904.
39. Bursal E., Boğa, R., 2018. Polyphenols analysed by UHPLC-ESI-MS/MS and antioxidant activities of molasses, acorn and leaves of oak (*Quercus robur* subsp. *pedunculiflora*). *Progress in Nutrition*, 20(1), 167-175.
40. Cacak-Pietrzak G., Dziki D., Gawlik-Dziki U., Parol-Nadłonek N., Kalisz S., Krajewska A., Stępniewska S., 2023. Wheat Bread Enriched with Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) Pomace: Physicochemical Properties and Sensory Evaluation. *Applied Sciences*, 13(12), 6936.
41. Cacak-Pietrzak G., Sułek A., Wyzińska M., 2019. Evaluation the baking value of passage flours. *Research for Rural Development*, 2, 36-41.
42. Cantos E., Espín J.C., López-Bote C., de la Hoz L., Ordóñez J.A., Tomás-Barberán F.A., 2003. Phenolic compounds and fatty acids from acorns (*Quercus* spp.), the main dietary constituent of free-ranged Iberian pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(21), 6248-6255.
43. Ceglińska A., 2017. Znaczenie pieczywa w codziennym życiu człowieka. *Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula*, 54(3), 30-37.
44. Charef M., Yousfi M., Saidi M., Stocker P., 2008. Determination of the fatty acid composition of acorn (*Quercus*), *Pistacia lentiscus* seeds growing in Algeria. *Journal of American Oil Chemists' Society*, 85, 921-924.
45. Chirino E., Vilagrosa A., Hernández E.I., Matos A., Vallejo V.R., 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber L*. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *Forest Ecology and Management*, 256(4), 779-785.

46. Coelho M., Silva S., Rodríguez-Alcalá L.M., Oliveira A., Costa E.M., Borges A., Martins C., Rodrigues A.S., Pintado M.M.E., 2018. Quercus based coffee-like beverage: Effect of roasting process and functional characterization. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(1), 471-479.
47. Correia P.R., Leitão A.E., Beirão-da-Costa M.L., 2009. Effect of drying temperatures on chemical and morphological properties of acorn flours. *International Journal of Food Science and Technology,* 44(9), 1729-1736.
48. Correia P.R., Beirão-da-Costa M.L., 2011. Effect of drying temperatures on starch-related functional and thermal properties of acorn flours. *Journal of Food Science,* 76(2), 196-202.
49. Correia P.R., Nunes M.C., Beirão-da-Costa M.L., 2013. The effect of starch isolation method on physical and functional properties of Portuguese nut starches. II. *Q. rotundifolia* Lam. and *Q. suber* Lam. acorns starches. *Food Hydrocolloids,* 30(1), 448-455.
50. Cuq B., Dandrieu L.E., Cassan D., Morel M.H., 2006. Impact of particles characteristics and mixing conditions on wheat flour agglomeration behaviour. 5th World Congress of Particle Technology, Orlando, Florida
51. Czubaszek A., Wojciechowisz-Budzisz A., Spychaj R., Kawa-Rygielska J., 2021. Baking properties of flour and nutritional value of rye bread with brewer's spent grain. *LWT - Food Science and Technology*, 150, 111955.
52. Danielewicz W., Kiciński P., Antosz Ł., 2014. Turkey oak (*Quercus cerris* L.) in Polish forests. *Acta Scientiarum Polonorum – Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 13(2), 5-22.
53. Dapčević Hadnađev T., Pojić M., Hadnađev M., Torbica A., 2011. The role of empirical rheology in flour quality control. W: Akyar I. (red.), *Wide spectra of quality control*. IntechOpen, Londyn, 335-360.
54. Dapčević Hadnađev T., Stupar A., Stevanović D., Škrobot D., Maravić N., Tomić J., Hadnađev M., 2022. Ancient wheat varieties and sourdough fermentation as a tool to increase bioaccessibility of phenolics and antioxidant capacity of bread. *Foods*, 11(24), 3985.
55. Das A.K., Islam M.N., Faruk M.O., Ashaduzzaman M., Dungani R., 2020. Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South African Journal of Botany,* 135, 58-70.

56. Demirkesen-Bicak H., Arici M., Yaman M., Karasu S., Sagdic O., 2021. Effect of different fermentation condition on estimated glycemic index, in vitro starch digestibility, and textural and sensory properties of sourdough bread. *Foods*, 10(3), 514.
57. Denk T., Grimm G.W., Manos P.S., Deng M., Hipp A.L., 2017. An Updated Infrageneric Classification of the Oaks: Review of Previous Taxonomic Schemes and Synthesis of Evolutionary Patterns. W: Gil-Pelegrín E., Peguero-Pina J., Sancho-Knapik D. (red), *Oaks Physiological Ecology. Exploring the Functional Diversity of Genus Quercus L. Tree Physiology*. Springer, Cham, Szwajcaria, 13-38.
58. Drakula S., Novotni D., Mustač N.Č., Voučko B., Krpan M., Hruškar M., Ćurić D., 2021. Alteration of phenolics and antioxidant capacity of gluten-free bread by yellow pea flour addition and sourdough fermentation. *Food Bioscience*, 44, 101424.
59. Dupas-Langlet M., Meunier V., Pouzot M., Ubbink J., 2019. Influence of blend ratio and water content on the rheology and fragility of maltopolymer/maltose blends. *Carbohydrate Polymers*, 213, 147-158.
60. Eaton E.G.S.D.J., Caudullo G., Oliveira S., De Rigo D., 2016. *Quercus robur* and *Quercus petraea* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. W: San-Miguel-Ayanz J., de Rigo D., Caudullo G., Houston Durrant T., Mauri A. (red.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Public Office of the European Union, Luksemburg, Luksemburg, 162-163.
61. Erbas M., Ertugay M.F., Certel M., 2005. Moisture adsorption behaviour of semolina and farina. *Journal of Food Engineering*, 69, 191-198.
62. Espín J.C., García-Conesa M.T., Tomás-Barberán F., 2013. Biological significance of urolithins, the gut microbial ellagic acid-derived metabolites: The evidence so far. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013, 1-15.
63. Finnie S., Atwell W.A., 2016. Wheat Flour Handbook Series (2 ed.). AACC International Press, Waszyngton, USA.
64. Ferraz de Oliveira M.I.F., Machado M.G., D'Abreu M.C., 2012. Acorn chemical composition depending on shedding date and *Quercus* species. *Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires*, 101, 229-234.
65. García-Villalba R., Espín J.C., Tomás-Barberán F.A., 2016. Chromatographic and spectroscopic characterization of urolithins for their determination in biological samples after the intake of foods containing ellagitannins and ellagic acid. *Journal of Chromatography A*, 1428, 162-175.

66. Gea-Izquierdo G., Cañellas I., Montero G., 2006. Acorn production in Spanish holm oak woodlands. *Forest Systems*, 15(3), 339-354.
67. Giménez-Bastida J.A., Ávila-Gálvez M.Á., Espín J.C., González-Sarrías A., 2020. The gut microbiota metabolite urolithin A, but not other relevant urolithins, induces p53-dependent cellular senescence in human colon cancer cells. *Food Chemistry and Toxicology*, 139, 111260.
68. Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M., Archetti G., Rizzello C.G., 2019. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 103-113.
69. Gumul D., Ziobro R., Korus J., Kruczek M., 2021. Apple Pomace as a Source of Bioactive Polyphenol Compounds in Gluten-Free Breads. *Antioxidants*, 10, 1–15.
70. Gonzaga M., Batista M., Guiné R.P.F., Correia P., 2015. Development and characterization of wheat breads with acorn flour. *International Conference on Engineering*, Covilhă, Portugalia.
71. Górnaś P., 2019. Oak *Quercus rubra* L. and *Quercus robur* L. acorns as an unconventional source of gamma-and beta-tocopherol. *European Food Research and Technology*, 245(1), 257-261.
72. Guiné R.P.F., Matos M., Henriques C., Correia P., 2016. Preferences and consumer habits related to bread in the centre of Portugal. *Nutrition & Food Science*, 46(3), 306-320.
73. Gupta S., Sood M., Gupta N., Bandral J.D., Langeh A., 2022. Food browning, its type and controlling measures: A review article. *Chemical Science Review and Letters*, 11(44), 417-424.
74. Hager A.S., Wolter A., Jacob F., Zannini E., Arendt E.K., 2012. Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 239-247.
75. Hanson K.E., Bryant P.L., Painter A.M., Skibo J.M., 2019. Acorn processing and pottery use in the upper Great Lakes: an experimental comparison of stone boiling and ceramic technology. *Ethnoarchaeology*, 11(2), 170-185.
76. Hassanpour S., MaheriSis N., Eshratkhah B., 2011. Plants and secondary metabolites (Tannins): A Review. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 1(1), 47-53.
77. Heenan S.P., Dufour J.P., Hamid N., Harvey W., Delahunty C.M., 2009. Characterisation of fresh bread flavour: Relationships between sensory characteristics and volatile composition. *Food Chemistry*, 116(1), 249-257.

78. Hitl M., Brkić S., Kladar N., 2023. *In vitro* fermentation of rosmarinic acid and lemon balm (*Melissa officinalis* L., *Lamiaceae*) extract by probiotic microorganisms. *South African Journal of Botany*, 157, 251-257.
79. Hoeche U., Kelly A., Coci F., 2014. Acorn: Staple food from the past or novel food for the future? – An investigation into the desirability and acceptability of scorn flour products. *Dublin Gastronomy Symposium*, Dublin, Irlandia.
80. Hrušková M., Švec I., Kadlčíková I., 2019. Effect of chestnut and acorn flour on wheat/wheat-barley flour properties and bread quality. *International Journal of Food Studies*, 8, 41-57.
81. Hu X., Cheng L., Hong Y., Li Z., Li C., Gu Z., 2021. Combined effects of wheat gluten and carboxymethylcellulose on dough rheological behaviours and gluten network of potato–wheat flour-based bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 56, 4149-4158.
82. Huang W., Niu H., Li Z., Lin W., Gong G., Wang W., 2007. Effect of ellagitannin acyl hydrolase, xylanase and cellulase on ellagic acid production from cups extract of valonia acorns. *Process Biochemistry*, 42(9), 1291-1295.
83. Hunaefi D., Riedel H., Akumo D.N., Gruda N.S., Smetanska I., 2013. Effect of lactic acid bacteria fermentation on rosmarinic acid and antioxidant properties of *in vitro* shoot culture of *Orthosiphon aristatus* as a model study. *Food Biotechnology*, 27, 152-177.
84. Ilktac H.Y., Sadik M., Garipagaoglu M., 2021. Types of bread preferred by adult individuals and bread's place in daily nutrition. *Progress in Nutrition*, 23(3), e2021096.
85. Islam S., Yu Z., She M., Zhao Y., Ma W., 2019. Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(3), 279-287.
86. Jakobek L., 2015. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. *Food Chemistry*, 175, 556-567.
87. Jan S., Ambrose R.P.K., Saxena D.C., 2017. Effect of grinding action on the flowability of rice flour. *Food Measure*, 11, 801-811.
88. Javaid N., Shah M.A., Rasul A., Chauhdary Z., Saleem U., Khan H., Ahmed N., Uddin M.S., Mathew B., Behl T., Blundell R., 2021. Neuroprotective effects of ellagic acid in Alzheimer's disease: focus on underlying molecular mechanisms of therapeutic potential. *Current Pharmaceutical Design*, 27(34), 3591-3601.
89. Jurga R., 2005. Wpływ stopnia rozdrobnienia (granulacji) mąki na jej własności wypiekowe. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 12, 13.

90. Kang I., Buckner T., Shay N.F., Gu L., Chung S., 2016. Improvements in metabolic health with consumption of ellagic acid and subsequent conversion into urolithins: Evidence and mechanisms. *Advances in nutrition (Bethesda, Md)*, 7(5), 961-972.
91. Karabas H., 2013a. Biodiesel production from crude acorn (*Quercus frainetto* L.) kernel oil: An optimisation process using the Taguchi method. *Renewable Energy*, 53, 384-388.
92. Karabaş H., 2013b. Acorn (*Quercus frainetto* L.) kernel oil as an alternative feedstock for biodiesel production in Turkey. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(1), 01120.
93. Karabas H., 2014. The optimum production parameters of methyl ester from acorn kernel oil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2), 625-628.
94. Karimian M., Najafi R., Jaimand K., Hatami F., Abbasi N., Jalali Ghalousangh A., 2020. Extraction and Identification of phytochemicals in Iranian oak (Quercus brantii var. Persica) Collected in Arghavan Valley, Ilam County by HS-SPME and GC-MS. *Journal of Medicinal plants and By-product*, 9(Special), 81-86.
95. Kaur M., Kaushal P., Sandhu K.S., 2013. Studies on physicochemical and pasting properties of Taro (Colocasia esculenta L.) flour in comparison with a cereal, tuber and legume flour. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 94-100.
96. Kaya E., Kamalak A., 2012. Potential nutritive value and condensed tannin contents of acorns from different oak species. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 18(6), 1061-1066.
97. Kazimierska I., 2022. Jak zmieniły się zwyczaje żywieniowe Polaków w XXI wieku. *Kurier Medyczny*, 2, 34-35.
98. Khan A., Saini C.S., 2016. Effect of roasting on physicochemical and functional properties of flaxseed flour. *Cogent Engineering*, 3(1), 1145566.
99. Kim J.-M., Joo J-I., 2019. Quality characteristics of acorn bread added with milk. *Journal of the Korean Society of Food Culture*, 34(3), 343-352.
100. Kim S.H., Lee W.K., Choi C.S., Cho S.M., 2012. Quality characteristics of muffins with added acorn jelly powder and acorn ethanol extract powder. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 41(3), 369-375.
101. Kiss A.K., Piwowarski P., 2016. Ellagitannins, gallotannins and their metabolites – The contribution to the antiinflammatory effect of food products and medicinal plants. *Current Medicinal Chemistry*, 25(37), 4946-4967.

102. Koistinen V.M., Mattila O., Katina K., Poutanen K., Aura A.-M., Hanhineva K., 2018. Metabolic profiling of sourdough fermented wheat and rye bread. *Scientific Reports*, 8, 5684.
103. Koenig W.D., Knops J.M., 2014. Environmental correlates of acorn production by four species of Minnesota oaks. *Population Ecology*, 56(1), 63-71.
104. Konopka I., Tańska M., Faron A., Czaplicki S., 2014. Release of free ferulic acid and changes in antioxidant properties during the wheat and rye bread making process. *Food Science and Biotechnology*, 23, 831-840.
105. Korus J., Witczak M., Ziobro R., Juszczak L., 2015. The influence of acorn flour on rheological properties of gluten- free dough and physical characteristics of the bread. *European Food Research and Technology*, 240(6), 1135-1143.
106. Korus A., Gumul D., Krystyjan M., Juszczak L., Korus J., 2017. Evaluation of the quality, nutritional value and antioxidant activity of gluten-free biscuits made from corn – acorn flour or corn – hemp flour biscuits. *European Food Research and Technology*, 243(8), 1429-1438.
107. Kowalski S., Łukasiewicz M., Juszczak L., Kutyła-Kupidura E.M., 2013. Dynamics of 5-hydroxymethylfurfural formation in shortbreads during thermal processing. *Czech Journal of Food Sciences*, 31(1), 33-42.
108. Krawęcka A., Sobota A., Sykut-Domańska E., 2019. Functional cereal products in the diet for type 2 diabetes patients. *International Journal of Food Science*, 2019, 4012450.
109. Kunachowicz H., Przygoda B., Nadolna I., Iwanow K., 2018. Tabele składu i wartości odżywczej żywności (2 ed). PZWL, Warszawa, Polska.
110. Kyriakidou K., Mourtzinos I., Biliaderis C.G., Makris D.P., 2016. Optimization of a green extraction/inclusion complex formation process to recover antioxidant polyphenols from oak acorn husks (*Quercus robur*) using aqueous 2-hydroxypropyl-β-cyclodextrin/glycerol mixtures. *Environments*, 3(1), 3.
111. Landillon V., Cassan D., Morel M.H., Cuq B., 2008. Flowability, cohesive, and granulation properties of wheat powders. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 178-193.
112. Lassoued R., Abderrabba M., Mejri J., 2022. Comparative chemical composition of two *Quercus* species seeds growing in Tunisia. *South African Journal of Botany*, 146, 71-76.
113. Lei Y., Huang Y., Wang Y., He X., 2018. Potential anti-neuroinflammatory triterpenoids isolated from Chinese acorns (*Quercus serrata* var. *brevipetiolata*). *Journal of Functional Foods*, 50, 18-25.

114. Leonard W., Zhang P., Ying D., Adhikari B., Fang Z., 2021. Fermentation transforms the phenolic profiles and bioactivities of plant-based foods. *Biotechnology Advances*, 49, 107763.
115. León-Camacho M., Viera-Alcaide I., Vicario I.M., 2004. Acorn (*Quercus* spp.) fruit lipids: saponifiable and unsaponifiable fractions: a detailed study. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 81, 447-453.
116. Lewicki P.P., 1998. A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 21, 127-144.
117. Li S., Zhou Y., Liu M., Zhang Y., Cao S., 2015. Nutrient composition and starch characteristics of *Quercus glandulifera* Bl. seeds from China. *Food Chemistry*, 185, 371-376.
118. Limousin G., Gaudet J.P., Charlet L., Szenknect S., Barthe V., Krimissa M., 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*, 22, 249-275.
119. Lin Y., Lu Y., Song Z., Huang D., 2018. Characterizations of the endogenous starch hydrolase inhibitors in acorns of *Quercus fabri* Hance. *Food Chemistry*, 258, 111-117.
120. López-Hortas L., Falqué E., Domínguez H., Torres M.D., 2019. Microwave hydrodiffusion and gravity (MHG) extraction from different raw materials with cosmetic applications. *Molecules*, 25(1), 92.
121. Łuczaj Ł., 2011. Dziko rosnące rośliny jadalne użytkowane w Polsce od połowy XIX w. do czasów współczesnych. *Etnobiologia Polska*, 1, 57-125.
122. Łuczaj Ł., Adamczak A., Duda M., 2014. Tannin content in acorns (*Quercus* spp.) from Poland. *Dendrobiology*, 72, 103-111.
123. Makhlouf F., Squeo G., Barkat M., Trani A., Caponio F., 2018. Antioxidant activity, tocopherols and polyphenols of acorn oil obtained from *Quercus* species grown in Algeria. *Food Research International*, 114, 208-213.
124. Makhlouf F., Squeo G., Barkat M., Pasqualone A., Caponio F., 2019. Comparative study of total phenolic content and antioxidant properties of *Quercus*: flour and oil. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*, 3(5), 148-155.
125. Makhlouf F.Z., Squeo G., Difonzo G., Faccia M., Pasqualone A., Summo C., Barkat M., Caponio F., 2020. Effects of storage on the oxidative stability of acorn oils extracted from three different *Quercus* species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(1), 131-138.

126. Mamat H., Hill S.E., 2014. Effect of fat types on the structural and textural properties of dough and semi-sweet biscuit. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1998-2005.
127. Mancebo C.M. Picón J., Gómez M., 2015. Effect of flour properties on the quality characteristics of gluten free sugar-snap cookies. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 64(1), 264-269.
128. Manikantan M.R., Kingsly Ambrose R.P., Alavi S., 2015. Flow-specific physical properties of coconut flours. *International Agrophysics*, 29(4), 459-465.
129. Martín-Gómez A., Arroyo-Manzanares N., Rodríguez-Estévez V., Arce L., 2019. Use of a non-destructive sampling method for characterization of Iberian cured ham breed and feeding regime using GC-IMS. *Meat Science*, 152, 146-154.
130. Martínez M.M., Gómez M., 2017. Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking. *Journal of Food Engineering*, 197, 78-86.
131. Martins R.B., Nunes M.C., Ferreira L.M.M., Peres J.A., Barros A.I.R.N.A, Raymundo A., 2020. Impact of acorn flour on gluten-free dough rheology properties. *Foods*, 9(5), 560-574.
132. Masmoudi M., Besbes S., Bouaziz A., Khlifi M., Yahyaoui D., Attia H., 2020. Optimization of acorn (*Quercus suber* L.) muffin formulations: Effect of using hydrocolloids by a mixture design approach. *Food Chemistry*, 328, 127082.
133. Mathlouthi M., 2001. Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, 12(7), 409-417.
134. Mäkilä L., Laaksonen O., Alanne A.-L., Kortesniemi M., Kallio H., Yang B., 2016. Stability of hydroxycinnamic acid derivatives, flavonol glycosides, and anthocyanins in black currant juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(22), 4584-4598.
135. Mekki I., Smeti S., Hajji H., Yagoubi Y., Mahouachi M., Atti N., 2019. Effect of oak acorn (*Quercus ilex*) intake during suckling and fattening of Barbarine lambs on growth, meat quality and fatty acid profile. *Journal of Animal Feeding Science*, 28, 22-30.
136. Mezni F., Stiti B., Fkiri S., Ayari F., Slimane L.B., Ksouri R., Khaldi A., 2022. Phenolic profile and in vitro anti-diabetic activity of acorn from four African Quercus species (*Q. suber*, *Q. canariensis*, *Q. coccifera* and *Q. ilex*). *South African Journal of Botany*, 146, 771-775.
137. Migaskó H., Ecseri K., 2020. Significance of *Quercus* species in nutrition. *Gradus*, 7(1), 6-11.

138. Mildner-Szkudlarz S., Zawirska-Wojtasik R., Obuchowski W., Gośliński M., 2009. Evaluation of antioxidant activity of green tea extract and its effect on the biscuits lipid fraction oxidative stability. *Journal of Food Science*, 74(8), 362-370.
139. Milecka K., Kupryanowicz M., Makohonienko I., Okuniewska-Nowaczyk I., Nalepka D., 2004. *Quercus* L. – Oak. W: Ralska-Jasiewiczowa M., Latałowa, M., Wasylikowa K., Madeyska E., Wright J., Turner C. (red.), *Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps*. Wyd. Instytutu Botaniki im. Władysława Szafera Polskiej Akademii Nauk, Kraków, Polska, 189-198.
140. Minkowski K., Grzeskiewicz S., Jerzewska, M., 2011. Ocena wartości odżywczej olejów roślinnych o dużej zawartości kwasów linolenowych na podstawie składu kwasów tłuszczowych, tokoferoli i steroli. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 18(2), 124-135.
141. Mirza Alizadeh A., Peivasteh Roudsari L., Tajdar Oranj B., Beikzadeh S., Barani Bonab H., Jazaeri S., 2022. Effect of flour particle size on chemical and rheological properties of wheat flour dough. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(2), 682-694.
142. Molavi H., Keramat J., Raisee B., 2015. Evaluation of the cake quality made from acorn – Wheat flour blends as a functional food. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 5(2), 53-60.
143. Molina-García L., Martínez-Expósito R., Fernández-de Córdova M.L., Llorent-Martínez E.J., 2018. Determination of the phenolic profile and antioxidant activity of leaves and fruits of Spanish *Quercus coccifera*. *Hindawi Journal of Chemistry*, 2018, 1-10.
144. Moore M.M., Schobe T.J., Docker P., Arend E.K., 2004. Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters and breads. *Cereal Chemistry*, 81, 567-575.
145. Mota S., Pinto C., Cravo S., Rocha e Silva J., Afonso C., Sousa Lobo J.M., Tiritan M.E., Cidade H., Almeida I.F., 2022. *Quercus suber*: A Promising Sustainable Raw Material for Cosmetic Application. *Applied Sciences*, 12(9), 4604.
146. Mousavi B., Ghaderi S., Hesarinejad M.A., Pourmahmoudi A., 2021. Effect of varying levels of acorn flour on antioxidant, staling and sensory properties of Iranian toast. *International Journal of Food Studies*, 10(2), 322-333.
147. Nikolić N.Č., Orlovic S., Krstic B., Kevrešan Ž., 2006. Variability of acorn nutrient concentrations in pedunculate oak (*Quercus robur* L.) genotypes. *Journal of Forest Science*, 52(2), 51-60.

148. Nikolić N., Radulović N., Momcilović B., Nikolić G., Lazić M., Todorovic Z., 2008. Fatty acids composition and rheology properties of wheat and wheat and white or brown rice flour mixture. *European Food Research and Technology*, 227, 1543-1548.
149. Nikolić N.Č., Stojanović J.S., Stojanović G.S., Mastilović J.S., Karabegović I.T., Petrović G.M., Lazić M.L., 2013. The effect of some protein rich flours on farinograph properties of the wheat flour. *Advanced Technologies*, 2(1), 20-25.
150. Nogala-Kalucka M., Siger A., 2011. Tokochromanole-bioaktywne związki roślin oleistych. Od biosyntezy do biomarkerów. *Rośliny Oleiste-Oilseed Crops*, 32(1), 9-28.
151. Nourmoradi H., Moghadam K.F., Jafari A., Kamarehie B., 2018. Removal of acetaminophen and ibuprofen from aqueous solutions by activated carbon derived from *Quercus Brantii* (Oak) acorn as a low-cost biosorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(6), 6807-6815.
152. Ocieczek A., 2012. Sorption properties of various types of commercial wheat flour. *Acta Agrophysica*, 19(2), 365-377.
153. Ocieczek A., Ruszkowska M., 2018. Porównanie właściwości sorpcyjnych ziarna wybranych odmian komosy ryżowej (*Chenopodium quinoa* willd). *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 3(116), 71-88.
154. Olędzki R., Walaszczyk E., 2020. Bionanoceluloza--właściwości, pozyskiwanie i perspektywy zastosowania w przemyśle spożywczym. *Postępy Mikrobiologii-Advancements of Microbiology*, 59(1), 87-102.
155. Oracz J., Żyżelewicz D., Pacholczyk-Sienicka B., 2022. UHPLC-DAD-ESI-HRMS/MS profile of phenolic compounds in northern red oak (*Quercus rubra* L., syn. *Q. borealis* F. Michx) seeds and its transformation during thermal processing. *Industrial Crops and Products*, 189, 115860.
156. Ou J., Wang M., Zheng J., Ou S., 2019. Positive and negative effects of polyphenol incorporation in baked foods. *Food Chemistry*, 284, 90-99.
157. Overstreet S., Choi S., Park C.R., Lee D., Gradziel T., 2015. Acorn production and utilization in the Republic of Korea. *California Oak Symposium: Managing Oak Woodlands in a Dynamic World*, Ambler, USA.
158. O'Reilly-Wapstra J.M., Miller A.M., Hamilton M.G., Williams D., Glancy-Dean N., Potts B.M., 2013. Chemical Variation in a Dominant Tree Species: Population Divergence, Selection and Genetic Stability across Environments. *PLoS ONE, 8*(3), e58416.

159. Özcan T., Bayçu G., 2005. Some elemental concentrations in the acorns of Turkish *Quercus* L. (*Fagaceae*) taxa. *Pakistan Journal of Botany*, 37(2), 361-371.
160. Özcan T., 2006. Total protein and amino acid compositions in the acorns of Turkish *Quercus* L. taxa. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 53, 419-429.
161. Özcan T., 2007. Characterization of Turkish *Quercus* L. taxa based on fatty acid compositions of the acorns. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84(7), 653-662.
162. Özcan T., 2008. Fatty acid composition in the acorn oil of *Quercus rubra* L. cultivated in NW Turkey. *Journal of Applied Biological Sciences*, 2(3), 51-55.
163. Özcan M.M., Sağlam C., Harmankaya M., 2012. Monitoring of heavy metal and minerals in different parts of oak acorn (Quercus spp.). *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 1(3), 77-81.
164. Paderewski M., 1999. Procesy adsorpcyjne w inżynierii chemicznej. WNT, Warszawa, Polska, 1-84.
165. Pałacha Z., 2007. Badanie stanu wody w matrycy modelowej i uzyskanej jabłek z wykorzystaniem metody opartej na izotermach sorpcji oraz kalorymetrycznej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, Polska.
166. Pałacha Z., Meus K., 2009. Wpływ temperatury na właściwości sorpcyjne nasion i mąki amarantusa. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 41-48.
167. Pałacha Z., Rasiński P., 2020. Właściwości sorpcyjne wybranych mąk niechlebowych®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 20-27.
168. Pantera A., Papadopoulos A., Papanastasis V.P., 2018. Valonia oak agroforestry systems in Greece: an overview. *Agroforestry Systems*, 92(4), 921-931.
169. Papoti W.T., Kizaki N., Skaltsi A., Karayannakidis P.D., Papageorgiou M., 2018. The phytochemical rich potential of acorn (*Quercus aegilops*) products and by products. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 819-828.
170. Park J.-I., Joo J.-I., Kim J.-M., 2017. Changes in the quality changes of bread added with acorn flour during the storage periods. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 27(5), 529-539.
171. Parsaei M., Goli M., Abbasi H., 2018. Oak flour as a replacement of wheat and corn flour to improve biscuit antioxidant activity. *Food Science and Nutrition*, 6(2), 253-258.
172. Pasqualone A., Makhlouf F.Z., Barkat M., Difonzo G., Summo C., Squeo G., Caponio F., 2019. Effect of acorn flour on the physico-chemical and sensory properties of biscuits. *Heliyon*, 5(8), e02242.

173. Pasukamonset P., Pumalee T., Sanguansuk N., Chumyen C., Wongvasu P., Adisakwattana S., Ngamukote S., 2018. Physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of sponge cakes fortified with *Clitoria ternatea* extract. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8), 2881-2889.
174. Pejcz E., Spychaj R., Gil Z., 2020. Technological methods for reducing the content of fructan in rye bread. *European Food Research and Technology*, 246, 1839-1846.
175. Pejcz E., Lachowicz-Wiśniewska S., Nowicka P., Wojciechowicz-Budzisz A., Spychaj R., Gil Z., 2021. Effect of inoculated lactic acid fermentation on the fermentable saccharides and polyols, polyphenols and antioxidant activity changes in wheat sourdough. *Molecules*, 26(14), 4193.
176. Pignone D., Laghetti G., 2010. On sweet acorn (*Quercus* spp.) cake tradition in Italian cultural and ethnic islands. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 57(8), 1261-1266.
177. Pinna C., 2013. Acorn bread: A traditional food of the past in Sardinia (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 14(3), S71-S74.
178. Pleszczyńska M., Szczodrak J., 2005. Taniny i ich rozkład enzymatyczny. *Biotechnologia*, 1(68), 152-165.
179. Polska Norma PN-A-79011-4:1998. Koncentraty spożywcze - Metody badań - Oznaczanie zawartości tłuszczu. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
180. Polska Norma PN-A-79011-9:1998. Koncentraty spożywcze - Metody badań - Oznaczanie kwasowości ogólnej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
181. Polska Norma PN-A-79011-15:1998. Koncentraty spożywcze - Metody badań - Oznaczanie zawartości błonnika pokarmowego. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
182. Polska Norma PN-EN ISO 2171:2010. Ziarno zbóż, nasiona roślin strączkowych i ich przetwory - Oznaczanie zawartości popiołu metodą spalania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
183. Polska Norma PN-EN ISO 3093:2010. Pszenica, żyto i mąki z nich uzyskane, pszenica durum i semolina - Oznaczanie liczby opadania metodą Hagberga-Pertena. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
184. Polska Norma PN-EN ISO 5529:2010. Pszenica - Oznaczanie wskaźnika sedymentacyjnego - Test Zeleny'ego. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
185. Polska Norma PN-ISO 712:2012. Ziarno zbóż i przetwory zbożowe - Oznaczanie wilgotności - Metoda odwoławcza. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.

186. Polska Norma PN-ISO 20483:2014-02. Ziarno zbóż i nasiona roślin strączkowych - Oznaczanie zawartości azotu i przeliczanie na zawartość białka - Metoda Kjeldahla. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
187. Polska Norma PN-EN ISO 5530-1:2015-01. Mąka pszenna - Fizyczne właściwości ciasta - Część 1: Oznaczanie wodochłonności i właściwości reologicznych za pomocą farinografu. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
188. Polska Norma PN-EN ISO 5530-2:2015-01. Mąka pszenna - Fizyczne właściwości ciasta - Część 2: Oznaczanie właściwości reologicznych za pomocą ekstensografu. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
189. Polska Norma PN-EN ISO 21415-2:2015-12. Pszenica i mąka pszenna - Ilość glutenu - Część 2: Oznaczanie glutenu mokrego i indeksu glutenu za pomocą urządzeń mechanicznych. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
190. Polska Norma PN-EN ISO 7973:2016-01. Ziarno zbóż i przetwory zbożowe - Oznaczanie lepkości mąki - Metoda z zastosowaniem amylografu. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, Polska.
191. Porretta S., 2021. Food Development: The Sensory & Consumer Approach. W: Porretta S., Moskowitz H., Gere H. (red.), *Consumer-based New Product Development for the Food Industry*. Royal Society of Chemistry, Londyn, Wielka Brytania, 3-20.
192. Pourhashemi M., Panahi P., Zandebasiri M., 2013. Application of visual surveys to estimate acorn production of Brants oak (*Quercus brantii* Lindl.) in northern Zagros Forests of Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 11(1), 85-95.
193. Puerta P., Carrillo E., Badia-Olmos C., Laguna L., Rosell C.M., Tárrega A., 2022. Coeliac consumers' expectations and eye fixations on commercial gluten-free bread packages. *LWT – Food Science and Technology*, 163, 113622.
194. Pugliese C., Sirtori F., Ruiz J., Martin D., Parenti S., Franci O., 2009. Effect of pasture on chestnut or acorn on fatty acid composition and aromatic profile of fat of Cinta Senese dry-cured ham. *Grasas y Aceites*, 60(3), 271-276.
195. Purabdolah H., Sadeghi A., Ebrahimi M., Kasheninejad M., Tabarestani H.S., Mohamadzadeh J., 2020. Techno-functional properties of the selected antifungal predominant LAB isolated from fermented acorn (*Quercus persica*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1754-1764.
196. Purohit S.R., Rao P.S., 2017. Modelling and analysis of moisture sorption isotherm of raw and pregelatinized rice flour and its crystalline status prediction. *Food Analytical Methods*, 10(6), 1914-1921.

197. Rababah T.M., Ereifej K.I., Al-Mahasneh M.A., Alhamad M.N., Alrababah M.A., Muhammad A.H., 2008. The physicochemical composition of acorns for two Mediterranean *Quercus* species. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 4(2), 131-137.
198. Raeker M.Ö., Gaines C.S., Finney P.L., Donelson T., 1998. Granule size distribution and chemical composition of starches from 12 soft wheat cultivars. *Cereal Chemistry*, 75(5), 721-728.
199. Rakić S., Povrenović D., Tešewić V., Simić M., Maletić R., 2006. Oak acorn, polyphenols and antioxidants activity in functional food. *Journal of Food Engineering*, 74, 416-423.
200. Rakić S., Petrowić S., Kukić J., Jadranin M., Tešewić V., Povrenović D., Šiler-Marinković S., 2007. Influence of thermal treatment on phenolic compounds and antioxidant properties of oak acorns from Serbia. *Food Chemistry*, 104(2), 830-834.
201. Rashid R.M.S., Sabir D.A., Hawramee O.K., 2014. Effect of sweet acorn flour of common oak (*Quercus aegilops* L.) on locally Iraqi pastru (kulicha) products. *Journal of Zankoy Sulaimani – A Special Issue*, 16, 244-249.
202. Reddy V., Urooj A., Kumar A., 2005. Evaluation of antioxidant activity of some plant extracts and their application in biscuits. *Food Chemistry*, 90, 317-321.
203. Rodríguez-Estévez V., Sánchez-Rodríguez M., Arce C.R., García A.M., Perea J.M., Gustavo Gómez-Castro A.G., 2012. Consumption of acorns by finishing Iberian pigs and their function in the conservation of the dehesa agroecosystem. W: Kaonga M. (red.) *Agroforestry for biodiversity and ecosystem services*. IntechOpen, Londyn, Wielka Brytania.
204. Roman-Gutierrez A., Guilbert S., Cuq B., 2002. Distribution of water between wheat flour components: A dynamic water vapour adsorption study. *Journal of Cereal Science*, 36, 347-355.
205. Romankiewicz D., Cacak-Pietrzak G., Kluczykow M., 2015. Jakość pieczywa pszennego z dodatkiem zakwasów. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 581, 63-72.
206. Ruszkowska M. 2012. Właściwości sorpcyjne mąk przeznaczonych do wypieku chleba w warunkach domowych. *Acta Agrophysica*, 19(1), 111-121.
207. Ruszkowska M., 2018. Jakość ekstrudatów kukurydzianych wzbogacanych spiruliną i chlorellą. Wydawnictwo Uniwersytetu Morskiego, Gdynia, Polska.
208. Ruszkowska M., Wiśniewska A., 2017. Ocena wybranych napojów roślinnych w proszku – charakterystyka właściwości fizykochemicznych. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 99, 103-113.

209. Rybicka I., Gliszczyńska-Świgło A., 2017a. Minerals in grain gluten – free products. The content of calcium, potassium, magnesium, sodium, copper, iron, manganese and zinc. *Journal of Food Composition and Analysis*, 59, 61-67.
210. Rybicka I., Gliszczyńska-Świgło A., 2017b. Gluten-Free flours from different raw materials as the source of vitamin $B_1$, $B_2$, $B_3$ and $B_6$. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 63(2), 125-132.
211. Saad Mohamad M., Gaiani C., Scher J., Cuq B., Ehrhardt J.J., Desobry S., 2009. Impact of regrinding on hydration properties and surface composition of wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 49, 134-140.
212. Sacchelli S., Cavuta T., Borghi C., Cipollaro M., Fratini R., Bernetti I., 2021. Financial Analysis of Acorns Chain for Food Production. *Forests*, 12(6), 784.
213. Saha S., Kuehne C., Bauhus J., 2017. Lessons learned from oak cluster planting trials in central Europe. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(2), 139-148.
214. Saka M., Özkaya B., Saka İ., 2021. The effect of bread-making methods on functional and quality characteristics of oat bran blended bread. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, 100439.
215. Sales-Campos H., Reis de Souza P., Crema Peghini B., Santana da Silva J., Ribeiro Cardoso C., 2013. An overview of the modulatory effects of oleic acid in health and disease. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 13(2), 201-210.
216. Samborska K., Choromanska A., Witrowa-Rajchert D., Bakier S., 2011. Suszenie rozpyłowe miodu pszczelego z maltodekstryną®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 21(1), 19-23.
217. Sardão R., Alexandre E., Amaral R., Saraiva J.A., Pintado M., 2019. Effect of high pressure processing on a functional acorn beverage. XXVI Encontro Nacional da Sociedade Portuguesa de Química, Aveiro, Portugalia.
218. Sato Y., Wada Y., Higo A., 2010. Relationship between monolayer and multilayer water contents, and involvement in gelatinization of baked starch products. *Journal of Food Engineering*, 96, 172-178.
219. Sawicki A., 2011. Dęby – drzewa królewskie. *Poznajmy Las*, 4, 8-9.
220. Seçmeler Ö., Galanakis C.M., 2019. Olive fruit and olive oil. W: Galanakis C.M. (red.), *Innovations in Traditional Foods*. Woodhead Publishing, Cambridge, Wielka Brytania, 193-220.

221. Sedej I., Mandić A., Sakač M., Mišan A., Tumbas V., 2010. Comparison of antioxidant components and activity of buckwheat and wheat flours. *Cereal Chemistry*, 87(5), 387-392.
222. Sekeroglu N., Ozkutlu F., Kilic E., 2017. Mineral composition of acorn coffees. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 51(3), S504-S507.
223. Serrano J., Puupponen-Pimiä R., Dauer A., Aura A.M., Saura-Calixto F., 2009. Tannins: current knowledge of food sources, intake, bioavailability and biological effects. *Molecular Nutrition & Food Research*, 53(S2), S310-S329.
224. Sereti V., Lazaridou A., Biliaderis C. G., Valamoti S. M., 2021. Reinvigorating Modern Breadmaking Based on Ancient Practices and Plant Ingredients, with Implementation of a Physicochemical Approach. *Foods*, 10, 789.
225. Setti C., Bouras A.D., Meziane M., Bouderoua K., Setti H., 2020. Antioxidant and antibacterial activities of green oak acorn (*Quercus ilex*) from Algeria. *South Asian Journal of Experimental Biology*, 10(5), 285-291.
226. Sharma K., Kumar V., Kaur J., Tanwar B., Goyal A., Sharma R., Gat J., Kumar A., 2021. Health effects, sources, utilization and safety of tannins: A critical review. *Toxin Reviews*, 40(4), 432-444.
227. Shiri A., Ehrampoush M.H., Yasini Ardakani S.A., Shamsi F., Mollakhalili-Meybodi N., 2021. Technological characteristics of inulin enriched gluten-free bread: Effect of acorn flour replacement and fermentation type. *Food Science & Nutrition*, 9, 6139-6151.
228. Shishehbor F., Salimi Z., Veissi M., Malehi A.S., Shiri-Nasab M., Helli B., 2020. Effect of oak flour on glycemic index and satiety index of white bread. *Iranian Red Crescent Medical Journal*, 22(1), e95552.
229. Silva S., Costa E.M., Borges A., Carvalho A.P., Monteiro M.J., Pintado M.M.E., 2016. Nutritional characterization of acorn flour (a traditional component of the Mediterranean gastronomical folklore). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(3), 584-588.
230. Singh J., Singh N., Sharma T., Saxena S., 2003. Physicochemical, rheological and cookie making properties of corn and potato flours. *Food Chemistry*, 83, 387-393.
231. Skendi A., Mouselemidou P., Papageorgiou M., Papastergiadis E., 2018. Effect of acorn meal-water combinations on technological properties and fine structure of gluten-free bread. *Food Chemistry*, 253, 119-126.
232. Skrajda-Brdak M., Konopka I., Tańska M., Czaplicki S., 2019. Changes in the content of free phenolic acids and antioxidative capacity of wholemeal bread in relation to cereal

species and fermentation type. *European Food Research and Technology*, 245, 2247-2256.

233. Smeriglio A., Barreca D., Bellocco E., Trombetta D., 2017. Proanthocyanidins and hydrolysable tannins: occurrence, dietary intake and pharmacological effects. *British Journal of Pharmacology*, 174(11), 1244-1262.
234. Sobczyk A., Pycia K., Jaworska G., Kaszuba J., 2017. Comparison of fermentation strength of the flours obtained from the grain of old varieties and modern breeding lines of spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, e13293.
235. Starowicz M., Zieliński H., 2019. How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? *Food Reviews International*, 35(8), 707-725.
236. Stavi I., Thevs N., Welp M., Zdruli P., 2022. Provisioning ecosystem services related with oak (*Quercus*) systems: a review of challenges and opportunities. *Agroforestry Systems*, 96, 293-313.
237. Sujka K., Koczoń P., Ceglińska A., Reder M., Ciemniewska-Żytkiewicz H., 2017. The application of FT-IR spectroscopy for quality control of flours obtained from polish producers. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2017, 4315678.
238. Szewczyk W., Kuzminski R., 2009. Rola czynników środowiskowych w zamieraniu drzewostanów dębowych. W: Konnenberg K., Szramka H. (red.), *Zarządzanie Ochroną Przyrody w Lasach*, Wyższa Szkoła Zarządzania Środowiskiem w Tucholi, Tuchola, Polska.
239. Śmiałek E., Gutkowska K., 2017. Kuchnia molekularna i jej możliwości rozwoju w Polsce®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, (1), 89-96.
240. Świtalski M., Ruszkowska M., Kamińska M., 2021. Ocena wybranych właściwości fizykochemicznych handlowych odżywek białkowych. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 28(3), 31-45.
241. Šálková T., Divišová M., Kadochová Š., Delawská K., Kadlčková E., Němečková L., Pokorná K., Voska V., Žemličková A., 2011. Acorns as a food resource. An experiment with acorn preparation. *Interdisciplinaria Archaeologica Natural Sciences in Archaeology*, 2(2), 133-141.
242. Švec I., Hrušková M., Kadlčíková I., 2018. Features of flour composites based on the wheat or wheat-barley flour combined with acorn and chestnut. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 10(1), 89-97.

243. Taib M., Bouyazza L., Lyoussi B., 2020. Acorn oil: Chemistry and functionality. *Journal of Food Quality*, 2020, 8898370.
244. Taib M., Bouyazza L., 2021. Composition, physicochemical properties, and uses of Acorn starch. *Journal of Chemistry*, 2021, 1-9.
245. Tantray Y. R., Wani M. S., Hussain A., 2017. Genus Quercus: an overview. International *Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6(8), 1880-1886.
246. Tańska M., Rotkiewicz D., 2011. Jakość tłuszczu nasion oleistych zastosowanych do produkcji wybranych rodzajów pieczywa. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 18(5), 62-74.
247. Tejerina D., García-Torres S., de Vaca M.C., Vázquez F.M., Cava R., 2011. Acorns (*Quercus rotundifolia* Lam.) and grass as natural sources of antioxidants and fatty acids in the "montanera" feeding of Iberian pig: Intra-and inter-annual variations. *Food Chemistry*, 124(3), 997-1004.
248. Thakur A., Sharma V., Thakur A., 2019. An overview of anti-nutritional factors in food. *International Journal of Chemical Studies*, 7(1), 2472-2479.
249. Torabi S., Mohtarami F., Dabbagh Mazhary M.R., 2020. The influence of acorn flour on physicochemical and sensory properties of gluten free biscuits. *Food Science and Technology*, 16(97), 171-181.
250. Torbica A., Belović M., Popović L., Čakarević J., Jovičić M., Pavličević J., 2021. Comparative study of nutritional and technological quality aspects of minor cereals. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 311-322.
251. Troadec R., Nestora S., Niquet-Léridon C., Marier D., Jacolot P., Sarron E., Regnault S., Anton P.M., Jouquand C., 2022. Effect of leavening agent on Maillard reaction and the bifidogenic effect of traditional French bread. *Food Chemistry*, 393, 133387.
252. Ureta M.M., Olivera D.F., Salvadori V.O., 2014. Quality attributes of muffins: Effect of baking operative conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 463-470.
253. Valero Galván J., Jorrin Novo J.J., Cabrera A.G., Ariza D., García-Olmo J., Cerrillo R.M.N., 2012. Population variability based on the morphometry and chemical composition of the acorn in Holm oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota* [Desf.] Samp.). *European Journal of Forest Research*, 131, 893-904.
254. van der Sman R.G.M., 2021. Thermodynamic description of the chemical leavening in biscuits. *Current Research in Food Science*, 4, 191-199.
255. Villar-Salvador P., Planelles R., Enrıquez E., Rubira J.P., 2004. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships

in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *Forest Ecology and Management*, 196(2-3), 257-266.

256. Vinha A.F., Barreira J.C., Costa A.S., Oliveira M.B.P., 2016a. A new age for *Quercus* spp. fruits: review on nutritional and phytochemical composition and related biological activities of acorns. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 947-981.
257. Vinha A.F., Costa A.S.G., Barreira J.C., Pacheco R., Oliveira M.B.P., 2016b. Chemical and antioxidant profiles of acorn tissues from *Quercus* spp.: Potential as new industrial raw materials. *Industrial Crops and Products*, 94, 143-151.
258. Wang Y., Xu C., Wang Q., Jiang Y., Qin L., 2023. Germplasm Resources of Oaks (*Quercus* L.) in China: Utilization and Prospects. *Biology*, 12, 76.
259. Wirkijowska A., Sobota A., Zarzycki P., Sykut-Domańska E., Teterycz D., 2018. Effect of addition of barley wholemeal with different dietary fibre content on wheat bread quality. *Polish Journal of Agronomy*, 34, 44-51
260. Xu D., Zhang Y., Tang K., Hu Y., Xu X., Gänzle M.G., 2019. Effect of mixed cultures of yeast and lactobacilli on the quality of wheat sourdough bread. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2113.
261. Yang Y., Zhou T., Duan D., Yang J., Feng L., Zhao G., 2016. Comparative analysis of the complete chloroplast genomes of five *Quercus* species. *Frontiers in Plant Science*, 7, 959.
262. Zarroug Y., Boulares M., Mejri J., Slimi B., Hamdaoui G., Djebi S., Saidi F., Nasri H., Sfayhi D.T., Kharrat M., 2020. Extraction and characterization of Tunisian Quercus ilex starch and its effect on fermented dairy product quality. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 8868673.
263. Zdybel B., Różyło R., Sagan A., 2019. Use of a waste product from the pressing of chia seed oil in wheat and gluten-free bread processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(8), e14002.
264. Zhang D., Tan B., 2021. Effects of different solid-state fermentation ratios of *S. cerevisiae* and *L. plantarum* on Physico-chemical properties of wheat bran and the quality of whole wheat bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(11), 4551-4560.
265. Zhou P., Yue C., Zhang Y., Li Y., Da X., Zhou X., Ye L., 2022. Alleviation of the byproducts formation enables highly efficient biosynthesis of rosmarinic acid in *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(16), 5077-5087.

266. Ziobro R., Ivanišová E., Bojňanská T., Gumul D., 2022. Retention of Antioxidants from Dried Carrot Pomace in Wheat Bread. *Applied Sciences-Basel*, 12, 1–13.
267. Zocchi D.M., Bondioli C., Hamzeh Hosseini S., Miara M.D., Musarella C.M., Mohammadi D., Manduzai A.K., Issa K.D. Sulaiman N., Khatib C., Ahmed H.M., Faraj T.A., Amin H.I.M. Hussain F.I.S., Faiz A., Pasqualone A., Heinrich F., Fontefrancesko M.F. Pieroni A., 2022. Food Security beyond Cereals: A Cross-Geographical Comparative Study on Acorn Bread Heritage in the Mediterranean and the Middle East. *Foods*, 11(23), 3898.

Strony internetowe:

1. https://darynatury.pl/
2. https://www.oakmeal.com/
3. https://www.zelod.si/
4. https://terrius.pt
5. https://biowebstore.scontrinoshop.com/; https://www.naturkraftwerke.de/

# 9. SPIS TABEL I RYSUNKÓW

## Spis tabel:

**Tabela 1.** Podstawowy skład chemiczny żołędzi różnych gatunków dębów.....15
**Tabela 2.** Zawartość składników bioaktywnych w żołędziach różnych gatunków. .....17
**Tabela 3.** Wykorzystanie żołędzi w produkcji spożywczej i niespożywczej. .....23
**Tabela 4.** Skład recepturowy wypiekanego chleba.....34
**Tabela 5.** Wpływ procesów przetwarzania na właściwości mąki żołędziowej. Opracowanie własne na podstawie danych z **publikacji P1**. .....56
**Tabela 6.** Porównanie składu chemicznego mąki żołędziowej i typowych mąk zbożowych. Opracowanie własne na podstawie danych z **publikacji P1**.....57
**Tabela 7.** Porównanie składu chemicznego mąki żołędziowej i typowych mąk zbożowych. Opracowanie własne na podstawie danych z **publikacji P1**.....60
**Tabela 8.** Skład chemiczny i pojemność przeciwutleniająca mąki żołędziowej polskiej i greckiej oraz mąk zbożowych: pszennej i żytniej. .....63
**Tabela 9.** Cechy fizyczne mąki żołędziowej polskiej i greckiej.....65
**Tabela 10.** Aktywność wody w mąkach żołędziowych przechowywanych w środowisku o aktywności wody $a_w$ = 0,07-0,92. .....69
**Tabela 11.** Parametry równania BET.....70
**Tabela 12.** Charakterystyka strukturalna badanych produktów oszacowana na podstawie parametrów równania BET.....72
**Tabela 13.** Właściwości fermentograficzne mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych.....73
**Tabela 14.** Właściwości amylograficzne mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych. .....74
**Tabela 15.** Ocena farinograficzna mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych. .....76
**Tabela 16.** Ocena ekstensograficzna mąki pszennej (próbka kontrolna), mąki żołędziowej oraz mieszanek pszenno-żołędziowych. .....78
**Tabela 17.** Właściwości technologiczne ciasta i chleba pszennego bez (próbka kontrolna) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej oraz glutenu pszennego. .....80
**Tabela 18.** Barwa chleba pszennego bez (próbka kontrolna) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej oraz glutenu pszennego.....84

**Tabela 19.** Cechy jakości technologicznej chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej. .....88
**Tabela 20.** Charakterystyka barwy skórki i miękiszu (model CIEL*a*b*) chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej. .....91
**Tabela 21.** Ocena sensoryczna (metoda 5-punktowa) chlebów pszennych i żytnich bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej. .....98
**Tabela 22.** Zawartość wolnych fenoli ogółem (TFP) i wolnych kwasów fenolowych oraz pojemność przeciwutleniająca (AC) w chlebie pszennym i żytnim bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej. .....103
**Tabela 23.** Wpływ metody prowadzenia ciasta i dodatku mąki żołędziowej na analizowane cechy chleba pszennego i żytniego. .....109
**Tabela 24.** Charakterystyka właściwości fizycznych muffinów pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej. .....117
**Tabela 25.** Charakterystyka sensoryczna muffinów pszennych bez oraz z mąką żołędziową. .....119
**Tabela 26.** Zawartość wolnych fenoli ogółem (TFP) i flawonoidów oraz pojemność przeciwutleniająca (AC) muffinów pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej. .....123
**Tabela 27.** Zawartość wolnych kwasów fenolowych w muffinach pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej. .....126
**Tabela 28.** Wpływ metody i czasu fermentacji mąki żołędziowej oraz dodatku fermentowanej mąki żołędziowej na analizowane cechy muffinów. .....128
**Tabela 29.** Właściwości fizyczne (barwa i tekstura: twardość i kruchość) ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych bez oraz z mąką żołędziową. .....132
**Tabela 30.** Charakterystyka sensoryczna pszennych i bezglutenowych ciastek kruchych bez oraz z mąką żołędziową. .....137
**Tabela 31.** Charakterystyka zidentyfikowanych związków lotnych w badanych ciastkach kruchych i ich pole powierzchni w próbkach kontrolnych (bez dodatku mąki żołędziowej) oraz próbkach z mąką żołędziową. .....143
**Tabela 32.** Wpływ pochodzenia i dodatku mąki żołędziowej na analizowane właściwości ciastek kruchych. .....145

## Spis rysunków:

**Rysunek 1.** Rozmieszczenie dębów na świecie, z podziałem na podrodzaje i sekcje. .....10
**Rysunek 2.** Klasyfikacja taksonomiczna gatunku *Quercus*. ..... 11
**Rysunek 3.** Rozmieszczenie dębów w Polsce: A – dąb bezszypułkowy (*Q. petraea*); B – dąb szypułkowy (*Q. robur*). .....12
**Rysunek 4.** Zróżnicowanie gatunkowe dębów na świecie.....13
**Rysunek 5.** Różnice morfologiczne liści i żołędzi różnych gatunków dębów. ..... 14
**Rysunek 6**. Schemat technologiczny produkcji mąki żołędziowej.....27
**Rysunek 7**. Dostępne na rynku mąki żołędziowe: A – polska; B – grecka; C – słoweńska; D – portugalska; E – włoska; F – niemiecka. .....28
**Rysunek 8.** Schemat procesu wypieku chleba dla każdej metody prowadzenia ciasta. .....35
**Rysunek 9.** Wygląd mąk użytych w badaniach oraz parametry barwy zmierzone za pomocą spektrofotokolorymetru. .....64
**Rysunek 10**. Izoterma sorpcji badanych mąk żołędziowych (AG – grecka, AP – polska), wyznaczona w środowisku o $a_w$ = 0,07-0,92, w czasie 60 dni, w temperaturze 20°C. .....67
**Rysunek 11.** Wygląd chleba pszennego bez (kontrolnego) i z dodatkiem mąki żołędziowej (a), z dodatkiem glutenu pszennego (b) oraz z podwojonym dodatkiem glutenu pszennego (c); przekrój i wygląd zewnętrzny.....82
**Rysunek 12**. Elastyczność miękiszu chleba pszennego bez (próbki kontrolne) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej oraz glutenu pszennego. .....86
**Rysunek 13.** Wygląd miękiszu chleba pszennego i żytniego bez (próbki kontrolne) oraz z dodatkiem mąki żołędziowej polskiej i greckiej, otrzymanego różnymi metodami prowadzenia ciasta.....92
**Rysunek 14.** Całkowita różnica barwy skórki i miękiszu chlebów pszennych (a) i żytnich (b) bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej. .....94
**Rysunek 15**. Elastyczność miękiszu chlebów pszennych (a) i żytnich (b) bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej. .....95
**Rysunek 16**. Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą – zawartość podstawowych składników odżywczych w chlebie pszennym (a) i żytnim (b). .....100
**Rysunek 17**. Pojemność przeciwutleniająca chlebów pszennych (a) i żytnich (b) bez i z dodatkiem polskiej i greckiej mąki żołędziowej.....107
**Rysunek 18.** Wyniki analizy PCA z uwzględnieniem dwóch pierwszych głównych składowych (po lewej – wykres rozrzutu próbek oraz po prawej – wykres ładunków czynnikowych): cech

fizycznych (a); cech sensorycznych (b); oraz charakterystyki substancji bioaktywnych (c) próbek chleba pszennego (kolor zielony) i żytniego (kolor czerwony).....111
**Rysunek 19.** Wygląd w przekroju muffinów pszennych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej: (a) próba pszenna (bez dodatku mąki żołędziowej) oraz próbki z mąką żołędziową niefermentowaną; (b) próbki z mąką żołędziową poddaną fermentacji spontanicznej; (c) próbki z mąką żołędziową fermentowaną z kulturą starterową; (d) próbki z mąką żołędziową fermentowaną z drożdżami. .....115
**Rysunek 20.** Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą – zawartość podstawowych składników odżywczych w muffinach pszennych. .....121
**Rysunek 21.** Wyniki analizy PCA z uwzględnieniem dwóch pierwszych głównych składowych (po lewej – wykres rozrzutu próbek oraz po prawej – wykres ładunków czynnikowych): cech fizycznych (a); cech sensorycznych (b); oraz charakterystyki substancji bioaktywnych (c) próbek muffinów (kolorem zaznaczono próbki z mąką żołędziową fermentowaną przez 24 h (kolor niebieski) oraz 48 h (kolor zielony)). .....130
**Rysunek 22**. Wygląd ciastek kruchych pszennych i bezglutenowych bez oraz z dodatkiem mąki żołędziowej. .....135
**Rysunek 23**. Wpływ dodatku mąki żołędziowej na wartość odżywczą – zawartość podstawowych składników odżywczych w ciastkach kruchych pszennych (a) oraz bezglutenowych (b). ..... 139
**Rysunek 24.** Procentowy udział grup związków lotnych w badanych ciastkach kruchych. .....
**Rysunek 25.** Wyniki analizy PCA z uwzględnieniem dwóch pierwszych głównych składowych (po lewej – wykres rozrzutu próbek oraz po prawej – wykres ładunków czynnikowych): cech fizycznych (a) oraz cech sensorycznych (b) próbek ciastek kruchych pszennych (kolor zielony) oraz bezglutenowych (kolor niebieski). .....142
**Rysunek 26.** Biplot przedstawiający rozrzut próbek ciastek kruchych pszennych (kolor czerwony) i bezglutenowych (kolor niebieski) oraz związków lotnych na płaszczyźnie utworzonej przez dwie pierwsze składowe główne (PC1 i PC2). Numery związków lotnych w ciastkach kruchych odpowiadają związkom przedstawionym w tabeli 31.....147

# 10. ZAŁĄCZNIKI

Check for updates

Received: 31 July 2020 | Revised: 31 October 2020 | Accepted: 18 November 2020

DOI: 10.1111/1541-4337.12683

COMPREHENSIVE REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND FOOD SAFETY

Comprehensive REVIEWS in Food Science and Food Safety WILEY

# Acorn flour properties depending on the production method and laboratory baking test results: A review

**Emilia Szabłowska**[1] | **Małgorzata Tańska**[2]

[1] Department of Food Technology and Human Nutrition, Faculty of Computer Science and Food Science, Łomża State University of Applied Sciences, Łomża, Poland
(Email: eszablowska@pwsip.edu.pl)

[2] Department of Food Plant Chemistry and Processing, Faculty of Food Sciences, University of Warmia and Mazury, Olsztyn, Poland

**Correspondence**
Małgorzata Tańska, Department of Food Plant Chemistry and Processing, Faculty of Food Sciences, University of Warmia and Mazury, Plac Cieszyński 1, 10–718 Olsztyn, Poland.
Email: m.tanska@uwm.edu.pl

**Abstract**

Acorns, the fruit of the oak, have long been an important source of food in different cultures around the world. Despite their long culinary tradition, they have become under-appreciated. Due to their high starch content, acorns are mainly used for flour production, and acorn flour is considered as a replacement for cereal flour in a wide range of applications in food production. This study reviewed the published literature concerning acorn flour production and composition as well as the possibility of using acorn flour in the most popular flour-based products such as bread, cake, and cookies. The study also presents the advantages resulting from acorn flour incorporation to the human diet and acorn flour influence on the quality of bread and pastry products. This review found that acorn flour is characterized by a lack of gluten proteins and a high content of fiber and minerals as well as the presence of polyphenols with antioxidant properties. However, negative impact of its larger amount on the dough rheological features and product physical properties has been emphasized in many studies. The researchers recommend the incorporation of acorn flour up to a level of 15% in formulating composite flour for bread production. However, the literature data indicates that acorn flour substitution for pastry production depends on the product type and ranges from 10 to even 60%. It is also highlighted that the application of acorn flour into gluten-free products is particularly favorable from a nutritional point of view.

## 1 | INTRODUCTION

Acorns (nuts of the oak and other trees of the *Quercus* genus, which is comprised of around 600 species worldwide) have been popular for thousands of years in the cuisine of many nations, countries, and cultures (Tantray, Wani, & Hussain, 2017). They have been a staple food throughout Sardinia (Pinna, 2013), Spain (Rakić, Povrenović, Tešewić, Simić, & Maletić, 2006), Turkey (Silva et al., 2016), Asian countries, Central and Eastern and North America (Bainbridge, 1987) as well as Poland (Łuczaj, 2011). Acorns are consumed raw, roasted, or boiled and have been used to make oil, soup, mush/porridge, cake, bread, and coffee-like beverages (Bainbridge, 1987; Pinna, 2013; Polimac & Komlenić, 2015). Nowadays, they have almost disappeared as an independent food product or even as an ingredient and are mostly associated with animal feed. However, with the development of organic, functional, and wild food harvesting, the recognition of acorns as an alternative and competitive food source is strengthening. In some Mediterranean countries, they are used in ice cream and other desserts or liqueurs. In Algeria, Morocco, and the eastern USA, acorn oil is produced (Makhlouf, Squeo, Barkat, Trani, & Caponio, 2018; Makhlouf et al., 2020), whereas in Northern Africa, they are consumed in such products as bread, cake, and coffee

 © 2020 Institute of Food Technologists® 

(Al-Rousan, Ajo, Al-Ismail, Shaker, & Osaili, 2013; García-Gómez, Perez-Badia, Pereira, & Puri, 2017; Pinna, 2013). Acorns are made up of compounds comparable to that of cereals and are a rich source of carbohydrates, mainly starch (31 to 51%). They also contain from 2 to 8% proteins and from 0.7 to 9% fats. For this reason, they are especially good raw material for preparing breads and pastries (Akcan, Gökçe, Asensio, Estévez, & Morcuende, 2017; Korus, Witczak, Ziobro, & Juszczak, 2015; Makhlouf et al., 2020; Rababah et al., 2008; Rosenberg, 2008).

A problem that may limit the consumption of acorns is the high content of tannins (Bainbridge, 1987; Łuczaj, Adamczak, & Duda, 2014). These are compounds belonging to the group of polyphenols that cause product bitterness and demonstrate an ability to form complex proteins, polysaccharides, and metal ions, thereby reducing product digestibility and absorption. For this reason, tannins are listed as anti-nutritional substances (Pleszczyńska & Szczodrak, 2005). The solution to this problematic issue may be the use of acorns in such industries where the raw material can initially be debittered by leaching/soaking, aimed at removing excessive amounts of tannins from the acorns (Bainbridge, 1987). This procedure is used in the production of acorn flour (Ajo, 2018; Hoeche, Kelly, & Coci, 2014; Molavi, Keramat, & Raisee, 2015). Acorn flour does not contain excessive amounts of anti-nutritional substances and its health-promoting properties are maintained in the production process. This flour is a valuable source of macroelements, including calcium, magnesium, potassium, and microelements such as copper, iron, manganese, and zinc (Rybicka & Gliszczyńska-Świgło, 2017a) as well as group B vitamins (Rybicka & Gliszczyńska-Świgło, 2017b), tocopherols (Akcan et al., 2017; Górnaś, 2019), dietary fiber (Correia, Leitão, & Beirão-da-Costa, 2009), unsaturated fatty acids (particularly linoleic acid; Silva et al., 2016), and antioxidant substances (especially polyphenols; Vinha, Costa, Barreira, Pacheco, & Oliveira, 2016). Moreover, due to the absence of gluten proteins, it can be used in the production of gluten-free foods intended for people suffering from celiac disease (Korus et al., 2015; Korus, Gumul, Krystyjan, Juszczak, & Korus, 2017; Polimac & Komlenić, 2015).

Researchers have increasingly been discussing the topic of acorn flour production (Šálková et al., 2011) and its chemical composition (Correia et al., 2009; Polimac, Komlenić, & Lukinac, 2015; Silva et al., 2016), potential nutritional and health-promoting properties (Korus et al., 2017; Parsaei, Goli, & Abbasi, 2018), and the possibility of its use as a replacement for traditional high-starch products (Ajo, 2018; Gondek, Nowak, Jakubczyk, Kamińska-Dwórznicka, & Samborska, 2016; Gonzaga, Batista, Guiné, & Correia, 2015; Hoeche et al., 2014; Korus et al., 2015; Molavi et al., 2015; Rashid, Sabir, & Hawramee, 2014; Skendi, Mouselemidou, Papageorgiou, & Papastergiadis, 2018; Švec, Hrušková, & Kadlčíková, 2018). As shown in Table 1, the researchers used in their studies acorns of various oak species. The greatest number of scientific articles focused on the chemical composition of acorns. Research in this direction were conducted in the countries of the Mediterranean (Greece, Cyprus, Portugal, Spain, Serbia, Turkey, and Algeria), as well as in China, Iran, Jordan, and Poland. In Mediterranean countries, research has mainly been conducted on oaks of the following species: *Q. coccifera*, *Q. ilex*, *Q. suber*, *Q. aegilops*, *Q. brantii*, *Q. robur*, *Q. cerris*, and *Q. pubescens*. The species *Q. robur* and *Q. petraea* are characteristic for Poland, and for China: *Q. fabri*, *Q. glandulifera*, *Q. serrata*, and *Q. liatungensis*. Only a small number of authors (five scientific articles) explored the production of acorn flour. The use of acorn flour in the bakery and pastry products has been documented in 20 scientific articles. Milling studies were conducted in Algeria (*Q. ilex*), Croatia (*Q. robur*), Portugal (*Q. ilex, Q. rotundifolia*, and *Q. suber*), and Tunisia (*Q. suber*). In turn, the bakery and pastry products were made with flour from the acorns of *Q. aegilops*, *Q. brantii*, *Q. coccifera*, *Q. ilex*, *Q. persica*, *Q. robur*, *Q. rotundifolia*, and *Q. suber*.

Because of the growing number of reports on the possibilities of using acorn flour in bread and pastry production, this paper analyses the available research results from a variety of attempts to introduce acorn flour into flour products, especially bread, cakes, and cookies.

## 2 | ACORN FLOUR PRODUCTION

The technology of acorn flour production differs from standard methods of traditional wheat or rye flour production. The acorn flour is obtained after removing the cap and the hardened coat – a pericarp. There have been no studies using whole acorns, including the hardened coat, to produce flour. The pericarp is removed in the process of manual shelling and only the internal part of the acorn (nut) is used for proper operations to obtain flour (Amina, Djamel, & Djamel, 2018; Correia & Beirão-da-Costa, 2011; Correia et al., 2009). The process of shelling acorns results in a loss of approximately 34% of the mass of raw material under processing (Polimac & Komlenić, 2015).

The greatest difference between the production of acorn flour and the production of conventional flour is the omission of the conditioning process (understood as moisturizing the raw material) in the former. In wheat flour production, wheat grain (with a storage humidity of 12 to 14%) is moisturized to facilitate the separation of the cover. Wheat grain subjected to a tempering process demonstrates the best milling properties at a moisture level of 15 to 16% (Hourston, Ignatz, Reith, Leubner-Metzger, &

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 1** Origin and laboratory studies of Quercus species

| Origin | Species | Oak tree type | Chemical studies | Milling studies | Baking studies |
|---|---|---|---|---|---|
| Algieria | Q. *coccifera* L. | Kermes oak | Makhlouf et al., 2018 | | Pasqualone et al., 2019 |
| | *Q. ilex* L. | Holly oak | Charef et al., 2008 | Amina et al., 2018 | Pasqualone et al., 2019 |
| | | | Makhlouf et al., 2018 | | Amina and Djamel, 2018 |
| | *Q. suber* L. | Cork oak | Charef et al., 2008 | | Pasqualone et al., 2019 |
| | | | Makhlouf et al., 2018 | | |
| China | *Q. fabri* | Faber's oak | Lin et al., 2018 | | |
| | *Q. glandulifera Bl.* | – | Li et al., 2015 | | |
| | *Q. liaotungensis* | – | Xu, Cao, Yue, Zhang, and Zhao, 2018a | | |
| | | | Xu et al., 2018b | | |
| | *Q. serrata* var. *brevipetiolata* | Chinese oak | Lei, Huang, Wang, and He, 2018 | | |
| Croatia | *Q. robur* L. | English oak | | Polimac et al., 2015 | |
| Cyprus | *Q. alnifolia* Poech | Golden oak | Anagiotos, Tsakaldimi, and Ganatsas, 2012 | | |
| | | | Neophytou, Palli, Dounavi, and Aravanopoulos, 2007 | | |
| | *Q. coccifera* L. | Kermes oak | Neophytou et al., 2007 | | |
| Czech Republic | *Q. robur* | English oak | | | Šálková et al., 2011 |
| | n.d. | | | | Švec et al., 2018 |
| | | | | | Hrušková et al., 2019 |
| Greece | *Q. aegilops* | Aegilops oak | Papoti et al., 2018 | | Skendi et al., 2018 |
| | *Q. coccifera* L. | Kermes oak | Roukos, Parissi, Kyriazopoulos, and Abraham, 2017 | | |
| Irak | *Q. aegilops* L. | Aegilops oak | | | Rashid et al., 2014 |
| Iran | n.d. | | Alemzadeh, Vossoughi, and Maghsoodi, 2000 | | |
| | *Q. brantii* | Persian oak/Brant's oak | Bahmani et al., 2015 | | Molavi et al., 2015 |
| | | | Saffarzadeh et al., 1999 | | Parsaei et al., 2018 |
| | | | | | Shishehbor et al., 2020 |
| | *Q. persica* | – | | | Purabdolah et al., 2020 |
| Jordan | *Q. aegilops* | Aegilops oak | Al-Rousan et al., 2013 | | Ajo, 2018 |
| | *Q. calliprinos* | Pallestine oak | Al-Rousan et al., 2013 | | |
| | | | Rababah et al., 2008 | | |
| | *Q. infectoria* | Aleppo oak | Al-Rousan et al., 2013 | | |
| | *Q. ithaburensis* | | Rababah et al., 2008 | | |

(Continues)

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 1** (Continued)

| Origin | Species | Oak tree type | Chemical studies | Milling studies | Baking studies |
|---|---|---|---|---|---|
| Korea | n.d. | | | | Park et al., 2017 |
| | | | | | Kim and Joo, 2019 |
| | | | | | Kim et al., 2012 |
| Poland | *Q. petraea* (Matt.) Liebl., syn. *Q. sessilis* Ehrh. | Sessile oak | Łuczaj et al., 2014 | | |
| | *Q. pubescens* Willd. | Downy oak/Pubescent oak | Łuczaj et al., 2014 | | |
| | *Q. robur* L. | English oak | Górnaś, 2019Łuczaj et al., 2014 | | |
| | *Q. rubra* L. | Red oak | Górnaś, 2019Łuczaj et al., 2014 | | |
| | n.d. | – | Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017a | | Korus et al., 2015 |
| | | | Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017b | | Korus et al., 2017 |
| Portugal | *Q. faginea* | Portuguese oak | Vinha et al., 2016 | | |
| | *Q. ilex* | Holly oak | Vinha et al., 2016 | Silva et al., 2016 | Martins et al., 2020 |
| | *Q. nigra* | | Vinha et al., 2016 | | |
| | *Q. rotundifolia* | – | Ferraz de Oliveira, Machado, and Cancela d'Abreu, 2012 | Correia et al., 2009 | Gonzaga et al., 2015 |
| | | | | Correia and Beirão-da-Costa, 2011 | |
| | | | | Silva et al., 2016 | Martins et al., 2020 |
| | *Q. suber* | Cork oak | Vinha et al., 2016 | Correia et al., 2009 | |
| | | | Ferraz de Oliveira et al., 2012 | Correia and Beirão-da-Costa, 2011 | |
| Serbia | *Q. robur* | English oak | Rakić et al., 2006 | | |
| Spain | *Q. coccifera* L. | Kermes oak | Akcan et al., 2017 | | |
| | | | Molina-García et al., 2018 | | |
| | *Q. faginea* Lam. | Portuguese oak | Akcan et al., 2017 | | |
| | *Q. ilex* L. subsp. *ballota* | Holm oak | Akcan et al., 2017 | | |
| | | | Galván et al., 2011 | | |
| | *Q. pyrenaica* Wild | Pyrenean oak | Akcan et al., 2017 | | |
| | *Q. suber* L. | Cork oak | Akcan et al., 2017 | | |
| Tunisia | *Q. suber* L. | Cork oak | | Masmoudi et al., 2020 | Masmoudi et al., 2020 |
| Turkey | *Q. aucheri* Jaub.and Spach | Boz-Pirnal oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. brantii* | Persian oak/Brant's oak | Kaya and Kamalak, 2012 | | |

(Continues)



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 1** (Continued)

| Origin | Species | Oak tree type | Chemical studies | Milling studies | Baking studies |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | *Q. cerris* | Turkey oak | Kaya and Kamalak, 2012 | | |
| | *Q. cerris* L. var. *austriaca* (Willd.) Loudon | – | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. cerris* L. var. *cerris* | – | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |
| | *Q. coccifera* L. | Kermes oak | Kaya and Kamalak, 2012 | | |
| | | | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Şenol, Şekeroğlu, Gezici, Kiliç, and Erdoğan Orhan, 2018 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |
| | *Q. frainetto* Ten. | Italian oak/Hungarian oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. hartwissiana* Steven. | Strendzha oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Tumen, Eyuboglu, Kurtça, and Sekeroglu, 2018 | | |
| | *Q. ilex* L. | Holly oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. infectoria* | Aleppo oak | Kaya and Kamalak, 2012 | | |
| | *Q. infectoria* Olivier subsp. *infectoria*, | Aleppo oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |
| | *Q. infectoria* Olivier subsp. *boissieri* | | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |

(Continues)



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 1** (Continued)

| Origin | Species | Oak tree type | Chemical studies | Milling studies | Baking studies |
|---|---|---|---|---|---|
| | *Q. ithaburensis* Decne. ssp. *macrolepis* (Kotschy.) | Mount Tabor oak | Özcan, 2006 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |
| | *Q. libani* Olivier | Lebanon oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |
| | *Q. petraea* (Mattuschka) Lieb. subsp. *petraea* | Sesille oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Tumen et al., 2018 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |
| | *Q. petraea* (Mattuschka) Lieb. subsp. *iberica* | Sesille oak | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. pontica* C. Koch. | Estern Black Sea oak | Özcan, 2006 | | |
| | | | Tumen et al., 2018 | | |
| | *Q. pubescens* Willd. | Downy oak/Pubescent oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. robur* | English oak | Kilic et al., 2010 | | |
| | *Q. robur* L. subsp. *robur* | – | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. robur* subsp. *pedunculiflora* | – | Bursal and Boğa, 2018 | | |
| | *Q. suber* | Cork oak | Kaya and Kamalak, 2012 | | |
| | *Q. trojana* P.B. Webb. | Macedonian oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | *Q. virgiliana* Ten. | – | Özcan, 2006 | | |
| | *Q. vulcanica* (Boiss.and Heldr. ex) Kotschy | Kasnak oak | Özcan and Bayçu, 2005 | | |
| | | | Özcan, 2006 | | |
| | | | Kaplan et al., 2019 | | |

n.d., not determined.



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Steinbrecher, 2017; Kweon, Martin, & Souza, 2009). Acorns have a much higher humidity (37 to 44.3%), which necessitates the drying of the raw material to reduce water activity and increase the durability of the final product (Akcan et al., 2017; Ganasas & Tsakaldimi, 2013).

The acorn drying process is carried out at various stages of acorn flour production. Correia et al. (2009) and Gonzaga et al. (2015) conducted the drying process in two stages: before removing the pericarp, whole acorns were subjected to prehydration at 40 °C for 24 hr. The acorns prepared this way were peeled, ground and properly dried in the temperature range of 40 to 70 °C to determine the effect of temperature on the physico-chemical properties of flour. Amina et al. (2018) used one-stage drying, which was applied to acorns in the last production phase, immediately before grinding.

Regardless of the method of drying the raw material used, to obtain flour as the final product, it is necessary to grind the acorns. In the discussed papers (Amina et al., 2018; Correia & Beirão-da-Costa, 2011; Correia et al., 2009), the grinding of acorns into flour was carried out in laboratory mills to obtain flour particles passing through a 1 mm sieve mesh.

Acorns are characterized by a high content tannins, which cause the bitter taste of flour obtained from this raw material (Łuczaj et al., 2014). To reduce the bitterness of the final product, additional production steps leading to eluting of tannins are necessary. Šálková et al. (2011) conducted an experiment in the flour production process involving boiling acorns in water and/or roasting the ground raw material. None of these procedures significantly influenced the taste assessment of products made of acorn flour. Papoti, Kizaki, Skaltsi, Karayannakidis, and Papageorgiou (2018) evaluated the impact of leaching by soaking acorns in lye on total phenolic content, including tannins. They found that the flour from leached acorns contained nearly three times less phenolic compounds than the untreated raw material.

Other treatments to modify the physicochemical and functional properties of acorns include fermentation and germination. Amina et al. (2018) treated the acorns with yeast in the fermentation process, which contributed to obtaining a lighter colored flour, higher water and oil absorption capacity, higher emulsifying activity and foaming capacity in comparison to natural acorn flour. Acorns subjected to the natural biological germination process had the same effect on the physical and functional characteristics of acorn flour as the fermentation.

Technological processes used in the production of acorn flour have an impact on its physical properties (Table 2). Acorn flour has a light brown color (Amina et al., 2018). Compared to flours commonly used in the baking and confectionery industry (such as wheat flour, corn flour), acorn flour is characterized by a lower value of the color brightness parameter (Korus et al., 2017). The color of the acorn flour is influenced by the processes applied to the raw material. The drying temperature of the acorn nut plays a key role. Higher drying temperatures produce flours darker in color (Correia et al., 2009). The flour color is also determined by other production processes. Acorns treated by fermentation or germination produce lighter flours compared with untreated nuts (Amina et al., 2018).

Among the physical properties of acorn flour, low bulk density, high water and oil absorption capacity, low emulsifying activity and foaming ability are of importance. As a result of acorn fermentation and germination, the flour bulk density decreases, whereas water absorption emulsifying activity and foamability increase (Amina et al., 2018).

## 3 | ACORN FLOUR COMPOSITION AND NUTRITIONAL VALUE COMPARED TO CONVENTIONAL CEREAL FLOURS

Acorn flour is a biological material whose composition fluctuates due to several factors, for example the oak species, the place of occurrence (including climatic and environmental conditions, environmental stress), the acorn maturity and related differences in metabolic processes. Consequently, these factors affect the chemical composition of acorn flour (Kaya & Kamalak, 2012; Li, Zhou, Liu, Zhang, & Cao, 2015; Silva et al., 2016). Silva et al. (2016) analyzed the composition of acorn flour using various heat treatment methods and found no significant effect of various thermal methods on the composition of the final product. However, Molavi et al. (2015) indicated a diverse composition of acorn flour depending on the use or lack of the debittering process.

The basic composition of acorn flour, compared with conventional cereal flours, is distinctive primarily due to the low proportion of protein and a high proportion of fat, fiber, and ash. The content of protein in acorn flour is from two to three times lower than in whole rye, buckwheat, wheat, or oat flour (Table 3). The proteins found in acorn flour do not contain gluten. The data show (King et al., 2020) that the number of people suffering from gluten-intolerance-related diseases is increasing. Therefore, interest in gluten-free cereal products intended for people suffering from celiac disease has been growing (Tellers, 2018). Acorn flour offers an alternative to gluten-free flour used in the production of bread or pastry products (Korus et al., 2015, 2017; Silva et al., 2016; Torabi, Mohtarami, & Dabbagh Mazhary, 2020).

No studies have been found to examine the amino acid profile directly in the acorn flour. The available studies (Özcan, 2006; Saffarzadeh, Vincze, & Csapó, 1999) relate

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 2** Experimental production methods of acorn flour

| Acorn treatment before milling | Milling conditions | Flour properties | Reference |
|---|---|---|---|
| Nuts dried at 50 °C for 16 to 18 hr | Ground in a laboratory mill and sieved (1 mm) | Dark color, low bulk density, high water and oil absorption capacity, low emulsifying activity, and foaming capacity | Amina et al., 2018 |
| Nuts dried at 50 °C for 16 to 18 hr, rinsing, soaking in sodium hypochlorite solution and in distilled water, dripping, germination | Ground in a laboratory mill and sieved (1 mm) | Brighter color, lower bulk density, higher water and oil absorption capacity, higher emulsifying activity, and foaming capacity in comparison to natural acorn flour | Amina et al., 2018 |
| Nuts dried at 50 °C for 16 to 18 hr, decortication, milling, fermentation with yeast addition, drying in a hot air oven | Ground in laboratory mill and sieved (1 mm) | Brighter color, lower bulk density, higher water and oil absorption capacity, larger emulsifying activity, and foaming capacity in comparison to natural acorn flour | Amina et al., 2018 |
| Prehydration of whole fruits at 40 °C for 16 to 18 hr, with air flow at 300 $m^3$/h, peeling, chopping, and drying of nuts at 40, 50, 60, and 70 °C until $a_w = 0.2$ | Milled in a hammer mill to pass a 1 mm sieve | Dark color (higher temperature of drying process—darker color of flour), small size of starch granules | Correia et al., 2009; Correia and Beirão-da-Costa, 2011 |
| Air pre-drying of whole fruits for 12 hr, decortication, air drying of nuts for 48 hr | Milled in an ultra-centrifugal mill to a powder | Light brown color, high water holding capacity and swelling capacity, low oil holding capacity, and emulsifying capacity | Masmoudi et al., 2020 |

to the amino acid composition of acorns. The content of essential amino acids in whole acorns (Saffarzadeh et al., 1999) is comparable to the content of those in maize grain and it is approximately two times lower than in wheat and rye grain (Kunachowicz, Przygoda, Nadolna, & Iwanow, 2018). Because alternative raw materials such as buckwheat or amaranth are gaining increasing popularity, it should be noted that the content of essential amino acids in acorns is almost three times lower than in the mentioned raw materials (Mota et al., 2016). In the acorn nuts used for making flour, Özcan (2006) identified all eight essential amino acids, including leucine (245 mg/100 g d.m.) and lysine (208 mg/100 g d.m.) occurring in the largest amounts. Among nonessential amino acids identified (asparagine, histidine, alanine, glycine, serine, glutamine), the highest amounts were found for asparagine (696 mg/100 g d.m.) and glutamine (518 mg/100 g d.m.). Considering the demand for amino acids recommended for adults (levels developed by FAO/WHO/UNU (2007)), and the contribution of acorn flour in foods (up to 60%; 25% to obtain the most favorable product characteristics; Ajo, 2018; Gonzaga et al., 2015; Hrušková, Švec, & Kadlčíková, 2019; Korus et al., 2015; Park, Joo, & Kim, 2017; Purabdolah et al., 2020; Skendi et al., 2018; Švec et al., 2018), the presented contents of amino acids are insufficient and do not have a significant share in the human diet.

Acorn flour is characterized by a high fat content in comparison with the commonly used flours (Table 3). The dominant fatty acid in acorn flour is oleic acid (approx. 60% of all fatty acids), followed by linoleic acid (approx. 15%; Silva et al., 2016). Studies on the composition of oil obtained from acorns also indicate oleic acid as dominant (Al-Rousan et al., 2013; Charef, Yousfi, Saidi, & Stocker, 2008). Li et al. (2015) pointed to linoleic acid, as prevailing over oleic acid (approx. 36 and 33% of all fatty acids, respectively). The dominance of unsaturated fatty acids in food products can be both positive and negative. It can increase the nutritional value of the product due to their health-promoting effects (Cintra et al., 2012) and affect oxidative reactivity, leading to the formation of peroxides (Roman, Heyd, Broyart, Castillo, & Maillard, 2013).

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 3** Chemical composition of acorn flour and conventional cereal flours

| Compound | Acorn flour | Wheat flour | | Rye flour | | Buckwheat flour | Oat flour | Corn flour |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Whole | White | Whole | White | | | |
| Water (%) | 5.4 to 22.05 | 6.55 to 11.7 | 13.7 to 14.5 | 11.5 to 14.5 | 11.1 to 14.5 | 4.65 to 11.7 | 5.03 to 10.52 | 10.9 to 11.4 |
| Carbohydrates (%) | 75.22 to 84.09 | 69.5 to 73.03 | 71 to 71.3 | 74 to 77 | 76.68 to 77.4 | 66 to 73.52 | 61 to 61.51 | 71.14 to 76.9 |
| Sugars (%) | n.d. | 2.1 | 1.7 | 2.31 | 0.93 | n.d. | n.d. | 0.6 |
| Proteins (%) | 4.32 to 5 | 9.5 to 13.9 | 7.8 to 12.6 | 7.31 to 9.6 | 5.9 to 6.28 | 8.73 to 17.4 | 6.91 to 21.5 | 5.5 to 6.9 |
| Lipids (%) | 8.44 to 13.86 | 1.3 to 3.6 | 1.33 to 1.8 | 1.28 to 2.3 | 1.7 to 1.9 | 1.81 to 3.04 | 4.42 to 6.1 | 1.22 to 3.9 |
| Main fatty acids (% of all fatty acids) | | | | | | | | |
| Palmitic acid | 14.09 to 14.98 | 14.2 to 27.5 | 18.17 to 19.74 | 15.95 to 19.41 | 15.43 to 15.99 | 14.3 to 15.78 | 16.5 to 20.62 | 12.62 to 14.4 |
| Stearic acid | 2.33 to 3.27 | 0.75 to 2.3 | 1.04 to 10.41 | 0.52 to 0.56 | 0.56 to 0.58 | 1.7 to 2.08 | 1.71 to 2 | 2.07 to 3.2 |
| Oleic acid | 59.85 to 60.92 | 12.73 to 24 | 15.5 to 31.14 | 16.39 to 17.34 | 16.48 to 18.05 | 34.9 to 36.53 | 39.2 to 41.85 | 26.08 to 34.4 |
| Linoleic acid | 15.34 to 15.91 | 49.1 to 61.36 | 23.74 to 61 | 54.58 to 56.22 | 56.09 to 56.17 | 33.01 to 38.6 | 26.56 to 38.5 | 45.2 to 54.73 |
| Linolenic acid | 0.63 to 0.84 | 3.94 to 5.04 | 1.74 to 3.71 | 7.15 to 9.19 | 7.93 to 9.3 | 2.5 to 3.78 | 0.71 to 1.4 | 0.9 to 2.08 |
| Fiber (%) | 10.89 to 17.9 | 4.5 to 12.82 | 2.9 to 3.9 | 16.71 to 12.8 | 6.40 to 8 | 0.7 to 2.18 | 4.05 to 6.16 | 2.62 to 7.3 |
| Ash (%) | 1.81 to 2.04 | 1.32 to 1.9 | 0.49 to 0.92 | 1.2 to 1.91 | 0.5 to 0.69 | 1.42 to 2.83 | 0.82 to 1.93 | 0.28 to 1.5 |
| Tannins (%) | 7.76 to 10.9 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 0.38 to 0.42 | n.d. | n.d. |
| Main vitamins (/100 g of flour) | | | | | | | | |
| B1 (mg) | 0.02 | 0.445 to 0.661 | 0.12 to 0.25 | 0.235 to 0.42 | 0.183 to 0.331 | 0.13-0.37 | 0.25 to 0.435 | 0.11 to 0.25 |
| B2 (mg) | 0.13 | 0.095 to 0.324 | 0.04 to 0.062 | 0.128 to 0.251 | 0.1 to 0.09 | 0.06-0.22 | 0.04 to 0.6 | 0.06 to 0.15 |
| B3 (mg) | n.d. | 5.809 to 6.54 | 1.250 to 2.29 | 1.03 to 4.27 | 0.66 to 0.8 | 3.16-4.88 | 0.72 | 1.43 to 1.9 |
| B6 (mg) | 0.03 | 0.31 to 0.754 | 0.044 to 0.17 | 0.3 to 0.443 | 0.14 to 0.234 | 0.15-0.416 | 0.1 to 0.243 | 0.11 to 0.37 |
| Folate (total) ($\mu$g) | 114 | 27 to 109 | 18 to 64 | 44 to 82 | 23 to 49 | 54 to 132 | 30 to 32 | 25 to 37 |
| Main mineral components (mg/100 g of flour) | | | | | | | | |
| Calcium | 164 | 30.77 to 35.1 | 16.9 to 179.77 | 33 to 37 | 21 to 26.1 | 3.2 to 19.77 | 22.43 to 40.3 | 3.32 to 7 |
| Copper | 1.04 | 0.4 to 2.4 | 0.12 to 0.15 | 0.32 to 0.35 | 0.17 to 0.24 | 0.3 to 0.57 | 0.27 to 0.44 | 0.04 to 0.2 |
| Iron | 18.61 | 2.69 to 3.5 | 0.63 to 1.6 | 2.07 to 3.4 | 1.4 to 1.8 | 1.79 to 8.24 | 1.64 to 5.49 | 0.91 to 2.4 |
| Magnesium | 54.2 | 78.27 to 126 | 18.69 to 31 | 89 to 90 | 29.00 to 53.1 | 89.8 to 218.87 | 39.27 to 130.21 | 31.57 to 93 |
| Manganese | 3.65 | 2.34 to 3.33 | 0.38 to 0.83 | 2.16 to 4.24 | 1.24 to 1.98 | 0.27 to 2.11 | 0.61 to 3.72 | 0.15 to 0.5 |
| Potassium | 379 | 324 to 399.77 | 89.89 to 165 | 396 to 420 | 190 to 252 | 156 to 373.44 | 174.37 to 351 | 148.7 −315 |
| Zinc | 0.83 | 1.75 to 3.51 | 0.66 to 1.36 | 2.7 to 3.84 | 1.50 to 1.89 | 1.15 to 3.09 | 1.13 to 3.03 | 0.51 to 1.7 |

(Continues)



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 3** (Continued)

| Compound | Acorn flour | Wheat flour | | Rye flour | | Buckwheat flour | Oat flour | Corn flour |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Whole | White | Whole | White | | | |
| References | Rakić et al., 2006; Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017a; Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017b; Silva et al., 2016; USDA, 2019 | Hager, Wolter, Jacob, Zannini, and Arendt, 2012; Kumar et al., 2011; Ertl and Goessler, 2018; Kalnina, Rakcejeva, Gramatina, and Kunkulberga, 2014; Kunachowicz et al., 2018; Rohi, Pasha, Butt, and Nawaz, 2013; Sujka, Koczoń, Ceglińska, Reder, and Ciemniewska-Żytkiewicz, 2017 | Hager et al., 2012; Kumar et al., 2011; Angioloni and Collar, 2011; Ertl and Goessler, 2018; Kalnina et al., 2014; Kariluoto et al., 2004; Kunachowicz et al., 2018; Nikolić et al., 2008; Sujka et al., 2017; USDA, 2019 | Angioloni and Collar, 2011; Ertl and Goessler, 2018; Kalnina et al., 2014; Kariluoto et al., 2004; Kunachowicz et al., 2018; Litwinek, Buksa, Gambuś, Kowalczyk, and Boreczek, 2017; Sujka et al., 2017; USDA, 2019 | Ertl and Goessler, 2018; Kunachowicz et al., 2018; Sujka et al., 2017; USDA, 2019 | Angioloni and Collar, 2011; Hager et al., 2012; Hong, Ikeda, Kreft, and Yasumoto, 1996; Krumina-Zemture and Beitane, 2017; Lebiedzińska and Szefer, 2006; Levent and Bigliçli, 2012; Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017a; Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017b | Hager et al., 2012; Angioloni and Collar, 2011; Chauhan, Kumar, Kumar, and Kumar, 2018; Levent and Bigliçli, 2012; Oliveira, Rosell, and Steel, 2015Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017a; Rybicka and Gliszczyńska-Świgło, 2017b; USDA, 2019; Salehi and Shahedi, 2007; Doehlert, Angelikousis, and Vick, 2010; Youssef, Nassar, Fishawy, and Mostafa, 2017 | Gwirtz and Garcia-Casal, 2014; Hager et al., 2012; Lebiedzińska and Szefer, 2006; Daglioglu and Tasan, 2003; Yassen, El-Hafeez Yaseen, El-Hafeez, Shouk, and Ramadan, 2010 |

n.d., not determined.



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

The high content of tocopherols in acorn fat (exceeding that in popular oils such as sunflower, soybean, linseed, extra virgin olive, and pumpkin seed oils) serves as the natural protection against oxidation of fatty acids (1,440 to 1,783 mg/kg of fat; Al-Rousan et al., 2013; Vidrih, Vidakovič, & Abramowič, 2010). The dominant tocopherol in the composition of acorn fat is $\gamma$-tocopherol. Al-Rousan et al. (2013) found that $\gamma$-tocopherol constituted from 84% to 91% of total tocopherols, whereas $\alpha$-tocopherol and $\beta$-tocopherol were not detected. Akcan et al. (2017) found the presence of three tocopherol homologues in acorn fat: $\gamma$-, $\alpha$-, and $\delta$-tocopherol, where $\gamma$-tocopherol was dominant and $\delta$-tocopherol had the smallest share, although in traditionally used cereals (wheat, rye, spelt, or rice), $\alpha$- and $\beta$-tocopherol dominate. The proportion of individual tocopherol homologues in corn fat is relatively balanced, whereas $\gamma$-tocopherol is the dominant homologue in millet and oat fat (Hejtmánková, Lachman, Hejtmánková, Pivec, & Janovská, 2010; Lu, Yang, Sun, & Wang, 2019; Nielsen & Hansen, 2008).

Besides tocopherols, water-soluble B vitamins, including vitamin B1, vitamin B2 and vitamin B6, can be found in acorn flour. The content of vitamins B1 and B6 is negligible and does not exceed 0.05 mg/100 g, which is much lower than in conventional cereal flours (Table 3). The vitamin B2 and folate contents are beneficial in terms of nutritional value. Acorn flour contains 0.13 mg/100 g of vitamin B2 (Rybicka & Gliszczyńska-Świgło, 2017b) and 114 $\mu$g/100 g of folate (USDA, 2019). Given that the raw material of flours and cereal products is characterized by a relatively low content of vitamin B2 and, therefore, is often enriched with vitamin B2, acorn flour can be used as a natural vitamin enriching additive, especially in rice products (Golbach, Ricke, O'Bryan, & Crandall, 2014; Pinto & Zempleni, 2016). Folate is found in cereals and flours made from them, but since white rice and maize products are particularly poor in folate (WHO, 2004), acorn flour can be an enriching ingredient.

Acorn flour is a high carbohydrate product. The content of carbohydrates in acorn flour can reach 84% (Silva et al., 2016). The dominant carbohydrate is starch, whose share ranges from 31.4 to 49.0% depending on the temperature of thermal processes applied in flour production. Higher flour drying temperatures produce lower starch contents and a higher proportion of reducing sugars resulting from its decomposition. An increase in the drying temperature affects consistency, that is it reduces the content of starch, sucrose, and maltose, and increases the content of glucose (Correia et al., 2009).

Starch found in acorns and acorn flour is characterized by a diverse shape of granules with a wide range of diameters (from 3.3 to 126.2 $\mu$m) and some pores (the beginning of the dipping channels leading to the core of granule) can be observed on the surface of the starch granules (Cappai, Alesso, Nieddu, Sanna, & Pinna, 2013; Correia, Nunes, & Beirão-da-Costa, 2013; Deng, Reddy, & Xu, 2020; Li et al., 2015). The gelatinization temperature of acorn starch varies, depending on the species of oak and the method of obtaining starch, from 67.5 to 72.0 °C. The share of amylose in starch chains in acorn flour varies and ranges from 19.5 to 59.4% (Cappai et al., 2013; Correia et al., 2013; Irinislimane & Belhaneche-Bensemra, 2017). However, Soni, Sharma, Dun, and Gharia (1993) noted gelatinization of acorn starch in the temperature range from 80 to 85 °C. Starch gels have high storage stability and high water holding capacity. Both the temperature and gelatinization enthalpy of acorn starch are higher than wheat starch, which may be due to the varied relative crystallinity (RC of acorn starch is 47.8 and RC of wheat starch is 23.7). Owing to these properties, acorn starch offers a substitute for wheat starch in products subjected to thermal processes, as pasteurization or sterilization (Molavi, Ali Razavi, & Farhoosh, 2018). The swelling power of acorn starch is about 10.23% and is comparable with that of potato starch (Deng et al., 2020; Zavereze et al., 2012).

Attention is drawn to the high fiber content in acorn flour, which can be up to two-fold higher than high-fiber whole grain flour (Table 3). In acorns intended for flour, the acid detergent fiber-to-neutral detergent fiber mass ratio ranges from 1: 1.31 to 1: 1.77 (Kaya & Kamalak, 2012). Silva et al. (2016) report that the fiber content in acorn flour is higher than that in acorns.

The high ash content in acorn flour is closely related to the content of mineral components. Acorn flour is characterized by a high content of calcium and iron, which exceeds the content of these minerals in conventional cereal flours (on average: four- and five-fold higher, respectively). It is believed that cereal products can be an important factor in the fight against calcium and iron deficiencies in the diet (Cilla, López-García, & Barberá, 2018). In this context, the high content of these minerals in acorn flour, introduced into cereal products, seems to be even more important. Moreover, enrichment of cereal products may lead to an increase in the bioavailability of minerals contained in them (Regula, Cerba, Suliburska, & Tinkov, 2018).

Besides calcium and iron, acorn flour contains significant amounts of copper and manganese when compared with conventional flour. One hundred grams of acorn flour can considerably cover the dose of recommended copper daily intake 1.3 mg/day for women and 1.6 mg/day for men (EFSA, 2015) and sufficiently cover the recommended demand for manganese of 3 mg/day (EFSA, 2013). However, it should be noted that since no significant deficiencies in manganese or copper are found in the human diet (EFSA, 2013, 2015), enriching food

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

with these minerals is not significant. The content of magnesium and zinc in acorn flour is not distinctive compared with that of conventional cereal flour (Table 3).

The high contents of phenolic compounds in acorns and acorn flour (high antioxidant activity) have been confirmed by many researchers (Bursal & Boğa, 2018; Gezici & Sekeregolu, 2019; Lee, Na, Park, & Han, 2014; Makhlouf et al., 2018; Molina-García, Martínez-Expósito, Fernández-de Córdova, & Llorent-Martínez, 2018; Parsaei et al., 2018; Vinha et al., 2016). Rakić et al. (2006) reported that acorn flour, depending on the production method, contains from 11.76% to 14.93% of total polyphenols, including 7.76 to 10.9% of tannins. Tannins cause the bitter taste of the acorns and demonstrate anti-nutritional properties in higher concentrations. The consequence of an excessively high tannin intake may be damage to the intestinal epithelium, liver, and kidney tissues (Łuczaj et al., 2014; Pignone & Laghetti, 2010). Tannins in acorn flour may also be responsible for its low digestibility. Hydrolysable tannins are thought to act as inhibitors of starch hydrolysis (Lin, Lu, Song, & Huang, 2018). Phenolic compounds, which occur in acorns in significant quantifies, along with tannins, are gallic acid derivatives, including methyl gallate, galloyl derivatives, galloyl methyl gallate, and tetragalloylhexoside (Molina-García et al., 2018). This group of phenolic compounds may play an important role in the prevention of diseases and display antiinflammatory, anticancerogenic, and antimutagenic effects (Choubey, Varughese, Kumar, & Beniwal, 2015). It should be noted that acorns and acorn oil can be quantitatively compared to products considered to be significant sources of phenolics in the diet, for example extra virgin olive oil. However, it should be noted that these products vary in respect to their phenolic compound profile (Makhlouf et al., 2018).

The benefits resulting from the introduction of acorn flour into baking products include an increase in their nutritional value, especially observed in gluten-free products. Products made of acorn flour are characterized by a higher content of dietary fiber and mineral compounds as well as the content of total phenolic compounds and the resulting increased antioxidant activity (Ajo, 2018; Hrušková et al., 2019; Korus et al., 2015; Martins et al., 2020; Purabdolah et al., 2020; Švec et al., 2018). As regards the content of phenolic compounds in products with acorn flour, attention should be paid to the method of producing acorn flour. If the acorn flour production process does not involve de-bittering, the phenolic compounds contain significant amounts of tannins (Rakić et al., 2006, 2007). One way to increase the nutritional value of bread may also be the introduction of lactic acid bacteria during the fermentation of the dough, which causes decrease in the content of phytic acid and increase in the content of lactate and total phenolic compounds (Hashemi, Gholamhosseinpour, & Khaneghah, 2019). A positive consequence of the introduction of acorn flour into bread also includes the increase of satiety index and feeling of satiety of the bread, which is associated with a high content of fiber in the acorn flour (Shishehbor et al., 2020).

## 4 | EFFECT OF ACORN FLOUR ON BREAD-MAKING AND PROPERTIES OF BAKING PRODUCTS

It is speculated that acorn flour may be an alternative raw material in bread production, used to increase the nutritional value of the product. However, a reliable assessment should be made to determine the effect of acorn flour on the baking process and its properties. Because acorn flour is gluten-free, deterioration of the product physical characteristics, including textural properties, is expected. To explain this, many studies have been undertaken (Ajo, 2018; Gonzaga et al., 2015; Hrušková et al., 2019; Korus et al., 2015; Park et al., 2017; Purabdolah et al., 2020; Skendi et al., 2018; Švec et al., 2018), in which acorn flour is introduced into traditional bread in varying proportions to basic flour.

A farinographic assessment of flour and dough made from it, based on the dough physical properties, is the basis for determining the flour baking value and the bread quality. A farinograph is used to analyze the water absorption of flour and the effect of mixing on dough development and changes in its consistency (Weipert, 2006). The introduction of acorn flour into bread-making recipe causes several changes in the dough farinographic properties (Table 4). The changes involve the water absorption of flour, which increases with the share of acorn flour, as well as dough development and stability time. The increase in water absorption has a positive effect on dough capacity and bread volume (Aydoğan, Şahin, Göçmen, Hamzaoğlu, & Taner, 2015). In gluten flour, proteins are primarily responsible for the affinity of flour to water (Ćurić, Karlović, Tušak, Petrović, & Dugum, 2001; Vaiciulyte-Funk, Juodeikiene, & Bartkiene, 2015). Studies show that the water absorption of flour can also be associated with the activity of amylolytic enzymes and the degree of starch damage, which may be the reason for the increased water absorption in flour mixtures with the addition of acorn flour (Berton, Scher, Villieras, & Hardy, 2002; Jovanovich, Campana, Cardós, & Lupano, 2003).

The impact of acorn flour on the development and stability of the dough is not clear. Ajo (2018) and Gonzaga et al. (2015) report a shorter dough development time and a longer stability time in acorn flour tests compared with control trials. Hrušková et al. (2019) and Švec et al. (2018)

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 4** Use of acorn flour in bakery products

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Fermentation type and conditions | Baking or extrusion conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat bread | Wheat flour, yeast, salt, water | 10%<br>15% | Undefined | Undefined | Shorter dough development time, longer dough stability time, increase of resistance and extensibility | Lower density value, increased hardness and chewiness, decrease in cohesiveness, darker color of crumb and crust, higher crust roughness, decrease in porosity and odor intensity, similar sensory properties (for appearance, aroma, taste, texture, and global appreciation) | Gonzaga et al., 2015 |
| | Wheat flour, yeast, salt, sugar, fat, water | 5%<br>10% | Direct method of bread preparation, fermentation: 50 min at 30 °C, leavening: 45 min at 30 °C | Baking on baking plates by 14 min at 240°C | Higher water absorption, higher viscosity, longer dough development time, shorter dough stability time, limited dough machinability | Higher fiber content, decrease in consumer acceptance: worse sensory evaluation results (for taste and aroma, chewiness, and stickiness) | Švec et al., 2018 |
| | Wheat flour, water, eggs, whipping cream, sugar, butter, dried milk, yeast, salt | 5%<br>10%<br>15%<br>20% | Dough fermentation: 35 min at 30 °C, 75% RH, pan proofing: 40 min at 38 °C and 85% RH | Baking for 35 min at 170 °C/190 °C | Lower temperature of starch gelatinization | Lower volume, darker color, greater hardness, gumminess, and brittleness, similar sensory properties for substitution up to 15% (for color, taste, bitter aftertaste, chewiness, and overall acceptance), worse sensory evaluation results for 20% substitution | Park et al., 2017 |

(Continues)

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 4 (Continued)

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Fermentation type and conditions | Baking or extrusion conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Wheat flour, water, yeast | 10%; acorn flour in 3 variants: nonfermented (NFA), spontaneous fermented (SFA), controlled fermented (CFA) | Direct method of bread preparation, fermentation: 120 min at 36 °C | Baking for 20 min at 180 °C | n.d. | Higher hardness, porosity and the DPPH scavenging activity – the highest for CFA samples, weaker mold growth, higher TPC, similar sensory properties (overall acceptance) | Purabdolah et al., 2020 |
| | Wheat flour, water, eggs, whipping cream, sugar, butter, dried milk, yeast, salt | 15% | Straight dough method, first fermentation: 35 min at 30 °C and 75% RH, second fermentation: 40 min at 38 °C and 85% RH | Baking for 35 min at 170 °C/190 °C | n.d. | Lower volume, increase in hardness, lighter color; decrease in cohesiveness, springiness, gumminess and brittleness with the addition of milk higher than 20% | Kim and Joo, 2019 |
| | Wheat flour, water, salt, yeast, improver | 25%<br>50% | Two-step fermentation, first for 30 min at 24 °C, second for 60 min at room temperature | Baking for 6 min at 250 °C | n.d. | Higher satiety index and feeling of satiety, no significant differences in the glycemic index and in the mean of blood glucose IAUC | Shishehbor et al., 2020 |
| Wheat-barley bread | Wheat flour, barley flour, yeast, salt, sugar, fat, water | 5%<br>10% | Direct method of bread preparation, fermentation: 50 min at 30 °C, leavening: 45 min at 30 °C | Baking on baking plates for 14 min at 240 °C | Longer dough development time, shorter dough stability time, limited dough machinability | Higher fiber content, worse sensory evaluation results (for taste and aroma, chewiness and stickiness) | Švec et al., 2018; Hrušková et al., 2019 |

(Continues)



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 4 (Continued)

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Fermentation type and conditions | Baking or extrusion conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gluten-free bread | Corn starch, potato starch, pectin, guar gum, yeast, sugar, salt, oil, water | 20% 40% 60% | Mixing for 8 min, dough fermentation: 15 min at 35 °C, pan proofing: 20 min at 35 °C | Baking for 30 min at 230 °C in pans | n.d. | Higher content of protein, fat, and dietary fiber; lower volume and specific volume, higher weight, pores and porosity, darker color of crumb, increase in hardness and chewiness, decrease in cohesiveness, slower retrogradation of amylopectin during storage, increase in consumer acceptance: higher scores in sensory evaluation for taste, smell, appearance, crumb color, structure and porosity | Korus et al., 2015 |
| | Rice flour, corn flour, sodium caseinate, DATEM, CMC, dry yeast, olive oil, sugar, salt, water | 5% 15% 25% | Mixing for 2 min, fermentation in a pan for 20 min at 30 to 32 °C | Baking for 20 to 25 min at 210 °C in pans | n.d. | Lower specific volume, darker color of crumb, smaller pores, higher porosity, hardness and chewiness, higher content of TPC | Skendi et al., 2018 |
| | Buckwheat flour, rice flour, potato starch, sunflower oil, HPMC, dry yeast, sugar, salt, water | 23% 35% (50% and 75% in relation to the buckwheat flour) | Fermentation in portions for 50 min at 37° C | Baking for 50 min at 180 °C | Lower viscosity, higher temperature of starch gelatinization, increase in firmness and cohesiveness | Higher content of total fiber and insoluble fiber, increase in bread firmness | Martins et al., 2020 |

(Continues)



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 4** (Continued)

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Fermentation type and conditions | Baking or extrusion conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flatbread | Wheat flour, salt, yeast, sugar, water | 5% 10%15% | Mixing for 5 min, first fermentation for 30 min second fermentation of loaves for 15 min at 27 to 30 °C | Baking for 1 to 2 min at 415 °C | Higher water absorption, shorter dough development time, longer dough stability time | Lower moisture, lower protein content, higher fiber and ash content, darker color, lower crumb softness and staling rate, similar sensory properties (cracks, crumb texture, flavor and aroma, rolling and folding, chewing), worse sensory evaluation results (lower scores) for crumb, crust color and blister | Ajo, 2018 |
| Extruded bread | Rice flour, sugar, salt | 10% | Not applicable | Extrusion parameters: 175 °C, pressure 68 Ba, raw material dosing rate: 35/min, screw rotation: 166/min | n.d. | Higher water content, higher geometric density, lower porosity and expansion factor, higher crunch factor | Gondek et al., 2016 |
| Acorn dough | Acorn flour, water, starter cultures: *Lactobacillus fermentum, L. casei* subsp. *casei*, *L. plantarum* subsp. *plantarum* | 100% | Dough heating (90 °C for 15 min), addition of LAB and fermentation at 37 °C for 24 hr | Not applicable | Lower pH value and phytic acid content, higher TPC and lactate compounds content, higher antioxidant activity | n.d. | Hashemi et al., 2019 |

n.d.., not determined; DATEM, mono- and diacetyl tartaric acid esters of mono- and diglycerides of fatty acids; CMC, carboxymethyl cellulose; HPMC, hydroxypropyl methylcellulose; LAB, lactic acid bacteria; TPC, total phenolic compounds.



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

obtained different results, in which dough development time was longer and dough stability time was shorter for acorn flour trials compared with control trials. The differences in the results were not due to the variable level of substitution, which fluctuated in the range from 5 to 20% in increments of 5% relative to the base flour in all of the analyzed studies. The effect of acorn flour addition on shortening the dough development time and prolonging the stability time seems to be more likely.

Hrušková et al. (2019) and Švec et al. (2018) found that acorn flour reduced dough machinability. This means that the addition of acorn flour in bread-making had a limiting effect on such extensographic features of dough quality as the elasticity-to-extensibility ratio. The reasons should once again be traced to the lack of gluten proteins in acorn flour. This is an unfavorable phenomenon because in a situation of low dough machinability the dough is not very flexible or stretchable, which causes easy loss of the spongy structure with a slight extension of the proper fermentation time (Hadnađev, Torbica, Pojić, & Hadnađev, 2011; Mirsaeedghazi, Emam-Djomeh, Mousavi, 2008).

Regardless of the type of bread produced, the addition of acorn flour causes deterioration of the physical characteristics of bread (Table 4). In the analyzed studies, acorn flour introduced into bread-making dough caused a decrease in the density and volume of the bread, increased its hardness and chewiness while reducing cohesiveness. In baking products with an addition of acorn flour, the formation of larger pores in the crumb and a darker color was observed (Ajo, 2018; Gonzaga et al., 2015; Kim & Joo, 2019; Korus et al., 2015; Park et al., 2017; Purabdolah et al., 2020; Skendi et al., 2018). The addition of acorn flour, therefore, negatively affected the structural features of baking products, which is not surprising, given the results of farinographic and extensographic evaluation of the flour and dough mixes made from it. A reduction in the physical properties of bakery products as a result of the introduction of acorn flour also degraded the sensory values of products made from gluten flour (Hrušková et al., 2019; Park et al., 2017; Švec et al., 2018). In contrast, the introduction of acorn flour into gluten-free bread improved its sensory properties (Korus et al., 2015; Skendi et al., 2018). It seems particularly important to reduce the brightness of gluten-free bread, which is associated by consumers with highly processed products with low nutritional value (Korus et al., 2015).

Among the sensory properties, flavor is usually the decisive factor for the choice of a bakery product. The literature data indicate that the effect of the addition of acorn flour on the sensory characteristics in terms of flavor depends on the type of the product. In the case of wheat bread, the addition of acorn flour caused a decrease in this parameter (Park et al., 2017; Švec et al., 2018) or obtaining results were similar to the control sample (Gonzaga et al., 2015; Purabdolah et al., 2020). The addition of acorn flour to gluten-free bread had a positive effect on product acceptance (Korus et al., 2015). The results of sensory evaluation were also dependent on the level of substitution of conventional flours with acorn flour. Most of researchers suggest that acorn flour incorporation up to 15% substantially enhance the nutritional qualities of the bakery products without significant affecting their sensory and quality properties (Ajo, 2018; Gonzaga et al., 2015; Park et al., 2017; Skendi et al., 2018; Švec et al., 2018).

The impact of acorn flour on the quality of crisp, gluten-free extruded bread requires a separate discussion. Gondek et al. (2016) showed that extruded bread made with 10% addition of acorn flour was characterized by higher geometric density and crunch factor, with lower porosity and expansion factor, compared with the control sample.

## 5 | EFFECTS OF ACORN FLOUR ON PASTRY PRODUCTION AND PROPERTIES

Attempts have also been made to introduce acorn flour into pastry products (Amina & Djamel, 2018; Hoeche et al., 2014; Korus et al., 2017; Masmoudi et al., 2020; Molavi et al., 2015; Parsaei et al., 2018; Pasqualone et al., 2019; Rashid et al., 2014; Šálková et al., 2011; Torabi et al., 2020), especially biscuits, whose raw material has to meet lower requirements than sponge cakes or sponge-fat cakes with a spongy structure (Table 5).

Amina and Djamel (2018) and Pasqualone et al. (2019) conducted the most extensive research into the effect of acorn flour on biscuit properties such as diameter, surface, thickness, and volume increase during the baking process as well as on the spread factor. The results obtained in the analyzed studies are not consistent. Pasqualone et al. (2019) showed a limiting effect of acorn flour, introduced into wheat biscuits, on the increase in thickness during the baking process and a positive effect on the diameter, surface and volume increase during the baking process and the spread factor. Korus et al. (2017), who used acorn flour as an enriching factor in the production of gluten-free biscuits, observed the same trends. In research conducted by Amina and Djamel (2018), the addition of acorn flour to wheat biscuits increased the thickness and volume of biscuits, but weight loss, diameter, spread ratio, and density were reduced. Acorn flour is a gluten-free raw material, but it has a high fat content, which can have a significant impact on the dough behavior during the baking process. Another factor that determines such characteristics as volume, thickness, and the spread ratio of biscuits may be the better binding strength of protein, which was also observed

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

**TABLE 5** Use of acorn flour in pastry products

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Minor ingredients | Baking conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kulicha – Iraqi pastry product | Wheat flour, milled sugar, margarine, nuts | 15%<br>30%<br>45% | Salt, yeast, cardamom, cinnamon, kulicha flavor | 220 °C for 15 min | Higher water absorption, lower dough development time, stability time and mixing time | Better sensory evaluation results—positive influence of acorn flour on the taste, texture, color, and odor | Rashid et al., 2014 |
| Wheat biscuits | Wheat flour, water | 50%<br>100% | Salt, yeast | n.d. | n.d. | Unacceptable sensory properties of pure acorn products, better scores for the taste of wheat-acorn products | Šálková et al., 2011 |
| | shortening, sugar, egg yolk, water, invert syrup, wheat flour | 15%<br>30%<br>45% | salt, sodium bicarbonate | 250 °C for 15 min | n.d. | Lower peroxide value, higher antioxidant activity, similar sensory properties (flavor, texture, after taste, color, and overall acceptability) | Parsaei et al., 2018 |
| | Wheat flour, sucrose, extra-virgin olive oil, water | 30%<br>60% | Sodium bicarbonate | 160 °C for 12 min | n.d. | Increase in water activity, content of TPC, darker color, larger diameter, surface and volume increase during baking process, larger spread factor, lower thickness increase during baking process; differences in sensory properties: more intense bran-like and caramel odor, less sweet taste, no difference in bitter taste, higher friability, astringency and graininess, darker color | Pasqualone et al., 2019 |

(Continues)



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 5 (Continued)

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Minor ingredients | Baking conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Wheat flour, grained sucrose, hydrogenated vegetable shortening, water | 10% | Salt, ammonium bicarbonate, sodium bicarbonate | 180 °C for 15 min | n.d. | Lower weight, weight loss, diameter, spread ratio and density, higher thickness and volume, darker color, lower whiteness index and higher browning index, worse sensory evaluation results: lower scores for tecture, color, taste, odor, appearance, and overall acceptance | Amina andDjamel, 2018 |
| Gluten-free biscuits | Shortening, sugar, egg yolk, water, invert syrup, corn flour | 15%<br>30%<br>45% | Salt, sodium bicarbonate | 250 °C for 15 min | n.d. | Lower peroxide value, higher antioxidant activity, similar sensory properties (for flavor, texture, after taste, color, and overall acceptability) | Parsaei et al., 2018 |
| | Corn flour, sucrose, margarine, milk, eggs, potato starch | 20%<br>40%<br>60% | Salt, baking powder | 190 °C of the lower heating element and 220 °C of the upper heating element for 10 min | Higher water and oil absorption; | Higher ash and fiber content, lower energy value and carbohydrates content, higher content of flavonoids, phenolic acid, flavonols, anthocyanins and tannins, lower volume, higher spread factor and hardness, darker color, worse sensory evaluation results: lower scores for color, smell, taste, consistency, and appearance | Korus et al., 2017 |
| | Rice flour, corn flour, corn starch, sugar, milk powder, oil, eggs, glucose, water | 10%<br>15%<br>20%<br>30% | Baking powder, pomegranate powder | 200 °C for 12 min | n.d. | Higher content of moisture, ash, crude fiber, carbohydrates and TPC, larger antioxidant capacity, larger hardness, worse sensory evaluation results: lower scores for aroma, taste, fragility, and overall acceptance | Torabi et al., 2020 |

(Continues)

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 5 (Continued)

| Product type | Basic formula | Acorn flour percentage | Minor ingredients | Baking conditions | Dough properties (compared to control sample) | Product properties (compared to control sample) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat muffins | Self-rising wheat flour, brown sugar, milk, eggs, sunflower oil | 50% | Baking powder, vanilla essence | 180 °C for 20 min | n.d. | Worse sensory evaluation results: lower scores for color intensity, color preference, texture and taste, no difference in aroma evaluation | Hoeche et al., 2014 |
| | Wheat flour, sugar, eggs, water, vegetable oil, margarine | 0%<br>100% | Salt, baking powder, hydrocolloids (xanthan, carboxymethyl cellulose, κ-carrageenan) | Undefined | n.d. | Lower height, firmness, cohesiveness, springiness and adhesiveness; ability to optimize textural properties through a hydrocolloids addition | Masmoudi et al., 2020 |
| | Wheat flour, sugar, butter, eggs, milk | 50% acorn jelly powder;<br>50% acorn jelly powder + 0.1% acorn ethanol extract powder;<br>50% acorn jelly powder + 1% acorn ethanol extract powder | salt, baking powder | 180 °C for 20 min | n.d. | Lower baking losess, darker color, lower yellowness, higher redness, lower moisture content, higher hardness, lower adhesiveness, lower cohesiveness, guminess and chewiness, no significant differences for springiness, better sensory evaluation results: higher scores for color, texture and flavor for all variants with acorn product, higher scores for taste and overall acceptability for variants with addition of acorn jelly powder + 1% acorn ethanol extract powder | Kim et al., 2012 |
| Wheat cake | Wheat flour, sugar, semi-sold oil, eggs, milk | 5%<br>10%20%30% | Baking powder, vanilla | 160 °C for 50 min | n.d. | Lower volume, higher density, hardness, cohesiveness, gumminess, adhesiveness, springiness and chewiness, worse sensory evaluation results: lower scores for texture, color, flavor, and overall acceptance | Molavi et al., 2015 |

n.d., not determined; TPC, total phenolic compounds.



15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

during the production of biscuits with an addition of soy flour (Aleem Zaker, Genitha, & Syed Imran, 2012).

The addition of acorn flour has a positive effect on the nutritional value of biscuits. In gluten-free biscuits with an addition of acorns, an increased content of fiber and minerals (ash) was determined compared with control samples (Korus et al., 2017; Torabi et al., 2020). An important benefit was the increase in antioxidant activity and reduction of peroxide value in biscuits with the addition of acorn flour compared with control samples, regardless of the type of base flour (Korus et al., 2017; Parsaei et al., 2018; Pasqualone et al., 2019; Torabi et al., 2020). The peroxide value is indicated as the main parameter determining the quality of food product with high fat content. As a result of the primary oxidation of fats in food, peroxides are formed in quantities expressed by the peroxide value. Peroxides are precursors in a series of chain reactions, eventually leading to the formation of substances responsible for the rancid taste of the product (Koczoń, Lipińska, Czerniawska-Piątkowska, Mikuła, & Bartyzel, 2016). Biscuits are products particularly susceptible to adverse oxidative changes, which result from the content of unsaturated fatty acids (Mildner-Szkudlarz, Zawirska-Wojtasik, Obuchowski, & Gośliński, 2009; Reddy, Urooj, & Kumar, 2005). The addition of acorn flour to biscuits limits oxidative changes and increases antioxidant activity. This is primarily due to the high content of antioxidant phenolic compounds in acorn flour (Korus et al., 2017; Parsaei et al., 2018; Pasqualone et al., 2019; Torabi et al., 2020).

Cakes with a spongy structure, leavened using yeast or baking powder, after substitution of base flour with acorn flour, demonstrate variability in characteristics similar to those observed in bread (Molavi et al., 2015; Rashid et al., 2014). Sweet yeast dough, as in bread dough, was characterized by the shortening of the dough development time and its stability time (Rashid et al., 2014). Sponge-fat cake was characterized by smaller volume, higher density, and deterioration of the features associated with the texture of the product. Increased hardness, cohesiveness, gumminess, adhesiveness, springiness, and chewiness were also found (Molavi et al., 2015). The same effect was observed by Masmoudi et al. (2020), who analyzed the impact of acorn flour on wheat muffin properties. The reasons for these changes were explained primarily by the lack of gluten proteins in the composition of acorn flour (Dapčević, Hadnađev, & Pojić, 2009; Weipert, 2006). The consequence of texture changes was lower consumer acceptance (Masmoudi et al., 2020; Molavi et al., 2015). Other results were obtained by Kim, Lee, Choi, and Cho (2012). The authors proved that the addition of acorn jelly powder and acorn jelly powder with acorn ethanol extract powder, resulted in a reduction of texture features, such as: hardness, adhesiveness, cohesiveness, gumminess, and chewiness. The positive consequence of textural changes in the research were high scores for muffins with the addition of acorn by-products.

A literature review has also shown that acorn flour addition effects on flavor of pastry products. It was reported that addition of acorn flour may have a negative effect on the taste and aroma of the final products (Amina & Djamel, 2018; Hoeche et al., 2014; Korus et al., 2017; Molavi et al., 2015; Torabi et al., 2020), as well as its textural features, which is particularly important in the case of cakes with a spongy structure (Hoeche et al., 2014; Molavi et al., 2015). The final product is, according to the results obtained by Pasqualone et al. (2019), characterized by bran-like odor and less sweet taste. As in the case of bakery products, also in the case of pastry products, the impact of acorn flour on sensory evaluation depends on the type of product and the level of substitution. Studies of Pasqualone et al. (2019) proved that the volatile compounds are significantly different in biscuits with acorn flour compared to wheat biscuits. The acorn-enriched biscuits showed higher levels of fermentative alcohols and their esters (particularly ethanol and ethyl acetate) as well as Maillard reaction volatile compounds (particularly furans). The furan compounds were mostly represented by furfural, a caramel-like odorant.

Depending on the type of pastry products, a compromise between the highest nutritional value and the lowest impact on sensory and quality properties can be achieved at different levels of substitution of conventional flours with acorn flour. In the case of biscuits, researchers suggest the addition of acorn flour from 20% (Torabi et al., 2020) to even 60% (Pasqualone et al., 2019). However, a significantly lower addition of acorn flour (10 to 15%) is advisable for cakes with a spongy structure (Molavi et al., 2015; Rashid et al., 2014).

## 6 | FUTURE PROSPECTS

Acorns have been recently rediscovered as a food raw material. The possibilities and ways to introduce acorns to the diet are still being tested and the health benefits derived from them are being studied. Many researchers (Akcan et al., 2017; Gezici & Sekeregolu, 2019; Özcan, 2006; Rakić et al., 2006; Rybicka & Gliszczyńska-Świgło, 2017a, 2017b; Silva et al., 2016) have studied the chemical composition of acorns and their by-products, with particular regard to bioactive compounds. However, the results of previous studies indicate the necessity of further research in the mechanisms of acorn bioactive compound conversion during the food production process as well as their action in the body.

Tannins remain a controversial group of compounds found in acorns and their by-products. They are responsible for bitter taste and in excessive amounts can cause

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

digestive disorders and reduce the absorption of nutrients (Łuczaj et al., 2014; Migaskó & Ecseri, 2020; Popova & Mihaylova, 2019). However, tannins display several health-promoting features, including antioxidant, antibacterial and antiviral properties and radical scavenging activity (Sieniawska & Baj, 2017). Despite many contradictions as to the use of tannins occurring in acorns, many reports indicate that these compounds seem to be significant since they may serve as a substrate in the formation of urolithins—compounds with health-promoting effects (Cortés-Martín et al., 2018; Espín, García-Conesa, & Tomás-Barberán, 2013; García-Villalba, Beltrán, Espín, Selma, & Tomás-Barberán, 2013; García-Villalba, Espín, & Tomás-Barberán, 2016; González-Barrio, Truchado, Ito, Espín, & Tomás-Barberán, 2011; Ishimoto et al., 2011; Kang, Buckner, Shay, Gu, & Chung, 2016; Kiss & Piwowarski, 2016).

Tannins are a heterogeneous group of compounds that are divided (depending on the adopted division criterion) into hydrolysable and nonhydrolysable tannins (based on hydrolysis resistance) or into condensed tannins, complex tannins, ellagitannins, and gallotannins (depending on their structure; Sieniwaska & Bai, 2017). The human body, through metabolic changes, uses ellagitannins and hydrolysable tannins which are found in the largest amounts in walnuts, blackberries, or pomegranate (Villalba, Barka, Pasos, & Rodríguez, 2019) and are also present in acorns (Kiss & Piwowarski, 2016). Ellagitannins, absorbed from food, are hydrolyzed in the small intestine into ellagic acid. Ellagic acid is used by human intestinal microflora as a substrate in a number of decarboxylation reactions, whose end products are urolithins of at least three different metabotypes (Silacci & Tretola, 2019). Several studies (Ahroni, Lati, Aviram, & Fuhrman, 2015; DaSilva et al., 2019; Espín et al., 2013; García-Mantrana et al., 2019; Gill et al., 2019; Holt et al., 2020; Kiss & Piwowarski, 2016; Rutledge et al., 2019; Selma et al., 2018; Yuzugulen, Noshadi, Shukur, Sahin, & Gulcan, 2019) have shown that urolithins have antioxidant, antiinflammatory, and neuroprotective effects, prevent the development of pathogenic microflora and are a factor that reduces the level of overall cholesterol and helps in the fight against obesity. Particular attention is paid to the possibility of preventing colon cancer by using anti-cancerogenic properties of type A urolithin (Giménez-Bastida, Ávila-Gálvez, Espín, & González-Sarrías, 2020). It should be noted that the studies indicated in the above sources are based on the health-promoting effects of ellagitannins derived from pomegranate, nuts or strawberries. Therefore, it is important to carry out research based on ellagitannins derived from acorns to assess the effect of the production conditions of acorn flour on the content of ellagitannins in the final product.

From a technological point of view, acorns deserve attention due to the characteristics of their starch. As noted by Correia et al. (2013), acorns can be an alternative source of starch, which, thanks to their properties, do not require chemical or genetic modification. The basic physicochemical properties and functionality of acorn starch obtained through different extraction methods are discussed in many papers (e.g. Cappai et al., 2013; Chen, Li, Shi, & Li, 2019; Correia et al., 2009, 2013; Correia & Beirão-da-Costa, 2011; Deng et al., 2020; Irinislimane & Belhaneche-Bensemra, 2017; Molavi et al., 2018; Yang et al., 2011). To be able to fully determine the possibilities offered by acorn starch, tests assessing the impact of acorn starch on the physicochemical properties of products made of acorn flour are needed. Another direction of research should focus on developing an understanding of the mechanisms that limit the digestibility of acorn starch.

Acorns and acorn flour are high fiber raw materials (Martins et al., 2020; Silva et al., 2016). According to the EFSA (2010) definition, dietary fiber consists of nondigestible carbohydrates, including lignin (thus, dietary fiber is composed of nonstarch polysaccharides, resistant oligosaccharides, resistant starch, and lignin). Polysaccharides, forming fiber, due to the fact that they are not digested, assimilated, or absorbed in the digestive tract, reach the intestines, where they provide food for the intestinal microflora and can act as prebiotics (Ahmadi, Sheikh-Zeinoddin, Soleimanian-Zad, Alihosseini, & Yadav, 2019; Wilson & Whelan, 2017). It should be emphasized that not all components of fiber qualify as prebiotics, while a significant portion of prebiotics found in food are components of fiber (Holsher, 2017; Sonnenburg & Bäckhed, 2016). Because polysaccharides found in acorns are hydrolyzed to a maximum of 3%, they can be used in fermentation reactions carried out by the intestinal microflora. Acorn polysaccharides contribute to the growth of *Lactobacillus plantarum*, a probiotic strain found in the human microbiome, and have a positive effect on the production of propionate by fecal microflora (Ahmadi et al., 2018, 2019; Tadayoni, Sheikh-Zeinoddin, & Soleimanian-Zad, 2015, 2017). Propionate is a factor that promotes cholesterol reduction and satiety (Louis & Flint, 2017). Although previous studies were conducted *in vivo* and on animals, efforts should be made to confirm the results of clinical trials.

## 7 | CONCLUSIONS

Noncereal flours are an alternative to flours traditionally used in the baking and pastry industries. Acorn flour offers various benefits, including a lack of gluten proteins, high fiber and mineral content, and antioxidant properties

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

due to the presence of polyphenols. However, research conducted to date indicates the negative impact of acorn flour on the rheological features of the dough and the physical properties of products made with it. Therefore, in bread and pastry production, it is advisable to introduce acorn-wheat flour blends. Also attempts should be made to use gluten protein as an auxiliary raw material in addition to acorn flour. The resulting product would not be intended for people on a gluten-free diet, although it would remain rich in fiber, minerals, tocopherols, and polyphenols. Furthermore, it would have a size and texture comparable to traditional products and would be desired by consumers.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Emilia Szabłowska searched and analyzed the literature and wrote the initial version of the manuscript. Małgorzata Tańska conceived the idea and provided scientific guidance through the process of writing and edited the manuscript. The final version was approved by all authors.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest.

## ORCID

*Emilia Szabłowska* https://orcid.org/0000-0002-1957-0316
*Małgorzata Tańska* https://orcid.org/0000-0002-7236-0369

## REFERENCES

Ahmadi, S., Nagpal, R., Wang, S., Gagliano, J., Kitzman, D. W., Soleimanian-Zad, S., … Yadav, H. (2018). Prebiotics from acorn and sago prevent high-fat diet-induced insulin resistance via microbiome-gut-brain axis modulation. *Journal of Nutritional Biochemistry*, *67*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.01.011

Ahmadi, S., Sheikh-Zeinoddin, M., Soleimanian-Zad, S., Alihosseini, F., & Yadav, H. (2019). Effects of different drying methods on the physicochemical properties and antioxidant activities of isolated acorn polysaccharides. *LWT – Food Science and Technology*, *100*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.027

Ahroni, S., Lati, Y., Aviram, M., & Fuhrman, B. (2015). Pomegranate juice polyphenols induce a phenotypic switch in macrophage polarization favouring a M2 anti-inflammatory state. *BioFactors*, *41*(1), 44–51. https://doi.org/10.1002/biof.1199

Ajo, R. Y. (2018). Effect of acorn flour substitution on Arabic Bread properties. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, *55*(4), 913–919. https://doi.org/10.21162/PAKJAS/18.6455

Akcan, T., Gökçe, R., Asensio, M., Estévez, M., & Morcuende, D. (2017). Acorn (*Quercus* spp.) as a novel source of oleic acid and tocopherols for livestock and humans: Discrimination of selected species from Mediterranean forest. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(10), 3050–3057. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2740-3

Aleem Zaker, M. D., Genitha, T. R., & Syed Imran, H. (2012). Effect of defatted soy flour incorporation on physical, sensorial and nutritional properties of biscuits. *Journal of Food Processing & Technology*, *3*(4), 149. https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000149

Alemzadeh, I., Vossoughi, M., & Maghsoodi, V. (2000). An investigation of chemical and physical properties of Kordestan (Iran) acorn. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *2*(3), 225–228.

Al-Rousan, W. M., Ajo, T. Y., Al-Ismail, K. M., Shaker, R. R., & Osaili, T. M. (2013). Characterization of acorn fruit oils extracted from selected Mediterranean *Quercus* Species. *Grasas y Aceites*, *64*(5), 554–560. https://doi.org/10.3989/gya.023313

Amina, M., & Djamel, F. (2018). Effect of fermentation and germination treatments on physicochemical and sensory properties of enriched biscuits with acorn flour. *Annals. Food Science and Technology*, *19*(4), 667–674.

Amina, M., Djamel, F., & Djamel, H. (2018). Influence of fermentation and germination treatments on physicochemical and functional properties of acorn flour. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *24*(4), 719–726.

Anagiotos, G., Tsakaldimi, M., & Ganatsas, P. (2012). Variation in acorn traits among natural populations of *Quercus alnifolia*, an endangered species in Cyprus. *Dendrobiology*, *63*, 3–10.

Angioloni, A., & Collar, C. (2011). Nutritional and functional added value of oat, Kamut®, spelt, rye and buckwheat *versus* common wheat in breadmaking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *91*(7), 1283–1292. https://doi.org/10.1002/jsfa.4314

Aydoğan, S., Şahin, M., Göçmen, A. A., Hamzaoğlu, S., & Taner, S. (2015). Relationships between farinograph parameters and bread volume, physicochemical traits in bread wheat flours. *Journal of Bahri Dagdas Crop Research*, *3*(1), 14–18.

Bahmani, M., Forouzan, S., Fazeli-Moghadam, E., Rafieian-Kopaei, M., Adineh, A., & Saberianpour, S. (2015). Oak (*Quercus brati*): An overview. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, *7*(1), 634–639.

Bainbridge, D. A. (1987). Use of acorns for food in California: Past, present, future. In T. R. Plumb & N. H. Pillsbury (Eds.), *Proceedings of the Symposium on Multiple-use Management of California's Hardwoods* (Vol. 100, pp. 453–458). Berkeley, USA: PSFRES. https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-100

Berton, B., Scher, J., Villieras, F., & Hardy, J. (2002). Measurement of hydration capacity of wheat flour: Influence of composition and physical characteristic. *Powder Technology*, *128*(2-3), 326–331. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00168-7

Bursal, E., & Boğa, R. (2018). Polyphenols analysed by UHPLC-ESI-MS/MS and antioxidant activities of molasses, acorn and leaves of oak (*Quercus robur* subsp. *pedunculiflora*). *Progress in Nutrition*, *20*(1-S), 165–175. https://doi.org/10.23751/pn.v20i1-S.5311

Cappai, M. G., Alesso, G. A., Nieddu, G., Sanna, M., & Pinna, W. (2013). Electron microscopy and composition of raw acorn starch in relation to *in vivo* starch digestibility. *Food & Function*, *4*(6), 917–922. https://doi.org/10.1039/C3FO60075K

Charef, M., Yousfi, M., Saidi, M., & Stocker, P. (2008). Determination of the fatty acid composition of acorn (*Quercus*), *Pistacia lentiscus* seeds growing in Algeria. *Journal of American Oil Chemists' Society*, *85*(10), 921–924. https://doi.org/10.1007/s11746-008-1283-1

Chauhan, D., Kumar, K., Kumar, S., & Kumar, H. (2018). Effect of incorporation of oat flour on nutritional and organoleptic characteristic of bread and noodles. *Current Research in Nutrition and Food Science*, *6*(1), 148–156. https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.1.17

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Chen, X., Li, X., Shi, X., & Li, L. (2019). Analysis on basic physicochemical properties and antioxidant activities of the starch from acorn. *Hans Journal of Food Nutrition and Science*, *8*(3), 195–207. https://doi.org/10.12677/HJFNS.2019.83025

Choubey, S., Varughese, L. R., Kumar, V., & Beniwal, V. (2015). Medicinal importance of gallic acid and its ester derivatives: A patent review. *Pharmaceutical Patent Analyst*, *4*(4), 305–315. https://doi.org/10.4155/ppa.15.14

Cilla, A., López-García, G., & Barberá, R. (2018). *In vitro* bioavailability of iron and calcium in cereals and derivatives: A review. *Food Reviews International*, *34*(1), 1–33. https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1210631

Cintra, D. E., Ropelle, E. R., Moraes, J. C., Pauli, J. R., Morari, J., de Souza, C. T., … Velloso, L. A. (2012). Unsaturated fatty acids revert diet-induced hypothalamic inflammation in obesity. *PLoS ONE*, *7*(1), e30571. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030571

Correia, P. R., Leitão, A. E., & Beirão-da-Costa, M. L. (2009). Effect of drying temperatures on chemical and morphological properties of acorn flours. *International Journal of Food Science & Technology*, *44*(9), 1729–1736. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01988.x

Correia, P. R., & Beirão-da-Costa, M. L. (2011). Effect of drying temperatures on starch-related functional and thermal properties of acorn flours. *Journal of Food Science*, *76*(2), 196–202. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01978.x

Correia, P. R., Nunes, M. C., & Beirão-da-Costa, M. L. (2013). The effect of starch isolation method on physical and functional properties of Portuguese nut starches. II. *Q. rotundifolia* Lam. and *Q. suber* Lam. acorns starches. *Food Hydrocolloids*, *30*(1), 448–455. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.06.014

Cortés-Martín, A., Carcía-Villalba, R., González-Sarrías, A., Romo-Vaquero, M., Loria-Kohen, V., Ramírez-de-Molina, A., … Espín, J. C. (2018). The gut microbiota urolithin metabotypes revisited: The human metabolism of ellagic acid is mainly determined by aging. *Food & Function*, *9*(8), 4100–4106. https://doi.org/10.1039/c8fo00956b

Ćurić, D., Karlović, D., Tušak, D., Petrović, B., & Dugum, J. (2001). Gluten as a standard of wheat flour quality. *Food Technology and Biotechnology*, *39*(4), 353–361.

Daglioglu, O., & Tasan, M. (2003). Fatty acid composition of traditional fermented and unfermented Turkish corn bread with the emphasis on trans fatty acids. *European Food Research and Technology*, *217*, 125–127. https://doi.org/10.1007/s00217-003-0720-5

Dapčević, T., Hadnađev, T. D., & Pojić, M. (2009). Evaluation of the possibility to replace conventional rheological wheat flour quality control instruments with the new measurement tool – mixolab. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, *74*(3), 169–174.

DaSilva, N. A., Nahar, P. P., Ma, H., Eid, A., Wei, Z., Mechwitz, S., … Seeram, N. P. (2019). Pomegranate ellagitannin-gut microbial-derived metabolites, urolithins, inhibit neuroinflammation *in vitro*. *Nutritional Neuroscience*, *22*(3), 185–195. https://doi.org/10.1080/1028415X.2017.1360558

Deng, M., Reddy, C. K., & Xu, B. (2020). Morphological, physicochemical and functional properties of underutilized starches in China. *International Journal of Biological Macromolecules*, *158*, 648–655. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.031

Doehlert, D. C., Angelikousis, S., & Vick, B. (2010). Accumulation of oxygenated fatty Acid in oat lipids during storage. *Cereal Chemistry*, *87*(6), 532–537. https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-10-0074

EFSA (European Food Safety Authority), (2010). Scientific opinion on dietary reference values for carbohydrates and dietary fibre. EFSA panel on dietetic products, nutrition, and allergies. *EFSA Journal*, *8*(3), 1462. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1462

EFSA (European Food Safety Authority), (2013). Scientific opinion on dietary reference values for manganese. EFSA panel on dietetic products, nutrition and allergies. *EFSA Journal*, *11*(11), 3419. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3419

EFSA (European Food Safety Authority), (2015). Scientific opinion on dietary reference values for copper. EFSA panel on dietetic products, nutrition and allergies. *EFSA Journal*, *13*(10), 4253. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4253

Ertl, K., & Goessler, W. (2018). Grains, whole flour, white flour, and some final goods: An elemental comparison. *European Food Research and Technology*, *244*, 2065–2075. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3117-1

Espín, J. C., García-Conesa, M. T., & Tomás-Barberán, F. (2013). Biological significance of urolithins, the gut microbial ellagic acid-derived metabolites: The evidence so far. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2013*, 1–15. https://doi.org/10.1155/2013/270418

FAO/WHO/UNU (2007). *Protein and amino acid requirements in human nutrition*. (Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. Technical report series no. 935). World Health Organization.

Ferraz de Oliveira, M. I., Machado, M. G., & Cancela d'Abreu, M. (2012). Acorn chemical composition depending on shedding date and *Quercus* species. In E. J. De Pedro & A. B. Cabezas (Eds.), *Proceedings of the 7th International Symposium on the Mediterranean Pig* (pp. 229–234). Zaragoza, Spain. CIHEAM.

Galván, J. V., Valledor, L., Navarro Cerrillo, R. M., Gil Pelegrín, E., & Jorrín-Novo, J. V. (2011). Studies of variability in Holm oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota* [Desf.] Samp.) through acorn protein profile analysis. *Journal of Proteomics*, *74*(8), 1244–1255. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2011.05.003

Ganasas, P., & Tsakaldimi, M. (2013). A comparative study of desiccation responses of seeds of three drought-resistant Mediterranean oaks. *Forest Ecology and Management*, *305*, 189–194. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.042

García-Gómez, E., Perez-Badia, R., Pereira, J., & Puri, R. K. (2017). The consumption of acorns (from *Quercus* spp.) in the Central West of the Iberian Peninsula in the 20th Century. *Economic Botany*, *71*(3), 256–268. https://doi.org/10.1007/s12231-017-9391-1

García-Mantrana, I., Calatayud, M., Romo-Vaquero, M., Espín, J. C., Selma, M. V., & Collado, M. M. (2019). Urolithin metabotypes can determine the modulation of gut microbiota in healthy individuals by tracking walnuts consumption over three days. *Nutrients*, *11*(10), 2483–2495. https://doi.org/10.3390/nu11102483

García-Villalba, R., Beltrán, D., Espín, J. C., Selma, M. V., & Tomás-Barberán, F. A. (2013). Time course production of urolithins from ellagic acid by human gut microbiota. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(37), 8797–8806. https://doi.org/10.1021/jf402498b

García-Villalba, R., Espín, J. C., & Tomás-Barberán, F. A. (2016). Chromatographic and spectroscopic characterization of urolithins for their determination in biological samples after the intake of foods containing ellagitannins and ellagic acid. *Journal of Chromatography. A*, *1428*, 162–175. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.08.044

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Gezici, S., & Sekeregolu, N. (2019). Neuroprotective potential and phytochemical composition of acorn fruits. *Industrial Crops and Products*, *128*(5), 13–17. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.082

Gill, C., Latimer, C., Ternan, N., Pourshahidi, K., Fontana, M., Lawther, R., … Tuohy, K. (2019). October 15 – 18). *Wild strawberry polyphenols exhibit gut-protective bioactivity following in vivo digestion* [Conference presentation]. Proceedings of the 13th European Nutrition Conference, FENS 2019, Dublin, Ireland.

Giménez-Bastida, J. A., Ávila-Gálvez, M. Á., Espín, J. C., & González-Sarrías, A. (2020). The gut microbiota metabolite urolithin A, but not other relevant urolithins, induces p53-dependent cellular senescence in human colon cancer cells. *Food and Chemical Toxicology*, *139*, 111260. https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111260

Golbach, J. L., Ricke, S. C., O'Bryan, C. A., & Crandall, P. G. (2014). Riboflavin in nutrition, food processing, and analysis - A Review. *Journal of Food Research*, *3*(6), 23–35. https://doi.org/10.5539/jfr.v3n6p23

Gondek, E., Nowak, D., Jakubczyk, E., Kamińska-Dwórznicka, A., & Samborska, K. (2016). Wybrane właściwości fizyczne ekstrudowanego pieczywa bezglutenowego wzbogaconego dodatkiem mąki z żołędzi. *Zeszyty Naukowe PWSZ im. Witelona w Legnicy*, *3*(20), 33–41 (in Polish). Retrieved from http://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-d2e7a34d-427d-4637-98b1-76728266eede/c/zn20_3.pdf (accessed on 31 July 2020).

Gonzaga, M., Batista, M., Guiné, R. P. F., & Correia, P. (2015). December 2 – 4). *Development and characterization of wheat breads with acorn flour* [Conference presentation]. International Conference on Engineering, Covilhã, Portugal.

González-Barrio, R., Truchado, P., Ito, H., Espín, J. C., & Tomás-Barberán, F. (2011). UV and MS identification of urolithins and nasutins the bioavailable metabolites of ellagitannins and ellagic acid in different mammals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59*(4), 1152–1162. https://doi.org/10.1021/jf103894m

Górnaś, P. (2019). Oak *Quercus rubra* L. and *Quercus robur* L. acorns as an unconventional source of gamma- and beta-tocopherol. *European Food Research and Technology*, *245*, 257–261. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3150-0

Gwirtz, J. A., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Processing maize flour and corn meal food products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1312*(1), 66–75. https://doi.org/10.1111/nyas.12299

Hadnađev, T. D., Torbica, A., Pojić, M., & Hadnađev, M. (2011). The role of empirical rheology in flour quality control. In I. Akyar (Ed.), *Wide spectra of quality control* (pp. 335–360). Rijeka, Croatia: IntechOpen.

Hager, A. S., Wolter, A., Jacob, F., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2012). Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flour. *Journal of Cereal Science*, *56*(2), 239–247. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.06.005

Hashemi, S. M. B., Gholamhosseinpour, A., & Khaneghah, A. M. (2019). Fermentation of acorn dough by lactobacilli strains: Phytic acid degradation and antioxidant activity. *LWT Food Science and Technology*, *100*(10), 144–149. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.054

Hejtmánková, K., Lachman, J., Hejtmánková, A., Pivec, V., & Janovská, D. (2010). Tocols of selected spring wheat (*Triticum aestivum* L.), einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.) and wild emmer (*Triticum dicoccum Schuebl* [Schrank]) varieties. *Food Chemistry*, *123*(4), 1267–1274. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.064

Hoeche, U., Kelly, A., & Coci, F. (2014). June 3 – 4). *Acorn: Staple food from the past or novel food for the future? – An investigation into the desirability and acceptability of scorn flour products* [Conference presentation]. Dublin Gastronomy Symposium, Dublin, Ireland.

Holsher, H. D. (2017). Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota. *Gut Microbes*, *8*(2), 172–184. https://doi.org/10.1080/19490976.2017.1290756

Holt, R. R., Zuelch, M. L., Charoenwoodhippong, P., Al-Dashti, Y. A., Hackman, R. M., & Keen, C. L. (2020). Effects of short-term consumption of strawberry powder on select parameters of vascular health in adolescent males. *Food & Function*, *11*(1), 32–44. https://doi.org/10.1039/c9fo01844a

Hong, J.-H., Ikeda, K., Kreft, I., & Yasumoto, K. (1996). Near-infrared diffuse spectroscopic analysis of the amounts of moisture, protein, starch, amylose and tannin in buckwheat flours. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, *42*(4), 359–366. https://doi.org/10.3177/jnsv.42.359

Hourston, J. E., Ignatz, M., Reith, M., Leubner-Metzger, G., & Steinbrecher, T. (2017). Biomechanical properties of wheat grains: The implications on milling. *Journal of the Royal Society Interface*, *126*(14), 1–12. https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0828

Hrušková, M., Švec, I., & Kadlčíková, I. (2019). Effect of chestnut and acorn flour on wheat/wheat-barley flour properties and bread quality. *International Journal of Food Studies*, *8*, 41–57. https://doi.org/10.7455/IJSFS/8.1.2019.A4

Irinislimane, H., & Belhaneche-Bensemra, N. (2017). Extraction and characterization of starch from oak acorn, sorghum, and potato and adsorption application for removal of Maxilon Red GRL from wastewater. *Chemical Engineering Communications*, *204*(8), 897–906. https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1325739

Ishimoto, H., Shibata, M., Myojin, Y., Ito, H., Sugimoto, Y., Tai, A., & Hatano, H. (2011). *In vivo* anti-inflammatory and antioxidant properties of ellagitannin metabolite urolithin A. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, *21*(19), 5901–5904. https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2011.07.086

Jovanovich, G., Campana, L., Cardós, M., & Lupano, C. E. (2003). Correlation between starch damage, alveograph parameters, water absorption and gelatinization enthalpy in flours obtained by industrial milling of Argentinian wheats. *Journal of Food Technology*, *1*(4), 168–172.

Kalnina, S., Rakcejeva, T., Gramatina, I., & Kunkulberga, D. (2014). Investigation of total dietary fiber, $B_1$ and $B_2$ vitamin content of flour blend for pasta production. *Proceedings of the The 9th Baltic Conference on Food Science and Technology "Food for Consumer Well-Being", FOODBALT 2014* ( 133–137), Latvia.

Kang, I., Buckner, T., Shay, N. F., Gu, L., & Chung, S. (2016). Improvements in metabolic health with consumption of ellagic acid and subsequent conversion into urolithins: Evidence and mechanisms. *Advances in Nutrition*, *7*(5), 961–972. https://doi.org/10.3945/an.116.012575

Kaplan, M., Kokten, K., Bengu, A. S., Kardes, Y. M., Das, Y., & Sekerci, A. D. (2019). Fatty acid composition of different *Quercus* species. *Chemistry of Natural Compounds*, *55*(2), 313–315. https://doi.org/10.1007/a10600-019-02675-x

Kariluoto, S., Vahteristo, L., Salovaara, H., Katina, K., Liukkonen, K.-H., & Piironen, V. (2004). Effect of baking method and

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

fermentation on folate content of rye and wheat breads. *Cereal Chemistry*, *81*(1), 134–139. https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.1.134

Kaya, E., & Kamalak, A. (2012). Potential nutritive value and condensed tannin contents of acorns from different oak species. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, *18*(6), 1061–1066. https://doi.org/10.9775/kvfd.2012.7053

Kilic, U., Boga, M., & Guven, I. (2010). Chemical composition and nutritive value of oak (*Quercus robur)* nut and leaves. *Journal of Applied Animal Research*, *38*(1), 101–104. https://doi.org/10.1080/09712119.2010.9707165

Kim, J.-M., & Joo, J-I. (2019). Quality characteristics of acorn bread added with milk. *Journal of the Korean Society of Food Culture*, *34*(3), 343–352. https://doi.org/10.7318/KJFC/2019.34.3.343

Kim, S. H., Lee, W. K., Choi, C. S., & Cho, S. M. (2012). Quality characteristics of muffins with added acorn jelly powder and acorn ethanol extract powder. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, *41*(3), 369–375.

King, J. A., Jeong, J., Underwood, F., Quan, J., Panaccione, N., Windsor, J. W., … Kaplan, G. G. (2020). Incidence of celiac disease is increasing over time: A systematic review and meta-analysis. *The American Journal of Gastroenterology*, *115*(4), 507–525. https://doi.org/10.14309/ajg.0000000000000523

Kiss, A. K., & Piwowarski, P. (2016). Ellagitannins, gallotannins and their metabolites – The contribution to the anti-inflammatory effect of food products and medicinal plants. *Current Medicinal Chemistry*, *25*(37), 4946–4967. https://doi.org/10.2174/0929867323666160919111559

Koczoń, P., Lipińska, E., Czerniawska-Piątkowska, E., Mikuła, M., & Bartyzel, B. J. (2016). The change of fatty acids composition of Polish biscuits during storage. *Food Chemistry*, *202*, 341–348. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.019

Korus, J., Witczak, M., Ziobro, R., & Juszczak, L. (2015). The influence of acorn flour on rheological properties of gluten- free dough and physical characteristics of the bread. *European Food Research and Technology*, *240*(6), 1135–1143. https://doi.org/10.1007/s00217-015-2417-y

Korus, A., Gumul, D., Krystyjan, M., Juszczak, L., & Korus, J. (2017). Evaluation of the quality, nutritional value and antioxidant activity of gluten – free biscuits made from corn – acorn flour or corn – hemp flour biscuits. *European Food Research and Technology*, *243*(8), 1429–1438. https://doi.org/10.1007/.s00217-017-2853-y

Krumina-Zemture, G., & Beitane, I. (2017). Fatty acid composition in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) Flours and their extruded products. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development* ( 66–69). Lithuania. Retrieved from https://doi.org/10.15544/RD.2017.017

Kumar, P., Yadava, R. K., Gollen, B., Kumar, S., Verma, R. K., & Yadav, S. (2011). Nutritional contents and medicinal properties of wheat: A review. *Life Sciences and Medicine Research*, *22*, 1–10.

Kunachowicz, H., Przygoda, B., Nadolna, I., & Iwanow, K. (2018). *Tabele składu i wartości odżywczej żywności* (2nd ed). Warszawa, Poland: PZWL (in Polish).

Kweon, M., Martin, R., & Souza, E. (2009). Effect of tempering conditions on milling performance and flour functionality. *Cereal Chemistry*, *86*(1), 12–17. https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-1-0012

Lebiedzińska, A., & Szefer, P. (2006). Vitamins B in grain and cereal–grain food, soy-products and seeds. *Food Chemistry*, *95*(1), 116–122. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.024

Lee, W. Y., Na, S. J., Park, E.-J., & Han, S. U. (2014). The comparison of tannins and nutritional components in the acorn of major oak trees in Korea. *Korean Journal of Plant Resources*, *27*(4), 279–285. https://doi.org/10.7732/kjpr.2014.27.4.279

Lei, Y., Huang, Y., Wang, Y., & He, X. (2018). Potential anti-neuroinflammatory triterpenoids isolated from Chinese acorns (*Quercus serrata* var. *brevipetiolata*). *Journal of Functional Foods*, *50*, 18–25. https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.09.022

Levent, H., & Bilgiçli, N. (2012). Evaluation of physical, chemical and sensory properties of Turkish flat breads (Bazlama and Yufka) supplemented with lupin, buckwheat and oat flours. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, *2*(5), 89–95. https://doi.org/10.5923/j.food.20120205.04

Li, S., Zhou, Y., Liu, M., Zhang, Y., & Cao, S. (2015). Nutrient composition and starch characteristics of *Quercus glandulifera* Bl. seeds from China. *Food Chemistry*, *185*, 371–376. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.147

Lin, Y., Lu, Y., Song, Z., & Huang, D. (2018). Characterizations of the endogenous starch hydrolase inhibitors in acorns of *Quercus fabri* Hance. *Food Chemistry*, *258*, 111–117. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.001

Litwinek, D., Buksa, K., Gambuś, H., Kowalczyk, M., & Boreczek, J. (2017). Ocena jakości handlowych mąk całoziarnowych – pszennej orkiszowej, pszennej zwyczajnej i żytniej oraz uzyskanych z nich zakwasów spontanicznych. *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, *24*(4), 76–89. (in Polish). https://doi.org/10.15193/zntj/2017/113/212

Louis, P., & Flint, H. J. (2017). Formation of propionate and butyrate by the human colonic microbiota. *Environmental Microbiology*, *19*(1), 29–41. https://doi.org/10.1111/1462-2920.13589

Lu, D., Yang, Y., Sun, C., & Wang, S. (2019). Determination of tocopherols and tocotrienols in cereals and nuts by dispersive solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry. *Analytical Methods*, *42*(11), 5439–5446. https://doi.org/10.1039/C9AY01634A

Łuczaj, Ł. (2011). Dziko rosnące rośliny jadalne użytkowane w Polsce od połowy XIX w. do czasów współczesnych. *Etnobiologia Polska*, *1*, 57–125 (in Polish).

Łuczaj, Ł., Adamczak, A., & Duda, M. (2014). Tannin content in acorns (*Quercus* spp.) from Poland. *Dendrobiology*, *72*, 103–111. https://doi.org/10.12657/denbio.072.009

Makhlouf, F., Squeo, G., Barkat, M., Trani, A., & Caponio, F. (2018). Antioxidant activity, tocopherols and polyphenols of acorn oil obtained from *Quercus* species grown in Algeria. *Food Research International*, *114*, 208–213. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.010

Makhlouf, F. Z., Squeo, G., Difonzo, G., Faccia, M., Pasqualone, A., Summo, C., … Caponio, F. (2020). Effects of storage on the oxidative stability of acorn oils extracted from three different *Quercus* species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(1), 131–138. https://doi.org/10.1002/jsfa.10623

Martins, R. B., Nunes, M. C., Ferreira, L. M. M., Peres, J. A., Barros, A. I. R. N. A., & Raymundo, A. (2020). Impact of acorn flour on gluten-free dough rheology properties. *Foods*, *9*(5), 560–574. https://doi.org/10.3390/foods9050560

Masmoudi, M., Besbes, S., Bouaziz, A., Khlifi, M., Yahyaoui, D., & Attia, H. (2020). Optimization of acorn (*Quercus suber* L.) muffin formulations: Effect of using hydrocolloids by a mixture design approach. *Food Chemistry*, *328*, 127082. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127082

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lomza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Migaskó, H., & Ecseri, K. (2020). Significance of *Quercus* species in nutrition. *Gradus*, *7*(1), 6–11.

Mildner-Szkudlarz, S., Zawirska-Wojtasik, R., Obuchowski, W., & Gośliński, M. (2009). Evaluation of antioxidant activity of green tea extract and its effect on the biscuits lipid fraction oxidative stability. *Journal of Food Science*, *74*(8), 362–370. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01313.x

Mirsaeedghazi, H., Emam-Djomeh, Z., & Mousavi, M. (2008). Rheometric measurement of dough rheological characteristics and factors affecting it. *International Journal of Agriculture and Biology*, *10*(1), 112–119.

Molavi, H., Keramat, J., & Raisee, B. (2015). Evaluation of the cake quality made from acorn – Wheat flour blends as a functional food. *Journal of Food Biosciences and Technology*, *5*(2), 53–60.

Molavi, H., Ali Razavi, S. M., & Farhoosh, R. (2018). Impact of hydrothermal modifications on the physicochemical, morphology, crystallinity, pasting and thermal properties of acorn starch. *Food Chemistry*, *245*, 385–393. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.117

Molina-García, L., Martínez-Expósito, R., Fernández-de Córdova, M. L., & Llorent-Martínez, E. J. (2018). Determination of the phenolic profile and antioxidant activity of leaves and fruits of Spanish *Quercus coccifera*. *Hindawi Journal of Chemistry*, *2018*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2018/2573270

Mota, C., Santos, M., Mauro, R., Samman, N., Matos, A. S., Torres, D., & Castanheira, I. (2016). Protein content and amino acids profile of pseudocereals. *Food Chemistry*, *193*, 55–61. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.043

Ndife, J., Abdulraheem, L., & Zakari, U. (2011). Evaluation of the nutritional and sensory quality of functional breads produced from whole wheat and soya bean flour blends. *African Journal of Food Science*, *5*(8), 466–472.

Neophytou, C., Palli, G., Dounavi, A., & Aravanopoulos, F. (2007). Morphological differentiation and hybridization between *Quercus alnifolia poech* and *Quercus coccifera* L. (*Fagaceae*) in Cyprus. *Silvae Genetica*, *56*(6), 271–277. https://doi.org/10.1515/sg-2007-0038

Nielsen, M. M., & Hansen, Å (2008). Rapid High-Performance Liquid Chromatography determination of tocopherols and tocotrienols in cereals. *Cereal Chemistry*, *85*, 248–251. https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-2-0248

Nikolić, N., Radulović, N., Momcilowić, B., Nikolić, G., Lazić, M., & Todorovic, Z. (2008). Fatty acids composition and rheology properties of wheat and wheat and white and white or brown rice brown mixture. *European Food Research and Technology*, *227*, 1543–1548. https://doi.org/10.1007/s00217-008-0877-z

Oliveira, L. C., Rosell, C. M., & Steel, C. J. (2015). Effect of the addition of whole-grain wheat flour and of extrusion process parameters on dietary fibre content, starch transformation and mechanical properties of a ready-to-eat breakfast cereal. *International Journal of Food Science and Technology*, *50*, 1504–1514. https://doi.org/10.1111/ijfs.12778

Özcan, T. (2006). Total protein and amino acid compositions in the acorns of Turkish *Quercus* L. taxa. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *53*, 419–429. https://doi.org/10.1007/s10722-004-1337-7

Özcan, T., & Bayçu, G. (2005). Some elemental concentrations in the acorns of Turkish *Quercus* L. (*Fagaceae*) taxa. *Pakistan Journal of Botany*, *37*(2), 361–371.

Papoti, W. T., Kizaki, N., Skaltsi, A., Karayannakidis, P. D., & Papageorgiou, M. (2018). The phytochemical rich potential of acorn (*Quercus aegilops*) products and by products. *Food Science and Biotechnology*, *27*(3), 819–828. https://doi.org/10.1007/s10068-017-0293-x

Park, J.-I., Joo, J.-I., & Kim, J.-M. (2017). Changes in the quality changes of bread added with acorn flour during the storage periods. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, *27*(5), 529–539. https://doi.org/10.17495/easdl.2017.10.27.5.529

Parsaei, M., Goli, M., & Abbasi, H. (2018). Oak flour as a replacement of wheat and corn flour to improve biscuit antioxidant activity. *Food Science & Nutrition*, *6*(2), 253–258. https://doi.org/10.1002/fsn3.524

Pasqualone, A., Makhlouf, F. Z., Barkat, M., Difonzo, G., Summo, C., Squeo, G., & Caponio, F. (2019). Effect of acorn flour on the physico-chemical and sensory properties of biscuits. *Heliyon*, *5*(8), e02242. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02242

Pignone, D., & Laghetti, G. (2010). On sweet acorn (*Quercus* spp.) cake tradition in Italian cultural and ethnic islands. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *57*(8), 1261–1266. https://doi.org/10.1007/s10722-010-9625-x

Pinna, C. (2013). Acorn bread: A traditional food of the past in Sardinia (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, *14*(3), S71–S74. https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.11.012

Pinto, J. T., & Zempleni, J. (2016). Riboflavin. *Advances in Nutrition*, *7*(5), 973–975. https://doi.org/10.3945/an.116.012716

Pleszczyńska, M., & Szczodrak, J. (2005). Taniny i ich rozkład enzymatyczny. *Biotechnologia*, *1*(68), 152–165 (in Polish).

Polimac, M., & Komlenić, D. K. (2015). Acorn flour – naturally gluten free. *Proceedings of the 8th International Congress Flour-Bread'15, 10th Croatian Congress of Cereal Technologists* ( 177–181). Croatia.

Polimac, M., Komlenić, D. K., & Lukinac, J. (2015). Possibilities of using acorn flour in products based on flour. *Proceedings of the 8th International Congress Flour-Bread'15, 10th Croatian Congress of Cereal Technologists* ( 33–48). Croatia.

Popova, A., & Mihaylova, D. (2019). Antinutrients in plant-based foods: A review. *The Open Biotechnology Journal*, *13*, 68–76. https://doi.org/10.2174/1874070701913010068

Purabdolah, H., Sadeghi, A., Ebrahimi, M., Kasheninejad, M., Tabarestani, H. S., & Mohamadzadeh, J. (2020). Techno-functional properties of the selected antifungal predominant LAB isolated from fermented acorn (*Quercus persica*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, *14*, 1754–1764. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00423-2

Rababah, T. M., Ereifej, K. I., Al-Mahasneh, M. A., Alhamad, M. N., Alrababah, M. A., & Muhammad, A. H. (2008). The physicochemical composition of acorns for two mediterranean *Quercus* species. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, *4*(2), 131–137.

Rakić, S., Povrenović, D., Tešewić, V., Simić, M., & Maletić, R. (2006). Oak acorn, polyphenols and antioxidants activity in functional food. *Journal of Food Engineering*, *74*, 416–423. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.057

Rakić, S., Petrowić, S., Kukić, J., Jadranin, M., Tešewić, V., Povrenović, D., & Šiler-Marinković, S. (2007). Influence of thermal treatment on phenolic compounds and antioxidant properties of oak acorns from Serbia. *Food Chemistry*, *104*(2), 830–834. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.025

Rashid, R. M. S., Sabir, D. A., & Hawramee, O. K. (2014). Effect of sweet acorn flour of common oak (*Quercus aegilops L.*) on locally Iraqi pastru (kulicha) products. *Journal of Zankoy Sulaimani – A Special Issue*, *16*, 244–249. https://doi.org/10.17656/jzs.10327

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Reddy, V., Urooj, A., & Kumar, A. (2005). Evaluation of antioxidant activity of some plant extracts and their application in biscuits. *Food Chemistry*, *90*, 317–321. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.038

Regula, J., Cerba, A., Suliburska, J., & Tinkov, A. A. (2018). *In vitro* bioavailability of calcium, magnesium, iron, zinc, and copper from gluten-free breads supplemented with natural additives. *Biological Trace Element Research*, *182*, 140–146. https://doi.org/10.1007/s12011-017-1065-4

Rohi, M., Pasha, I., Butt, M. S., & Nawaz, H. (2013). Variation in the levels of b-vitamins and protein content in wheat flours. *Pakistan Journal of Nutrition*, *12*(5), 441–447. https://doi.org/10.3923/PJN.2013.441.447

Roman, O., Heyd, B., Broyart, B., Castillo, R., & Maillard, M.-N. (2013). Oxidative reactivity of unsaturated fatty acids from sunflower, high oleic sunflower and rapeseed oils subjected to heat treatment, under controlled conditions. *LWT - Food Science and Technology*, *52*(1), 49–59. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.12.011

Rosenberg, D. (2008). The possible use of acorns in past economies of the Southern Levant: A staple food or a negligible food source? *Levant*, *40*(2), 167–175. https://doi.org/10.1179/175638008X348025

Roukos, C. N., Parissi, Z. M., Kyriazopoulos, A. P., & Abraham, E. M. (2017). Nutritional quality of kermes oak (*Quercus coccifera* L.) acorns as affected by altitude in a typical Mediterranean area. *Archives Animal Breeding*, *60*, 71–78. https://doi.org/10.5194/aab-60-71-2017

Rutledge, G. A., Fisher, D. R., Miller, M. G., Kelly, M. E., Bielinski, D. F., & Shukitt-Hale, B. (2019). The effects of blueberry and strawberry serum metabolites on age-related oxidative and inflammatory signalling *in vitro*. *Food & Function*, *10*(12), 7707–7713. https://doi.org/10.1039/c9fo01913h

Rybicka, I., & Gliszczyńska-Świgło, A. (2017a). Minerals in grain gluten – free products. The content of calcium, potassium, magnesium, sodium, copper, iron, manganese and zinc. *Journal of Food Composition and Analysis*, *59*, 61–67. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.02.006

Rybicka, I., & Gliszczyńska-Świgło, A. (2017b). Gluten-Free flours from different raw materials as the source of vitamin $B_1$, $B_2$, $B_3$ and $B_6$. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, *63*(2), 125–132. https://doi.org/10.3177/jnsv.63.125

Saffarzadeh, A., Vincze, L., & Csapó, J. (1999). Determination of the chemical composition of acorn (*Quercus branti*), *Pistacia atlantica* and *Pistacia khinjuk* seeds as non-conventional feedstuffs. *Acta Agraria Kaposváriensis*, *3*(3), 59–69.

Selma, M. V., González-Sarrías, A., Salas-Salvadó, J., Andrés-Lucueva, C., Alasalvar, C., Örem, A., … Espín, J. C. (2018). The gut microbiota metabolism of pomegranate or walnut ellagitannins yields two urolithin-metabotypes that correlate with cardiometabolic risk biomarkers: Comparison between normoweight, overweight-obesity and metabolic syndrome. *Clinical Nutrition*, *37*(3), 897–905. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.03.012

Shishehbor, F., Salimi, Z., Veissi, M., Malehi, A. S., Shiri-Nasab, M., & Helli, B. (2020). Effect of oak flour on glycemic index and satiety index of white bread. *Iranian Red Crescent Medical Journal*, *22*(1), 1–7. https://doi.org/10.5812/ircmj.95552

Sieniawska, E., & Baj, T. (2017). Tannins. In S. Badal & R. Delgoda (Eds.), *Pharmacognosy. Fundamentals, Applications and Strategy* (pp. 199–227). London, England: Elsevier.

Silacci, P., & Trettola, M. (2019). Pomegranate's ellagitannins: Metabolism and mechanisms of health promoting properties pomegranate's ellagitannins: Metabolism and mechanisms of health promoting properties. *Nutrition & Food Science International Journal*, *9*(4), 76–82. https://doi.org/10.19080/NFSIJ.2019.09.555766

Silva, S., Costa, E. M., Borges, A., Carvalho, A. P., Monteiro, M. J., & Pintado, M. M. E. (2016). Nutritional characterization of acorn flour (a traditional component of the Mediterranean gastronomical folklore). *Journal of Food Measurement and Characterisation*, *10*, 584–588. https://doi.org/10.1007/s11694-016-9340-1

Skendi, A., Mouselemidou, P., Papageorgiou, M., & Papastergiadis, E. (2018). Effect of acorn meal-water combinations on technological properties and fine structure of gluten-free bread. *Food Chemistry*, *253*, 119–126. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.144

Soni, P. L., Sharma, H., Dun, D., & Gharia, M. M. (1993). Physicochemical properties of *Quercus leucotrichophora* (oak) starch. *Starch/Stärke*, *45*, 127–130. https://doi.org/10.1002/star.19930450403

Sonnenburg, J. L., & Bäckhed, F. (2016). Diet–microbiota interactions as moderators of human metabolism. *Nature*, *535*, 56–64. https://doi.org/10.1038/nature18846

Sujka, K., Koczoń, P., Ceglińska, A., Reder, M., & Ciemniewska-Żytkiewicz, H. (2017). The Application of FT-IR Spectroscopy for quality control of flours obtained from Polish producers. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, *2017*, 4315678. https://doi.org/10.1155/2017/4315678

Šálková, T., Divišová, M., Kadochová, Š., Delawská, K., Kadlčková, E., Němečková, L., … Žemličková, A. (2011). Acorns as a food resource. An experiment with acorn preparation. *Interdisciplinaria Archaelogica Natural Sciences in Archeology*, *2*(2), 133–141. https://doi.org/10.24916/iansa.2011.2.6

Švec, I., Hrušková, M., & Kadlčíková, I. (2018). Features of flour composites based on the wheat or wheat-barley flour combined with acorn and chestnut. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, *10*(1), 89–97. https://doi.org/10.17508/CJFST.2018.10.1.16

Şenol, F. S., Şekeroğlu, N., Gezici, S., Kiliç, E., & Erdoğan Orhan, I. (2018). Neuroprotective potential of the fruit (acorn) from *Quercus coccifera* L. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *42*, 82–87. https://doi.org/10.3906/tar-1711-18

Tadayoni, M., Sheikh-Zeinoddin, M., & Soleimanian-Zad, S. (2015). Isolation of bioactive polysaccharide from acorn and evaluation of its functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, *72*, 179–184. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.015

Tadayoni, M., Sheikh-Zeinoddin, M., & Soleimanian-Zad, S. (2017). Evaluation of prebiotic activity of polysaccharides extracted from oak. *Journal Food Processing and Storage*, *9*(1), 53–66.

Tantray, Y. R., Wani, M. S., & Hussain, A. (2017). Genus Quercus: An overview. *International Journal of Advanced Research in Science and Engineering*, *6*, 1880–1886.

Tellers, E. (2018. March 5). *Going Gluten-free with confidence*. Nutraceuticals Now. Retrieved from https://www.nutraceuticalsnow.com/articles/2018/03/05/going-gluten-free-confidence/

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Tumen, I., Eyuboglu, S., Kurtça, M., & Sekeroglu, N. (2018). Chemical compounds of oak (Quercus petraea (Matt.) Liebl.) species with different medicinal properties in eastern Black Sea region. *Annals of Phytomedicine*, *7*(1), 140–146. https://doi.org/10.21276/ap.2018.7.1.17

Torabi, S., Mohtarami, F., & Dabbagh Mazhary, M. R. (2020). The influence of acorn flour on physico-chemical and sensory properties of gluten free biscuits. *Food Science and Technology*, *16*(97), 171–181. https://doi.org/10.29252/fsct.16.97.171

USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Legacy Release (2019, August 05). U.S. Department of Agriculture (USDA). Retrieved from http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/

Vaiciulyte-Funk, L., Juodeikiene, G., & Bartkiene, E. (2015). The relationship between wheat baking properties, specific high molecular weight glutenin components and characteristic of varieties. *Zemdirbyste - Agriculture*, *102*(2), 229–238. https://doi.org/10.13080/z-a.2015.102.030

Vidrih, R., Vidakovič, S., & Abramowič, H. (2010). Biochemical parameters and oxidative resistance to thermal treatment of refined and unrefined vegetable edible oils. *Czech Journal of Food Sciences*, *28*(5), 376–384. https://doi.org/10.17221/202/2008-CJFS

Villalba, K. J. O., Barka, F. V., Pasos, C. V., & Rodríguez, P. E. (2019). Food ellagitannins: Structure, metabolomic fate, and biological properties. In A. Aires (Ed.), *Tannins - Structural Properties, Biological Properties and Current Knowledge* (pp. 26–46). Rijeka, Croatia: IntechOpen.

Vinha, A. F., Costa, A. S. G., Barreira, J. C. M., Pacheco, R., & Oliveira, B. P. P. (2016). Chemical and antioxidant profiles of acorn tissues from *Quercus* spp.: Potential as new industrial raw materials. *Industrial Crops Products*, *94*, 143–151. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.027

Weipert, D. (2006). Fundamentals of rheology and spectrometry. In L. Popper, W. Schäfer, & W. Freund (Eds.), *Future of Flour – A Compendium of Flour Improvement* (pp. 117–146). Clenze, Germany: Verlag Agrimedia.

WHO (2004). *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. World Health Organization, Food and Agricultural Organization of the United Nations.

Wilson, B., & Whelan, K. (2017). Prebiotic inulin-type fructans and galacto-oligosaccharides: Definition, specificity, function, and application in gastrointestinal disorders. *Journal Gastroenterology and Hepatology*, *32*(Suppl. 1), 64–68. https://doi.org/10.1111/jgh.13700

Xu, J., Cao, J., Yue, J., Zhang, X., & Zhao, Y. (2018a). New triterpenoids from acorns of *Quercus liaotungensis* and their inhibitory activity against α-glucosidase, α-amylase and protein-tyrosine phosphatase 1B. *Journal of Functional Foods*, *41*, 232–239. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.054

Xu, J., Wang, X., Su, G., Yue, J., Sun, Y., Cao, J., … Zhao, Y. (2018b). The antioxidant and anti-hepatic fibrosis activities of acorns (*Quercus liaotungensis*) and their natural galloyl triterpenes. *Journal of Functional Foods*, *46*, 567–578. https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.05.031

Yang, K.-H., Ahn, J.-H., Kim, H.-J., Lee, J.-Y., You, B.-R., Song, J.-E., … Kim, M.-R. (2011). Properties of nutritional compositions and antioxidant activity of acorn crude starch by geographical origins. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, *40*(7), 928–934. https://doi.org/10.3746/jkfn.2011.40.7.928

Yassen, A. A., El-Hafeez Yaseen, A., El-Hafeez, A., Shouk, A. A., & Ramadan, M. T. (2010). Corn-wheat pan bread quality as affected by hydrocolloids. *Journal of American Science*, *6*(10), 684–690.

Youssef, M. K. E., Nassar, A. G., Fishawy, F. A., & Mostafa, M. (2017). Assessment of proximate chemical composition and nutritional status of wheat biscuits fortified with oat powder. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, *47*(5), 83–94. https://doi.org/10.21608/AJAS.2016.2071

Yuzugulen, J., Noshadi, B., Shukur, K., Sahin, M. F., & Gulcan, H. O. (2019). The metabolites of ellagitannin metabolism urolithins display various biological activities. *EMU Journal of Pharmaceutical Sciences*, *2*(2), 102–110.

Zavereze, E., Pinto, V. Z., Klein, B., El Halal, S. L. M., Eliaz, M. C., Prentice-Hernández, C., & Dias, A. R. G. (2012). Development of oxidised and heat–moisture treated potato starch film. *Food Chemistry*, *132*(1), 344–350. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.090

**How to cite this article:** Szabłowska E, Tańska M. Acorn flour properties depending on the production method and laboratory baking test results: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2021;20:980–1008. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12683

15414337, 2021, 1, Downloaded from https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12683 by State College of Computer Science & Business Admin in Lamza, Wiley Online Library on [03/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Olsztyn, 3.07.2023 r.
/miejscowość, data/

**Dr hab. inż. Małgorzata Tańska, prof. UWM**
Katedra Przetwórstwa i Chemii Surowców Roślinnych
Wydział Nauki o Żywności
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Pl. Cieszyński 1, 10-726 Olsztyn

# OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA

Oświadczam, że w pracy:

Szabłowska E., Tańska M., 2021. Acorn flour properties depending on the production method and laboratory baking test results: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 20(1), 980-1008, https://doi.org/10.1111/1541-4337.12683

mój udział polegał na wsparciu merytorycznym w: opracowaniu koncepcji pracy, przygotowaniu wstępnej i ostatecznej wersji manuskryptu, oraz pełnieniu roli autora korespondencyjnego.

Jednocześnie wyrażam zgodę, aby wymieniona praca została wykorzystana w przewodzie doktorskim mgr inż. Emilii Szabłowskiej.

Małgorzata Tańska
.....
/podpis współautora/