ŻYWNOŚĆ. NAUKA. TECHNOLOGIA. JAKOŚĆ, 2025, 32, 4 (145), 117 – 135

DOI: 10.15193/zntj/2025/145/560

JOANNA STASIAK, JUSTYNA LIBERA, DARIUSZ STASIAK, MONIKA SUJKA, DOROTA TETERYCZ

WYKORZYSTANIE AQUAFABY I INULINY Z CYKORII W PRODUKCJI WEGAŃSKICH BEZ: WPŁYW NA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOCHEMICZNE, MIKROBIOLOGICZNE I SENSORYCZNE

S t r e s z c z e n i e

Wprowadzenie. Aquafaba, czyli woda pozostała po obróbce termicznej ciecierzycy, jest powszechnie wykorzystywana jako zamiennik jaj. Stwarza to możliwość tworzenia wegańskich potraw, w duchu zero waste, przy jednoczesnym zachowaniu pożądanych właściwości fizykochemicznych i sensorycznych produktu spożywczego. Zbadanie wpływu dodatku inuliny z cykorii w technologii bez z aquafaby było celem niniejszego badania. Porównano cechy fizykochemiczne, strukturalne, mikrobiologiczne i sensoryczne wegańskiej bezy z tradycyjną bezą z jaj kurzych. Zbadano stabilność i objętość piany powstałej podczas ubijania aquafaby, a w gotowym produkcie, za pomocą metod instrumentalnych, oznaczono podstawowy skład chemiczny, barwę i teksturę, aktywność wody, wykonano także analizę sensoryczną i ocenę mikrobiologiczną.

Wyniki i wnioski. Badania wykazały, że bezy przygotowane z aquafaby miały jaśniejszą barwę w porównaniu z wariantami jajecznymi, cechowały się też aż sześciokrotnie niższą zawartością białka i podobną zawartością węglowodanów przyswajalnych. Analiza sensoryczna wykazała, że wegańskie bezy charakteryzowały się łagodniejszym smakiem, natomiast warianty jajeczne uzyskały wyższe oceny w zakresie smaku „bezowego" i słodkości. Dodatek inuliny korzystnie wpłynął na stabilizację struktury, twardość oraz jednorodność porów w produkcie. W produktach podczas przechowywania nie stwierdzono obecności bakterii tlenowych oraz *Enterobacteriaceae*. Niska zawartość wody w produkcie oraz niska aktywność wody (< 0,30) gwarantowały bezpieczeństwo mikrobiologiczne produktu. Wyniki wskazują, że połączenie aquafaby z inuliną stanowi nowe rozwiązanie technologiczne wpisujące się w aktualne trendy w żywności roślinnej. Bezy z aquafaby z dodatkiem inuliny są akceptowalne sensorycznie, mają odpowiednią strukturę oraz pożądane cechy fizykochemiczne.

Słowa kluczowe: aquafaba, białko jaja, inulina, wegańskie bezy, żywność funkcjonalna

Mgr inż. J. Stasiak ORCID: 0000-0001-5619-9387, Katedra Technologii Żywności Pochodzenia Zwierzęcego; dr inż. J. Libera ORCID: 0000-0002-1362-4168, Katedra Inżynierii i Technologii Zbóż; prof. UP dr hab. inż. D. Stasiak ORCID: 0000-0002-6172-3013, Katedra Technologii Żywności Pochodzenia Zwierzęcego; prof. UP dr hab. inż. M. Sujka ORCID: 0000-0001-9306-3913, Katedra Analizy i Oceny Jakości Żywności; dr inż. D. Teterycz ORCID: 0000-0002-8714-9814, Katedra Inżynierii i Technologii Zbóż, Wydział Nauk o Żywności i Biotechnologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Skromna 8, 20-704 Lublin. Kontakt: e-mail: justyna.libera@up.lublin.pl

Wprowadzenie

Aquafaba to płyn pozostający po gotowaniu nasion roślin strączkowych, przede wszystkim ciecierzycy, zawierający rozpuszczalne białka, skrobię, saponiny oraz inne związki powierzchniowo czynne, które nadają mu zdolność do tworzenia pian, emulsji i struktur żelowych [4, 34]. Jako produkt uboczny procesu gotowania może być w pełni zagospodarowany, co wpisuje się w założenia zrównoważonego rozwoju i koncepcję „zero waste" oraz odpowiada rosnącej potrzebie racjonalnego wykorzystywania surowców pochodzenia roślinnego [19, 35].

Właściwości technologiczne aquafaby wynikają z obecności składników umożliwiających stabilizację pian i emulsji, dzięki czemu może ona pełnić funkcję zamiennika białka jaja [4, 34]. Do jej najważniejszych zalet należy zdolność do tworzenia pian o parametrach zbliżonych do pian uzyskiwanych z białek jaj, roślinne pochodzenie, łatwa dostępność oraz możliwość wykorzystania frakcji ubocznej, co ma znaczenie zarówno ekonomiczne, jak i środowiskowe [4, 17, 28]. Ograniczeniem pozostaje jednak zmienność składu i właściwości, zależna od odmiany strączkowych, warunków ich gotowania i koncentracji ekstraktu, co może wpływać na powtarzalność rezultatów w procesach technologicznych [4, 34]. Ponadto niższa zawartość białka w porównaniu z białkiem jaja może ograniczać zdolność do wiązania podczas obróbki cieplnej [34].

Z uwagi na właściwości spieniające i emulgujące aquafaba jest szeroko wykorzystywana w technologii żywności, zwłaszcza w wyrobach cukierniczych, takich jak musy, kremy czy ciasta, gdzie pełni rolę zamiennika białka jaja [4, 7, 17, 28]. Aquafaba jest wykorzystywana do produkcji wegańskich bez [15, 19]. Znalazła także zastosowanie w produktach wegańskich i niskotłuszczowych, w tym w sosach emulsyjnych, napojach oraz wyrobach o obniżonej zawartości tłuszczu, a jej funkcjonalność może być dodatkowo modyfikowana poprzez wprowadzanie polisacharydów, takich jak inulina, poprawiających teksturę i stabilność pian [14, 25].

Równolegle rośnie zainteresowanie polisacharydami stabilizującymi, w tym inuliną, która łączy funkcję technologiczną (zagęszczanie, żelowanie, poprawa tekstury i stabilności pian) z prozdrowotną, pełniąc rolę prebiotyku [25]. Dodatek inuliny może zwiększać stabilność piany, poprawiać jej objętość i odporność na opadanie, co jest istotne w produkcji deserów [14].

Celem pracy było porównanie wegańskiej bezy z aquafaby z tradycyjną bezą z białek jaj pod względem właściwości fizykochemicznych, strukturalnych, mikrobiologicznych oraz sensorycznych. Zakres prac obejmował wytworzenie produktów, ocenę ich jakości po wypieku oraz po 90-dniowym przechowywaniu w temperaturze pokojowej.

Materiał i metody badań

Materiał do badań stanowiły cztery warianty bez: A (aquafaba), AI (aquafaba z inuliną), J (białko jaja) oraz JI (białko jaja z inuliną). Recepturę bez przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład recepturowy bez.
Table 1. Formulation composition of meringues.

Składnik / Ingredient	Próbka A / Sample A	Próbka AI / Sample AI	Próbka J / Sample J	Próbka JI / Sample JI
Białko jaja / Egg white [cm^3]	-	-	330	330
Aquafaba [cm^3]	330	330	-	-
Cukier puder [g] / Powdered sugar [g]	450	450	450	450
Skrobia ziemniaczana / Potato starch [g]	22,5	22,5	22,5	22,5
Sól [g] / Salt [g]	1,5	1,5	1,5	1,5
Sproszkowana inulina z cykorii / Chicory inulin powder [g]	-	9	-	9

Objaśnienie / Explanatory notes:
A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition.

Do przygotowania bez wykorzystano: jaja świeże rozmiar L (Agrowita Sp. z o.o.), ciecierzycę gotowaną (Levant Foods S.A.), skrobię ziemniaczaną (Melvit S.A.), cukier (Polski cukier S.A.), sól warzoną jodowaną (Qemetica Soda Polska S.A.) i inulinę z cykorii (100%) (Agnex Sp. z o.o.). Producent ciecierzycy gotowanej zadeklarował następujące składniki: ciecierzyca, woda, sól, przeciwutleniacz EDTA, konserwant: pirosiarczan sodu.

Masę bezową przygotowano poprzez ubijanie aquafaby (lub białek jaja) ze szczyptą soli przez 5 minut, przy maksymalnych obrotach blendera ręcznego z ubijaczką (Braun MultiQuick 5, DeLonghi Sp. z o.o., Warszawa). Następnie stopniowo dodawano cukier puder, a po uzyskaniu błyszczącej, stabilnej piany dodawano skrobię ziemniaczaną. Do wariantów AI i JI dodano na koniec inulinę i delikatnie wymieszano masę, używając najniższych obrotów ubijaka. Otrzymaną masę przełożono do rękawa cukierniczego i formowano okrągłe bezy (średnica 10 cm, wysokość 2 cm). Produkt pieczono w temperaturze 130°C przez 15 minut, następnie dosuszano w 100 °C przez 3 godziny, używając pieca konwekcyjnego (SPU-200, ZUT Colector, Kraków). Po zakończeniu wypieku bezy pozostawiano w uchylonym piecu do całkowitego ostygnięcia. Bezy (Ryc. 1) do czasu analizy przechowywano w szczelnie zamkniętych workach

polietylenowych, w temperaturze pokojowej i bez dostępu światła. Bezy badano po wystudzeniu bezpośrednio po produkcji oraz w 30., 60. i 90. dniu przechowywania.

Rycina 1. Wygląd upieczonych bez (autor fotografii J. Stasiak).
Figure 1. Appearance of baked meringues (photo by J. Stasiak).
Objaśnienie / Explanatory notes:
A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition.

Wydajność i stabilność piany

Porcję 50 cm^3 białka jaja lub aquafaby ubijano blenderem (Braun MultiQuick 5, DeLonghi Sp. z o.o., Warszawa) przez 5 minut. Otrzymaną pianę przenoszono do zlewki i mierzono jej objętość początkową (OP). Po 30 minutach określono ponownie objętość piany (O_{30}), po odlaniu wycieku. Analizę przeprowadzano w 3 powtórzeniach. Obliczono wydajność pienienia (FC) i stabilność piany (FS) według wzorów:

$$FC = \frac{OP}{O} \times 100\%$$

$$FS = \frac{O_{30}}{OP} \times 100\%$$

gdzie: O – objętość wyjściowa białka lub aquafaby [cm^3], OP – objętość piany po ubiciu [cm^3], O_{30} – objętość piany po 30 minutach [cm^3].

Objętość właściwa

Objętość właściwą bezy oznaczono metodą przemieszczenia nasion, zgodną z metodą AACC 10-05.010 z wykorzystaniem nasion prosa**.** Badanie przeprowadzono w 3 powtórzeniach. Objętość właściwą wyliczono ze wzoru:

$$OV = \frac{V}{m}$$

gdzie: OV – objętość właściwa [$cm^3 \cdot g^{-1}$], V – objętość próbki [cm^3], m – masa próbki [g].

Podstawowy skład chemiczny i zawartość wody

Podstawowy skład chemiczny bez określony został na podstawie receptury i charakterystyki składu poszczególnych surowców. Do obliczeń wykorzystano wartości uśrednione na podstawie informacji zaczerpniętych z bazy danych USDA FoodData Central [36] i na podstawie tabel składu i wartości odżywczej żywności udostępnianych przez IŻŻ [22]. Zawartość wody w bezach oznaczono metodą suszenia termicznego, zgodnie z Polską Normą ISO 1442. Analizę przeprowadzono w 3 powtórzeniach.

Aktywność wody

W celu oznaczenia aktywności wody bezy były kruszone ręcznie, a następnie umieszczane w naczynku pomiarowym. Pomiar prowadzony był w aparacie do pomiaru aktywności wody LabMaster – aw (Novasina AG, Lachen, Szwajcaria). Pomiary wykonywano w temperaturze 20 °C, a wynik odczytywano z dokładnością do 0,001. Badanie przeprowadzono w 3 powtórzeniach.

Analiza mikrobiologiczna

Analizę mikrobiologiczną przeprowadzono za pomocą automatycznego systemu do liczenia drobnoustrojów – TEMPO® (bioMerieux, Francja). Oznaczanie liczby drobnoustrojów w badanych próbkach w systemie TEMPO® oparte jest na metodzie najbardziej prawdopodobnej liczby (NPL). Próbki bez przygotowywano w rozcieńczeniu 1:400, następnie łączono ze sterylną pożywką dedykowaną oznaczanemu drobnoustrojowi i przenoszono do kart TEMPO®. Warunki inkubacji (temperatura i czas) były zależne od oznaczanych bakterii, zgodnie z instrukcją producenta urządzenia: ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych (AC): 35 °C przez 24 ÷ 28 godzin, *Enterobacteriaceae* (EB): 35°C przez 22 ÷ 27 godz., *Escherichia coli* (EC): 37 °C przez 24 ÷ 27 godz. Po inkubacji następował automatyczny odczyt w TEMPO® Reader, gdzie liczba sygnalizujących dodatnią reakcję studzienek umożliwiała obliczenie liczebności drobnoustrojów wyrażonej w jtk/g. Badanie przeprowadzono w 3 powtórzeniach.

Obserwacja mikroskopowa

Produkty w przekroju poprzecznym (poziomym) obserwowano za pomocą mikroskopu cyfrowego VHX-7000 (Keyence, Japonia) w czterech połączonych polach obserwacyjnych (4 x 5 cm). Wszystkie produkty obserwowano przy czterdziestokrotnym powiększeniu. Do obserwacji zastosowano oświetlenie pierścieniowe pełne.

Analiza barwy

Pomiar wykonano metodą odbiciową za pomocą kolorymetru sferycznego 8200 Series (X-Rite Inc., USA). Próbki ręcznie pokruszone były umieszczane w woreczku polietylenowym i umieszczane w polu obserwacyjnym kolorymetru. Pomiary prowadzono przy wykorzystaniu źródła światła D65 oraz standardowego obserwatora kolorymetrycznego o polu widzenia 10°. Wyniki wyrażono w jednostkach systemu CIE Lab i CIE LCh, gdzie: L* oznacza jasność barwy, a* – chromatyczność w zakresie czerwono-zielonym, b* – chromatyczność w zakresie żółto-niebieskim, C* oznacza nasycenie, a h° reprezentuje odcień koloru. Badanie przeprowadzono w 10 powtórzeniach.

Analiza tekstury metodą cięcia i penetracji

Test cięcia został przeprowadzony w celu określenia wytrzymałości mechanicznej w aspekcie dominujących naprężeń tnących. W szczególności wyznaczona została charakterystyka siły w zależności od wielkości deformacji próbki. Pomiar wykonano przy użyciu analizatora tekstury TA.XT plus Texture Analyser (Stable Micro Systems, Surrey, UK) wyposażonego w czujnik siły 500 N i przystawkę do cięcia nożem płaskim (HDP/BS; 1 mm). Badanie przeprowadzono w temperaturze 20 ± 1 °C. Próbki (całe bezy) o masie 23 ± 2 g umieszczano centralnie pod ostrzem, na platformie pomiarowej. Początkowa prędkość głowicy (przed kontaktem z próbką) wynosiła 1 mm/s. Następnie nóż przemieszczany był z prędkością 5 mm/s aż do całkowitego przecięcia próbki. Podczas testu rejestrowano wielkość siły w zależności od czasu. Z analizy krzywej wyznaczono maksymalną siłę cięcia (N) – twardość, czyli siłę, po której wystąpieniu następuje gwałtowny spadek jej wartości (o co najmniej 50 %). Wyznaczano także obszar pod krzywą (N·s) – odpowiadający spoistości, czyli zdolności do utrzymania pierwotnej struktury.

Test penetracji polegał na wbijaniu walcowej sondy w próbkę. Sonda, wnikając w próbkę z określoną prędkością i na określoną głębokość, umożliwiała zarejestrowanie siły oporu stawianej przez produkt. Na podstawie uzyskanej krzywej siła–czas obliczane były parametry tekstury. Pomiar przeprowadzono na analizatorze tekstury TA.XT plus Texture Analyser (Stable Micro Systems, Surrey, UK) z czujnikiem siły 500 N oraz sondą walcową o średnicy 10 mm (P/10). Próbki, całe bezy o średnicy ok. 10 cm, umieszczano na stoliku przedmiotowym (HDP/90). Pomiar prowadzono

w temperaturze 20 ± 1 °C. Początkowa prędkość głowicy (przed kontaktem z próbką) wynosiła 1 mm/s. Następnie penetrator przemieszczany był z prędkością 5 mm/s aż do osiągnięcia 50 % wysokości próbki. Podczas testu rejestrowano zależność siły od czasu. Z analizy krzywej wyznaczono maksymalną siłę penetracji (N) – miarę jędrności, czyli maksymalną siłę podczas testu potrzebną do przebicia oraz wyznaczano odkształcenie do pęknięcia (mm) – elastyczność struktury, czyli zdolność produktu do odzyskania pierwotnego kształtu.

Wszystkie pomiary wykonano w co najmniej 4 powtórzeniach dla każdej próbki, zgodnie z procedurami producenta (Stable Micro Systems, UK) i zaleceniami Bourne'a [11].

Analiza sensoryczna

Analizę sensoryczną przeprowadził 11-osobowy wykwalifikowany zespół sensoryczny (ISO 8586:2023-10) w laboratorium sensorycznym, stosując ilościową analizę opisową QDA (ISO 13299:2010). Przed właściwą oceną próbek paneliści wzięli udział w sesji szkoleniowej, podczas której zapoznali się z ocenianymi cechami, metodyką ich oznaczania oraz wykonali próbną ocenę bezy J (wariant kontrolny, bez dodatku inuliny). Po zakończonej sesji szkoleniowej paneliści przystąpili do oceny 4 produktów (bezy A, AI, J, JI). Wszystkie próbki zakodowano i zaprezentowano oceniającym tyle samo razy (technika „balanced design"). Oceniający mieli za zadanie dokonać oceny intensywności następujących wyróżników sensorycznych (w nawiasach oznaczenia brzegowe): barwa (biała - beżowa), połysk powierzchni (matowa - bardzo intensywny połysk), szorstkość (gładka - szorstka), zapach bezowy (niewyczuwalny – bardzo intensywny), zapach obcy (niewyczuwalny – bardzo intensywny), porowatość (brak porów - liczne pory), twardość (miękka - twarda), kruchość (niska kruchość - wysoka kruchość), rozpuszczalność (niska rozpuszczalność - wysoka rozpuszczalność), smak bezowy (niewyczuwalny – bardzo intensywny), smak słodki (niewyczuwalny – bardzo intensywny), smak gorzki (niewyczuwalny – bardzo intensywny), posmak (niewyczuwalny – bardzo intensywny). Intensywność wyróżników oceniano w skali od 0 do 10 cm. Dodatkowo oceniający byli proszeni o podanie kodu próbki, w której wyczuwalny był obcy smak/posmak i/lub zapach, a także o ocenę zbalansowania tych cech (w skali 0 ÷ 10 cm).

Analiza statystyczna

Zgromadzone dane poddano analizie statystycznej, obejmującej jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA) oraz test post-hoc Tukeya. Analizy parametrów fizykochemicznych i barwy przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania KyPlot ver. 2.0 (Kyens Lab Inc., Tokyo, Japan), a wyniki parametrów tekstury opracowano przy użyciu programu Statistica 10 (StatSoft Polska Sp. z o.o., Kraków, Polska). Dane

z oceny sensorycznej analizowano w dedykowanym oprogramowaniu Compusense (Compusense Inc., Guelph, ON, Canada). Obliczenia pomocnicze wykonano w Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft Corporation, Washington, USA). We wszystkich analizach statystycznych przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Wyniki i dyskusja

Wydajność i stabilność piany

W badaniach porównano wydajność pienienia i stabilność piany otrzymanej z aquafaby oraz z białka jaja kurzego. Wydajność pienienia i stabilność piany powstałej z aquagaby wynosiły 600 % i 92 %. Podobne wartości otrzymano dla piany z kurzych białek: 580 % i 94 %. Surowce wykazały zbliżoną zdolność do tworzenia piany. Otrzymane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi, w których wydajność pienienia aquafaby mieściła się w zakresie 505 ÷ 610 % [31] oraz 405 ÷ 510 % [34]. W przypadku piany z białek jaj wartości te kształtowały się na poziomie 479 % [21] i 650 % [37]. Obie piany wykazały wysoką stabilność. Porównywalne wartości podają Aslan [7] odpowiednio: 94,74 % i 93,33 % dla aquafaby i białek jaj. Wyniki Wang [37] również potwierdzają podobną stabilność pian z białek jaj (ok. 96 %). Różnice obserwowane w poszczególnych badaniach mogą wynikać z właściwości surowca, jego składu białkowo-polisacharydowego, pH oraz sposobu przygotowania prób. Aquafaba, jako innowacyjny surowiec, nie ma jeszcze zdefiniowanych standardów jakościowych.

Tabela 2. Objętość właściwa, podstawowy skład chemiczny bez oraz wydajność [FC] i stabilność [FS] piany.
Table 2. Specific volume, proximate composition of meringues, foam capacity [FC] and stability [FS].

Próbka / Sample	Objętość właściwa / Specific volume [cm^3/g]	Woda / Moisture [%]	Tłuszcz / Fat [%]	Białko / Protein [%]	Węglowodany / Carbohydrates [%]	Próbka / Sample	FC [%]	FS [%]
A	$7,62^{a} \pm 0,72$	$4,06^{a} \pm 0,15$	$0,06^{a}$	$1,16^{a}$	$92,38^{a}$	A	600	92
AI	$5,99^{ab} \pm 0,83$	$4,92^{ab} \pm 0,37$	$0,06^{a}$	$1,14^{a}$	$92,55^{a}$			
J	$6,30^{a} \pm 0,33$	$5,34^{b} \pm 0,10$	$0,13^{b}$	$6,84^{b}$	$87,04^{a}$	J	580	9
JI	$5,05^{b} \pm 0,25$	$6,07^{c} \pm 0,35$	$0,12^{b}$	$6,68^{b}$	$86,42^{a}$			

Objaśnienie / Explanatory notes:
A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny. Wartości średnie (wartość średnia ± odchylenie standardowe, n = 3) dla kolumn w obszarze jednego parametru z takimi samymi małymi literami w indeksie górnym nie różnią się istotnie ($p < 0,05$) / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition. The mean values (mean ± standard deviation, n = 3) for columns within one parameter with the same lowercase superscript letters are not significantly different ($p < 0.05$).

Objętość właściwa

Objętość właściwa badanych bez mieściła się w zakresie od 5,05 ± 0,25 do 7,62 ± 0,72 cm^3/g. Wyniki te wskazują, że rodzaj surowca oraz obecność dodatków funkcjonalnych znacząco wpływają na rozwój struktury piany i retencję gazu w trakcie suszenia. Zastosowanie aquafaby sprzyjało lepszemu napowietrzeniu, co można wiązać z wyższą lepkością roztworu i obecnością naturalnych emulgatorów, takich jak saponiny i białka roślinne, które stabilizują pęcherzyki powietrza.

Niższa objętość właściwa w wariantach z inuliną (AI i JI) może wynikać z ograniczenia ekspansji gazowej oraz zagęszczenia fazy ciągłej, co utrudnia powstawanie i utrzymanie stabilnej piany. Podobne obserwacje przedstawili Nazim i in. [30], którzy odnotowali spadek objętości właściwej bez w wyniku substytucji cukru alternatywnymi surowcami. Wyniki te są również zgodne z badaniami Lekjing [24], która wykazała, że rodzaj i stężenie cukru znacząco modulują strukturę i porowatość piany. Zaobserwowane różnice w objętości właściwej świadczą o złożonej interakcji pomiędzy właściwościami białkowymi i polisacharydowymi składników a parametrami suszenia. Aquafaba, mimo że jest zamiennikiem białka jaja, wykazała zbliżoną zdolność do utrzymania ekspansji struktury, co potwierdza jej potencjał technologiczny w produkcji bez roślinnych.

Podstawowy skład chemiczny

Zawartość wody w badanych bezach wahała się od 4,06 ± 0,15 % do 6,07 ± 0,35 %, przy czym wyższe wartości odnotowano w próbkach z białkiem jaja (J, JI). Może to wynikać z większej zdolności białek zwierzęcych do wiązania wody oraz gęstszej struktury piany po suszeniu. Bezy z aquafaby charakteryzowały się natomiast wyższym udziałem węglowodanów, co jest związane z obecnością rozpuszczalnych polisacharydów. Dodatek inuliny nie wpłynął znacznie na skład chemiczny. Wyniki są zgodne z obserwacjami innych autorów [24, 30, 34].

Aktywność wody i analiza mikrobiologiczna

Analizę mikrobiologiczną bez wykonano dwukrotnie: po 30 i 90 dniach przechowywania produktu. W żądnej z próbek w całym okresie przechowywania (30 i 90 dni) nie wykryto obecności bakterii tlenowych (AC < 10 jtk/g), bakterii z grupy *Enterobacteriaceae* (EB < 10 jtk/g) ani *Escherichia coli* (EC < 10 jtk/g). Jest to spowodowane odwodnieniem produktu. Wilgotność próbek nie przekraczała 6 % (Tab. 2).

Aktywność wody (a_w) badanych próbek (A, AI, J, JI) była niska i obniżała się nieistotnie podczas przechowywania. W bezach z jaj kurzych początkowa aktywność wody (0,37) zmniejszyła się do 0,20. Z kolei w bezach wegańskich, a_w początkowa wynosiła 0,30 i zmniejszyła się do 0,24. Takie niskie aktywności wody w bezach wynikają ze specyfiki procesu technologicznego — intensywnego odparowania wody

podczas suszenia oraz wysokiej zawartości cukru, który dzięki efektowi osmotycznemu wiąże cząsteczki wody, ograniczając jej dostępność dla mikroorganizmów. Dodatkowo, denaturacja białek zawartych w białkach jaj prowadzi do powstania zwartej, porowatej struktury utrudniającej migrację wody i tworzącej fizyczną barierę dla wzrostu bakterii. Zjawisko to potwierdzają wcześniejsze badania, w których wykazano, że bezy o wyższym udziale cukru i dłuższym czasie suszenia charakteryzują się niższą aktywnością wody i większą stabilnością mikrobiologiczną [24, 30].

Zgodnie z danymi literaturowymi, większość mikroorganizmów wymaga $a_w > 0,85$ do wzrostu, natomiast produkty o $a_w < 0,60$ pozostają mikrobiologicznie stabilne [26]. Uzyskane wyniki potwierdzają zatem, że niska aktywność wody stanowi główną barierę hamującą rozwój flory bakteryjnej w bezach, zapewniając ich trwałość podczas przechowywania. Chociaż literatura wskazuje, że niektóre patogeny mogą przetrwać w środowisku o niskiej aktywności wody w formie przetrwalnikowej, to dzięki zastosowanej długotrwałej obróbce termicznej badanych produktów niemalże wyklucza się taką możliwość [1, 32]. Brak wzrostu oznaczanych bakterii w badanym produkcie potwierdza jego wysoką jakość mikrobiologiczną i skuteczność zastosowanego procesu technologicznego.

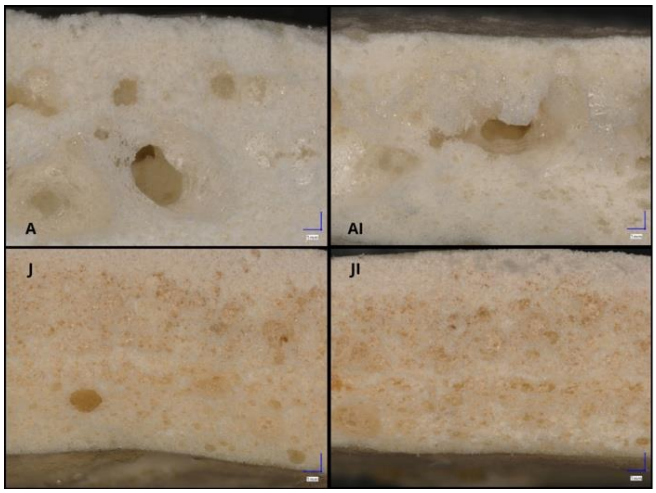
Tabela 3. Aktywność wody i ogólna liczba bakterii tlenowych w bezach.
Table 3. Total number of aerobic bacteria of meringues and water activity.

Analiza / Analysis	Dni przechowywania / Days of storage	A	AI	J	JI
a_w	0	$0,276^a \pm 0,020$	$0,302^b \pm 0,001$	$0,374^c \pm 0,017$	$0,364^d \pm 0,009$
	30	$0,278^a \pm 0,017$	$0,272^b \pm 0,013$	$0,285^c \pm 0,007$	$0,313^d \pm 0,023$
	60	$0,271^a \pm 0,027$	$0,257^b \pm 0,009$	$0,246^c \pm 0,023$	$0,271^a \pm 0,006$
	90	$0,270^a \pm 0,005$	$0,240^b \pm 0,018$	$0,200^c \pm 0,009$	$0,230^d \pm 0,019$
AC [jtk/g]	30	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$
	90	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$
EB [jtk/g]	30	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$
	90	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$
EC [jtk/g]	30	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$
	90	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$	$<10 \pm 0$

Objaśnienie / Explanatory notes:
A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny, a_w – aktywność wody, AC – ogólna liczba bakterii tlenowych; EB – *Enterobacteriaceae*; EC – *E.coli*. Wartości średnie (wartość średnia ± odchylenie standardowe, n = 3) dla wierszy z takimi samymi małymi literami w indeksie górnym nie różnią się istotnie ($p < 0,05$) / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition, a_w – water activity, AC - Total number of aerobic bacteria; EB – *Enterobacteriaceae*; EC – *E.coli*. The mean values (mean ± standard deviation, n = 3) for rows with the same lowercase superscript letters are not significantly different ($p < 0.05$).

Obserwacje mikroskopowe

Mikroskopowa analiza przekrojów badanych próbek wykazała wyraźne różnice w zakresie porowatości, wynikające z odmiennych mechanizmów stabilizacji piany. Bezy otrzymane z aquafaby (A i AI) charakteryzowały się licznymi, nieregularnymi i dużymi porami, co wskazuje na ograniczoną stabilność struktury (Ryc. 2). Porowatość była nierównomierna, jednak mogła sprzyjać zwiększeniu objętości wyrobu, co z punktu widzenia konsumenta może być cechą pożądaną. Obserwacje te są zgodne z literaturą, w której podkreśla się, że aquafaba – mimo niskiej zawartości białka – wykazuje właściwości pianotwórcze dzięki obecności saponin i węglowodanów, obniżających napięcie powierzchniowe i stabilizujących pęcherzyki powietrza [10, 34]. Brak silnej matrycy białkowej skutkuje jednak mniejszą jednorodnością piany i powstawaniem większych porów, co potwierdzają zarówno analizy mikroskopowe, jak i wcześniejsze badania nad stabilnością pian roślinnych [27].



Rycina 2. Wygląd poprzeczny upieczonych bez – obraz mikroskopowy 40x (autor fotografii D. Teterycz).

Figure 2. Cross-sectional appearance of baked meringues – microscopic image at 40x (photo by D. Teterycz).

Objaśnienie / Explanatory notes:

A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition.

W przypadku próbek przygotowanych na bazie białek jaj (J i JI) stwierdzono bardziej zwartą mikrostrukturę, z drobnymi i równomiernie rozmieszczonymi porami. Wynika to z właściwości funkcjonalnych białek jaja, które dzięki naturze amfifilowej

szybko adsorbują się na granicy faz powietrze–woda, a podczas ubijania ulegają częściowej denaturacji i sieciowaniu, tworząc elastyczną matrycę ograniczającą koalescencję i drenaż pęcherzyków [23, 38]. Dodatkowo sacharoza działa synergistycznie, zwiększając lepkość fazy ciągłej i wzmacniając sieć białkową, co skutkuje powstawaniem stabilnej piany o drobnych i jednorodnych porach [5]

Dodatek inuliny poprawiał mikrostrukturę zarówno w bezach z aquafaby, jak i z białek jaj, prowadząc do zmniejszenia i ujednorodnienia porów oraz ograniczenia powstawania dużych pustych przestrzeni [27]. W bezach jajecznych efekt ten był szczególnie widoczny, czego konsekwencją była najbardziej zwarta i jednorodna struktura spośród analizowanych próbek.

Analiza barwy

Analiza parametrów barwy (L*, a*, b*, C*, h°) wykazała wpływ zarówno rodzaju bazy białkowej, jak i dodatku inuliny na wygląd bez oraz stabilność barwy w czasie przechowywania (Tab. 4). Bezy z aquafaby (A, AI) charakteryzowały się wyższą jasnością (L*) niż warianty jajeczne (J, JI), co wskazuje na mniejszą intensywność reakcji brązowienia. Wynika to z niższej zawartości białek i cukrów redukujących w aquafabie, które ograniczają reakcję Maillarda [16]. Wraz z przechowywaniem (do 90 dni) obserwowano spadek L*, szczególnie w próbkach J i JI, zgodnie z tendencją do ciemnienia produktów białkowych w wyniku utleniania i dalszych reakcji Maillarda [6, 17]. Dodatek inuliny wpłynął na barwę w sposób zależny od rodzaju bazy. W bezach z aquafaby (AI) obserwowano relatywnie stabilny kolor i wyższe L*, natomiast w próbkach jajecznych z inuliną (JI) pojawiło się intensywniejsze brązowienie i niższe h°, co wskazuje na ciemniejszy odcień. Podobne zjawisko odnotowali Canale i wsp. [13], wskazując, że dodatek inuliny może sprzyjać ciemnieniu skórki pieczywa w wyniku nasilenia reakcji Maillarda. Z kolei Shiri i wsp. [33] zaobserwowali, że inulina w niektórych systemach obniża jasność barwy (L*) poprzez ograniczenie intensywności brązowienia, co może tłumaczyć jaśniejszy kolor wariantu AI w porównaniu z JI. Wyższe wartości a* i b* w próbkach jajecznych potwierdzają cieplejszy (żółtobrązowy) odcień, związany z obecnością białek takich jak owalbumina czy owotransferryna, podatnych na reakcje Maillarda [2]. Aquafaba o niskiej zawartości białka i wyższym udziale węglowodanów [9] sprzyjała utrzymaniu jaśniejszej barwy. Pod względem praktycznym wariant AI wykazał największą stabilność wizualną podczas przechowywania, co potwierdza potencjał technologiczny połączenia aquafaby i inuliny jako alternatywy dla białka jaja w produkcji bez.

Tabela 4. Wyniki analizy parametrów barwy (L*, a*, b*, C* i h°) bez w 0., 30., 60. i 90. dniu przechowywania.

Table 4. Results of the analysis of color parameters (L*, a*, b*, C* and h°) of meringues on the 0th, 30th, 60th and 90th day of storage.

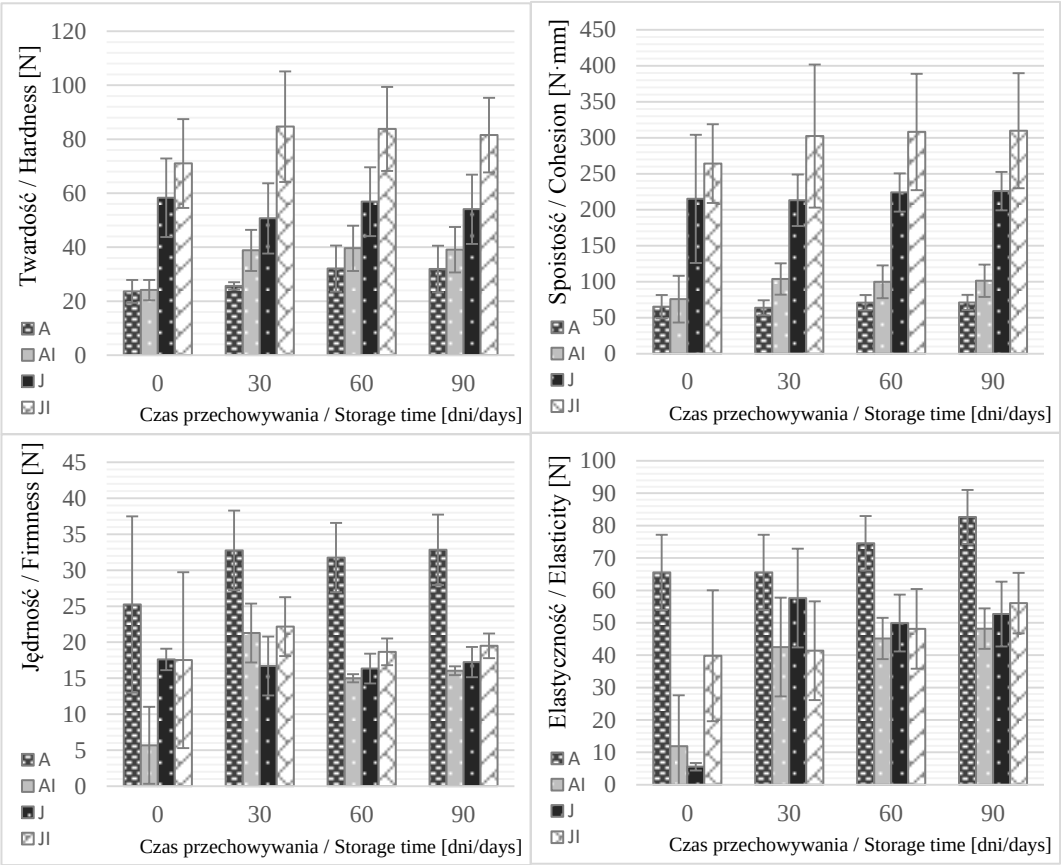
Parametr / Parameter	Próbka / Sample	0	30	60	90
L*	A	$94{,}98^{a} \pm 0{,}94$	$97{,}64^{a} \pm 0{,}38$	$95{,}27^{a} \pm 0{,}48$	$92{,}63^{a} \pm 0{,}61$
	AI	$96{,}15^{b} \pm 0{,}64$	$97{,}43^{a} \pm 0{,}43$	$97{,}06^{b} \pm 0{,}60$	$90{,}79^{ab} \pm 2{,}63$
	J	$92{,}71^{c} \pm 0{,}41$	$93{,}51^{b} \pm 0{,}61$	$96{,}14^{c} \pm 0{,}45$	$88{,}52^{ab} \pm 6{,}24$
	JI	$93{,}77^{d} \pm 0{,}22$	$93{,}48^{b} \pm 0{,}53$	$93{,}37^{d} \pm 0{,}75$	$85{,}83^{b} \pm 4{,}98$
a*	A	$0{,}06^{a} \pm 0{,}20$	$-0{,}04^{a} \pm 0{,}17$	$0{,}76^{a} \pm 0{,}12$	$0{,}36^{a} \pm 0{,}14$
	AI	$-0{,}04^{a} \pm 0{,}24$	$-0{,}51^{a} \pm 0{,}10$	$-0{,}20^{b} \pm 0{,}18$	$-0{,}02^{b} \pm 0{,}17$
	J	$2{,}13^{b} \pm 0{,}19$	$1{,}61^{b} \pm 0{,}28$	$0{,}33^{c} \pm 0{,}09$	$0{,}55^{a} \pm 0{,}33$
	JI	$1{,}97^{b} \pm 0{,}13$	$1{,}48^{b} \pm 0{,}21$	$1{,}46^{d} \pm 0{,}35$	$1{,}16^{c} \pm 0{,}47$
b*	A	$10{,}66^{a} \pm 0{,}76$	$7{,}39^{a} \pm 0{,}30$	$12{,}41^{a} \pm 0{,}53$	$10{,}16^{a} \pm 0{,}34$
	AI	$8{,}22^{b} \pm 0{,}32$	$7{,}26^{a} \pm 0{,}23$	$8{,}52^{b} \pm 0{,}48$	$8{,}66^{b} \pm 0{,}58$
	J	$16{,}40^{c} \pm 0{,}42$	$16{,}32^{b} \pm 0{,}52$	$12{,}94^{a} \pm 0{,}58$	$11{,}72^{c} \pm 0{,}96$
	JI	$15{,}23 \pm 0{,}35$	$16{,}34^{b} \pm 0{,}41$	$16{,}86^{c} \pm 1{,}35$	$13{,}46^{d} \pm 1{,}10$
C*	A	$10{,}66^{a} \pm 0{,}76$	$7{,}41^{a} \pm 0{,}31$	$12{,}43^{a} \pm 0{,}53$	$10{,}17^{a} \pm 0{,}34$
	AI	$8{,}22^{b} \pm 0{,}32$	$7{,}28^{a} \pm 0{,}23$	$8{,}53^{b} \pm 0{,}48$	$8{,}66^{b} \pm 0{,}58$
	J	$16{,}54^{c} \pm 0{,}41$	$16{,}41^{b} \pm 0{,}53$	$12{,}94^{a} \pm 0{,}59$	$11{,}73^{c} \pm 0{,}97$
	JI	$15{,}35^{d} \pm 0{,}35$	$16{,}41^{b} \pm 0{,}41$	$16{,}93^{c} \pm 1{,}36$	$13{,}52^{d} \pm 1{,}12$
h°	A	$89{,}69^{a} \pm 1{,}08$	$93{,}17^{a} \pm 1{,}13$	$86{,}53^{a} \pm 0{,}47$	$87{,}98^{a} \pm 0{,}73$
	AI	$90{,}27^{a} \pm 1{,}67$	$94{,}00^{a} \pm 0{,}81$	$91{,}34^{b} \pm 1{,}16$	$90{,}19^{b} \pm 1{,}15$
	J	$92{,}61^{b} \pm 0{,}67$	$84{,}37^{b} \pm 0{,}83$	$88{,}54^{c} \pm 0{,}37$	$87{,}40^{a} \pm 1{,}4$
	JI	$82{,}62^{b} \pm 0{,}45$	$84{,}83^{b} \pm 0{,}69$	$85{,}08^{d} \pm 0{,}94$	$85{,}16^{c} \pm 1{,}83$

Objaśnienie / Explanatory notes:
wartości średnie (wartość średnia ± odchylenie standardowe, n = 10) dla kolumn w obszarze jednego parametru z takimi samymi małymi literami w indeksie górnym nie różnią się istotnie ($p < 0{,}05$) / mean values (mean ± standard deviation, n = 10) for columns within one parameter with the same lowercase superscript letters are not significantly different ($p < 0.05$).

Analiza tekstury metodą cięcia i penetracji

Analiza tekstury wykazała istotny wpływ rodzaju bazy białkowej i dodatku inuliny (Ryc. 3). Bezy jajeczne (J, JI) charakteryzowały się istotnie wyższą twardością i spoistością niż próbki na bazie aquafaby (A, AI), co utrzymywało się przez cały okres przechowywania ($p \leq 0{,}001$). Różnice te wynikają z wyższej zawartości i jakości białek w białku jaja, tworzących bardziej zwartą, sztywniejszą strukturę piany po suszeniu. Dodatek inuliny wpływał na właściwości mechaniczne w sposób zależny od rodzaju bazy. W próbkach AI obserwowano wzrost spoistości i twardości w czasie przechowywania, co może wynikać z zagęszczania fazy wodnej i ograniczenia drenażu piany. Zjawisko to jest zgodne z obserwacjami López-Castejón i wsp. [27], którzy

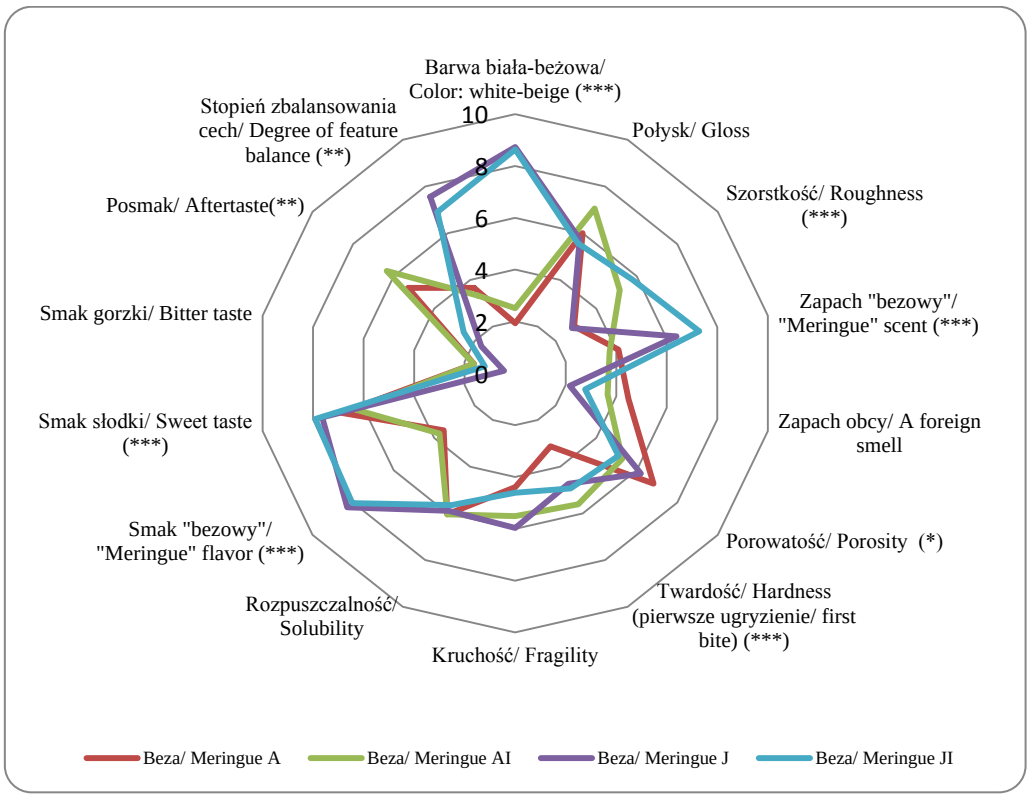
wykazali, że inulina zwiększa stabilność pian poprzez efekt zagęszczający fazy ciągłej, oraz z wynikami Canazzy i wsp. [14], wskazującymi, że inulina poprawia stabilność i teksturę wyrobów spienionych dzięki modyfikacji właściwości reologicznych układu. Parametr jędrności i elastyczności nie wykazał istotnych różnic pomiędzy próbkami w większości punktów pomiarowych ($p > 0.05$), co sugeruje, że struktura mechaniczna pian po wypieku była stabilna we wszystkich wariantach. Uzyskane wyniki potwierdzają, że rodzaj białka decyduje o właściwościach mechanicznych bez, a inulina pełni rolę stabilizatora struktury, ograniczając pogorszenie tekstury w czasie przechowywania.



Rycina 3. Wyniki analiza tekstury
Figure 3. Results of the texture analysis
Objaśnienie / Explanatory notes: A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny. Odchylenie standardowe zaznaczono na wykresach / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition, The standard deviation is marked on the graphs.

Analiza sensoryczna

Analiza sensoryczna (Ryc. 4) wykazała istotne różnice pomiędzy wariantami w zakresie większości badanych cech ($p < 0,05$), szczególnie barwy, szorstkości powierzchni, zapachu „bezowego", twardości oraz smaku słodkiego i karmelowego. Bezy z białek jaj (J, JI) uzyskały najwyższe oceny za barwę, smak „bezowy" i słodycz, co potwierdza ich charakterystyczny, intensywny profil aromatyczny i wizualny. Warianty z aquafaby (A, AI) odznaczały się łagodniejszym smakiem i jaśniejszą barwą. Dodatek inuliny zwiększył twardość ($p < 0,01$) oraz szorstkość powierzchni, szczególnie



Rycina 4. Profil sensoryczny bez.
Figure 4. Sensory evaluation profile of meringues.
Objaśnienie / Explanatory notes: A – próbka z aquafaby, J – próbka z białek jaj kurzych, AI próbka z aquafaba i dodatku inuliny, JI – próbka z białek jaj kurzych i dodatku inuliny. Wartości średnie oznaczone gwiazdką różnią się istotnie *($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$), *** ($p < 0,001$) / A – sample with aquafaba, J – sample with egg whites, AI – sample with aquafaba and inulin addition, JI – sample with egg whites and inulin addition. Values marked with asterisks indicate significant differences: * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), *** ($p < 0.001$).

w wariancie AI. Zjawisko to jest zgodne z obserwacjami Ahmeda i wsp. [3], Burešovej i wsp. [12] oraz Morris i wsp. [29]. Wprowadzanie inuliny (zwłaszcza w postaci proszku i przy wyższych stężeniach) może prowadzić do usztywnienia matrycy wypieków i wzrostu twardości okruszka, co tłumaczy się m.in. powstawaniem mniejszych porów z grubszymi ściankami ciasta oraz spadkiem objętości produktu [3, 12, 29].

Niższa intensywność zapachu „bezowego" w próbkach z aquafabą (A i AI) może wynikać z mniejszej zawartości lotnych związków odpowiedzialnych za aromat karmelowy, co potwierdzają obserwacje Shim i wsp. [34] wskazujące, że profil lotnych składników aquafaby zależy od źródła i sposobu obróbki nasion roślin strączkowych. Podobne zjawisko zaobserwowano w produktach z dodatkiem aquafaby, gdzie ograniczone uwalnianie związków lotnych skutkowało słabszą percepcją aromatu [8]. Brak istotnych różnic w zakresie smaku gorzkiego i zapachu obcego świadczy o dobrej jakości surowców i braku reakcji niepożądanych podczas wypieku. Wariant AI uzyskał wysokie noty za zrównoważenie cech, co potwierdza, że dodatek inuliny może poprawiać stabilność piany oraz usztywniać strukturę produktów wypiekanych, zwiększając ich twardość przy zachowaniu akceptowalnych cech sensorycznych [12, 27].

Wnioski

1. Badania potwierdzają możliwość zastosowania aquafaby jako roślinnego substytutu białka jaja kurzego w produkcji bez o wysokiej jakości technologicznej. Aquafaba wykazała odpowiednie właściwości spieniające i stabilizujące, umożliwiające uzyskanie produktu porównywalnego z tradycyjnymi bezami.
2. Dodatek inuliny przyczynił się do poprawy stabilności struktur oraz korzystnie wpłynął na teksturę wariantów AI oraz JI. W ocenie sensorycznej dodatek inuliny zwiększał twardość i szorstkość powierzchni, szczególnie w wariancie AI. Bezy z aquafaby (A, AI) były jaśniejsze, a dodatek inuliny nie zmienił wyraźnie barwy produktów z tego samego surowca.
3. W ocenie sensorycznej bezy jajeczne (J, JI) uzyskały najwyższe oceny za barwę i smak „bezowy", a brak różnic w smaku gorzkim i zapachu obcym świadczy o dobrej jakości surowców i prawidłowym przebiegu procesu wypieku.
4. Połączenie aquafaby z inuliną stanowi efektywne rozwiązanie technologiczne, zwiększające stabilność piany, jednorodność porów i twardość wypieków, przy zachowaniu atrakcyjnego smaku i koloru.

Literatura

[1] Abdelhamid A.G., Yousef A.E.: Collateral adaptive responses induced by desiccation stress in Salmonella enterica. LWT–Food Sci. Technol., 2020, 133 #110089.

[2] Abeyrathne, S. R., Lee, H. Y., & Ahn, D. U.: Egg white proteins and their potential use in food processing or as nutraceutical and pharmaceutical agents – A review. Poultry Sci., 2013, 92(12), 3292-3299.

[3] Ahmed J., Thomas L., Khashawi R.A.: Effect of inulin on rheological, textural, and structural properties of brown wheat flour dough and in vitro digestibility of developed Arabic bread. J. Food Sci., 2020, 85(11), 3711-3721.

[4] Akbin A.Ç., Yolacaner E.T., Sumnu G.: Effects of legume-based aquafaba on batter rheology and quality characteristics of microwave-infrared baked cakes. Phys. Fluids, 2025, 37(1), #013111.

[5] Alavi F., Emam-Djomeh Z., Mohammadian M., Salami M., Moosavi-Movahedi A.A.: Physicochemical and foaming properties of nanofibrillated egg white protein and its functionality in meringue batter. Food Hydrocoll., 2020, 101, #105554.

[6] Albalá-Hurtado S., Veciana-Nogués M.T., Mariné-Font A., Vidal-Carou M.C.: Progress of browning reactions during storage of liquid infant milks. J. Agric. Food Chem., 1999, 47(10), 4033-4037.

[7] Aslan M., Ertaş N.: Possibility of using chickpea aquafaba as egg replacer in traditional cake formulation. Harran Tarı Gıda Bilim. Derg., 2020, 24(1), 1-8.

[8] Balivo A., d'Errico G., Genovese A., et al.: Whipped chickpea aquafaba as a fat replacer in ice cream: effect on sensory and physicochemical properties. J. Food Sci., 2024, #17605.

[9] de Barros Miranda, B., Holanda, G. S., Raposo, A., da Costa Maynard, D., Botelho, R. B. A., Romão, B., de Oliveira, V. R., & Zandonadi, R. P. (2024). Chickpea aquafaba: A systematic review of the different processes for obtaining and their nutritional and technological characteristics. J. Food Sci. Technol., 2024, 61*(8)*, 1439-1456.

[10] Böttcher S., Drusch S.: Saponins – self-assembly and behavior at aqueous interfaces. Adv. Colloid Interface Sci., 2017, 243, 105-113.

[11] Bourne M.C.: Food texture and viscosity: concept and measurement. Academic Press, San Diego 2002.

[12] Burešová I., Tokár M., Marečková M., Hrušková M., Karasová A.: Impact of inulin addition on rice dough and bread. Appl. Sci., 2024, 14(7), #2882.

[13] Canale M., Sanfilippo R., Strano M.C., Bavaro A.R., Amenta M., Bizzini M., Allegra M., Blangiforti S., Spina A.: Technological properties of inulin-enriched doughs and breads: influence on short-term storage and glycemic response. Foods, 2024, 13(17), #2711.

[14] Canazza E., Grauso M., Mihaylova D., Lante A.: Techno-functional properties and applications of inulin in food systems. Gels, 2025, 11(10), #829.

[15] Caroko R.D., Kristopo H.: The Effect of Using Aquafaba from Various Brands of Chickpeas (Cicer arietinum L.) as an Egg Replacer in French Meringue Production on Physical, Chemical, and Sensory Characteristics. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2025, 1488(1), #012120.

[16] Crawford K., Kerr W., Tyl C.: Effect of hydrocolloid addition on cake prepared with aquafaba as egg substitute. Int. J. Food Sci. Technol., 2023, 58(8), 4567-4576.

[17] Crawford K., Tyl C., Kerr W.: Evaluation of processing conditions and hydrocolloid addition on functional properties of aquafaba. Foods, 2023, 12(4), #775.

[18] Hemmler D., Roullier-Gall C., Marshall J.W., et al.: Insights into the chemistry of non-enzymatic browning reactions in different ribose–amino acid model systems. Sci. Rep., 2018, 8, #16879.

[19] Intikhab A.: Aquafaba: nutritional significance for vegans – a way towards environmental sustainability. Life Sci., 2023, 4(1), 75-81.

[20] Kargar Z., Hematian Sourki A.: Microwave-assisted extraction enhances Aquafaba functionality: A high value-added egg white replacer in vegan meringue production. Food Chem. 2025, 25, #102176.

[21] Knorr D., Zenker M., Heinz V., Lee D.U.: Application and potential of ultrasonics in food processing. Trends Food Sci. Technol., 2004, 15, 261-266.
[22] Kunachowicz H., Przygoda B., Nadolna I., Iwanow K.: Tabele składu i wartości odżywczej żywności. Instytut Żywności i Żywienia, Warszawa 2020.
[23] Laursen N.F., Nielsen G.M., Christiansen M.B.J., Li R., Corredig M., Christensen C.H.: Plant proteins as substitutes for egg white protein in food foams: meringues as a model system. Food Struct., 2025, 44, #100417.
[24] Lekjing S., Keawpeng I., Venkatachalam K., Karrila S.: Impact of different sugar types and their concentrations on salted duck egg white based meringues. Foods, 2022, 11(9), #1248.
[25] Liang X., Lin D., Zhang W., Chen S., Ding H., Zhong H.J.: Progress in the preparation and application of inulin-based hydrogels. Polymers, 2024, 16(11), #1492.
[26] Liu S., et al.: Recent development in low-moisture foods: microbial safety and thermal processing. Food Res. Int., 2022, 160, #111717.
[27] López-Castejón M.L., Bengoechea C., Alguacil J.M., Carrera C.: Prebiotic food foams stabilized by inulin and β-lactoglobulin. Food Hydrocoll., 2021, 119, #106829.
[28] Madhavi B., Asaithambi N., Kumar A., Maiti P., Rai D.C., Duary R.K.: Impact of chickpea aquafaba-based emulsion on the physicochemical, nutritional, rheological and structural characteristics of little millet (Panicum sumatrense) flour cake. Sustainable Food Technol. 2025, 3, 286-299.
[29] Morris C., Morris G.A., Harding S.E.: The effect of inulin and fructo-oligosaccharide supplementation on the textural, rheological and sensory properties of bread and their role in weight management: A review. Food Chem., 2012, 133(2), 237-248.
[30] Nazim H.A.A., Othman A.: Characterization of meringue formulated with different palm sugar substitutes. Food Res., 2025, 9(1), 272-281.
[31] Nguyet N.T.M., Quoc L.P.T., Buu T.G.: Evaluation of textural and microstructural properties of vegan aquafaba whipped cream from chickpeas. Chem. Eng. Trans., 2021, 83, 421-426.
[32] Olaimat A.N., Osaili T.M., Al-Holy M.A., Al-Nabulsi A.A., Obaid R.S., Alaboudi A.R., Ayyash M., Holley R.A.: Microbial safety of oily, low water activity food products: a review. Food Microbiol., 2020, 92, #103571.
[33] Shiri A., Moosavi-Nasab M., Seyedain-Ardabili M., Hashemi S.M.B.: Technological characteristics of inulin-enriched gluten-free bread: effect of fermentation and incorporation level. Food Sci. Nutr., 2021, 9(5), 2682-2692.
[34] Shim Y.Y., Mustafa R., Shen J., Ratanapariyanuch K., Reaney M.J.T.: Composition and properties of aquafaba: water recovered from commercially canned chickpeas. J. Vis. Exp., 2018, 132, #56305.
[35] Stasiak J., Stasiak D.M., Libera J.: The potential of aquafaba as a structure-shaping additive in plant-derived food technology. Appl. Sci., 2023, 13(7), #4122.
[36] United States Department of Agriculture (USDA): FoodData Central [online]. Agricultural Research Service, Beltsville (MD) 2024. Dostępne: https://fdc.nal.usda.gov [Data dostępu: 27.10.2025].
[37] Wang G., Wang T.: Effects of yolk contamination, shearing, and heating on foaming properties of fresh egg white. J. Food Sci., 2009, 74(2), C147–C156.
[38] Yang X., Foegeding E.A.: Effects of sucrose on egg white protein and whey protein isolate foams: factors determining properties of wet and dry foams (cakes). Food Hydrocoll., 2010, 24(2-3), 227-238.

THE USE OF AQUAFABA AND CHICORY INULIN IN THE PRODUCTION OF VEGAN MERINGUES: AN IMPACT ON PHYSICOCHEMICAL, MICROBIOLOGICAL AND SENSORY PROPERTIES

S u m m a r y

Background. Aquafaba, a liquid remaining after the thermal processing of chickpeas, is commonly used as an egg substitute. This enables the creation of vegan products within a zero-waste approach, while maintaining desirable physicochemical and sensory properties of the final food product. The aim of the current study was to investigate the effect of chicory inulin addition in a meringue formulation prepared with aquafaba. Physicochemical, structural, microbiological and sensory characteristics of vegan meringues were compared with those of traditional meringues made with hen eggs. Foam stability and volume generated during aquafaba whipping were evaluated, while the finished products were assessed for basic chemical composition, instrumental color and texture parameters, water activity, sensory profile and microbiological quality.

Results and conclusions. The study demonstrated that meringues prepared with aquafaba exhibited a lighter color compared with their egg-based counterparts and contained up to six times less protein, while showing similar levels of available carbohydrates. A sensory analysis revealed that the vegan meringues were characterized by a milder flavor, whereas the egg-based variants received higher scores for "meringue-like" flavor and sweetness. The addition of inulin had a beneficial effect on structural stability, hardness and pore uniformity in the product. No aerobic bacteria or *Enterobacteriaceae* were detected in the products during storage; low moisture content and low water activity (< 0.30) ensured microbiological safety of the product. Overall, the findings indicate that combining aquafaba with inulin offers a novel technological solution aligned with current trends in plant-based food. Aquafaba-based meringues enriched with inulin are sensorially acceptable and exhibit appropriate structure, as well as desirable physicochemical properties.

Key words: aquafaba; egg white; inulin; vegan meringues; functional foods