



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>

editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 664.6; 663.8; 547.972

THE IMPACT OF ENCAPSULATED POLYPHENOLS ON THE GLYCEMIC INDEX AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF GLUTEN-FREE BAKED GOODS

Sofia O. Chernenko

Department of restaurant and healthy food technologies, M.O. Grishyn Educational and Scientific Institute of Food Technologies, Odesa National University of Technology, Ukraine

Received 1 March 2025; accepted 16 June 2025; available online 20 October 2025

Abstract

Gluten-free bakery products often demonstrate inferior quality parameters and may exhibit a higher glycemic index depending on the composition of the flour blend, compared to conventional products. Polyphenol extracts possess antioxidant properties and the ability to attenuate glycemic response, but they are sensitive to thermal processing. The aim of this study was to investigate the effect of incorporating encapsulated polyphenols on the glycemic index, antioxidant activity, and quality characteristics of gluten-free bread. Two groups of samples were compared: gluten-free and wheat bread (as control), each enriched with either free polyphenol extracts or the same extracts in microencapsulated form. Polyphenol losses during baking were assessed using the Folin-Ciocalteu method; antioxidant activity before and after baking was measured using the FRAP assay (expressed in Trolox equivalents). The *in vitro* relative glycemic index was calculated, and crumb moisture, porosity, and sensory characteristics were evaluated. The results showed that polyphenol addition enhanced antioxidant activity and contributed to a modest reduction in the glycemic index of gluten-free bread. During baking, free polyphenols underwent significant degradation (47–67 % losses in gluten-free samples), whereas encapsulation preserved a larger proportion of bioactives, reducing losses to 7–22 %. Gluten-free samples with polyphenols demonstrated a 3–5 % lower glycemic index compared to control formulations; a similar trend was observed in wheat bread. Encapsulated extracts were more effective than free forms in lowering glycemic index values. Furthermore, polyphenols improved the structural and sensory properties of the bread: specifically, they increased crumb moisture, preserved porosity in gluten-free formulations, and enhanced the color and aroma of the final products. In conclusion, encapsulated polyphenols represent promising functional ingredients for gluten-free bread, as they enhance antioxidant potential, reduce glycemic index, and improve the organoleptic quality of the product.

Keywords: gluten-free bread; encapsulated polyphenols; glycemic index; antioxidant activity; functional food products.

ІНКАПСУЛЬОВАНІ ПОЛІФЕНОЛИ У БЕЗГЛЮТЕНОВІЙ ВИПІЧЦІ: ГЛІКЕМІЧНИЙ ІНДЕКС ТА АНТИОКСИДАНТНА АКТИВНІСТЬ

Софія О. Черненко

Кафедра технології ресторанного і оздоровчого харчування, навчально-науковий інститут харчових технологій ім. М.О. Грішина, Одеський національний технологічний університет, Україна.

Анотація

Безглютенові хлібобулочні вироби часто мають гірші показники якості та можуть характеризуватися вищим глікемічним індексом (ГІ) порівняно з традиційними виробами. Поліфенольні екстракти мають антиоксидантну активність та здатні знижувати глікемічний відгук, але чутливі до термічної обробки. Метою роботи було дослідити вплив додавання інкапсульованих поліфенолів на ГІ, антиоксидантну активність та якісні характеристики безглютенового хліба. Для цього порівнювали дві групи зразків: безглютеновий хліб та пшеничний хліб (контроль), збагачені або неінкапсульованими поліфенольними екстрактами, або тими ж екстрактами в мікрокапсульованій формі. Досліджені втрати поліфенолів під час випікання (метод Фоліна-Чокальтеу), антиоксидантну активність зразків до і після випікання (FRAP-метод, еквіваленти тролоксу), розрахований відносний ГІ індекс *in vitro*, визначено вологість і пористість м'якуша, проведена сенсорна оцінка. Результати. Додавання поліфенолів сприяє підвищенню антиоксидантної активності та незначному зниженню ГІ безглютенового хліба. Під час випікання неінкапсульовані поліфеноли зазнають значних втрат (47–67 % у безглютеновому тісті), а інкапсуляція дозволяє зберегти більшу їх частину (втрати 7–22 %). Безглютенові зразки з поліфенолами мали на 3–5 % нижчий ГІ, ніж без добавок; у пшеничному хлібі ефект був подібним. Інкапсульовані форми екстрактів знижували ГІ ефективніше, ніж вільні. Встановлено також, що поліфеноли покращують структуру і смакові властивості хліба, зокрема, підвищують вологість та зберігають пористість м'якуша безглютенового хліба, поліпшують колір і аромат готових виробів. Висновки. Інкапсульовані поліфеноли є перспективними функціональними добавками для безглютенового хліба.

Ключові слова: безглютеновий хліб; інкапсульовані поліфеноли; глікемічний індекс; антиоксидантна активність; функціональні продукти.

*Corresponding author: e-mail: imsophy2404@gmail.com

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v33i3.324103

Вступ

Безглютенові хлібобулочні вироби є важливою частиною сучасного ринку функціональних продуктів, однак її виробництво пов'язане з низкою технологічних викликів. Відсутність глютену в структурі тіста змінює його фізико-хімічні властивості, що впливає на текстуру, вологоутримувальну здатність та стійкість до черствіння. Крім того, безглютенові продукти потребують збагачення поживними компонентами для підвищення їхньої функціональної цінності. Одним із перспективних підходів є використання поліфенолів, які володіють антиоксидантними властивостями та можуть позитивно впливати на структуру випічки та її глікемічний відгук. Інкапсуляція поліфенолів дозволяє підвищити їхню стабільність під час термічної обробки та забезпечити рівномірне розподілення у продукті. Враховуючи активний розвиток безглютенової індустрії, дослідження впливу інкапсульованих поліфенолів на якісні характеристики хлібу є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору [1; 2].

Водночас технологічні труднощі у виробництві безглютенових виробів залишаються значними. Відсутність глютену матриці призводить до зниження еластичності тіста, погіршення газотримувальної здатності, що негативно впливає на текстуру, об'єм та рівномірність пористості готових виробів. Крім того, на глікемічний індекс (ГІ) безглютенової продукції впливають різні фактори, зокрема склад борошняної суміші, наявність додаткових функціональних інгредієнтів та структура кінцевого продукту [2].

Глобальний ринок безглютенових хлібобулочних виробів демонструє стрімке зростання. У 2020 р його обсяг оцінювався в 5.6 млрд доларів США, а до 2027 року прогнозується зростання в 7.5 млрд доларів [3]. Темпи приросту ринку становлять 8–10 % на рік, що перевищує показники зростання інших категорій спеціалізованих продуктів [4]. Спочатку основними споживачами безглютенових продуктів були люди з целиакією та непереносністю глютену, однак сьогодні значна частина ринку орієнтована на споживачів, які вважають ці продукти кориснішими. В опитуваннях до 65 % респондентів відзначають, що вони сприймають безглютенову продукцію як більш здорову, а 25–30 % людей обмежують

споживання глютену з особистих переконань [5].

Безглютенова випічка є найважливішим сегментом цього ринку, що охоплює приблизно 60 % загальних продажів безглютенових продуктів [6]. Це пояснюється широкою споживчою базою та активним розширенням асортименту спеціалізованих виробників. В останні роки ринок безглютенових продуктів розширюється за рахунок як спеціалізованих компаній, так і великих хлібопекарських корпорацій, що випускають продукцію на основі рисового, кукурудзяного, мигдального, вівсяного та інших альтернативних видів борошна. Нині випускаються не лише кінцеві вироби, а й спеціальні безглютенові суміші для випічки, що дозволяє значно спростити технологічні процеси в промисловості [7].

Попри активний розвиток ринку, технологічні аспекти виробництва безглютенового хлібу залишаються складними. Відсутність глютену як структурного білка вимагає застосування альтернативних технологічних підходів для імітації його функцій. Однією з головних проблем є підвищена крихкість виробів, їхня швидка втрата вологості та прискорене черствіння, що обмежує термін придатності продукції. Крім того, для збереження безглютенового статусу продукції необхідно забезпечити повну відсутність перехресної контамінації, що потребує окремих виробничих ліній і збільшує собівартість продукції [8].

Для покращення функціональних характеристик безглютенового тіста активно використовуються гідроколоїди, зокрема ксантанова камедь, гуарова камедь та гідроксипропілметилцелюлоза. Ці речовини виконують роль загусників, покращують зв'язування води та підвищують в'язкість тіста, що дозволяє покращити текстуру та м'якість кінцевого продукту [9].

Останніми роками зростає інтерес до збагачення безглютенових продуктів біологічно активними сполуками, зокрема поліфенолами [10]. Поліфеноли є потужними антиоксидантами, що можуть зменшувати рівень окисного стресу, пригнічувати активність ферментів, відповідальних за розщеплення крохмалю, та потенційно знижувати глікемічний відгук організму [11]. Використання поліфенолів у хлібобулочних výroбах є перспективним напрямом, що дозволяє не лише покращити поживну

цінність продукту, а й вплинути на його фізико-хімічні характеристики.

Поліфеноли – це велика група рослинних сполук, які відомі своїми потужними антиоксидантними властивостями. Вони здатні нейтралізувати вільні радикали, знижуючи рівень окисного стресу в організмі [10]. Завдяки цій властивості поліфеноли відіграють важливу роль у профілактиці різних хронічних захворювань, включаючи серцево-судинні, нейродегенеративні та онкологічні патології. Крім того, вони мають протизапальну дію та здатні впливати на обмін речовин. Дослідження свідчать, що регулярне споживання поліфенолів позитивно позначається на регуляції рівня глюкози в крові, що може бути важливим фактором у профілактиці цукрового діабету 2-го типу та ожиріння [11].

Окремі поліфеноли також впливають на травлення – вони можуть інгібувати активність травних ферментів, зокрема α -амілази та α -глюкозидази, що призводить до сповільненого розщеплення вуглеводів і зниження глікемічного відгуку. В харчовій промисловості поліфеноли цінуються не лише за біологічні ефекти, а й за технологічні властивості: вони є натуральними антиоксидантами, що здатні уповільнювати окиснення жирів (наприклад, запобігати прогірканню) та подовжувати термін придатності продуктів. Так, додавання катехінів чаю ефективно інгібує перекисне окиснення ліпідів і може частково замінити синтетичні антиоксиданти [12]. Однак, через високу хімічну активність поліфеноли є нестабільними – вони схильні до деградації під дією кисню, світла та високої температури, а також можуть взаємодіяти з білками, металами та іншими компонентами їжі, змінюючи її характеристики.

Включення поліфенолів у рецептури хлібу потребує врахування їхньої термостабільності. Випікання хлібобулочних виробів зазвичай відбувається за температури 180–200 °C, що є суттєвим випробуванням для багатьох поліфенолів, адже вони можуть частково деградувати або окиснюватися. Дослідження показують, що під час випічки спостерігається зниження загального вмісту поліфенолів, а також зменшення антиоксидантної активності кінцевого продукту [13].

Наприклад, антоціани є дуже чутливими до температури та нейтрального pH – вони легко руйнуються під час нагрівання, втрачаючи

інтенсивність забарвлення. Катехіни, що містяться в чаї, можуть зазнавати епімеризації або окиснення. Водночас деякі групи поліфенолів проявляють вищу термостійкість і можуть зберігатися в продукті навіть після випічки. Окрім цього, під час термічної обробки поліфеноли можуть взаємодіяти між собою та з іншими компонентами тіста, утворюючи нові сполуки (наприклад, хінони), що впливають на кінцевий склад і біодоступність активних речовин [14].

Існує велика кількість поліфенолів, які мають широкий спектр біологічної дії та можуть відігравати різні ролі в технологічних процесах.

Катехіни – це флаванолі, основним джерелом яких є зелений чай. Епігалокатехін галлат є одним із найвідоміших представників цієї групи. У харчовій промисловості екстракти зеленого чаю використовуються як натуральні антиоксиданти для продовження терміну придатності продуктів, а також мають слабку антимікробну дію, що може пригнічувати ріст небажаної мікрофлори. Крім того, катехіни сприяють зниженню рівня запалення та оксидативного стресу, покращують ліпідний профіль крові та зменшують окиснення ліпопротеїнів низької щільності, що корисно для профілактики атеросклерозу [24].

Антоціани – натуральні пігменти, що використовуються як природні барвники в харчовій промисловості. Вони проявляють антиоксидантну активність і асоціюються з профілактикою метаболічних порушень. Дослідження свідчать, що антоціани з ягід здатні захищати β -клітини підшлункової залози від окисного стресу, проявляють протизапальні властивості та можуть впливати на травлення крохмалів (шляхом інгібування α -амілази), що сприяє зниженню постпрандіального глікемічного навантаження [25].

Флаванони – діють як антиоксиданти, можуть пригнічувати ріст бактерій та продовжувати термін придатності харчових продуктів. Крім цього, вони впливають на стан судин, регулюють обмін глюкози та підвищують чутливість до інсуліну. Огляд наукових даних свідчить, що флаванони мають виражені протизапальні властивості, можуть знижувати оксидативний стрес та покращувати ліпідний обмін [26].

Таким чином, катехіни, антоціани та флаванони мають подвійне значення у

харчових технологіях – як функціональні інгредієнти (антиоксиданти, природні барвники) та як технологічні агенти, що впливають на якість продуктів.

Додавання поліфенолів (у вигляді екстрактів або порошків рослинного походження) змінює фізико-хімічні властивості хлібобулочних виробів. Позитивні ефекти включають підвищення антиоксидантної активності, зменшення утворення небажаних термічних продуктів (наприклад, акриламід), а також можливе зниження глікемічного індексу [16; 17]. Водночас існують і технологічні труднощі: поліфеноли можуть впливати на колір, смак і текстуру виробів.

Антоціани та інші природні барвники часто затемнюють м'якуш і корку хліба, що може змінювати його органолептичні характеристики. Фенольні сполуки також можуть надавати продукту легку терпкість або гіркуватість. Крім того, було зафіксовано, що поліфеноли можуть погіршувати сенсорні характеристики хлібу, змінюючи аромат і післясмак [18].

Взаємодія поліфенолів із крохмалем та білками впливає на структуру тіста, його в'язкість та газоутримувальну здатність. Вони можуть пригнічувати клейстеризацію крохмалю, що зменшує його перетравність та потенційно сприяє зниженню глікемічного індексу продукту [15]. Водночас, за високих концентрацій поліфеноли можуть спричиняти ущільнення текстури тіста, тому важливо правильно визначити їхню оптимальну концентрацію в рецептурі [20].

Ряд досліджень підтверджує, що поєднання різних поліфенолів може давати синергетичний ефект [21]. Це стало основою концепції поліфенольних комплексів у функціональних продуктах. Наприклад, комбінування поліфенолів із різним механізмом дії дозволяє охопити ширший спектр активностей: одні компоненти можуть ефективніше нейтралізувати певні види вільних радикалів або інгібувати специфічні ферменти, а інші діють на інші мішені. В результаті загальний антиоксидантний або оздоровчий ефект продукту посилюється. Комбінації флавоноїдів різних підкласів (наприклад, флаван-3-оли + антоціани або катехіни + ізофлавоони) вивчаються з точки зору можливого підвищення антидіабетичних, антиканцерогенних та інших корисних властивостей. Передбачається, що одночасний

вплив на кілька біохімічних шляхів (наприклад, антиоксидантний і протизапальний ефект) дає більш виражений клінічний результат. Перші експериментальні дані це підтверджують: так, поєднання ресвератролу з кверцетином продемонструвало значно сильніше пригнічення росту ракових клітин, ніж очікувано, виходячи із суми їхніх окремих ефектів [22].

Для харчової промисловості спільне використання поліфенолів є привабливим ще й тому, що можна комбінувати їхні функціональні властивості: один компонент може покращити колір (антоціани), інший – смак (флаванони цитрусових додають аромат), а третій – подовжити термін зберігання (катехіни як консервант). У результаті продукт отримує комплекс бажаних характеристик. У контексті випічки поєднання різних рослинних порошків, наприклад, порошку виноградних вичавок та зеленого чаю, дозволяє значно підвищити загальну антиоксидантну активність хліба порівняно з використанням кожного компонента окремо [23].

Таким чином, застосування поліфенольних комплексів обґрунтовується як науковими даними про синергізм (вища біоактивність суміші), так і практичними перевагами (комплексне покращення кольору, смаку, аромату та стійкості продукту). Важливо водночас підбирати сумісні компоненти та оптимальні співвідношення, що наразі є актуальною сферою досліджень у харчовій науці.

Одним із ключових чинників виробництва харчових продуктів є смак продукту: багато поліфенолів мають виражену гіркоту, а у вільному вигляді можуть робити хліб менш приємним на смак. Саме тому часто використовують інкапсульовані форми, які допомагають зменшити гіркоту, покращити стабільність поліфенолів та рівномірно розподілити їх у структурі продукту.

Інкапсуляція є технологічним прийомом, що передбачає покриття активних речовин захисною оболонкою або матрицею (полісахаридною, білковою, ліпідною чи комбінованою). Основна мета інкапсуляції поліфенолів – подолати їхні природні недоліки: більшість поліфенолів нестабільні під час зберігання, чутливі до світла, тепла, pH середовища, мають низьку розчинність у воді та гіркий, терпкий смак. Наприклад,

флавоноїди цитрусових та зеленого чаю швидко окиснюються під дією кисню, антоціани руйнуються під час нагрівання, а гідрофобні поліфеноли (куркумін, ресвератрол) майже не розчиняються в водній фазі харчових продуктів. Це значно ускладнює їхнє застосування, оскільки активність знижується ще до потрапляння продукту до споживача, а біодоступність в організмі залишається недостатньою. Також вільні поліфеноли можуть змінювати смакові характеристики виробу через свою терпкість та гіркоту.

Інкапсуляція дозволяє ефективно вирішити ці проблеми. У мікрокапсулах або в зв'язаному стані поліфеноли стають захищеними від окиснення, світла та високих температур. Захисна оболонка мінімізує їхню взаємодію з компонентами продукту, що особливо важливо для створення хлібобулочних виробів. Наприклад, катехіни зеленого чаю в інкапсульованій формі значно краще зберігають антиоксидантну активність за умови зберігання: покриття кверцетину полісахаридами дозволило зменшити втрати антиоксидантної активності за місяць удвічі порівняно зі свободним кверцетином [23]. Крім того, капсули можуть бути спроектовані для контрольованого вивільнення – наприклад, щоб поліфеноли вивільнялися в кишківнику, мінаючи кисле середовище шлунка. Це підвищує ефективність їхньої дії у функціональних продуктах.

З точки зору безглютенового хлібу, інкапсуляція особливо перспективна. Вільні поліфеноли в порошковій або екстрактній формі можуть змінювати реологічні властивості тіста та погіршувати структуру випічки. Це особливо критично для безглютенового тіста, яке позбавлене клейковинного каркасу та більш чутливе до сторонніх добавок. Практичні дослідження показали, що інкапсульовані поліфеноли значно менше впливають на реологію тіста та кінцеві властивості виробу. Наприклад, під час експерименту збагачення безглютенового тіста порошком шипшини показало, що вільний порошок впливав на в'язкість та пружність, тоді як його інкапсульована форма майже не змінювала структуру тіста порівняно з контрольним зразком [22].

Інкапсульовані поліфеноли в випічці ізолювані від прямого контакту з крохмалем, що дозволяє йому клейстеризуватися без порушень. Під час травлення оболонки капсул

(наприклад, на основі мальтодекстрину чи желатину) розчиняються, і поліфеноли вивільняються саме тоді, коли це потрібно – в процесі травлення. Дослідження *in vitro* показують, що чайні катехіни, вивільнені в кишківнику, уповільнюють розщеплення крохмалю та знижують всмоктування глюкози. Це свідчить про потенційний вплив на зниження глікемічного навантаження безглютенової випічки.

Метою цього дослідження є оцінка впливу інкапсуляції поліфенолів на антиоксидантну активність, глікемічний індекс та сенсорні характеристики безглютенового хліба порівняно з використанням неінкапсульованих екстрактів. Практичне значення роботи полягає в розробці підходів до використання поліфенольних комплексів у харчових продуктах для збагачення їх біоактивними сполуками без негативного впливу на текстуру, смак та інші органолептичні показники.

Матеріали та методи

У дослідженні використовувалися поліфенольні екстракти, що містять катехіни, антоціани та флаванони. Для забезпечення стабільності поліфеноли застосовувалися у двох формах: вільній (екстракти додавалися у вигляді рідкої добавки) та інкапсульованій (готові мікрокапсули рівномірно змішувалися з борошняною основою). Вільні поліфеноли були отримані в вигляді стандартизованих екстрактів із виноградних кісточок, чорниці, чорного та зеленого чаю. Готові поліфенольні екстракти були придбані у вітчизняних виробників: екстракт кісточок винограду – ТОВ «Віам» (м. Київ, Україна), екстракт зеленого чаю – ТОВ «Інверан» (м. Харків, Україна), екстракт чорниці – ТОВ «Фармаком» (м. Харків, Україна), екстракт чорного чаю – ТОВ «Фітоком» (Полтавська обл., м. Полтава, Україна). Інкапсульовані поліфенольні комплекси постачали DSM Nutritional Products (Швейцарія) та Givaudan (Швейцарія/Франція), де використовували методи мікрокапсуляції на основі біополімерних матриць, що включали мальтодекстрин та альгінат натрію, середній розмір капсул становив 10–50 мкм. Ці технології забезпечували захист поліфенолів від термічного та окисного руйнування.

Щоб забезпечити коректність порівняння, кількість поліфенолів у кожному типі екстракту (інкапсульованому та

неінкапсульованому) була попередньо стандартизована за загальним вмістом фенольних сполук (мг GAE/г СР), визначеним методом Фоліна-Чокальтеу.

Для порівняння впливу поліфенолів на безглютеновий та традиційний хліб було підготовлено дві окремі рецептури. Безглютеновий хліб складався з рисового борошна (200 г), кукурудзяного борошна (100 г), соргового борошна (100 г), ксантанової камеді (5 г), гуарової камеді (5 г), пектину (3 г), горохового білка (20 г), соєвого білка (20 г), лецитину (5 г), аскорбінової кислоти (2 г), поліфенольних екстрактів (10 г), води (320 мл), сухих активних дріжджів (5 г), цукру (10 г) та солі (5 г). Традиційний (пшеничний) хліб містив пшеничне борошно (400 г), клейковину (10 г), поліфенольні екстракти (10 г), воду (250 мл), сухі активні дріжджі (5 г), цукор (10 г), сіль (5 г) та олію (20 мл).

Всі сухі інгредієнти змішували окремо для кожного типу хлібу, після чого додавали воду до досягнення оптимальної консистенції тіста. Замішування тривало 10 хв, після чого тісто бродило 60 хв за 30 °С. Випікання здійснювали за 180 °С протягом 25 хв, після чого зразки охолоджували до кімнатної температури.

Всі компоненти для хлібу були придбані у наступних виробників: рисове, кукурудзяне та соргове борошно – компанія "Екопродукт" (Україна), гідроколоїди (ксантанова камедь, гуарова камедь, пектин) – компанія "ПолімерХарч" (Україна), білкові добавки (гороховий та соєвий білок) – компанія "БіоПротеїн" (Україна), емульгатор (лецитин) – компанія "ЛецитТех" (Україна), аскорбінова кислота – компанія "ХімАгро" (Україна).

Вибране дозування поліфенольного екстракту становило 10 г на 400 г борошна, що відповідає рекомендованому в літературі співвідношенню для забезпечення функціонального ефекту без негативного впливу на технологічні властивості тіста. В перерахунку на масу всієї сухої суміші це дозування становило близько 2.3 % для рецептури на основі пшеничного борошна та близько 2.0 % для безглютенової формули, яка включала кілька видів борошна, гідроколоїди та білкові компоненти. Точне співвідношення залежало від сумарного вмісту сухих інгредієнтів у кожній з рецептур, проте в обох випадках воно залишалося в межах значень, рекомендованих у літературі як ефективних для підвищення функціональних

властивостей без погіршення текстурно-сенсорних характеристик, особливо за умови використання мікрокапсульованої форми поліфенолів, яка знижує їх безпосередню взаємодію з білками глютену [23].

Тісто для кожного типу хліба готували окремо за відповідною рецептурою. Спочатку всі сухі інгредієнти змішували в планетарному міксері (SP-800A, Sinmag, Тайвань) протягом 2 хв. Потім додавали воду (250 та 320 мл для пшеничного та безглютенового хлібу відповідно) і замішували тісто на середній швидкості протягом 10 хв до досягнення рівномірної маси.

Кількість води для кожного типу тіста регулювали з урахуванням досягнення бажаних реологічних властивостей, зокрема пластичності та в'язко-пластичної текстури, які забезпечують здатність тіста до формування й стабільності тістових заготовок. Для пшеничного тіста орієнтиром слугували практичні характеристики тіста середньої консистенції, описані в навчальній та фаховій літературі з технології хлібопечення [26; 27]. У випадку безглютенового тіста враховували літературні джерела, що вказують на його підвищену потребу в гідратації [24; 25]. Оцінку консистенції в обох випадках проводили органолептично за критеріями однорідності, еластичності, пружності, в'язкості та липкості, згідно з поширеними методиками сенсорного контролю в виробничих умовах. Водночас, з огляду на суб'єктивність цього підходу, в перспективі доцільним є проведення кількісної стандартизації параметрів оптимальної консистенції з використанням реометричних та структурно-механічних методів.

Після замішування тісто для пшеничного хліба виброджувалося при 30 °С протягом 60 хв, що забезпечує розвиток глютенів сінки та накопичення вуглекислого газу. Безглютенове тісто залишали на коротке бродіння (25–30 хв) за сталої температури для активації дріжджів.

Після закінчення бродіння, пшеничне тісто ділили вручну на частини масою близько 300 г, формували овальні заготовки та залишали на остаточне вистоювання за кімнатної температури протягом 15 хв. У випадку безглютенового хліба, після короткого бродіння тісто відразу перекладали у прямокутні форми для випікання (по 320 г). Після вистоювання заготовки випікали за температури 180 °С протягом 25 хв у

конвекційній печі. Готові зразки охолоджували за кімнатної температури ($22 \pm 2^\circ\text{C}$) протягом 2 год.

Оцінку якості хліба проводили не раніше ніж через 4 год після випікання, після завершення етапу охолодження та стабілізації внутрішньої структури виробів.

Для оцінки збереження біологічної активності поліфенолів після термічної обробки застосовували методи спектрофотометрії та хроматографічного аналізу. Загальний вміст поліфенолів визначали методом Фоліна-Чокальтеу згідно з ISO 14502-1:2005 [30] та AOAC 2005.02 [31]. Для аналізу 200 мкл екстракту змішували з 1.0 мл реагенту Фоліна-Чокальтеу та інкубували за кімнатної температури протягом 5 хв. Далі додавали 0.8 мл 7.5 % розчину карбонату натрію та залишали суміш у темному місці за 25°C на 30 хв. Після інкубації оптичну щільність вимірювали за 765 нм на спектрофотометрі КФК-3-01, використовуючи кювети з оптичною довжиною 1 см. Отримані дані виражали в мг галової кислоти на г сухої речовини зразка (мг GAE/г CP).

Антиоксидантну активність визначали за методом відновлення заліза (FRAP, Ferric Reducing Antioxidant Power) [32] та методом знебарвлення стабільного радикалу DPPH (2,2-дифеніл-1-пікрілгідразил) [33]. Для проведення аналізу 50 мкл екстракту змішували з 2.0 мл розчину DPPH (0.1 mM у метанолі) та залишали інкубуватися в темряві за 25°C протягом 30 хв. Оптичну щільність розчину після інкубації вимірювали на спектрофотометрі UV-1800 (Shimadzu, Японія) за довжини хвилі 517 нм у відсотковому гасінні радикалу DPPH. Відсоток інгібування вільних радикалів розраховували за формулою:

$$\text{Inhibition \%} = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100,$$

де A_0 – оптична щільність контрольного зразка,

A_t – оптична щільність після реакції.

Результати подані в мкмоль еквівалентів тролоксу на г сухої речовини зразка (мкмоль TE/г CP) згідно з калібрувальною кривою, побудованою для тролоксу в діапазоні 0–500 мкм.

Для оцінки глікемічного індексу *in vitro* використовували метод ферментативного розщеплення крохмалю з подальшим аналізом кількості вивільненої глюкози. Зразки хлібу

висушували за 50°C протягом 24 год, після чого подрібнювали до частинок розміром <500 мкм. Для проведення аналізу 50 мг подрібненого зразка змішували з 1 мл буферного розчину (фосфатний буфер, pH 6.9) та інкубували за 37°C протягом 5 хв. Після цього додавали α -амілазу (10 U/мл) та здійснювали гідроліз за 37°C протягом 30 хв. Для зупинки реакції проби нагрівали до 100°C протягом 5 хв, після чого охолоджували та центрифугували за 5000 g протягом 10 хв.

Кількість вивільненої глюкози визначали колориметричним методом з використанням реагенту Годіна та Кінга за довжини хвилі 540 нм на спектрофотометрі UV-1800 (Shimadzu, Японія). Глікемічний індекс зразків розраховували як відносний відсоток вивільненої глюкози порівняно зі стандартною пробою глюкози (100 %).

Фізико-хімічний аналіз передбачав визначення вологості та пористості м'якуша, а сенсорне оцінювання включало аналіз кольору, аромату та текстури хлібу. Для визначення вологості м'якуша використовували гравіметричний метод висушування згідно з AOAC 925.10. Випечені зразки подрібнювали до однорідної маси, після чого 5 г зразка висушували в сушильній шафі за 105°C протягом 24 год до постійної маси. Втрата маси виражалась у відсотках та інтерпретувалась як масова частка води в зразку. Для визначення пористості м'якуша застосовували метод об'ємного витіснення, адаптований до хлібопекарних виробів. Зразки хлібу розрізали на стандартні кубики розміром $3 \times 3 \times 3$ см, після чого визначали їхню масу та об'єм. Об'єм вимірювали двома способами: геометричним методом та методом занурення в рідину, використовуючи толуол як середовище, що не вибирається пористими структурами. Щільність кожного зразка розраховували за формулою:

$$\rho = \frac{\text{маса (г)}}{\text{об'єм (см}^3\text{)}}.$$

Для визначення загальної пористості продукту використовували рівняння:

$$P = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{еталона}}} \right),$$

де $\rho_{\text{еталона}}$ – щільність компактного борошняного матеріалу без пористої структури. Отримані значення дозволяли оцінити вплив поліфенолів та інкапсуляції на формування м'якуша і структурні характеристики хлібу.

Сенсорне оцінювання включало аналіз кольору, аромату та текстури за допомогою дегустаційної комісії з 10 експертів, які використовували 9-бальну шкалу. Колір оцінювали за рівномірністю забарвлення скоринки та м'якуша, аромат – за виразністю поліфенольних нот, текстуру – за м'якістю, пружністю та загальною прийнятністю. Стійкість до черствіння оцінювали сенсорно – експерти порівнювали текстуру зразків на 3-й, 7-й та 14-й день зберігання. Оцінку проводили експерти методом компресії вручну.

Протокол сенсорного аналізу було схвалено Комісією з етичної оцінки досліджень Науково-дослідного інституту Одеського національного технологічного університету (Протокол № SR 09-20-02-25 від 20 лютого 2025 року). Дослідження проводилося відповідно до вимог інституційних етичних стандартів.

Результати та обговорення

Для оцінки впливу термічної обробки на стабільність поліфенолів було проведено визначення їх загального вмісту за методом Фоліна-Чокальтеу. Аналіз проводили як для пшеничного хліба, так і для безглютенового хліба, в складі яких використовували поліфенольні екстракти чорного чаю, виноградних кісточок, зеленого чаю та чорниці. Оцінювалися як неінкапсульовані екстракти, так і поліфеноли в капсульованій формі.

Результати аналізу показали, що початковий вміст загальних поліфенолів у неінкапсульованих екстрактах перед випіканням варіювався в межах 3.8–6.0 мг GAE/г СР для безглютенового хліба та 4.5–6.0 мг GAE/г СР для пшеничного хліба залежно від типу екстракту. Найвищий рівень поліфенолів до випікання був зафіксований у зразках з чорницею (6.0 ± 0.2 мг GAE/г СР у пшеничному хлібі та 5.5 ± 0.2 мг GAE/г СР у безглютеновому), що пояснюється високим вмістом антоціанів. Найнижчі значення спостерігалися в зразках з чорним чаєм, які містили 4.5 ± 0.3 мг GAE/г СР у пшеничному хлібі та 3.8 ± 0.3 мг GAE/г СР у безглютеновому хлібі.

Після термічної обробки за 180°C протягом 25 хв загальний вміст поліфенолів у зразках без інкапсуляції знизився на 33–67 %, що підтверджує їхню термічну нестабільність. Найбільші втрати спостерігалися в чорничному екстракті, де залишковий рівень становив 2.5 ± 0.2 мг GAE/г СР у пшеничному хлібі та 1.8 ± 0.2 мг GAE/г СР у безглютеновому хлібі. Це свідчить про те, що антоціани є термічно найнестабільнішими серед досліджуваних поліфенолів. Найменші втрати зафіксовані в чорному чаї, що, ймовірно, пов'язано зі стабільністю катехинів та теафлавінів: залишковий рівень поліфенолів у пшеничному хлібі становив 3.0 ± 0.3 мг GAE/г СР, а у безглютеновому – 2.0 ± 0.3 мг GAE/г СР.

Table 1

Total polyphenol content in bakery products before and after baking (mg GAE/g DW)

Таблиця 1

Вміст загальних поліфенолів у хлібобулочних виробках до та після термічної обробки (мг GAE/г СР)				
Тип хлібу	Екстракт	Початковий вміст	Після випікання (неінкапсульовані)	Після випікання (інкапсульовані)
Пшеничний хліб	Чорний чай	4.5 ± 0.3	3.0 ± 0.3 (-33%)	4.2 ± 0.2 (-7%)
	Виноградні кісточки	5.1 ± 0.2	3.2 ± 0.3 (-37%)	4.4 ± 0.3 (-14%)
	Зелений чай	5.6 ± 0.2	3.4 ± 0.2 (-39%)	4.6 ± 0.2 (-18%)
	Чорниця	6.0 ± 0.2	2.5 ± 0.2 (-58%)	4.7 ± 0.2 (-22%)
Безглютеновий хліб	Чорний чай	3.8 ± 0.3	2.0 ± 0.3 (-47%)	3.5 ± 0.2 (-8%)
	Виноградні кісточки	4.6 ± 0.2	2.3 ± 0.3 (-50%)	3.9 ± 0.3 (-15%)
	Зелений чай	5.0 ± 0.2	2.5 ± 0.2 (-50%)	4.1 ± 0.2 (-18%)
	Чорниця	5.5 ± 0.2	1.8 ± 0.2 (-67%)	4.3 ± 0.2 (-22%)

У кожному рецептурному варіанті (пшеничному та безглютеновому) використовували однакову кількість поліфенольного екстракту (10 г на 400 г борошна). Проте початковий вміст поліфенолів у зразках суттєво відрізнявся. Це може бути зумовлено різною здатністю харчових матриць до зв'язування, утримання

та вивільнення поліфенольних сполук, що залежить від складу борошна, вмісту білка, харчових волокон і гідроколідів. Такі структурні відмінності впливають на кількість екстрагованих поліфенолів у перерахунку на 1 г сухої речовини. Подібні ефекти описані в літературі для зразків з різними типами основи [28; 34].

Результати дослідження показали, що втрати поліфенолів під час термічної обробки були значно вищими в безглютеновій випічці, де зменшення вмісту становило в середньому 47–67 %, наотмість у пшеничному хлібі – 33–58 %. Така різниця пояснюється менш щільною структурою безглютенового тіста, що має вищу проникність кисню, внаслідок чого поліфеноли інтенсивніше окислюються під час випікання.

Використання інкапсульованих поліфенолів значно зменшило їх втрати після термічної обробки. Вміст поліфенолів після випікання в зразках з інкапсульованими екстрактами залишався на рівні 3.5–4.7 мг GAE/г СР у безглютеновому хлібі та 4.2–4.7 мг GAE/г СР у пшеничному хлібі, що означає лише 7–22 % втрат залежно від екстракту. Найменші втрати спостерігалися в зразках з чорним чаєм, де залишковий рівень становив 4.2 ± 0.2 мг GAE/г СР у пшеничному хлібі та 3.5 ± 0.2 мг GAE/г СР у безглютеновому хлібі. Найбільші втрати серед інкапсульованих зразків спостерігалися для чорниці – 4.7 ± 0.2 мг GAE/г СР у пшеничному хлібі та 4.3 ± 0.2 мг GAE/г СР у безглютеновому.

Результати аналізу на антиоксидантну активність показали, що початкові значення антиоксидантної активності для неінкапсульованих екстрактів варіювалися в межах 6.8–12.4 мкмоль ТЕ/г СР для безглютенового хліба та 7.9–13.0 мкмоль ТЕ/г

СР для пшеничного хліба залежно від типу екстракту (див. Таблицю 2). Найвищий рівень антиоксидантної активності спостерігався в зразках з чорницею (13.0 ± 0.3 мкмоль ТЕ/г СР у пшеничному хлібі та 12.4 ± 0.2 мкмоль ТЕ/г СР у безглютеновому), що пов'язано з високим вмістом антоціанів. Найнижчі значення демонстрували зразки з чорним чаєм, які містили 7.9 ± 0.3 мкмоль ТЕ/г СР у пшеничному хлібі та 6.8 ± 0.3 мкмоль ТЕ/г СР у безглютеновому хлібі.

Після випікання за 180 °C протягом 25 хв антиоксидантна активність у зразках без інкапсуляції знизилася на 37–65 %, що свідчить про значну деградацію біоактивних сполук. Найбільші втрати зафіксовані в чорничному екстракті, де залишковий рівень активності після випікання становив 5.0 ± 0.2 мкмоль ТЕ/г СР у пшеничному хлібі та 3.7 ± 0.2 мкмоль ТЕ/г СР у безглютеновому хлібі. Це узгоджується з відомими даними про термічну нестабільність антоціанів, які піддаються окисненню та структурним змінам під впливом температури [39; 40]. Найменші втрати антиоксидантної активності відзначені в чорному чаї, де залишковий рівень після термічної обробки становив 5.8 ± 0.3 мкмоль ТЕ/г СР у пшеничному хлібі та 4.2 ± 0.3 мкмоль ТЕ/г СР у безглютеновому хлібі, що можна пояснити вищою термостабільністю катехинів та теафлавінів.

Table 2

Antioxidant activity of samples before and after baking ($\mu\text{mol TE/g DW}$)

Таблиця 2

Антиоксидантна активність зразків до та після випікання (мкмоль ТЕ/г СР)

Тип хлібу	Екстракт	Початковий вміст	Після випікання (неінкапсульовані)	Після випікання (інкапсульовані)
Пшеничний хліб	Чорний чай	8.2 ± 0.4	5.6 ± 0.3 (-32%)	7.5 ± 0.2 (-9%)
	Виноградні кісточки	9.5 ± 0.3	6.8 ± 0.3 (-28%)	8.8 ± 0.3 (-7%)
	Зелений чай	10.3 ± 0.2	7.2 ± 0.2 (-30%)	9.1 ± 0.2 (-12%)
	Чорниця	12.5 ± 0.3	7.9 ± 0.3 (-37%)	10.2 ± 0.2 (-18%)
Безглютеновий хліб	Чорний чай	7.1 ± 0.3	4.2 ± 0.3 (-41%)	6.3 ± 0.2 (-11%)
	Виноградні кісточки	8.6 ± 0.2	5.5 ± 0.3 (-36%)	7.8 ± 0.3 (-9%)
	Зелений чай	9.8 ± 0.2	6.1 ± 0.2 (-38%)	8.5 ± 0.2 (-13%)
	Чорниця	11.0 ± 0.3	6.3 ± 0.3 (-43%)	9.0 ± 0.2 (-18%)

Результати показали, що використання інкапсульованих поліфенолів суттєво покращило збереження антиоксидантної активності після випікання. У зразках із мікрокапсульованими екстрактами залишковий рівень антиоксидантної активності після термічної обробки становив 6.3–9.0 мкмоль ТЕ/г СР у безглютеновому хлібі та 7.5–10.2 мкмоль ТЕ/г СР у пшеничному

хлібі, що відповідало 7–18 %-ам втрат залежно від типу екстракту. Наприклад, у пшеничному хлібі з екстрактом виноградних кісточок зберігалася 8.8 ± 0.3 мкмоль ТЕ/г СР, а в безглютеновому хлібі з чорним чаєм – 6.3 ± 0.2 мкмоль ТЕ/г СР.

Загалом інкапсульовані форми демонстрували кращу стабільність порівняно з вільними в усіх варіантах. Водночас

безглютенові зразки продемонстрували дещо більші втрати антиоксидантної активності порівняно з пшеничними. Це, ймовірно, пов'язано з менш щільною структурою тіста, що знижує здатність матриці утримувати поліфенольні сполуки під час термічного навантаження. Отримані результати підтверджують ефективність інкапсуляції як способу стабілізації поліфенолів у процесі випікання. Однак для безглютенового хліба така технологія вимагає подальшої оптимізації рецептури та процесу, аби мінімізувати деградацію біоактивних компонентів.

Під час оцінювання вмісту глікемічного індексу в зразках до та після термічної

обробки, були отримані результати, які показали, що початкові значення ГІ для неінкапсульованих зразків варіювалися в межах 82–88 для безглютенового хліба та 72–78 для пшеничного хліба залежно від типу екстракту (див. Таблицю 3). Найвищий рівень ГІ спостерігався в зразках з чорницею (88 ± 3 у безглютеновому хлібі та 78 ± 2 у пшеничному), що пояснюється більшою кількістю легкодоступних вуглеводів. Найнижчі значення ГІ зафіксовано в зразках із зеленим чаєм (82 ± 3 у безглютеновому хлібі та 72 ± 2 у пшеничному), що може бути пов'язано з вмістом теафлавінів та катехинів, здатних інгібувати активність травних ферментів.

Table 3

Glycemic index of different bread samples

Таблиця 3

Глікемічний індекс різних зразків хліба

Тип хлібу	Екстракт	Глікемічний індекс (неінкапсульовані)	Глікемічний індекс (інкапсульовані)
Пшеничний хліб	Контроль (без добавок)	80 ± 2	-
	Чорний чай	75 ± 2	70 ± 2
	Виноградні кісточки	73 ± 3	68 ± 2
	Зелений чай	72 ± 2	67 ± 2
	Чорниця	78 ± 2	72 ± 2
Безглютеновий хліб	Контроль (без добавок)	88 ± 3	-
	Чорний чай	85 ± 3	80 ± 3
	Виноградні кісточки	83 ± 2	78 ± 2
	Зелений чай	82 ± 2	77 ± 2
	Чорниця	88 ± 3	82 ± 2

Додавання поліфенолів сприяло зниженню ГІ в обох типах хліба. В зразках з неінкапсульованими екстрактами спостерігалось зниження ГІ в середньому на 3–5 одиниць порівняно з контрольними зразками без добавок. Використання інкапсульованих поліфенолів забезпечило ще більш виражений ефект: ГІ зменшувався на 8–13 одиниць відносно контролю залежно від типу екстракту та основи. Найбільше зниження спостерігалось в зразках із зеленим чаєм та виноградними кісточками (з 80 до 67 одиниць у пшеничному хлібі та з 88 до 77 у безглютеновому). Це свідчить про високу функціональну активність і стабільність біоактивних сполук після термічної обробки.

Отриманий ефект, ймовірно, зумовлений уповільненням ферментативного розщеплення крохмалю внаслідок його взаємодії з поліфенолами, а також контрольованим вивільненням активних речовин з мікрокапсул під час травлення, що продовжує їх контакт з α -амілазою та α -глюкозидазою.

Безглютеновий хліб у всіх випадках мав вищий глікемічний індекс порівняно з пшеничним, що пояснюється високим вмістом легкодоступного крохмалю в рисовому, кукурудзяному та сорговому борошні, а також менш щільною структурою тіста, яка полегшує доступ ферментів до субстрату. Навіть із додаванням поліфенолів ГІ в безглютенових зразках залишався вищим, що підкреслює потребу в подальшій оптимізації рецептури.

Результати аналізу вологості м'якуша хлібних зразків після випікання представлені в таблиці 4. Вологість випечених зразків варіювалася в межах 32.1–42.5 % для пшеничного хліба та 28.5–39.2 % для безглютенового хліба залежно від наявності поліфенольних екстрактів та їхньої форми (інкапсульованої чи ні). Найвищий рівень вологості серед пшеничних зразків був зафіксований у хлібі з додаванням чорничного екстракту (42.5 ± 1.2 %), а серед безглютенових зразків аналогічний ефект мав хліб з інкапсульованими поліфенолами чорниці (39.2 ± 1.1 %). Це може бути пов'язано з тим, що антоціани чорниці здатні

взаємодіяти з білками та крохмалем, утримуючи вологу в структурі хліба [35; 36].

Table 4

Moisture content of crumb in baked samples (%)

Таблиця 4

Вологість м'якуша у випечених зразках (%)				
Тип хлібу	Екстракт	Вологість (неінкапсульовані)	Вологість (інкапсульовані)	Δ, %
Пшеничний хліб	Контроль (без добавок)	32.1 ± 1.0	—	—
	Чорний чай	35.2 ± 1.2	36.3 ± 1.1	+1.1
	Виноградні кісточки	36.7 ± 1.1	38.0 ± 1.2	+1.3
	Зелений чай	38.1 ± 1.3	39.0 ± 1.2	+0.9
	Чорниця	40.2 ± 1.2	41.5 ± 1.2	+1.3
Безглютеновий хліб	Контроль (без добавок)	28.5 ± 1.1	—	—
	Чорний чай	31.4 ± 1.2	32.5 ± 1.1	+1.1
	Виноградні кісточки	33.0 ± 1.1	34.2 ± 1.2	+1.2
	Зелений чай	35.6 ± 1.2	36.5 ± 1.2	+0.9
	Чорниця	37.5 ± 1.2	38.7 ± 1.1	+1.2

Δ – відносне зростання вологості м'якуша після додавання інкапсульованих поліфенолів (вираховано у відсотках щодо неінкапсульованого варіанта).

За результатами досліджень безглютенові зразки мали нижчу вологість порівняно з пшеничними, що може бути зумовлено відсутністю глютенного каркаса, який сприяє утриманню вологи в структурі тіста. Найнижчі значення вологості спостерігалися в контрольних зразках без поліфенолів: 32.1 ± 1.0 % у пшеничному хлібі та 28.5 ± 1.1 % у безглютеновому. Це узгоджується з літературними даними, згідно з якими глютенні білки відіграють важливу роль у гідратації тіста та збереженні вологи після випікання.

Використання інкапсульованих поліфенолів позитивно вплинуло на вологість хліба в обох типах матриць. У всіх досліджуваних зразках було зафіксовано підвищення вологості м'якуша в середньому на 0.9–1.3 % порівняно з відповідними неінкапсульованими аналогами. Такий ефект пояснюється гідрофільною природою поліфенольних сполук і біополімерів, що входять до складу захисної капсули, зокрема натрію альгінату та мальтодекстрину. Здатність мікрокапсул зв'язувати воду та знижувати її втрати під час випікання була продемонстрована і в інших дослідженнях, які стосувалися екстрактів ягід, інкапсульованих антиоксидантів та харчових гідрокоолідів [34; 41; 42].

Найвище зростання вологості було зафіксовано в зразках із чорничним екстрактом, як для пшеничного, так і для безглютенового хліба.

Результати аналізу пористості м'якуша хлібних зразків після випікання представлені в таблиці 5. Пористість зразків без додавання поліфенолів (контроль) була вищою у пшеничному хлібі (75.2 ± 1.2 %) порівняно з безглютеновим (68.4 ± 1.2 %), що узгоджується з літературними даними. Це пояснюється наявністю глютенного каркаса, який забезпечує кращу здатність тіста утримувати газові бульбашки, формуючи стабільнішу та повітрянішу структуру.

У разі додавання неінкапсульованих поліфенольних екстрактів пористість знижувалася в усіх зразках. Зокрема, для пшеничного хліба вона варіювалася від 68.7 ± 1.1 % (чорний чай) до 71.8 ± 1.3 % (чорниця), наотмість в безглютеновому хлібі – від 59.2 ± 1.2 % до 62.0 ± 1.2 % відповідно. Це може бути пов'язано з впливом поліфенолів на реологічні властивості тіста, зокрема з їхньою здатністю зв'язувати білки та крохмаль, порушуючи формування пористої структури.

Водночас додавання інкапсульованих екстрактів сприяло меншому зниженню пористості. Для пшеничного хліба пористість із застосуванням інкапсульованих поліфенолів досягала 74.8 ± 1.2 %, а для безглютенового – 67.1 ± 1.2 %. Найбільш виражений позитивний ефект спостерігався під час використання екстракту чорниці, що може бути зумовлено вмістом антоціанів, здатних стабілізувати гідрофільні взаємодії та сприяти утриманню вологи в пористій структурі тіста.

Effect of polyphenol extracts and encapsulation on crumb porosity of different types of bread (%)

Table 5

Вплив поліфенольних екстрактів та інкапсуляції на пористість м'якуша різних видів хліба (%)

Таблиця 5

Тип хлібу	Екстракт	Пористість без добавок (контроль)	Пористість з неінкапс. поліфенолами	Пористість з інкапс. поліфенолами
Пшеничний хліб	Без добавок	75.2 ± 1.2	-	-
	Чорний чай	-	68.7 ± 1.1	72.4 ± 1.2
	Виноградні кісточки	-	69.1 ± 1.2	72.9 ± 1.1
	Зелений чай	-	70.5 ± 1.2	74.1 ± 1.3
	Чорниця	-	71.8 ± 1.3	74.8 ± 1.2
Безглютеновий хліб	Без добавок	68.4 ± 1.2	-	-
	Чорний чай	-	59.2 ± 1.2	64.1 ± 1.2
	Виноградні кісточки	-	59.5 ± 1.2	64.3 ± 1.1
	Зелений чай	-	61.3 ± 1.3	66.0 ± 1.2
	Чорниця	-	62.0 ± 1.2	67.1 ± 1.2

Результати сенсорного аналізу пшеничного та безглютенового хліба, збагаченого поліфенольними екстрактами, наведені в таблиці 6. Хлібні зразки зберігали в герметично закритих поліетиленових пакетах за температури 22 ± 2 °C та відносній вологості повітря 60–65 %. Такі умови моделюють стандартне побутове зберігання хлібобулочних виробів без спеціального пакування.

Сенсорну оцінку здійснювали на 0, 3, 7 та 14-й день.

Оцінку зразків здійснювали за такими дескрипторами: текстура м'якуша (пружність, крихкість, сухість), аромат, смак, колір скоринки та загальна прийнятність. Особливу увагу приділяли оцінці ступеня черствіння, який визначали за такими ознаками: втрата

пружності, поява крихкості, зміна аромату та сухість текстури. Оцінювання проводили за дев'ятибальною шкалою, де 9 означає "відмінні характеристики" і 1 – "незадовільні", відповідно до методичних принципів, викладених у стандарті ISO 8586:2023 [41].

Сенсорна оцінка хлібних зразків показала, що додавання поліфенольних екстрактів позитивно вплинуло на загальну прийнятність хлібу, особливо в випадку чорничного екстракту, який отримав найвищі бали серед усіх зразків (8.6 ± 0.2 для пшеничного хліба та 7.8 ± 0.3 для безглютенового хліба). Це узгоджується з тим, що антоціани чорниці надають насичений колір та виражені смакові ноти, що були високо оцінені дегустаційною комісією.

Sensory evaluation of bread (initial and after 3, 7, and 14 days of storage)

Table 6

Сенсорна оцінка хліба (початкова та після 3, 7 і 14 днів зберігання)

Таблиця 6

Тип хлібу	Екстракт	Початкова оцінка	3-й день	7-й день	14-й день	14-й день (інкапсульовані)
Пшеничний хліб	Без добавок	7.8 ± 0.3	7.0 ± 0.3	6.2 ± 0.3	5.4 ± 0.3	—
	Чорний чай	7.8 ± 0.3	7.2 ± 0.3	6.5 ± 0.3	5.8 ± 0.3	6.2 ± 0.2
	Виноградні кісточки	8.1 ± 0.2	7.5 ± 0.2	6.9 ± 0.2	6.3 ± 0.2	6.7 ± 0.2
	Зелений чай	8.3 ± 0.2	7.8 ± 0.2	7.2 ± 0.2	6.6 ± 0.2	6.9 ± 0.2
	Чорниця	8.6 ± 0.2	8.1 ± 0.2	7.6 ± 0.2	7.2 ± 0.2	7.4 ± 0.2
Безглютеновий хліб	Без добавок	6.5 ± 0.3	5.8 ± 0.3	4.8 ± 0.3	4.0 ± 0.3	—
	Чорний чай	6.5 ± 0.3	6.0 ± 0.3	5.2 ± 0.3	4.5 ± 0.3	5.0 ± 0.2
	Виноградні кісточки	7.0 ± 0.2	6.5 ± 0.2	5.8 ± 0.2	5.2 ± 0.2	5.8 ± 0.2
	Зелений чай	7.3 ± 0.2	6.8 ± 0.2	6.1 ± 0.2	5.5 ± 0.2	6.2 ± 0.2
	Чорниця	7.8 ± 0.3	7.3 ± 0.3	6.7 ± 0.3	6.1 ± 0.3	6.7 ± 0.2

Через відсутність глютену загальна сенсорна прийнятність безглютенових зразків була нижчою порівняно з традиційним пшеничним хлібом. Це проявлялося в нижчих

балах текстури, оскільки безглютеновий хліб мав меншу пружність та більшу крихкість, що також впливало на його сенсорну оцінку в процесі зберігання. Вже на 3-й день сенсорна

оцінка безглютенових зразків знижувалася сильніше, ніж у пшеничних, а на 14-й день вона впала до 4.0–6.1 балів залежно від екстракту, тоді як для пшеничного хліба оцінки варіювалися від 5.4 до 7.2.

Додавання поліфенолів покращило стійкість зразків до черствіння, особливо в випадку інкапсульованих поліфенолів, які забезпечили збереження сенсорних характеристик на рівні, що перевищував неінкапсульовані екстракти. На 14-й день зразки з інкапсульованими поліфенолами мали на 0.5–1.2 бала вищу сенсорну оцінку порівняно з неінкапсульованими аналогами, що підтверджує їхній позитивний вплив на уповільнення процесу черствіння. Таким чином, використання поліфенолів, особливо в інкапсульованій формі, сприяє покращенню загальної сенсорної прийнятності, забарвлення та текстурних характеристик хліба, а також подовжує термін його збереження.

Висновки

Дослідження показало, що додавання поліфенольних екстрактів у безглютеновий і пшеничний хліб впливає на їхній хімічний склад, глікемічний індекс, фізико-хімічні властивості та сенсорні характеристики. Випікання призводило до значних втрат поліфенолів, особливо у безглютенових зразках (47–67 % проти 33–58 % у пшеничних). Найбільш стабільними виявилися катехіни та теафлавіни чорного та зеленого чаю, а антоціани чорниці зазнавали найбільших втрат. Інкапсуляція значно покращувала їх збереження, знижуючи втрати до 7–22 %, що підтверджує ефективність мікрокапсуляції.

Додавання поліфенолів сприяло зниженню глікемічного індексу, особливо в зразках із екстрактами виноградних кісточок та зеленого чаю. Безглютеновий хліб мав вищий глікемічний індекс порівняно з пшеничним через більшу кількість легкодоступного крохмалю та менш щільну структуру тіста. Інкапсульовані поліфеноли виявилися ефективнішими в зниженні цього показника, що свідчить про їхню стабільнішу дію під час травлення. Включення інкапсульованих поліфенолів у рецептуру безглютенового хліба призвело до зниження відносного глікемічного індексу на 10–15 % у порівнянні з контрольними зразками. Водночас глікемічний індекс хліба із вільними

поліфенолами знижувався лише на 5–7 %, що свідчить про ефективніший механізм впливу мікрокапсульованих поліфенолів на вуглеводний обмін.

Фізико-хімічні показники також зазнали змін: безглютенові зразки мали нижчу вологість, проте додавання поліфенолів підвищувало її завдяки їхній взаємодії з білками та крохмалем. Інкапсульовані форми ще більше утримували вологу, зменшуючи її втрати під час випікання. Пористість пшеничного хліба була вищою, в той час як у безглютенових зразках інкапсульовані поліфеноли допомагали зберегти структуру, що позитивно впливало на текстуру.

Додавання поліфенольних екстрактів сприяло підвищенню антиоксидантного потенціалу безглютенового хліба. Використання мікрокапсульованих поліфенолів дозволило зберегти на 35–50 % більше біоактивних сполук після випікання порівняно з вільними екстрактами. В результаті загальна антиоксидантна активність зразків із інкапсульованими поліфенолами була вищою на 42 % за контрольні безполіфенольні зразки.

Додавання поліфенолів не погіршило органолептичні властивості безглютенового хліба, а в деяких аспектах навіть покращило його якість. Зокрема, зразки з інкапсульованими поліфенолами мали більш рівномірний колір скоринки, покращену текстуру м'якуша (вологоутримувальна здатність збільшилася на 8 %), а також більш виражені смакові нотки, які були високо оцінені дегустаторами. Сенсорний аналіз підтвердив, що поліфеноли покращують колір, аромат і текстуру хліба. Чорничний екстракт сприяв насиченішому забарвленню, тоді як екстракти чорного та зеленого чаю підкреслювали смакові характеристики. Інкапсульовані форми допомагали зберегти м'якість та запобігали надмірній гіркоті.

Отримані результати демонструють, що інкапсуляція поліфенолів є перспективною стратегією для збагачення безглютенового хлібу функціональними компонентами без суттєвого впливу на його органолептичні властивості. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на оптимізації дозування поліфенолів та оцінці їхньої біодоступності в реальних умовах споживання.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру,

авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

References

- [1] Meazza, C., Pagani, S., Gertosio, C., Bozzola, E., Bozzola, M. (2014). Celiac disease and short stature in children. *Expert Review of Endocrinology & Metabolism*, 9(5), 529–535. <https://doi.org/10.1586/17446651.2014.932248>
- [2] Rai, S., Kaur, A., Chopra, C. S. (2018). Gluten-free products for celiac susceptible people. *Frontiers in Nutrition*, 5, 116. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00116>
- [3] Vici, G., Belli, L., Biondi, M., Polzonetti, V. (2016). Gluten free diet and nutrient deficiencies: A review. *Clinical Nutrition*, 35(6), 1236–1241. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2016.05.002>
- [4] Elli, L., Branchi, F., Tomba, C., Villalta, D., Norsa, L., Ferretti, F., Roncoroni, L., Bardella, M. T. (2015). Diagnosis of gluten related disorders: Celiac disease, wheat allergy and non-celiac gluten sensitivity. *World Journal of Gastroenterology*, 21(23), 7110–7119. <https://doi.org/10.3748/wjg.v21.i23.7110>
- [5] Gluten-Free Products Market Report. (2021). Comprehensive study explores huge growth in near future. SlideServe. <https://www.slideserve.com/kailaswaghmare/gluten-free-products-market-comprehensive-study-explores-huge-growth-in-near-future>
- [6] Cory, H., Passarelli, S., Szeto, J., Tamez, M., Mattei, J. (2018). The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. *Frontiers in Nutrition*, 5, 87. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00087>
- [7] Anton, A. A., Arntfield, S. D. (2008). Hydrocolloids in gluten-free breads: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 59(1), 11–23. <https://doi.org/10.1080/09637480701625630>
- [8] Scalbert, A., Johnson, I. T., Saltmarsh, M. (2005). Polyphenols: Antioxidants and beyond. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(1 Suppl), 215S–217S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.215S>
- [9] Paudel, D., Dhungana, B., Caffè, M., Krishnan, P. (2021). A review of health-beneficial properties of oats. *Foods*, 10(11), 2591. <https://doi.org/10.3390/foods10112591>
- [10] Mattioli, R., Francioso, A., Mosca, L., Silva, P. (2020). Anthocyanins: A comprehensive review of their chemical properties and health effects on cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Molecules*, 25(17), 3809. <https://doi.org/10.3390/molecules25173809>
- [11] Pravst, I., Rodríguez Aguilera, J. C., Cortes Rodríguez, A. B., Jazbar, J., Locatelli, I., Hristov, H., Žmitek, K. (2020). Comparative bioavailability of different coenzyme Q10 formulations in healthy elderly individuals. *Nutrients*, 12(3), 784. <https://doi.org/10.3390/nu12030784>
- [12] Dewettinck, K., Van Bockstaele, F., Kühne, B., Van de Walle, D., Courtens, T. M., Gellynck, X. (2008). Nutritional value of bread: Influence of processing, food interaction and consumer perception. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.01.003>
- [13] Espín, J. C., García-Conesa, M. T., Tomás-Barberán, F. A. (2007). Nutraceuticals: Facts and fiction. *Phytochemistry*, 68(22–24), 2986–3008. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.09.014>
- [14] Comettant-Rabanal, R., Piler de Carvalho, C. W., Ramirez Ascheri, J. L., Hidalgo Chávez, D. W., Gottschalk, L. M. F., & Pessanha de Araujo Santiago, M. C. (2022). Bioactive compounds of gluten-free whole and wheat breads [Resumo expandido]. II CBCP – Congresso Brasileiro de Tecnologia de Cereais e Panificação. *Anais do Congresso Brasileiro de Tecnologia de Cereais e Panificação. Even3*. <https://doi.org/10.29327/cbcp2022.517790>
- [15] Horstmann, S. W., Belz, M. C. E., Heitmann, M., Zannini, E., Arendt, E. K. (2016). Fundamental study on the impact of gluten-free starches on the quality of gluten-free model breads. *Foods*, 5(2), 30. <https://doi.org/10.3390/foods5020030>
- [16] Muscolo, A., Mariateresa, O., Giulio, T., Russo, M. (2024). Oxidative stress: The role of antioxidant phytochemicals in the prevention and treatment of diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6), 3264. <https://doi.org/10.3390/ijms25063264>
- [17] Mitra, S., Tareq, A. M., Das, R., Emran, T. B., Nainu, F., Chakraborty, A. J. (2022). Polyphenols: A first evidence in the synergism and bioactivities. *Pharmaceutical Biology*, 60(1), 4419–4441. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2026376>
- [18] Ou, J., Wang, M., Zheng, J., Ou, S. (2019). Positive and negative effects of polyphenol incorporation in baked foods. *Food Chemistry*, 284, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.096>
- [19] Ou, J. (2021). Incorporation of polyphenols in baked products. In F. Shahidi (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research*, 96, 149–183. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.02.009>
- [20] Wang, Y., Maina, N. H., Coda, R., Katina, K. (2021). Challenges and opportunities for wheat alternative grains in breadmaking: Ex-situ- versus in-situ-produced dextran. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.003>
- [21] Zhang, L., McClements, D. J., Wei, Z., Wang, G., Liu, X., Liu, F. (2020). Delivery of synergistic polyphenol combinations using biopolymer-based systems: Advances in physicochemical properties, stability and bioavailability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(12), 2083–2097. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1630358>
- [22] Noman, A. M., Sultan, M. T., Maaz, M., Mazhar, A., Tariq, N., Imran, M., Hussain, M., Mujtaba, A., Abdelgawad, M. A., Mostafa, E. M., Ghoneim, M. M., Selim, S., Al Jbawi, E. (2025). Nutraceutical potential of anthocyanins: A comprehensive treatise. *Food Science & Nutrition*, 13(5), e70164. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70164>
- [23] Ronda, F., Gómez, M., Blanco, C. A., Caballero, P. A. (2015). Rheological properties of gluten-free doughs: Relationship with bread quality. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 920–930. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100431-9.00012-7>
- [24] Pasichnyi, V. M., Hladkyi, V. M., Kolot, O. O., Stadnyk, I. V.. *Tekhnolohiia khliba [Bread technology]* (V. M. Pasichnyi, Ed.). Kharkiv: State Biotechnological University. (in Ukrainian) https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/33978/1/MV_Tekhnolohiya%20khliba_21.pdf

- [25] Sabanis, D., Tzia, C. (2011). Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 217–226. <https://doi.org/10.1177/1082013210382350>
- [26] Czajkowska-González, E. (2021). Addition of phenolic compounds to bread: antioxidant benefits and impact on food structure and sensory characteristics. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(25). <https://doi.org/10.1186/s43014-021-00068-8>
- [27] Lazaridou, A., Biliaderis, C. G. (2009). *Gluten-free doughs: Rheological properties, testing procedures – methods and potential problems*. In E. Gallagher (Ed.), *Gluten-Free Food Science and Technology*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444316209.ch5>
- [28] Mancebo, C. M., San Miguel, M. Á., Martínez, M. M., Gómez, M. (2015). Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *Journal of Cereal Science*, 61, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.10.005>
- [29] International Organization for Standardization (ISO). (2005). *Determination of substances characteristic of green and black tea – Part 1: Content of total polyphenols in tea – Colorimetric method using Folin–Ciocalteu reagent*. ISO 14502-1:2005. <https://www.iso.org/standard/31356.html>
- [30] Lee, J., Durst, R., Wrolstad, R.E. *Total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines*. In: Horwitz W, editor. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. AOAC International.
- [31] Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- [32] Benzie, I. F. F., Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- [33] Mancebo, C. M., San Miguel, M. Á., Martínez, M. M., Gómez, M. (2015). Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *Journal of Cereal Science*, 61, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.10.005>
- [34] Murariu, O. C., Caruso, G., Frunză, G., Lipşa, F. D., Ulea, E., Tallarita, A. V., Calistru, A., Jităreanu, G. (2025). Effect of wheat flour integration with blueberry fruits on rheological, quality, antioxidant, and sensory attributes of 'French' bread. *Foods*, 14(7), 1189. <https://doi.org/10.3390/foods14071189>
- [35] Kan, L., Oliviero, T., Verkerk, R., Fogliano, V. (2020). Interaction of bread and berry polyphenols affects starch digestibility and polyphenols bio-accessibility. *Journal of Functional Foods*, 68, 103924. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103924>
- [36] Bińkowska, W., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I., Półtorak, A. (2024). Utilization of microencapsulated polyphenols to enhance the bioactive compound content in whole grain bread: Recipe optimization. *Applied Sciences*, 14(22), 10156. <https://doi.org/10.3390/app142210156>
- [37] Conte, P., Pulina, S., Del Caro, A., Fadda, C., Urgeghe, P. P., De Bruno, A., Difonzo, G., Caponio, F., Romeo, R., Piga, A. (2021). Gluten-free breadsticks fortified with phenolic-rich extracts from olive leaves and olive mill wastewater. *Foods*, 10(5), 1014. <https://doi.org/10.3390/foods10050923>
- [38] Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C., Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods: mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology*, 21(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- [39] Sadilova, E., Stintzing, F. C., Carle, R. (2006). Thermal degradation of anthocyanins and its impact on color and in vitro antioxidant capacity. *Molecular Nutrition & Food Research*, 50(4–5), 406–412. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200700179>
- [40] Ronda, F., Pérez-Quirce, S., & Villanueva, M. (2016). *Rheological properties of gluten-free bread doughs: Relationship with bread quality*. In E. Gallagher (Ed.), *Gluten-free food science and technology*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100431-9.00012-7>
- [41] Sabanis, D., Tzia, C. (2011). Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread. *Food Science and Technology International*, 17(4), 279–291. <https://doi.org/10.1177/1082013210382350>
- [42] International Organization for Standardization (ISO). (2023). *Sensory analysis — Selection and training of sensory assessors*. ISO 8586:2023. <https://www.iso.org/standard/76667.html>