

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет харчових наук, нутриціології та управління якістю

ПОГОДЖЕНО

**В.о. декана факультету харчових
наук, нутриціології та управління
якістю**

_____ Лариса БАЛЬ-ПРИЛИПКО

« ____ » _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**В.о. завідувача кафедри технології
м'ясних, рибних та морепродуктів**

_____ Олександр САВЧЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Вдосконалення способу виробництва хлібців з використанням
пшеничних висівків для осіб із порушеним обміном речовин»**

Спеціальність **181 «Харчові технології»**

Освітня програма «Нутриціологія»

Орієнтація освітньої програми **освітньо-наукова**

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент

_____ Людмила ТИЩЕНКО

Керівник магістерської роботи

д.т.н., професор

_____ Світлана ДАНИЛЕНКО

Виконав

_____ Денис КОВАЛЬЧУК

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет харчових наук, нутриціології та управління якістю

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри технології
м'ясних, рибних та морепродуктів

_____Олександр САВЧЕНКО

«_____» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

Ковальчуку Денису Павловичу

Спеціальність 181 «Харчові технології»

Освітня програма «Нутриціологія»

Програма підготовки Освітньо-наукова

Тема магістерської роботи **«Вдосконалення способу виробництва хлібців з використанням пшеничних висівок для осіб із порушеним обміном речовин»**

Затверджена наказом ректора НУБіП України від “25” листопада 2024 р. № 2093 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 10. 06. 2025 р

Вихідні дані до магістерської роботи: хлібці з функціональними властивостями, пшеничні висівки, хімічний склад рослинної сировини.

Перелік питань, що підлягають дослідженню: огляд літературних джерел; організація, об'єкти, предмети і методи досліджень; результати дослідження та їх аналіз; висновки; список використаної літератури.

Дата видачі завдання “14” квітня 2025 р.

Керівник магістерської роботи

д.т.н., професор

_____ Світлана ДАНИЛЕНКО

Завдання прийняв до виконання

_____ Денис КОВАЛЬЧУК

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана згідно із завданням на тему: «Вдосконалення способу виробництва хлібців з використанням пшеничних висівок для осіб із порушеним обміном речовин».

Метою магістерської роботи є удосконалення технології виробництва функціональних хлібців із використанням пшеничних висівок та інших джерел харчових волокон, спрямованих на покращення метаболічних процесів в організмі, підвищення харчової та біологічної цінності готової продукції, а також оптимізацію її функціонально-технологічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз наукових джерел щодо сучасних тенденцій створення функціональних зернових продуктів та використання харчових волокон у харчових технологіях.
2. Обґрунтувати доцільність використання пшеничних висівок як основного функціонального інгредієнта у виробництві хлібців для осіб із порушеним обміном речовин.
3. Дослідити вплив харчових волокон на структурно-механічні, реологічні та технологічні властивості зернових напівфабрикатів.
4. Розробити рецептури функціональних хлібців із використанням пшеничних висівок, насіння та інших джерел біологічно активних речовин.
5. Визначити фізико-хімічні, органолептичні, мікробіологічні та структурно-механічні показники розроблених зразків продукції.
6. Провести оцінку харчової та біологічної цінності контрольного і дослідних зразків хлібців.
7. Встановити вплив пшеничних висівок на якість, пористість, крихкість та споживчі властивості готового продукту.
8. Розрахувати техніко-економічні показники та обґрунтувати доцільність впровадження удосконаленої технології у виробництво.

Об'єкт дослідження: технологія виробництва функціональних зернових хлібців.

Предмет дослідження: рецептурний склад, технологічні параметри, фізико-хімічні та структурно-механічні показники хлібців, збагачених пшеничними висівками та функціональними інгредієнтами.

Методи дослідження: фізико-хімічні, органолептичні, реологічні та математико-статистичні методи аналізу.

Магістерська робота складається зі вступу, огляду літератури, матеріалів та методів досліджень, результатів власних досліджень, аналізу та узагальнення отриманих результатів, висновків і списку використаних джерел.

Магістерська робота виконана на 52 сторінках друкованого тексту, містить 2 таблиці і 1 рисунок. Список використаних джерел налічує 55 найменувань.

Ключові слова: функціональні хлібці, пшеничні висівки, харчові волокна, зернові продукти, метаболічні порушення, низькокалорійні продукти, реологічні властивості, функціональне харчування.

ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1 Сучасні тенденції розвитку функціональних зернових продуктів	10
1.2. Характеристика пшеничних висівок як функціонального інгредієнта	13
1.3 Особливості харчування осіб із порушеним обміном речовин	15
1.4. Перспективи вдосконалення технології хлібців функціонального призначення	18
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	22
2.1 Матеріали дослідження	22
2.2 Методи досліджень	23
2.3 Предмет і об'єкт дослідження	29
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
3.1 Розроблення технології хлібців з використанням пшеничних висівок для осіб із порушеним обміном речовин. Фізико-хімічні характеристики закваски, з додаванням пшеничних висівок	30
3.1.1. Вплив ферментації з використанням одного або кількох штамів на зміни рН та загальної щільності закваски	30
3.1.2. Вплив ферментації з використанням одного або кількох штамів на зміни вмісту антинутриційних факторів у заквасці	32
3.1.3. Вплив ферментації одного або змішаного штаму на зміни ключової ферментативної активності під час ферментації закваски	33
3.2. Біоактивний вміст червоної квасолі, ферментованої одним або змішаним штамом, з додаванням закваски з пшеничних висівок	35
3.3 Характеристики хліба, виготовленого з червоної квасолі одно- або змішаного штаму ферментації з додаванням закваски з пшеничних висівок	37
3.3.1. Питомі об'ємні та текстурні характеристики хліба.	37
3.3.2. Сенсорна оцінка хліба.	39
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБЦІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПШЕНИЧНИХ ВИСІВОК ДЛЯ ОСІБ ІЗ ПОРУШЕНИМ ОБМІНОМ РЕЧОВИН	41
4.1. Техніко-економічне обґрунтування виробництва хлібців з	41

використанням пшеничних висівок для осіб із порушеним обміном речовин

ВИСНОВКИ 44

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 46

ВСТУП

Ферментація на заквасці, давня технологія біообробки, широко використовується для покращення харчових, функціональних та сенсорних аспектів хліба [1 , 2 , 3]. У бобових інгредієнтах ферментація на заквасці значно знизила антинутриційні фактори (АНФ) та сторонні присмаки, що покращило їх використання як інгредієнтів у пшенично-композитних системах хліба на заквасці. Наприклад, якість випічки та загальна прийнятність пшенично-соевого хліба покращилися після ферментації соєвого борошна з використанням штамів *Pedicoccus pentosaceus* та *Lactobacillus plantarum* [4]. В іншому дослідженні включення ферментованої червоно-квасолевої закваски *Weissella confusa* покращило реоферментаційні властивості тіста, а також якість та аромат пшенично-червоно-квасолевого хліба [5]. Крім того, вміст АНФ інгібітора трипсину та фітату знизився в бобових заквасках та отриманому хлібі на заквасці на основі пшениці та бобових [6]. З іншого боку, ферментація інгредієнтів з високим вмістом клітковини, таких як пшеничні висівки, зменшила вміст нерозчинних харчових волокон (НХВ) завдяки підвищеній солюбілізації до розчинних харчових волокон (РХВ). Попередня ферментація пшеничних висівок за допомогою *Kluuyveromyces marxianus* покращила функціональність пшеничних висівок у хлібопеченні [7]. Зокрема, зміни, що пояснюються закваскою, були пов'язані з типом використаних мікробних заквасок; їхній метаболізм різних субстратів вивільняє біоактивні метаболіти за допомогою ферментів, що виробляються *in situ*, під час процесу ферментації [3 , 8].

Опубліковані дослідження повідомляли, що ферментація закваски з використанням змішаних штамів, таких як молочнокислі бактерії (МБК) та дріжджі, забезпечила ефективніші та стабільніші результати, ніж ферментація з використанням одного штаму, у розробці функціонально збагачених хлібобулочних виробів [9]. Це пояснюється синергетичним взаємодійним ефектом між МБК та штамами дріжджів, де МБК забезпечували джерела

енергії з цукрів, що вивільнялися для росту дріжджів, а дріжджі забезпечували поживні речовини, такі як вітаміни та амінокислоти, для росту МБК під час ферментації [10 , 11]. Згодом, порівняно з заквасками, ферментованими з використанням одного штаму дріжджів або штаму МБК, у заквасках, ферментованих з використанням змішаних дріжджів та штаму МБК, а також у кінцевому продукті, отриманому в результаті цього [12 , 13], було виявлено значно більше біоактивних метаболітів та зменшення кількості біоактивних метаболітів. У ферментованому хлібі з білої квасолі зі змішаним штамом (*Lactobacillus plantarum* або *Pediococcus pentosaceus* та *K. marxianus*) спостерігалось збільшення кількості біоактивних пептидів та зменшення кількості антигенів-факторів (ANF), тоді як отриманий хліб на заквасці мав значно підвищений вміст резистентного крохмалю, повільно перетравлюваного крохмалю та засвоюваності білка [6]. Крім того, споживання цього хліба на заквасці збільшило різноманітність кишкової мікробіоти, посилило протизапальну дію та покращило толерантність до глюкози порівняно з хлібом з білої квасолі у здорових мишей. Однак опублікованих досліджень впливу лактобактерій та ферментації дріжджовими штамми на харчові та функціональні властивості борошна з червоної квасолі, доповненого пшеничними висівками, було мало.

Крім того, зміни у смаках та вподобаннях споживачів сприяли розробці функціональних та збагачених біоактивними інгредієнтами харчових продуктів з потенційним фізіологічним ефектом при споживанні [14]. Червона квасоля містить високоякісні білки, клітковину та фенольні сполуки, які мають потенційний харчовий та оздоровчий вплив у функціональних харчових продуктах [15]. З іншого боку, пшеничні висівки у функціональних продуктах харчування можуть посилити протидіабетичні властивості та пребіотичний вплив на здоров'я кишечника [16 , 17]. Однак дослідження показали, що додавання борошна з червоної квасолі та пшеничних висівок до пшеничного тіста/хлібних систем призводить до погіршення якості продукції та зниження її прийнятності для споживачів. Це пояснюється наявністю

сторонніх присмаків та ANF у бобових культурах, а також високим вмістом IDF у пшеничних висівках, які разом розбавляють глютеніві білки, посилюють конкуренцію води з глютеновими білками під час гідратації та порушують формування глютенової мережі [15 , 16 , 17 , 18 , 19]. Щоб подолати ці недоліки, може бути корисним використання ферментації закваски для покращення застосовності бобових та пшеничних висівків, а також для підвищення технологічних, харчових та функціональних властивостей, а також загальної прийнятності хлібобулочних виробів на основі пшениці [20 , 21]. Крім того, вплив співіснування червоної квасолі та пшеничних висівків як субстрату в системі закваски зі змішаними штамми з точки зору фізико-хімічних та харчових аспектів ще далеко не досліджений.

Отже, метою цього дослідження було дослідити вплив ферментації закваски з використанням одного (*Lactobacillus fermentum*) або змішаного (*Lactobacillus fermentum* та *Kluyveromyces marxianus*) штаму на фізико-хімічні характеристики, такі як антинутрієнтні фактори, загальний вміст фенолів та флавоноїдів, а також склад харчових волокон червоної квасолі з борошном з пшеничних висівків або без нього. Було повідомлено про зміни ключової ферментативної активності, такої як β -глюкозидаза, ферулоїлестераза та фітаза, під час ферментації закваски. Також було повідомлено про якість відповідного хліба на основі питомого об'єму, характеристик текстурного профілю та сенсорної оцінки. Крім того, також були оцінені зміни ліпідного профілю, толерантності до глюкози, інсулінорезистентності, прозапальних цитокінів, коротколанцюгових жирних кислот та складу кишкової мікробіоти у здорових мишей після 28 днів споживання хліба на заквасці.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Сучасні тенденції розвитку функціональних зернових продуктів

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості особливої актуальності набуває створення продуктів функціонального призначення, здатних не лише забезпечувати організм людини основними поживними речовинами, а й позитивно впливати на стан здоров'я, сприяти профілактиці аліментарно-залежних захворювань та покращувати якість життя населення. Значна увага приділяється розробленню продуктів для осіб із порушеннями обміну речовин, ожирінням, метаболічним синдромом та цукровим діабетом, поширення яких останніми роками суттєво зросло як в Україні, так і у світі.

Одним із пріоритетних напрямів сучасної нутриціології та харчових технологій є створення функціональних зернових продуктів із підвищеним вмістом харчових волокон, біологічно активних речовин та зниженим глікемічним індексом. До таких продуктів належать хлібці функціонального призначення, які характеризуються відносно низькою калорійністю, високим вмістом складних вуглеводів, мінеральних речовин, вітамінів та харчових волокон. Популярність хлібців серед споживачів пояснюється їх зручністю у використанні, тривалим терміном зберігання, можливістю включення до різних дієтичних раціонів та високою технологічною гнучкістю рецептурного складу.

Сучасні тенденції розвитку функціонального харчування передбачають не лише збагачення продукції окремими нутрієнтами, а й комплексне формування оздоровчих властивостей харчових систем. У зв'язку з цим значний інтерес викликає використання зернової сировини, багатої на харчові волокна, антиоксиданти, мінеральні речовини та природні пребіотики. Особливого значення набуває застосування вторинної рослинної сировини та побічних продуктів переробки зерна, що відповідає сучасним принципам ресурсозбереження та сталого розвитку харчових виробництв.

Одним із найбільш перспективних функціональних інгредієнтів є пшеничні висівки, які утворюються під час переробки зерна пшениці та характеризуються високою харчовою і біологічною цінністю. Пшеничні висівки містять значну кількість нерозчинних та частково розчинних харчових волокон, зокрема целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, β -глюкани та пектинові речовини. Крім того, вони є джерелом вітамінів групи В, токоферолів, фенольних сполук, макро- та мікроелементів, серед яких особливе значення мають магній, калій, фосфор, кальцій, залізо та цинк.

Наукові дослідження свідчать, що регулярне споживання продуктів, багатих на харчові волокна, позитивно впливає на функціональний стан організму людини. Харчові волокна сприяють нормалізації моторики шлунково-кишкового тракту, покращують процеси травлення, забезпечують детоксикаційну дію та сприяють підтриманню нормального мікробіому кишечника. Крім того, встановлено їх здатність знижувати рівень холестерину в крові, уповільнювати всмоктування глюкози та зменшувати ризик розвитку серцево-судинних і метаболічних захворювань.

Особливого значення продукти з підвищеним вмістом харчових волокон набувають у харчуванні осіб із порушеним обміном речовин. Встановлено, що включення до раціону функціональних зернових продуктів сприяє формуванню тривалого відчуття ситості, зниженню енергетичної цінності харчування та корекції маси тіла. Завдяки здатності харчових волокон знижувати швидкість гідролізу вуглеводів та всмоктування глюкози такі продукти характеризуються нижчим глікемічним індексом, що є важливим для осіб із цукровим діабетом та інсулінорезистентністю.

Важливим напрямом удосконалення технології функціональних зернових продуктів є оптимізація їх структурно-механічних та органолептичних характеристик. Внесення висівок у рецептури хлібців суттєво впливає на водопоглинальну здатність тіста, пористість, щільність, крихкість та текстуру готового продукту. Харчові волокна здатні зв'язувати значну кількість води, що зумовлює необхідність коригування технологічних параметрів

виробництва та підбору оптимального співвідношення рецептурних компонентів.

Сучасні технології виробництва функціональних хлібців передбачають використання екструзійних, термомеханічних та комбінованих способів обробки зернової сировини. Екструзійні технології дозволяють отримувати продукти з пористою структурою, низькою вологістю та тривалим терміном зберігання без застосування консервантів. Крім того, екструзія сприяє частковій деструкції крохмалю, підвищенню доступності харчових волокон та покращенню споживчих властивостей готової продукції.

Перспективним напрямом є також комбінування пшеничних висівок з іншими функціональними інгредієнтами, зокрема насінням льону, вівсяними компонентами, рослинними білками, псиліумом, інуліном та природними антиоксидантами. Такі композиції дозволяють підвищити харчову та біологічну цінність продукту, збалансувати амінокислотний склад та покращити функціонально-технологічні властивості хлібців.

Слід зазначити, що сучасний ринок функціональних зернових продуктів демонструє стійку тенденцію до зростання, що обумовлено підвищенням обізнаності населення щодо принципів здорового харчування та профілактики хронічних неінфекційних захворювань. У зв'язку з цим розроблення нових технологій виробництва функціональних хлібців із використанням пшеничних висівок є актуальним і перспективним напрямом сучасної харчової науки.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що функціональні зернові продукти з використанням пшеничних висівок мають значний потенціал для використання у профілактичному та дієтичному харчуванні осіб із порушеним обміном речовин. Подальші дослідження у даному напрямі мають бути спрямовані на оптимізацію рецептурного складу, удосконалення технологічних режимів виробництва та дослідження функціонально-технологічних властивостей готової продукції.

1.2 Характеристика пшеничних висівок як функціонального інгредієнта

Пшеничні висівки є одним із найбільш перспективних функціональних інгредієнтів сучасної харчової промисловості та широко використовуються у технологіях продуктів оздоровчого і дієтичного призначення. Вони являють собою побічний продукт борошномельного виробництва, що утворюється під час переробки зерна пшениці та складається переважно з оболонки зерна, алеїронового шару та частково зародка. Завдяки високому вмісту біологічно активних речовин пшеничні висівки характеризуються значною харчовою та фізіологічною цінністю.

Особливе значення пшеничних висівок обумовлене високою концентрацією харчових волокон. До їх складу входять целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, β -глюкани, арабіноксилани та інші полісахариди, які відіграють важливу роль у забезпеченні нормального функціонування травної системи людини. Загальний вміст харчових волокон у пшеничних висівках може становити 40–50 %, що значно перевищує аналогічні показники традиційного пшеничного борошна. Саме тому висівки розглядаються як ефективний компонент для створення функціональних зернових продуктів із підвищеним вмістом клітковини.

Харчові волокна виконують низку важливих фізіологічних функцій. Вони сприяють нормалізації моторики кишечника, покращують процеси травлення та забезпечують сорбційні властивості щодо токсичних речовин і продуктів метаболізму. Крім того, волокна здатні уповільнювати всмоктування глюкози та ліпідів у кишечнику, що позитивно впливає на вуглеводний та жировий обмін. Регулярне споживання продуктів, багатих на харчові волокна, асоціюється зі зниженням ризику розвитку ожиріння, цукрового діабету II типу, серцево-судинних захворювань та метаболічного синдрому.

Пшеничні висівки також є цінним джерелом рослинного білка, вміст якого може становити 14–18 %. Білкові речовини висівок характеризуються наявністю незамінних амінокислот та здатністю позитивно впливати на

харчову цінність готових продуктів. Крім того, висівки містять значну кількість мінеральних речовин, зокрема калій, магній, кальцій, фосфор, залізо, цинк та мідь, які необхідні для підтримання нормального перебігу метаболічних процесів в організмі людини.

Важливою особливістю пшеничних висівок є високий вміст вітамінів групи В, токоферолів та антиоксидантних компонентів. До складу антиоксидантного комплексу входять фенольні кислоти, флавоноїди та токоферолі, здатні нейтралізувати вільні радикали та пригнічувати процеси перекисного окиснення ліпідів. Антиоксидантна активність висівок сприяє профілактиці оксидативного стресу та розвитку хронічних неінфекційних захворювань.

Останніми роками значна увага приділяється використанню пшеничних висівок у технології функціональних зернових продуктів, зокрема хлібців, сухих сніданків, екструдованих виробів та дієтичних хлібобулочних продуктів. Включення висівок до рецептур дозволяє суттєво підвищити вміст харчових волокон, знизити калорійність продукції та сформувати функціональні властивості готового продукту. Крім того, використання висівок сприяє підвищенню біологічної цінності виробів за рахунок збагачення їх мінеральними речовинами та антиоксидантними компонентами.

У технологічному аспекті пшеничні висівки характеризуються високою водопоглинальною здатністю та значним вмістом нерозчинних полісахаридів, що впливає на структурно-механічні властивості харчових систем. Внесення висівок у рецептури зернових продуктів може змінювати консистенцію тіста, пористість, крихкість та щільність готових виробів. Саме тому важливим завданням сучасних досліджень є визначення оптимального рівня внесення висівок та удосконалення технологічних режимів виробництва.

Наукові дослідження свідчать, що оптимальні концентрації пшеничних висівок дозволяють покращити функціонально-технологічні властивості зернових продуктів без суттєвого погіршення органолептичних показників. Водночас надмірне внесення висівок може призводити до підвищення

жорсткості, надмірної крихкості та погіршення смакових характеристик продукції. У зв'язку з цим важливого значення набуває підбір раціонального рецептурного складу та застосування сучасних технологічних методів обробки сировини.

Перспективним напрямом є комбінування пшеничних висівок з іншими функціональними інгредієнтами, зокрема псиліумом, інуліном, насінням льону, рослинними білками та природними антиоксидантами. Такі композиції дозволяють формувати продукти з покращеними структурно-механічними характеристиками, збалансованим хімічним складом та вираженими функціональними властивостями.

Таким чином, пшеничні висівки є цінним функціональним інгредієнтом, використання якого у технології зернових продуктів дозволяє створювати продукцію з підвищеною харчовою та біологічною цінністю. Їх застосування у виробництві хлібців функціонального призначення є науково обґрунтованим та перспективним напрямом сучасних харчових технологій, особливо для харчування осіб із порушеним обміном речовин.

1.3 Особливості харчування осіб із порушеним обміном речовин

Порушення обміну речовин є однією з найбільш актуальних медико-соціальних проблем сучасності та характеризуються значним поширенням серед населення різних вікових груп. До найбільш поширених метаболічних порушень належать ожиріння, інсулінорезистентність, цукровий діабет II типу, дисліпідемії, метаболічний синдром та інші патологічні стани, пов'язані з порушенням енергетичного, вуглеводного та ліпідного обміну. За даними міжнародних організацій охорони здоров'я, кількість осіб із надлишковою масою тіла та супутніми метаболічними розладами щороку зростає, що обумовлює необхідність розроблення нових підходів до профілактичного та дієтичного харчування.

Основними чинниками розвитку порушень обміну речовин є нераціональне харчування, надмірне споживання висококалорійних

продуктів, дефіцит харчових волокон у раціоні, недостатня фізична активність, стресові фактори та несприятливий спосіб життя. Особливо негативний вплив на стан метаболічного здоров'я має надмірне споживання простих вуглеводів, насичених жирів та продуктів із високим глікемічним індексом, що сприяє розвитку інсулінорезистентності та порушенню регуляції рівня глюкози у крові.

Одним із ключових принципів харчування осіб із порушеним обміном речовин є корекція енергетичної цінності раціону та оптимізація його нутрієнтного складу. Особлива увага приділяється збільшенню частки продуктів, багатих на складні вуглеводи та харчові волокна, які забезпечують повільне вивільнення глюкози, формують тривале відчуття ситості та сприяють стабілізації глікемічного профілю. Саме тому функціональні зернові продукти розглядаються як важливий компонент раціону осіб із метаболічними порушеннями.

Наукові дослідження підтверджують, що харчові волокна відіграють важливу роль у регуляції вуглеводного та ліпідного обміну. Вони здатні знижувати швидкість всмоктування глюкози в кишечнику, зменшувати постпрандіальну гіперглікемію та покращувати чутливість тканин до інсуліну. Крім того, харчові волокна сприяють зниженню рівня загального холестерину та ліпопротеїнів низької щільності, що має важливе значення у профілактиці серцево-судинних захворювань.

Особливе місце у харчуванні осіб із порушеним обміном речовин займають продукти зі зниженим глікемічним індексом. Глікемічний індекс характеризує швидкість підвищення рівня глюкози в крові після споживання продукту. Встановлено, що регулярне вживання продуктів із високим глікемічним індексом може призводити до порушення секреції інсуліну, розвитку інсулінорезистентності та накопичення жирової тканини. У зв'язку з цим особливого значення набуває створення зернових продуктів із модифікованим вуглеводним складом та підвищеним вмістом харчових волокон.

Пшеничні висівки є одним із найбільш перспективних функціональних інгредієнтів для створення дієтичних зернових продуктів. Завдяки високому вмісту клітковини, мінеральних речовин та біологічно активних компонентів вони здатні позитивно впливати на функціональний стан організму людини. Використання пшеничних висівок у складі хлібців сприяє зниженню енергетичної цінності продукції, покращенню насичувальної здатності та уповільненню процесів перетравлення і всмоктування вуглеводів.

Крім впливу на вуглеводний обмін, харчові волокна позитивно впливають на стан мікробіоти кишечника. Встановлено, що нерозчинні та частково розчинні волокна можуть виконувати пребіотичну функцію, стимулюючи ріст корисної мікрофлори кишечника. Це сприяє покращенню травлення, нормалізації моторики кишечника та зниженню ризику розвитку запальних процесів у травному тракті.

Важливим аспектом дієтичного харчування осіб із метаболічними порушеннями є також контроль калорійності раціону. Хлібці функціонального призначення з використанням пшеничних висівок можуть бути рекомендовані як альтернатива традиційним хлібобулочним виробам завдяки меншій калорійності та нижчому вмісту швидкозасвоюваних вуглеводів. Такі продукти дозволяють зменшити енергетичне навантаження раціону без суттєвого обмеження об'єму споживаної їжі.

Останніми роками значна увага приділяється створенню персоналізованих харчових продуктів для осіб із різними типами метаболічних порушень. У цьому контексті функціональні зернові продукти, збагачені харчовими волокнами, мінеральними речовинами та біологічно активними компонентами, розглядаються як перспективний напрям сучасної харчової науки та нутриціології.

Слід зазначити, що ефективність функціональних продуктів значною мірою залежить від їх органолептичних характеристик та споживчої привабливості. Саме тому при розробленні хлібців функціонального призначення важливим є не лише забезпечення високої харчової цінності, а й

формування приємного смаку, текстури та зовнішнього вигляду готової продукції.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що харчування осіб із порушеним обміном речовин повинно базуватися на принципах зниження глікемічного навантаження, обмеження енергетичної цінності раціону та збільшення вмісту харчових волокон. Використання пшеничних висівок у технології функціональних хлібців є перспективним напрямом створення дієтичних продуктів, здатних позитивно впливати на обмін речовин та сприяти профілактиці метаболічних захворювань.

1.4 Перспективи вдосконалення технології хлібців функціонального призначення

Перспективи вдосконалення технології хлібців функціонального призначення є одним із актуальних напрямів розвитку сучасної харчової промисловості та функціонального харчування. Зростання поширеності аліментарно-залежних захворювань, зокрема ожиріння, метаболічного синдрому, цукрового діабету II типу та серцево-судинних патологій, обумовлює необхідність створення продуктів зі зниженою калорійністю, високим вмістом харчових волокон та покращеними функціональними властивостями. У зв'язку з цим функціональні зернові продукти, зокрема хлібці, набувають все більшого поширення у структурі профілактичного та дієтичного харчування населення.

Аналіз сучасних літературних джерел свідчить, що одним із найбільш перспективних способів удосконалення технології хлібців є використання пшеничних висівок як функціонального інгредієнта. Пшеничні висівки є вторинним продуктом переробки зерна, однак характеризуються значним вмістом біологічно активних речовин, зокрема харчових волокон, мінеральних елементів, вітамінів групи В та антиоксидантних сполук. Високий вміст нерозчинних і частково розчинних харчових волокон забезпечує позитивний

вплив на функціональний стан травної системи, сприяє нормалізації кишкової мікрофлори, зниженню рівня холестерину та регуляції вуглеводного обміну.

Особливого значення набуває використання пшеничних висівок у технології продуктів для осіб із порушеним обміном речовин. Встановлено, що регулярне споживання харчових волокон сприяє зниженню швидкості всмоктування глюкози, покращенню чутливості тканин до інсуліну та формуванню тривалого відчуття ситості. Саме тому функціональні хлібці можуть розглядатися як перспективний продукт у системі профілактичного та дієтичного харчування населення.

У сучасних умовах розвитку харчових технологій значна увага приділяється не лише підвищенню харчової цінності продукції, а й забезпеченню її високих органолептичних показників. Внесення пшеничних висівок у рецептури хлібців впливає на структурно-механічні властивості тіста, текстуру готових виробів, їх колір, смак та аромат. Надмірне внесення висівок може призводити до погіршення пористості, надмірної щільності структури, появи грубої консистенції та специфічного присмаку. У зв'язку з цим одним із ключових завдань сучасних досліджень є визначення оптимального рівня внесення висівок, який забезпечуватиме баланс між функціональними властивостями та споживчою привабливістю продукції.

Перспективним напрямом удосконалення технології хлібців є поєднання пшеничних висівок з іншими функціональними інгредієнтами рослинного походження. Зокрема, перспективним є використання насіння льону, вівсяних висівок, псиліуму, інуліну, рослинних білків та природних антиоксидантів. Такі компоненти дозволяють не лише підвищити вміст харчових волокон у готовому продукті, а й покращити його амінокислотний склад, антиоксидантні властивості та функціонально-технологічні характеристики.

Окремої уваги потребують дослідження впливу технологічних параметрів виробництва на якість функціональних хлібців. Важливими чинниками є температура та тривалість термічної обробки, вологість сировини, ступінь подрібнення висівок, режим екструзії та умови зберігання

готової продукції. Відомо, що надмірна термічна обробка може призводити до часткового руйнування біологічно активних речовин, зниження антиоксидантної активності та погіршення харчової цінності виробів. Саме тому сучасні технології спрямовані на впровадження щадних режимів обробки сировини та оптимізацію технологічних процесів.

Перспективними є також дослідження глікемічного індексу функціональних хлібців із використанням пшеничних висівок. Встановлено, що збільшення вмісту харчових волокон сприяє уповільненню перетравлення вуглеводів та зниженню швидкості підвищення рівня глюкози у крові після споживання продукту. Це має важливе значення для осіб із цукровим діабетом, ожирінням та іншими метаболічними порушеннями.

Крім функціональної спрямованості, удосконалення технології хлібців має важливе економічне та екологічне значення. Використання пшеничних висівок як вторинної сировини зернопереробної промисловості дозволяє підвищити рівень комплексної переробки зерна, зменшити кількість відходів виробництва та забезпечити раціональне використання ресурсів. Це відповідає сучасним принципам сталого розвитку та ресурсозбереження у харчовій промисловості.

Таким чином, удосконалення технології хлібців із використанням пшеничних висівок є перспективним та науково обґрунтованим напрямом розвитку функціональних зернових продуктів. Поєднання високої харчової та біологічної цінності, функціональних властивостей, профілактичної спрямованості та економічної доцільності визначає значний потенціал таких виробів для використання у харчуванні осіб із порушеним обміном речовин. Подальші дослідження у даному напрямі мають бути спрямовані на оптимізацію рецептурного складу, вдосконалення технологічних параметрів виробництва та комплексне вивчення функціональних властивостей готової продукції.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

У процесі виконання досліджень щодо вдосконалення технології функціональних зернових продуктів використовували зернову, бобову та допоміжну сировину. Основу рецептур становили пшеничне борошно, пшеничні висівки та червона квасоля, які характеризуються високим вмістом харчових волокон, білка, мінеральних речовин та біологічно активних компонентів. Особливу увагу приділяли використанню пшеничних висівок як джерела нерозчинних і розчинних харчових волокон, здатних позитивно впливати на функціонально-технологічні та фізіологічні властивості готової продукції.

Для покращення харчової та біологічної цінності виробів застосовували ферментацію рослинної сировини із використанням мікроорганізмів *Lactobacillus fermentum* та *Kluyveromyces marxianus*. Досліджували як одноштамову, так і змішаноштамову ферментацію червоної квасолі у поєднанні з пшеничними висівками. Вибір зазначених культур мікроорганізмів обумовлений їх здатністю синтезувати ферменти β -глюкозидазу, ферулоїлестеразу та фітазу, які сприяють руйнуванню антипоживних речовин і підвищенню біодоступності нутрієнтів.

У процесі ферментації спостерігалось зниження вмісту танінів, фітинової кислоти та інгібіторів трипсину, що сприяло покращенню засвоюваності мінеральних речовин та білкових компонентів. Одночасно відзначалося підвищення вмісту поліфенольних сполук, флавоноїдів, галової кислоти та розчинних харчових волокон, що позитивно впливало на антиоксидантні та пребіотичні властивості продукту.

Для формування необхідних структурно-механічних характеристик виробів використовували рослинні компоненти з високим вмістом харчових волокон, які забезпечували покращення водоутримувальної здатності, стабільності структури та текстурних властивостей тіста. Встановлено, що

застосування змішаноштамової ферментації сприяло збільшенню питомого об'єму виробів, зниженню твердості м'якушки та покращенню органолептичних показників готової продукції.

До допоміжної сировини належали питна вода, кухонна сіль, дріжджі та інші рецептурні компоненти, необхідні для формування технологічних властивостей тіста. Усі інгредієнти відповідали вимогам чинної нормативної документації та використовувалися відповідно до розроблених рецептур і технологічних режимів виробництва функціональних зернових продуктів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання ферментованої рослинної сировини та пшеничних висівок у технології функціональних хлібців для осіб із порушеним обміном речовин. Синергетичний ефект молочнокислої та дріжджової ферментації забезпечує підвищення харчової та біологічної цінності продукції, покращення її сенсорних характеристик і формування виражених пребіотичних властивостей.

2.2 Методи дослідження

Фізико-хімічний аналіз одно- та змішано ферментованої закваски з червоної квасолі після додавання пшеничних висівок

2.2.1. pH та загальна титрувана кислотність (ЗТК) закваски після різних ферментацій

pH та ТТА зразків вимірювали до та після бродіння на заквасці. Коротко кажучи, 10 г зразків гомогенізували з 90 мл дистильованої води, а pH вимірювали за допомогою pH-метра (FE-20, Mettler Toledo, Шанхай, Китай). ТТА виражали в мл 0,1 N NaOH, необхідного для досягнення pH 8,5.

2.2.2. Активність інгібітора трипсину (TIA), фітинової кислоти (PA) та вмісту конденсованого таніну

TIA у ліофілізованих зразках закваски визначали, як описано Кломклао та Бенджакулом, використовуючи аналіз N α -бензоїл-L-аргінін-4-нітроаніліду гідрохлориду (BAPNA) [22]. Коротко кажучи, 200 мл ліофілізованого зразка

екстрагували протягом ночі 0,15 М фосфатним буфером (рН 8,1) при 4 °С. Після цього проводили центрифугування ($4000\times g$, 15 хв, 15 °С), додавання 200 мл свиного панкреатину (2 г/л) та інкубацію при 37 °С протягом 15 хв. Додавали попередньо нагріту суміш, що містила 800 мл ВАРНА та 200 мл дистильованої води, та інкубували при струшуванні протягом 10 хв. Реакцію зупиняли додаванням 300 мл оцтової кислоти. Реакційну суміш центрифугували ($8000\times g$, 5 хв, 4 °С), і залишкову активність трипсину вимірювали при 410 нм. Одну одиницю ТІА визначали як кількість інгібітора, необхідну для зниження активності ферменту на одну одиницю за умов аналізу, а результати виражали в одиницях інгібування трипсином на грам зразка (од/г).

Вміст ПА у ліофілізованій заквасці визначали згідно з методом, описаним Буддріком та ін. [23]. Поглинання вимірювали при 519 нм за допомогою УФ-спектрофотометра (TU 1810, Пекін, Китай) з дистильованою водою як холостою пробою. Стандартну криву побудували, використовуючи розведення у вихідних розчинах стандарту ПА, розчиненого в соляній кислоті.

Конденсовані таніни в ліофілізованій заквасці визначали за допомогою ванілінового методу, описаного Бродхерстом та Джонсом [24]. Коротко кажучи, 1 г ліофілізованої закваски екстрагували 10 мл розчину хлоридної кислоти та метанолу (1:100, об. / об.) шляхом струшування при кімнатній температурі протягом 2,5 годин (у темряві). Після цього проводили центрифугування ($4000\times g$, 20 хв) для отримання супернатанту для аналізу. Стандартну криву побудували з використанням катехіну, а результати виразили в еквівалентах катехіну.

2.2.3. Загальний вміст фенолів, загальний вміст флавоноїдів та фенольнокислотний склад закваски після різних ферментацій

Екстракти зі зразків готували шляхом додавання 10 мл метанолу до 2 г ліофілізованого зразка закваски при температурі 25 °С та 200 об/хв протягом 24 годин. Залишок після фільтрації повторно екстрагували метанолом, і цей

процес повторювали тричі. Всі екстракти фільтрували через фільтр 0,22 мкм, доводили до 10 мл метанолом та зберігали для подальшого аналізу.

Загальний вміст фенолів (ЗВФ) в екстрактах визначали за методом Фоліна-Чокальтеу, описаним у [25]. Поглинання вимірювали при 760 нм. Галову кислоту (ГК) використовували як стандарт, дистильовану воду – як холосту пробу, а ЗВФ виражали в еквівалентах галової кислоти (мг ГЕА/г). Загальний вміст флавоноїдів (ЗВФ) в екстрактах визначали, як описано в [26]. ЗВФ виражали в еквівалентах рутину (мг РЕ/г).

Склад фенольних кислот у метанольних екстрактах було кількісно визначено за допомогою методу ВЕРХ з оберненою фазою, як раніше описано Омеді та ін. [27]. Аналіз проводили за допомогою системи ВЕРХ Waters, що складається з насоса Waters 1525 Binary ВЕРХ, автосамплера Waters 2707 та УФ-видимого детектора Waters 2489 (Waters Corporation, Мілфорд, Массачусетс, США). Хроматографічне розділення проводили на колонці SYMMETRY C18 (5 мкм, 4,6 × 250 мм). Елюювання проводили рухомою фазою (А) 1% водним розчином оцтової кислоти; рухомою фазою (В) ацетонітрилом. Швидкість потоку становила 0,7 мл/хв, УФ/видимий детектор використовував довжину хвилі 310 нм, а температура колонки становила 35 °С. Градієнт елюції: 90% А (0–27 хв), 10–40% В (28 хв), 40–60% В (28–39 хв), 60–90% В (39–50 хв), потім повернення до початкового стану 90% А протягом 55 хв. Цьому дали пропрацювати ще 5 хв, перш ніж ввести наступний зразок. Загальний час аналізу кожного зразка становив 60 хв. Метанольні екстракти фільтрували (фільтр 0,22 мкм) перед введенням ВЕРХ та вводили 20 мкл зразка. Збір даних та інтеграцію проводили за допомогою програмного пакету Empower (версія 3.0). Ідентифікацію фенольних кислот в екстрактах проводили з використанням зовнішніх стандартів, проаналізованих за аналогічних умов.

2.2.4. Склад харчових волокон закваски після різних видів ферментації

Склад харчових волокон, включаючи загальні харчові волокна (TDF), розчинні харчові волокна (SDF) та нерозчинні харчові волокна (IDF), визначали за допомогою методу AACC 32-07.

2.2.5. Зміни активності ферментів β -глюкозидази, фітази та ферулоїлестерази під час бродіння закваски

Для визначення змін активності ферментів, зразки масою 1 г збирали через 0, 4, 8, 12, 16, 20 та 24 години під час процесу бродіння закваски. Зібраний зразок змішували з 20 мл деіонізованої води та центрифугували ($10\,000\times g$, 4 °C, 15 хв) для отримання супернатанту, який використовували як розчин ферменту для визначення активності ферментів.

Активність β -глюкозидази визначали шляхом вимірювання кількості р-нітрофенолу (р-NP), що вивільняється із субстрату 4-нітрофеніл β -D-глюкопіранозиду (р-NPG), як описано Ляном та ін. [8]. Коротко кажучи, до 100 мкл розчину ферменту додали 1,8 мл 0,05 М буфера ацетату натрію (pH 5) та інкубували при 37 °C протягом 5 хвилин. Потім додали 100 мкл р-NPG та суміш додатково інкубували при 37 °C протягом 10 хвилин. Реакцію зупинили додаванням 1 мл 1 М Na_2CO_3 та вимірювали поглинання при 400 нм. Для визначення активності ферменту використовували стандартну криву з використанням ферменту β -глюкозидази (Shanghai Yuanye Biological Technology Co., Ltd., Шанхай, Китай). Ферментну одиницю визначали як кількість ферменту, необхідну для каталізу виробництва 1 мкмоль р-NP за хвилину за тих самих умов.

Активність ферулоїлестерази визначали за методом, описаним Лян та ін. [8], з деякими модифікаціями. Коротко кажучи, 500 мкл розчину ферменту змішували з 500 мкл буферного розчину метилферулату з концентрацією 2 мг/мл та інкубували при 45 °C протягом 10 хвилин. Після цього додавали 1 мл гліцину з концентрацією 0,01 моль/л (pH = 10) для зупинки реакції. Поглинання вимірювали при 335 нм. Одиницю активності ферменту визначали як кількість ферменту, необхідну для вивільнення 1 мкмоль

ферулової кислоти шляхом гідролізу метилового естеру ферулової кислоти за хвилину за тих самих умов.

Фітазну активність визначали за методом, описаним Фекрі та ін. [28], з деякими модифікаціями. Коротко кажучи, 0,2 мл розчину ферменту змішували з 1,8 мл буфера натрію ацетату та інкубували при 37 °С протягом 5 хвилин. Після цього додавали 4 мл розчину фітату натрію з концентрацією 7,5 ммоль/л та інкубували при 37 °С протягом 30 хвилин. Реакцію зупиняли та індукували розвиток кольору додаванням розчину для термінації та хромогенного розчину (суміш 30% розчину азотної кислоти, 100 г/л молібдату амонію та 2,35 г/л розчину метаванадату амонію у співвідношенні 2:1:1). Поглинання вимірювали при 415 нм. Активність ферменту визначали як кількість ферменту, здатну вивільняти 1 мкмоль неорганічного фосфату за хвилину при 37 °С.

2.2.6. Приготування хліба на заквасці після ферментації одним або змішаним штамом

У цьому дослідженні було вивчено 7 видів хліба, зокрема: (1) пшеничний хліб (WB), (2) хліб з червоної квасолі (RB), (3) хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок (RWB), (4) хліб на заквасці з червоної квасолі, ферментований *L. fermentum* (RBY), (5) хліб на заквасці з червоної квасолі, ферментований *L. fermentum* та *K. marxianus* (RBYK), (6) хліб на заквасці з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментований *L. fermentum* (RWBY), та (7) хліб на заквасці з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментований *L. fermentum* та *K. marxianus* (RWBYK). Рецепт кожного виду хліба наведено в таблиці S1 . Для приготування хліба, коротко кажучи, всі зважені інгредієнти, крім маргарину, змішували у спіральному змішувачі (Sinmag, Усі, Китай) на низькій швидкості протягом 3 хвилин, потім на високій швидкості 1 хвилину. Потім додавали жир і змішували на низькій швидкості протягом 1 хвилини, а потім на високій швидкості протягом 3 хвилин. Потім тісто накрили поліетиленовою плівкою та дали відпочити (10 хвилин) за кімнатної температури. Потім тісто розділили (шматок по 90 г), округлили,

надали йому форму, переклали у форми для випікання, а потім дали вистоятися (Sinmag, Усі, Китай) (90 хвилин, 38 °C, 85% відносної вологості). Після цього хліб випікали в попередньо розігрітій духовці (Sinmag, Усі, Китай) (верхня: 170 °C та нижня: 220 °C) протягом 21 хвилини. Після випікання хліб охолоджували протягом 2 годин за кімнатної температури. Частину використовували для подальшого аналізу, а решту висушили (40 °C, 9 годин) та подрібнили на порошок для приготування кормового раціону для випробувань на тваринах.

Фізико-хімічний аналіз хліба на заквасці, виготовленого методом одноштаммової або змішаної ферментації

2.2.7. Питомий об'єм

Питомий об'єм хліба вимірювали через 2 години після випікання методом витіснення ріпакового насіння. Питомий об'єм (мл/г) визначали як відношення об'єму хліба (мл) до маси (г).

2.2.8. Аналіз текстурного профілю

Після охолодження хліб нарізали тонкими скибочками товщиною 10 мм за допомогою різача. Два середні скибочки були відібрані та використані для визначення текстурного профілю хліба за допомогою приладу Texture Pro CT V 1.4 Build 17 (Brookfield Engineering Laboratory, Міддлборо, Массачусетс, США) у режимі аналізу текстурного профілю (ТРА), що складався з випробування на подвійне стискання та був оснащений циліндричним зондом з алюмінію діаметром 36 мм. Умови випробування були наступними: модель зонда Р/36, швидкість руху зонда перед випробуванням 1,0 мм/с, швидкість руху зонда під час випробування на стискання 3,0 мм/с, швидкість руху зонда після завершення стиснення 3,0 мм/с, деформація стиснення 50%, індукційна сила 5 g, інтервал часу стиснення 1 с між двома стисканнями. Зазначеними параметрами були твердість та жувальна здатність.

2.2.9. Сенсорна оцінка

Двадцять напівпідготовлених осіб (10 чоловіків, 10 жінок) зі Школи харчових наук і технологій Університету Цзяннань (Китай) оцінювали

сенсорні характеристики, включаючи форму, колір, смак, текстуру, відчуття в роті та загальну прийнятність хліба за дев'ятибальною гедоністичною шкалою. Бали від 1 до 9 (1: дуже не подобається, 2: дуже не подобається, 3: помірно не подобається, 4: трохи не подобається, 5: ні подобається, ні не подобається, 6: трохи подобається, 7: помірно подобається, 8: дуже подобається та 9: дуже подобається) були призначені для позначення ступеня переваги до різних характеристик хліба. Кожен зразок хліба був нарізаний, випадковим чином закодований та виданий учасникам панелі щонайменше через 2 години після випікання. Учасникам панелі було доручено полоскати рот водою між зразками, щоб мінімізувати будь-які залишкові ефекти.

2.2.10. Статистичний аналіз

Результати щонайменше трьох незалежних вимірювань були представлені як середнє значення. Дані порівнювали за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з використанням SPSS 26.0 (IBM, Armonk, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США), а порівняння між групами проводили за допомогою тесту Дункана. Значущі відмінності вважалися значущими, коли $p < 0,05$. Для дослідження зв'язків між параметрами тіста/хліба було проведено кореляційний тест Пірсона.

2.3 Предмет і об'єкт дослідження

Об'єкт дослідження: технологія виробництва функціональних низькокалорійних десертів.

Предмет дослідження: рецептурний склад, технологічні параметри, реологічні та якісні показники десертів, збагачених пребіотичними волокнами та рослинними антиоксидантними екстрактами.

Методи дослідження: фізико-хімічні, мікробіологічні, органолептичні, реологічні та математико-статистичні методи аналізу.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Розроблення технології хлібців з використанням пшеничних висівок для осіб із порушеним обміном речовин. Фізико-хімічні характеристики закваски, з додаванням пшеничних висівок

3.1.1. Вплив ферментації з використанням одного або кількох штамів на зміни рН та загальної щільності закваски

Зміни рН та ТТА зразків закваски представлені в Таблиці 3.1. Результати показали, що рН становив 6,46 та 6,39 у контрольних зразках RB та RWB відповідно. Після ферментації значення рН знизилися ($p < 0,05$) в діапазоні від 4,23 до 4,37, причому нижчі значення спостерігалися у заквасках із борошна з червоної квасолі з пшеничними висівками, ферментованих змішано (RWBYK < RBYK), ніж у одноштаммових (RWBY < RBY). Значення ТТА становили 4,52 та 4,48 у контрольних зразках RB та RWB, але збільшилися ($p < 0,05$) в діапазоні від 18,28 до 20,39 мл після ферментації. Вищі значення ТТА спостерігалися у заквасках із борошна з червоної квасолі з пшеничними висівками, ферментованих змішано, ніж з одноштаммовими (Таблиця 3.1). Зміни рН та ТТА після ферментації закваски узгоджувалися із загальновідомими тенденціями параметрів підкислення в кількох системах ферментації закваски [2]. У дослідженнях закваски зміни рН та ТТА були пов'язані з ростом клітин LAB та/або дріжджів, які метаболізували поживні речовини субстрату, вивільняючи метаболіти, що змінюють рН, такі як органічні кислоти. Крім того, завдяки синергетичній взаємодії під час ферментації, використання LAB та дріжджів у ферментації змішаними штамми могло значно знизити рН та збільшити ТТА закваски [6 , 30]. У цьому дослідженні синергія у ферментованій червоній квасолі змішаними штамми, доповненій пшеничними висівками, могла забезпечити додаткове живлення для кращої проліферації та метаболізму LAB та дріжджів, що

призвело до вивільнення більшої кількості метаболітів, що змінюють рН, ніж у субстратах, ферментованих одним штамом.

Таблиця 3.1

Фізико-хімічні характеристики борошна з червоної квасолі з висівками або без них на заквасці з пшеничними висівками, ферментованої одним (*L. fermentum*) або змішаним (*L. fermentum* та *K. marxianus*) штамом

Елемент		РБ	РВБ	РБІ	РБІК	RWBY	RWBY К
Фізико-хімічні характеристики	рН	6,46 ± 0,03 ^с	6,39 ± 0,06	4,37 ± 0,03	4,27 ± 0,02 ^{аб}	4,31 ± 0,04	4,23 ± 0,02 ^а
	ТТА (мл)	4,52 ± 0,03 ^а	4,48 ± 0,07 ^а	18,28 ± 0,15 ^б	19,99 ± 0,14 ^{дня}	19,27 ± 0,09	20,39 ± 0,07 ^с
Антину트리ційні фактори	Конденсований танін (мг/г)	6,14 ± 0,34 ^с	3,59 ± 0,22 ^б	3,61 ± 0,31 ^б	3,68 ± 0,19 ^б	2,47 ± 0,26 ^а	2,43 ± 0,12 ^а
	Фітинова кислота (мг/г)	6,54 ± 0,28 ^б	11,65 ± 0,25	5,09 ± 0,09 ^а	4,98 ± 0,06 ^а	8,22 ± 0,14	8,14 ± 0,14 ^с
	Інгібітор трипсину (мг/г)	13,95 ± 0,21	9,34 ± 0,25 ^с	8,14 ± 0,13 ^б	8,20 ± 0,14 ^б	5,05 ± 0,07	5,12 ± 0,11 ^с
Фіто-хімічний вміст	ТПК (мг GAE/г)	4,02 ± 0,08 ^а	4,95 ± 0,08 ^б	5,24 ± 0,12	5,60 ± 0,12	6,63 ± 0,13 ^с	7,18 ± 0,14 ^ф
	ЗВФ (мг RE/г)	2,39 ± 0,10 ^а	2,31 ± 0,16 ^а	2,94 ± 0,14 ^б	3,32 ± 0,13	2,82 ± 0,15 ^б	3,17 ± 0,11 ^с
Фенольні кислоти (мкг/г)	Галова кислота	47,74 ± 3,27 ^а	54,74 ± 4,78 ^{аб}	59,67 ± 4,28	68,19 ± 5,28 ^{де}	64,72 ± 3,84	73,12 ± 4,41 ^с
	Протокатехова кислота	73,26 ± 2,22 ^ф	60,80 ± 3,67 ^с	35,18 ± 2,58	19,07 ± 2,56 ^а	28,02 ± 2,05	20,35 ± 2,33 ^б
	Хлорогенова кислота	28,63 ± 2,60 ^{дня}	15,19 ± 0,75 ^б	14,73 ± 0,53 ^б	17,83 ± 0,96 ^с	4,49 ± 0,40 ^а	4,32 ± 0,49 ^а
	Кофеїнова кислота	17,06 ± 1,11	8,90 ± 0,41	8,65 ± 0,51 ^б	9,92 ± 0,49 ^с	4,51 ± 0,48 ^а	4,09 ± 0,43 ^а
	<i>п</i> - кумарова кислота	-	0,54 ± 0,12 ^с	0,18 ± 0,12 ^а	0,26 ± 0,09 ^б	1,23 ± 0,10 ^с	0,92 ± 0,19
	Ферулова	11,18 ±	16,55 ±	8,82 ±	8,98 ±	10,34 ±	10,11 ±

Елемент		РБ	РВБ	РБІ	РБІК	RWBY	RWBY К
	кислота	0,32	1,07 ^е	0,39 ^а	0,34 ^б	0,45 ^{кд}	0,40
Харчові волокна (г/100 г)	НХВ	4,23 ± 0,07 ^{°C}	7,26 ± 0,09 ^ф	3,72 ± 0,08 ^б	3,01 ± 0,05 ^а	5,60 ± 0,08 ^е	4,97 ± 0,07
	СДФ	0,82 ± 0,03 ^а	1,55 ± 0,04	1,03 ± 0,05 ^б	1,22 ± 0,02 ^{°C}	1,96 ± 0,03 ^е	2,31 ± 0,04 ^ф
	ТДФ	5,05 ± 0,04	8,81 ± 0,14 ^ф	4,75 ± 0,09 ^б	4,23 ± 0,07 ^а	7,56 ± 0,06 ^е	7,27 ± 0,08

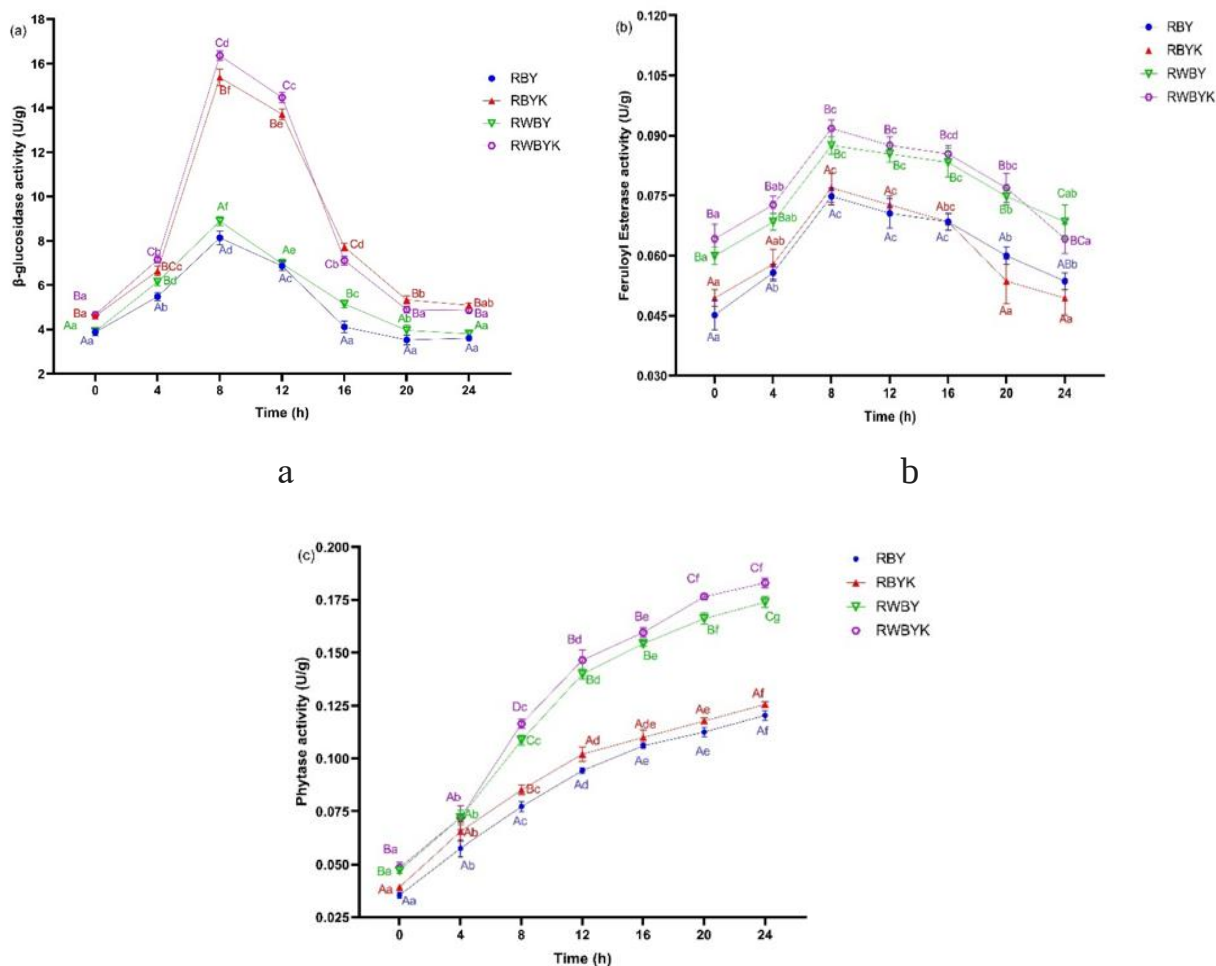
Дані представлені як середнє значення ± стандартне відхилення ($n = 3$) з різними літерами в одному рядку, що вказують на значну різницю при $p < 0,05$ (тест Дункана). (-) означає, що не визначено. RB: суспензія борошна з червоної квасолі (DY: 300); RWB: суспензія з червоної квасолі та пшеничних висівок (червона квасоля до пшеничних висівок, 5:4, (мас. / мас.)) (DY: 300); RBY: закваска з червоної квасолі, ферментована *L. fermentum*; RBYK: закваска з червоної квасолі, ферментована *L. fermentum* та *K. marxianus*. RWBY: закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована *L. fermentum*. RWBYK: закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована *L. fermentum* та *K. marxianus*. ТТ: загальна титрована кислотність. ТРС: загальна фенольна сполука. GAE: еквівалент галової кислоти. TFC: загальний вміст флавоноїдів. RE: еквівалент рутину. НХВ: нерозчинні харчові волокна. СХВ: розчинні харчові волокна. ТДФ: Загальна харчова клітковина.

3.1.2. Вплив ферментації з використанням одного або кількох штамів на зміни вмісту антинутриційних факторів у заквасці. Вміст ANF, включаючи фітинову кислоту (РА), активність інгібітора трипсину (ТІА) та конденсовані таніни у заквасках показано в Таблиці 1. Порівняно з відповідними неферментованими контрольними групами, ферментація на заквасці загалом знизилася ($p < 0,05$) вміст ANF у субстратах. Більше зниження спостерігалось у червоній квасолі з додаванням пшеничних висівок після ферментації змішаним штамом, ніж після ферментації одним штамом. Наприклад, порівняно з RB та RWB, РА знизилася на -22,17, -23,90, -29,43 та -30,08%, а ТІА знизилася на -41,66, -41,20, -45,92 та -45,23 у RBY, RBYK, RWBY та RWBYK відповідно. Конденсовані таніни були нижчими в RWBY та RWBYK, ніж у RBY та RBYK; Однак, у RBY та RBYK (від -40,17 до -41,17%)

спостерігався вищий рівень зниження, ніж у RWBY та RWBYK (від -31,21 до -32,35%) порівняно з контрольною групою. Це пояснюється вищим вмістом конденсованих танінів у RB, ніж у RWB як вихідному субстраті (Таблиця 1). Більший рівень зниження у присутності пшеничних висівок вказував на те, що адитивний ефект пшеничних висівок міг збільшити кількість ANF, зокрема фітатів та інгібіторів трипсину, які розкладалися більше під час змішано-штаммового, ніж одноштаммового, ферментації на заквасці червоної квасолі з додаванням пшеничних висівок. Повідомляється, що пшеничні висівки містять зв'язані метаболіти, такі як фенольні кислоти та фітати, які можуть вивільнятися під час ферментації на заквасці [31 , 32].

3.1.3. Вплив ферментації одного або змішаного штаму на зміни ключової ферментативної активності під час ферментації закваски. Зміни активності β -глюкозидази, ферулоїлестерази та фітази під час ферментації закваски з червоної квасолі, доповненої пшеничними висівками, представлені на рисунку 1. Загалом, активність усіх трьох ферментів була виявлена під час процесу ферментації закваски. Активність β -глюкозидази була вищою ($p < 0,05$) під час ферментації на змішаному штамі (RWBYK > RBYK), ніж на одноштаммовому субстраті (RWBY > RBY) (вища у червоній квасолі з пшеничними висівками, ніж без нього) (рисунок 1a). Дріжджі *K. marxianus* є високими продуцентами β -глюкозидази [7]; це могло призвести до додатково вищої активності β -глюкозидази в RWBYK та RBYK, ніж у RWBY та RBY, під час ферментації закваски зі змішаними штамми. З іншого боку, активність ферулоїлестерази була значно ($p < 0,05$) вищою у змішано ферментованій червоній квасолі з пшеничними висівками (RWBYK > RWBY), ніж без субстрату (RBYK > RBY) під час ферментації на заквасці (Рисунок 1b). Зміна оптимального рН, ідеального для ферменту естерази, що продукується мікробами, може впливати на його активність під час ферментації субстрату [8]. У цьому дослідженні додавання пшеничних висівок до борошна з червоної квасолі, можливо, мало буферний ефект на рН та підтримувало його в межах

оптимального для активності ферулоїлестерази, що виробляється під час ферментації на заквасці (Таблиця 1, Рисунок 1b). Подібно до ферулоїлестерази, активність фітази була вищою ($p < 0,05$) у борошні з червоної квасолі з додаванням пшеничних висівків (RWBYK > RWBY), ніж без нього (RBYK > RBY) під час ферментації на заквасці (Рисунок 1c).



С

Рисунок 3.1. Зміни активності ферментів β -глюкозидази (а), ферулоїлестерази (b) та фітази (c) під час ферментації борошна з червоної квасолі з пшеничними висівками або без них на заквасці з використанням одного та змішаного штаму.

Примітка: RBY: закваска з червоної квасолі, ферментована *L. fermentum*; RBYK: закваска з червоної квасолі, ферментована *L. fermentum* та *K. marxianus*. RWBY: закваска з червоної квасолі та пшеничних висівків, ферментована *L. fermentum*. RWBYK: закваска з червоної квасолі та пшеничних висівків, ферментована *L. fermentum* та *K. marxianus*. Різні малі та великі літери вказували на значну різницю при $p < 0,05$ для одного й того ж зразка в різний час ферментації та різних зразків в один і той самий час ферментації відповідно.

На відміну від впливу рН на активність естерази, окрім фітази, що виробляється заквасками під час ферментації, підкислення закваски могло активувати ендогенні фітази у пшеничних висівках, що призвело до значно вищої активності в RWBYK та RWBY, ніж у RBYK та RBY під час ферментації [33 , 34]. Загалом, ферменти, що виробляються *in situ* під час ферментації закваски, відповідають за різноманітні біотрансформації, такі як фітази для розщеплення фітинової кислоти, естерази та β -глюкозидази для розчинення клітковини, що збільшує харчовий та біоактивний потенціал закваски та отриманого хліба на заквасці [2 , 3].

3.2. Біоактивний вміст червоної квасолі, ферментованої одним або змішаним штамом, з додаванням закваски з пшеничних висівків

Загальний вміст фенолів (TPC) та загальний вміст флавоноїдів (TFC) у зразках закваски представлені в Таблиці 1. Порівняно з RB (4,02 мг GAE/г) та RWB (4,95 мг GAE/г), TPC збільшився ($p < 0,05$) у всіх зразках після ферментації на заквасці. Більше збільшення спостерігалось у зразках червоної квасолі змішаного, ніж одноштаммового сорту з пшеничними висівками (RWBYK (+44,90%) > RWBY (+33,77%)), ніж без них (RBYK (+39,90%) > RBY (+30,11%)). З іншого боку, порівняно з RB (2,39 мг RE/г) та RWB (2,31 мг RE/г), вміст загальної концентрації квасолі (TFC) збільшився ($p < 0,05$) у RBY (23,12%), RBYK (39,30%), RWBY (22,00%) та RWBYK (37,27%). У кількох опублікованих дослідженнях вивільнення зв'язаних фітохімічних речовин внаслідок гідролітичної активності ферментів, що продукуються *in situ*, під час мікробної ферментації збільшило вміст загальної концентрації квасолі (TPC) та TFC ферментованого субстрату [35 , 36]. Як показано на рисунку 1 , активність ферментів (фітаза, ферулоїлестераза та β -глюкозидаза) зростала під час ферментації на заквасці, особливо вище ($p < 0,05$) у червоній квасолі, ферментованій змішаним, а не одноштамово, з пшеничними висівками, ніж без закваски. Це може бути життєво важливим для вивільнення зв'язаних фітохімічних речовин, які збільшували вміст TPC та TFC у заквасці.

Вміст фенольних кислот, включаючи галову кислоту, протокатехову кислоту, хлорогенову кислоту, кавову кислоту, п-кумарову кислоту та ферулову кислоту у зразках, представлено в Таблиці 1. Порівняно з RB та RWB, вміст галової кислоти та п-кумарової кислоти збільшився ($p < 0,05$), тоді як вміст протокатехової кислоти, хлорогенової кислоти, кавової кислоти та ферулової кислоти зменшився ($p < 0,05$) у зразках закваски. Під час бродіння закваски фенольні кислоти можуть вивільнятися зі зв'язаного стану, а деякі перетворюватися на проміжні продукти з вищою біологічною активністю за допомогою LAB та/або дріжджів [37]. Наприклад, зниження вмісту ферулової кислоти в субстратах, ферментованих LAB, пояснюється її розкладом на проміжний продукт, такий як 4-вінілгваякол [38]. Отже, зміни в TPC, TFC та фенольних кислотах після ферментації субстратів на заквасці можуть підвищити біоактивний потенціал закваски та отриманого хліба на заквасці [27].

Крім того, склад харчових волокон зразків закваски було представлено в Таблиці 1. Результати показали, що порівняно з RB та RWB, розчинна харчова клітковина (SDF) збільшилася ($p < 0,05$), тоді як вміст нерозчинної харчової клітковини (IDF) та загальної харчової клітковини (TDF) зменшився ($p < 0,05$) у всіх зразках після ферментації на заквасці (Таблиця 3.1). Більше того, спостерігалось більше збільшення ($p < 0,05$) SDF (RWBYK (+48,50%) > RBYK (+47,77%) > RWBY (+26,18%) > RBYK (+25,10%)) та зменшення ($p < 0,05$) TDF (RWBYK (-17,47%) < RBYK (-16,24%) < RWBY (-14,22%) < RBY (-6,01%)) у червоній квасолі, ферментованій змішаним штамом, ніж одним штамом, з пшеничними висівками, ніж без неї. Через вищу активність β -глюкозидази у субстратах, ферментованих змішаним штамом, ніж одним штамом (Рисунок 1a), можливо, відбувалася значно вища деградація IDF під час ферментації закваски в його розчинну форму (SDF) у ферментованих субстратах [38 , 39]. Подібні результати були отримані в нещодавньому дослідженні, де β -глюкозидаза, що продукується *in situ*, збільшила вміст SDF та зменшила TDF та IDF у чорній квасолі, ферментованій LAB з додаванням

пшеничних висівок [2]. Більше того, додавання пшеничних висівок до червоної квасолі сприяло збільшенню ($p < 0,05$) вмісту TDF, який все більше розчинявся у більшій кількості SDF у RWBYK та RWBY порівняно з RWB, ніж у RBYK та RBY порівняно з RB (Таблиця 3.1).

3.3. Характеристики хліба, виготовленого з червоної квасолі одно- або змішаного штаму ферментації з додаванням закваски з пшеничних висівок

3.3.1. Питомі об'ємні та текстурні характеристики хліба. Вплив додавання заквасок на питомий об'єм та текстурні характеристики хліба представлено в таблиці 2. Результати показали, що порівняно з хлібом WB, додавання борошна з червоної квасолі з пшеничними висівками (RWB) або борошна з червоної квасолі (RB) зменшило ($p < 0,05$) питомий об'єм на - 22,89% та -25,63%, а також збільшило ($p < 0,05$) твердість та жувальну здатність м'якушки на 97,58% та 102,56%, а також на 114,12% та 149,77% відповідно. З іншого боку, порівняно з контрольними сортами хліба RB та RWB, додавання закваски збільшило питомий об'єм та зменшило ($p < 0,05$) твердість та жувальну здатність хліба. Більше збільшення ($p < 0,05$) питомого об'єму (RBYK: +13,86%, RWBYK: +11,99%, RBY: +9,04%, RWBY: +7,62%) та більше зниження ($p < 0,05$) твердості м'якушки (RWBYK: -19,87%, RBYK: -19,31%, RWBY: -14,87%, RBY: -12,78%) та жувальності (RBYK: -31,51%, RWBYK: -26,05%, RBY: -21,59%, RWBY: -17,08%) спостерігалось у субстратах, ферментованих змішаним штамом, ніж у субстратах, ферментованих одним штамом, порівняно з контрольним хлібом (таблиця 2). Враховуючи, що зменшення питомого об'єму в поєднанні зі збільшенням твердості та жувальності м'якушки є відомими показниками зниження якості хліба [3 , 40], ці результати свідчать про те, що додавання неферментованого борошна з червоної квасолі з пшеничними висівками або без них негативно впливає на якість хліба, тоді як бродіння борошна з червоної квасолі на заквасці (змішаний штаб краще, ніж одноштаммово) з субстратами

пшеничних висівок або без них покращує якість хліба. У попередніх дослідженнях повідомлялося, що фенольні кислоти та SDF утворюють мережі з глютеновим білком, що призводить до покращення структурної цілісності тіста та коефіцієнта утримання газу, а також покращує якість хліба [27 , 41]. Отже, збільшення біоактивних компонентів, таких як TPC, TFC, фенольні кислоти та SDF, у заквасках, особливо у заквасках, ферментованих зі змішаним штамом, а потім одноштаммово, могло позитивно вплинути на покращення якості хліба.

Таблиця 3.2

Вплив борошна з червоної квасолі, ферментованого одним та змішаним штамом, з закваскою з пшеничних висівок або без неї, на питомий об'єм, текстурні характеристики профілю та сенсорну оцінку пшеничного хліба

Зразок	Питомий об'єм (мл/г)	Характеристики текстурного профілю		Сенсорна оцінка					Загальна прийнятність
		Твердість (г)	Жувальна здатність (мДж)	Текстура	Смак	Колір	Аромат	Зовнішній вигляд	
WB	6.08 ± 0.14 ^e	234.33 ± 8.14 ^a	14.40 ± 0.66	7.35± 0.49 ^c	7.50 ± 0.71 ^d	6.95 ± 0.21 ^b	7.05 ± 0.14 ^d	7.65 ± 0.35 ^c	7.70 ± 0.14 ^d
RB	4.52 ± 0.17 ^a	474.57 ± 5.03 ^f	35.97 ± 1.59	5.70± 0.28 ^a	6.33 ± 0.14 ^{ab}	6.75 ± 0.07 ^a	6.55 ± 0.14 ^b	6.60 ± 0.14 ^a	5.95 ± 0.24 ^a
RWB	4.69 ± 0.08 ^a	463.00 ± 9.16 ^e	30.83 ± 1.17	5.40± 0.14	6.15 ± 0.07 ^a	6.55 ± 0.14 ^a	6.00 ± 0.13 ^a	6.35 ± 0.07 ^a	5.65 ± 0.21 ^a
RBY	4.93 ± 0.09 ^b	414.00 ± 6.08 ^d	28.20 ± 1.18	6.50± 0.14	6.85 ± 0.14 ^{ab}	6.80 ± 0.07 ^a	6.95 ± 0.07 ^d	6.60 ± 0.21 ^a	6.80 ± 0.07 ^b
RBYK	5.15 ± 0.02 ^{cd}	383.00 ± 6.24 ^c	24.6± 0.87	6.75± 0.06	7.05 ± 0.08 ^{cd}	6.75 ± 0.01 ^a	7.10 ± 0.01 ^d	6.90 ± 0.01 ^b	6.90 ± 0.14 ^b
RWBY	5.04 ± 0.04 ^c	393.67 ± 4.51 ^c	25.57 ± 0.65	6.6 ± 0.03	6.70 ± 0.01 ^{abc}	6.70 ± 0.07 ^a	6.60 ± 0.06	6.90 ± 0.14	7.00 ± 0.07 ^b
RWBY K	5.25 ± 0.04 ^d	371.33 ± 5.20 ^b	22.80 ± 0.89	6.85± 0.04	7.00 ± 0.07 ^{bcd}	6.85 ± 0.07 ^b	6.80 ± 0.21 ^c	7.20 ± 0.28 ^c	7.30 ± 0.06 ^c

3.3.2. Сенсорна оцінка хліба. Результати сенсорної оцінки хліба з борошном з червоної квасолі одно- або змішаного штаму ферментації з

закваскою з пшеничних висівок або без неї представлені в таблиці 3.2. Зразок хліба пшеничний хліб отримав найвищий бал ($p < 0,05$), тоді як хліб з червоної квасолі, а потім хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок, отримали найнижчий бал ($p < 0,05$) за всіма оціненими сенсорними характеристиками. Порівняно з хліб з червоної квасолі та хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок всі характеристики отримали вищі бали ($p < 0,05$) у хліба, виготовленого на заквасці. Наприклад, загальна сприйнятливість та зовнішній вигляд були оцінені найвище у закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, потім закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом *L. fermentum* та *K. marxianus*, закваска з червоної квасолі, ферментована хлібом, хліб з червоної квасолі та хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок; аромат був оцінений найвище у закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом *L. fermentum* та *K. marxianus*, потім закваска з червоної квасолі, ферментована хлібом, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, хліб з червоної квасолі та хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок; смак був оцінений найвище у закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом *L. fermentum* та *K. marxianus*, потім закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, закваска з червоної квасолі, ферментована хлібом, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, хліб з червоної квасолі та хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок; колір був оцінений найвище у закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, потім закваска з червоної квасолі, ферментована хлібом, хліб з червоної квасолі, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом *L. fermentum* та *K. marxianus*, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом та хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок; а текстура була оцінена найвище у закваска з червоної квасолі та пшеничних

висівок, ферментована хлібом, потім у закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом *L. fermentum* та *K. marxianus*, закваска з червоної квасолі та пшеничних висівок, ферментована хлібом, закваска з червоної квасолі, ферментована хлібом, хліб з червоної квасолі та хліб з червоної квасолі та пшеничних висівок. Ці результати свідчать про те, що ферментація субстратів на заквасці, особливо ферментація зі змішаним штамом, а потім з одним штамом, покращила кілька сенсорних характеристик отриманого хліба. Це пояснюється здатністю ферментації на заквасці зменшувати вміст ANF, збільшувати SDF та вивільняти інші біологічно активні сполуки, такі як органічні кислоти та леткі ароматичні сполуки, що разом покращило якість, смак та аромат отриманого хліба [3]. Таким чином, ферментація на заквасці зі змішаним штамом, а потім з одним штамом, значно підвищила застосовність та потенційне сприйняття споживачами інгредієнтів борошна з червоної квасолі та пшеничних висівок у хлібі [20 , 21].

На завершення, порівняно з одноштамовою ферментацією, закваска, приготована шляхом змішаної штамової ферментації червоної квасолі з/без пшеничних висівок, мала більше знижених антинутрієнтних факторів та більше підвищений вміст біологічно активного компонента в субстратах. Після змішаної штамової ферментації було отримано значно вищий вміст розчинної харчової клітковини, загальних фенолів та флавоноїдів, а також фенольних кислот, таких як галова кислота, ніж після одноштамової ферментації на заквасці. Згодом, хоча якість та сенсорна сприйнятливність хліба значно покращилися завдяки одноштамовій або змішаній штамовій ферментації, змішана штамова ферментація могла краще покращити якість хліба порівняно з одноштамовою ферментацією.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБЦІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПШЕНИЧНИХ ВИСІВОК ДЛЯ ОСІБ ІЗ ПОРУШЕНИМ ОБМІНОМ РЕЧОВИН

4.1. Техніко-економічне обґрунтування виробництва хлібців з використанням пшеничних висівок для осіб із порушеним обміном речовин

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості особливої актуальності набуває виробництво функціональних харчових продуктів, призначених для профілактичного та дієтичного харчування населення. Одним із перспективних напрямів є створення зернових продуктів із підвищеним вмістом харчових волокон та біологічно активних речовин, зокрема хлібців із використанням пшеничних висівок та ферментованої рослинної сировини.

Доцільність виробництва функціональних хлібців обумовлена стабільним зростанням кількості осіб із порушеннями обміну речовин, ожирінням, інсулінорезистентністю та цукровим діабетом II типу. У зв'язку з цим спостерігається підвищений попит на продукти зі зниженим глікемічним індексом, високим вмістом харчових волокон, антиоксидантів та пребіотичних компонентів.

Використання пшеничних висівок у технології хлібців є економічно вигідним, оскільки вони належать до вторинних продуктів борошномельного виробництва та характеризуються порівняно невисокою вартістю. При цьому висівки містять значну кількість харчових волокон, мінеральних речовин, вітамінів групи В та фенольних сполук, що дозволяє підвищити біологічну цінність готової продукції без суттєвого збільшення собівартості.

Додатковою перевагою розробленої технології є використання ферментованої бобової сировини, зокрема червоної квасолі, обробленої змішаною штамовою ферментацією із застосуванням *Lactobacillus fermentum* та *Kluyveromyces marxianus*. Встановлено, що така ферментація сприяє

зниженню вмісту антинутрієнтних речовин, зокрема фітинової кислоти, танінів та інгібіторів трипсину, що підвищує біодоступність мінеральних речовин і покращує засвоюваність продукту.

Результати досліджень свідчать, що змішаноштамова ферментація забезпечує підвищення вмісту розчинних харчових волокон, фенольних сполук, флавоноїдів та галової кислоти, що формує виражені антиоксидантні та пребіотичні властивості продукції. Крім того, застосування ферментованої сировини позитивно впливає на технологічні показники виробів: збільшується питомий об'єм, покращується структура м'якушки, знижується твердість та підвищується сенсорна привабливість хлібців.

З економічної точки зору використання пшеничних висівок та ферментованої бобової сировини дозволяє частково замінити дорожчу зернову сировину, оптимізувати рецептурний склад та підвищити вихід готової продукції. При цьому покращення функціонально-технологічних властивостей тіста сприяє зменшенню технологічних втрат під час виробництва та зберігання.

Орієнтовний рівень рентабельності виробництва функціональних хлібців може становити 20–30 % залежно від масштабів виробництва, вартості сировини та обсягів реалізації. Основними факторами економічної ефективності є:

- використання доступної вторинної рослинної сировини;
- зростання попиту на функціональні продукти харчування;
- збільшення терміну зберігання продукції завдяки зниженню вологості;
- можливість позиціонування продукції у сегменті дієтичного та профілактичного харчування;
- підвищення споживчої цінності продукції без суттєвого збільшення виробничих витрат.

Виробництво хлібців із використанням пшеничних висівок та ферментованої бобової сировини не потребує суттєвого переоснащення існуючих технологічних ліній хлібопекарських підприємств. Це дозволяє

впроваджувати розроблену технологію на діючих виробництвах із мінімальними капітальними витратами.

Таким чином, результати проведених досліджень підтверджують технологічну та економічну доцільність виробництва функціональних хлібців із використанням пшеничних висівок і ферментованої рослинної сировини. Запропонована технологія дозволяє отримати продукцію підвищеної біологічної цінності з вираженими функціональними властивостями, що є перспективним напрямом розвитку сучасної харчової промисловості та профілактичного харчування осіб із порушеним обміном речовин.

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу сучасних наукових джерел встановлено, що одним із перспективних напрямів розвитку харчових технологій є створення функціональних зернових продуктів для осіб із порушеннями обміну речовин. Визначено, що використання харчових волокон та вторинної зернової сировини, зокрема пшеничних висівок, дозволяє підвищити біологічну цінність продукції, знизити її калорійність та глікемічний індекс.

2. Обґрунтовано доцільність використання пшеничних висівок у технології хлібців функціонального призначення. Встановлено, що висівки характеризуються високим вмістом харчових волокон, мінеральних речовин, вітамінів групи В та антиоксидантних компонентів, що позитивно впливає на харчову цінність готових виробів.

3. Досліджено хімічний склад та функціонально-технологічні властивості пшеничних висівок як функціонального інгредієнта. Визначено, що внесення висівок сприяє підвищенню вологоутримувальної здатності, збагаченню продукції харчовими волокнами та формуванню функціональних властивостей хлібців.

4. Розроблено рецептури функціональних хлібців із використанням пшеничних висівок у різних концентраціях. Встановлено оптимальний рівень внесення висівок, який забезпечує покращення харчової цінності продукції без суттєвого погіршення органолептичних показників.

5. Проведено оцінку фізико-хімічних, органолептичних та структурно-механічних показників готових виробів. Встановлено, що додавання пшеничних висівок сприяє підвищенню вмісту харчових волокон та мінеральних речовин, а також забезпечує формування задовільних показників смаку, аромату, кольору та текстури хлібців.

6. Визначено, що функціональні хлібці з пшеничними висівками характеризуються нижчою калорійністю та потенційно нижчим глікемічним

індексом порівняно з традиційними хлібобулочними виробами, що робить їх перспективними для харчування осіб із порушеним обміном речовин.

7. Встановлено позитивний вплив пшеничних висівків на функціонально-технологічні властивості продукції, зокрема на структуру, вологоутримувальну здатність та стабільність виробів під час зберігання.

8. Проведені техніко-економічні розрахунки підтвердили доцільність впровадження удосконаленої технології виробництва функціональних хлібців із використанням пшеничних висівків. Визначено, що використання вторинної зернової сировини дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва та розширити асортимент продукції профілактичного та дієтичного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gobbetti, M.; Rizzello, C.G.; Di Cagno, R.; De Angelis, M. How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods. *Food Microbiol.* 2014, 37, 30–40.
2. Huang, J.; Omedi, J.O.; Huang, C.; Chen, C.; Liang, L.; Zheng, J.; Zeng, Y.; Xu, Y.; Huang, W. Effect of black bean supplemented with wheat bran sourdough fermentation by *Pediococcus acidilactici* or *Pediococcus pentosaceus* on baking quality and staling characteristics of wheat composite bread. *Appl. Food Res.* 2024, 4, 100425
3. Arora, K.; Ameer, H.; Polo, A.; Di Cagno, R.; Rizzello, C.G.; Gobbetti, M. Thirty years of knowledge on sourdough fermentation: A systematic review. *Trends Food Sci. Technol.* 2021, 108, 71–83.
4. Luti, S.; Mazzoli, L.; Ramazzotti, M.; Galli, V.; Venturi, M.; Marino, G.; Lehmann, M.; Guerrini, S.; Granchi, L.; Paoli, P.; et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected *Lactobacilli* strains are retained in breads. *Food Chem.* 2020, 322, 126710
5. Huang, C.; Huang, J.; Zhang, B.; Omedi, J.O.; Chen, C.; Zhou, L.; Liang, L.; Zou, Q.; Zheng, J.; Zeng, Y.; et al. Rheo-Fermentation Dough Properties, Bread-Making Quality and Aroma Characteristics of Red Bean (*Vigna angularis*) Sourdough Induced by LAB *Weissella confusa* QS813 Strain Fermentation. *Foods* 2023, 12, 605
6. Chen, C.; Huang, J.; Omedi, J.O.; Huang, C.; Cheng, X.; Zhang, B.; Li, N.; Gao, T.; Liang, L.; Zheng, J.; et al. Characteristics of the microstructure and the key components of white kidney bean sourdough bread induced by mixed-strain fermentation and its influence on gut microbiota. *Food Funct.* 2023, 14, 7413–7425.
7. Struyf, N.; Vandewiele, H.; Herrera-Malaver, B.; Verspreet, J.; Verstrepen, K.J.; Courtin, C.M. *Kluyveromyces marxianus* yeast enables the production of low FODMAP whole wheat breads. *Food Microbiol.* 2018, 76, 135–145

8. Liang, L.; Omedi, J.O.; Huang, W.; Zheng, J.; Zeng, Y.; Huang, J.; Zhang, B.; Zhou, L.; Li, N.; Gao, T.; et al. Antioxidant, flavor profile and quality of wheat dough bread incorporated with kiwifruit fermented by β -glucosidase producing lactic acid bacteria strains. *Food Biosci.* 2022, *46*, 101450.
9. Chun, J.Y.; Kim, J.S.; Kim, J.H. Enrichment of isoflavone aglycones in soymilk by fermentation with single and mixed cultures of *Streptococcus infantarius* 12 and *Weissella* sp 4. *Food Chem.* 2008, *109*, 278–284
10. Alvarez-Martín, P.; Flórez, A.B.; Hernández-Barranco, A.; Mayo, B. Interaction between dairy yeasts and lactic acid bacteria strains during milk fermentation. *Food Control* 2008, *19*, 62–70.
11. Lucio, O.; Pardo, I.; Heras, J.M.; Krieger, S.; Ferrer, S. Influence of yeast strains on managing wine acidity using *Lactobacillus plantarum*. *Food Control* 2018, *92*, 471–478.
12. Garrido-Galand, S.; Asensio-Grau, A.; Calvo-Lerma, J.; Heredia, A.; Andres, A. The potential of fermentation on nutritional and technological improvement of cereal and legume flours: A review. *Food Res. Int.* 2021, *145*, 110398.
13. Leonard, W.; Zhang, P.; Ying, D.; Adhikari, B.; Fang, Z. Fermentation transforms the phenolic profiles and bioactivities of plant-based foods. *Biotechnol. Adv.* 2021, *49*, 107763.
14. Crowe, K.M.; Francis, C. Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Functional Foods. *J. Acad. Nutr. Dietetics* 2013, *113*, 1096–1103.
15. Wang, Y.; Yao, X.M.; Shen, H.F.; Zhao, R.; Li, Z.B.; Shen, X.T.; Wang, F.; Chen, K.X.; Zhou, Y.; Li, B.; et al. Nutritional Composition, Efficacy, and Processing of *Vigna angularis* (Adzuki Bean) for the Human Diet: An Overview. *Molecules* 2022, *27*, 6079
16. Cheng, W.; Sun, Y.J.; Fan, M.C.; Li, Y.; Wang, L.; Qian, H.F. Wheat bran, as the resource of dietary fiber: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2021, *62*, 7269–7281.

17. Liu, W.J.; Brennan, M.; Serventi, L.; Brennan, C. Effect of wheat bran on dough rheology and final quality of chinese steamed bread. *Cereal Chem.* 2017, 94, 581–587.
18. Cheni, Y.H.; Yang, X.S.; Guo, H.M.; Li, J.C.; Ren, G.X. Effect of extruded adzuki bean flour on the quality and α -glucosidase inhibitory activity of Chinese steamed bread. *Food Sci. Nutr.* 2019, 7, 3244–3252
19. Cho, S.S.; Qi, L.; Fahey, G.; Klurfeld, D.M. Consumption of cereal fiber, mixtures of whole grains and bran, and whole grains and risk reduction in type 2 diabetes, obesity, and cardiovascular disease. *Am. J. Clin. Nutr.* 2013, 98, 594–619
20. Qin, H.B.; Wu, H.B.; Shen, K.; Liu, Y.L.; Li, M.; Wang, H.G.; Qiao, Z.J.; Mu, Z.X. Fermented Minor Grain Foods: Classification, Functional Components, and Probiotic Potential. *Foods* 2022, 11, 3155
21. Tanaskovic, S.J.; Sekuljica, N.; Jovanovic, J.; Gazikalovic, I.; Grbavcic, S.; Dordevic, N.; Sekulic, M.V.; Hao, J.; Lukovic, N.; Knezevic-Jugovic, Z. Upgrading of valuable food component contents and anti-nutritional factors depletion by solid-state fermentation: A way to valorize wheat bran for nutrition. *J. Cereal Sci.* 2021, 99, 103159
22. Klomklao, S.; Benjakul, S. Effect of trypsin inhibitor in adzuki bean (*Vigna angularis*) on proteolysis and gel properties of threadfin bream (*Nemipterus bleekeri*). *LWT Food Sci. Technol.* 2015, 63, 906–911
23. Buddrick, O.; Jones, O.A.H.; Cornell, H.J.; Small, D.M. The influence of fermentation processes and cereal grains in wholegrain bread on reducing phytate content. *J. Cereal Sci.* 2014, 59, 3–8.
24. Richard, B.; Broadhurst, W.T.J. Analysis of condensed tannins using acidified vanillin. *J. Sci. Food Agric.* 1978, 29, 788–794
25. Guergoletto, K.B.; Costabile, A.; Flores, G.; Garcia, S.; Gibson, G.R. In vitro fermentation of juçara pulp (*Euterpe edulis*) by human colonic microbiota. *Food Chem.* 2016, 196, 251–258.
26. Luo, J.Q.; Cai, W.X.; Wu, T.; Xu, B.J. Phytochemical distribution in hull and cotyledon of adzuki bean (*Vigna angularis* L.) and mung bean (*Vigna*

radiate L.), and their contribution to antioxidant, anti-inflammatory and anti-diabetic activities. *Food Chem.* 2016, 201, 350–360

27. Omedi, J.O.; Li, N.; Chen, C.; Cheng, X.; Huang, J.; Zhang, B.; Gao, T.; Liang, L.; Zhou, Z.; Huang, W. Potential Health Benefits of Yeast-Leavened Bread Containing LAB *Pediococcus pentosaceus* Fermented Pitaya (*Hylocereus undatus*): Both In Vitro and In Vivo Aspects. *Foods* 2022, 11, 3416.

28. Fekri, A.; Torbati, M.; Yari Khosrowshahi, A.; Bagherpour Shamloo, H.; Azadmard-Damirchi, S. Functional effects of phytate-degrading, probiotic lactic acid bacteria and yeast strains isolated from Iranian traditional sourdough on the technological and nutritional properties of whole wheat bread. *Food Chem.* 2020, 306, 125620

29. Scortichini, S.; Boarelli, M.C.; Silvi, S.; Fiorini, D. Development and validation of a GC-FID method for the analysis of short chain fatty acids in rat and human faeces and in fermentation fluids. *J. Chromatogr. B* 2020, 1142, 121972

30. Vogelmann, S.A.; Seitter, M.; Singer, U.; Brandt, M.J.; Hertel, C. Adaptability of lactic acid bacteria and yeasts to sourdoughs prepared from cereals, pseudocereals and cassava and use of competitive strains as starters. *Int. J. Food Microbiol.* 2009, 130, 205–212

31. Onipe, O.O.; Jideani, A.I.O.; Beswa, D. Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2015, 50, 2509–2518

32. Ma, S.; Wang, Z.; Guo, X.; Wang, F.; Huang, J.; Sun, B.; Wang, X. Sourdough improves the quality of whole-wheat flour products: Mechanisms and challenges—A review. *Food Chem.* 2021, 360, 130038.

33. Reale, A.; Konietzny, U.; Coppola, R.; Sorrentino, E.; Greiner, R. The importance of lactic acid bacteria for phytate degradation during cereal dough fermentation. *J. Agric. Food Chem.* 2007, 55, 2993–2997

34. Karaman, K.; Sagdic, O.; Durak, M.Z. Use of phytase active yeasts and lactic acid bacteria isolated from sourdough in the production of whole wheat bread. *LWT Food Sci. Technol.* 2018, 557, 567.

35. Fang, L.P.; Wang, W.J.; Dou, Z.X.; Chen, J.; Meng, Y.C.; Cai, L.Q.; Li, Y.H. Effects of mixed fermentation of different lactic acid bacteria and yeast on phytic acid degradation and flavor compounds in sourdough. *LWT Food Sci. Technol.* 2023, *174*, 114438
36. Filannino, P.; Di Cagno, R.; Gobbetti, M. Metabolic and functional paths of lactic acid bacteria in plant foods: Get out of the labyrinth. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2018, *49*, 64–72
37. Yang, F.; Chen, C.; Ni, D.R.; Yang, Y.B.; Tian, J.H.; Li, Y.Y.; Chen, S.G.; Ye, X.Q.; Wang, L. Effects of Fermentation on Bioactivity and the Composition of Polyphenols Contained in Polyphenol-Rich Foods: A Review. *Foods* 2023, *12*, 3315
38. Li, W.; Sun, X.; Du, Y.; Su, A.; Fang, Y.; Hu, Q.; Pei, F. Effects of co-fermentation on the release of ferulic acid and the rheological properties of whole wheat dough. *J. Cereal Sci.* 2023, *111*, 103669.
39. Michlmayr, H.; Kneifel, W. β -Glucosidase activities of lactic acid bacteria: Mechanisms, impact on fermented food and human health. *FEMS Microbiol. Lett.* 2014, *352*, 1–10
40. Wronkowska, M.; Jadacka, K.; Soral-Smietana, M.; Zander, L.; Dajnowiec, F.; Banaszcyk, P.; Jelinski, Z.; Szymatowicz, B. Acid whey concentrated by ultrafiltration a toll for modeling bread properties. *LWT Food Sci. Technol.* 2015, *61*, 172–175.
41. Goesaert, H.; Brijs, K.; Veraverbeke, W.S.; Courtin, C.M.; Gebruers, K.; Delcour, J.A. Wheat flour constituents: How they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends Food Sci. Technol.* 2005, *16*, 12–30.
42. Schadow, A.M.; Revheim, I.; Spielau, U.; Dierkes, J.; Schwingshackl, L.; Frank, J.; Hodgson, J.M.; Moreira-Rosário, A.; Seal, C.J.; Buyken, A.E.; et al. The Effect of Regular Consumption of Reformulated Breads on Glycemic Control: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *Adv. Nutr. Int. Rev. J.* 2023, *14*, 30–43

43. Winn, N.C.; Schleh, M.W.; Garcia, J.N.; Lantier, L.; McGuinness, O.P.; Blair, J.A.; Hasty, A.H.; Wasserman, D.H. Insulin at the intersection of thermoregulation and glucose homeostasis. *Mol. Metab.* 2024, *81*, 101901
44. Busik, J.V. Lipid metabolism dysregulation in diabetic retinopathy. *J. Lipid Res.* 2021, *62*, 100017.
45. Chen, H.R.; Guan, K.F.; Qi, X.F.; Wang, R.C.; Ma, Y. α -Lactalbumin ameliorates hepatic lipid metabolism in high-fat-diet induced obese C57BL/6J mice. *J. Funct. Foods* 2020, *75*, 104253.
46. Ma, Y.; Lu, Y.; Petrofsky, K.; Liu, J.; Cheng, Y.; Ruan, R.; Chen, C. Double-edged metabolic effects from short-term feeding of functionalized wheat bran to mouse revealed by metabolomic profiling. *J. Agric. Food Chem.* 2021, *69*, 6543–6555
47. Tarfa, A.; Alonazi, M.A. Lycopene corrects metabolic syndrome and liver injury induced by high fat diet in obese rats through antioxidant, anti-inflammatory, antifibrotic pathways. *Biomed. Pharmacother.* 2021, *141*, 111831
48. Li, J.J.; Jin, H.; Yan, X.M.; Shao, D.Y.; Hu, X.Z.; Shi, J.L. The anti-obesity effects exerted by different fractions of *Artemisia sphaerocephala* Krasch polysaccharide in diet-induced obese mice. *Int. J. Biol. Macromol.* 2021, *182*, 825–837
49. Zhu, R.Y.; Wei, J.P.; Liu, H.X.; Liu, C.Y.; Wang, L.L.; Chen, B.B.; Li, L.; Jia, Q.Q.; Tian, Y.M.; Li, R.; et al. Lycopene attenuates body weight gain through induction of browning via regulation of peroxisome proliferator-activated receptor γ in high-fat diet-induced obese mice. *J. Nutr. Biochem.* 2020, *78*, 108335
50. Yan, Y.L.; Hu, Y.; Gänzle, M.G. Prebiotics, FODMAPs and dietary fiber—Conflicting concepts in development of functional food products? *Curr. Opin. Food Sci.* 2018, *20*, 30–37.
51. Moorthy, M.; Chaiyakunapruk, N.; Jacob, S.A.; Palanisamy, U.D. Prebiotic potential of polyphenols, its effect on gut microbiota and anthropometric/clinical markers: A systematic review of randomised controlled trials. *Trends Food Sci. Technol.* 2020, *99*, 634–649

52. Rezende, E.S.V.; Lima, G.C.; Naves, M.M.V. Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification by prebiotic categories. *Nutrition* 2021, *89*, 111217.
53. Mo, X.X.; Sun, Y.H.; Liang, X.L.; Li, L.Y.; Hu, S.; Xu, Z.H.; Liu, S.; Zhang, Y.; Li, X.Q.; Liu, L.G. Insoluble yeast β -glucan attenuates high-fat diet-induced obesity by regulating gut microbiota and its metabolites. *Carbohydr. Polym.* 2022, *281*, 119046
54. Peluzio, M.D.G.; Martinez, J.A.; Milagro, F.I. Postbiotics: Metabolites and mechanisms involved in microbiota-host interactions. *Trends Food Sci. Technol.* 2021, *108*, 11–26
55. Alvarez, J.; Real, J.M.F.; Guarner, F.; Gueimonde, M.; Rodríguez, J.M.; de Pipaon, M.S.; Sanz, Y. Gut microbes and health. *Gastroenterol. Hepatol.* 2021, *44*, 519–535