



UDC 664.64./66.016:664.764

COMPARATIVE STUDIES OF THE PROPERTIES OF DOUGH AND BREAD MADE WITH THE ADDITION OF WHEAT BRAN OF DIFFERENT FRACTIONS OR THEIR EXTRACTSWang Fang¹, Valerii A. Sukmanov^{2*}, Anatoliy M. Shostya², Svetlana O. Usenko²,
Larysa M. Kuzmenko², Olha V. Barabolia², Viktoriia M. Sheludko²¹Xinyang Agricultural and Forestry University, College of Food Science and Engineering, No. 1, Beihuan Road, Pingqiao District, Xinyang City, Henan Province, 464000, China.²Poltava State Agrarian University, str. Skovorody, 1/3, Poltava, 36003, Poltava, Ukraine.

Received 19 May 2025; accepted 13 August 2025; available online 20 October 2025

Abstract

Wheat bran (WB) is the main by-product in the grain processing industry and contains a large number of biologically active substances, which, unfortunately, are not used in the food industry today. The aim of the study was to compare the effect of using WB of different fractional composition in the technology of wheat bread, ultrafine grinding WB and subcritical extract of WB. Methods. Ultrafine grinding of WB was carried out on an ultrafine grinding mill of series Ultrafine Mill SCM800. Extracts were obtained on the RVD-02-500 installation. The study of selected properties of objects using generally accepted methods. Results. The use of ultrafine grinding WB or subcritical extract allowed to obtain the highest positive effects. Adding WB to the recipe composition of bread improved its technological properties and changed its structure; The best results were obtained when using PV and PV10 extracts. Bread elasticity practically did not decrease when using PV extract. Increasing particle size and the amount of added PV led to a darker, more reddish and less yellowish crust color, but the use of PV extract minimized changes in bread color. The use of PV significantly enhanced the antioxidant properties of bread with the addition of PV. All samples were acceptable to consumers, but the highest scores were obtained for samples with the addition of PV and PV10 extracts in an amount of up to 30 %. When enriching bread with PV and using PV10 and PV50, the amount of added PV can be up to 30 %; when using PV325 and PV620, the amount of added PV can be up to 20 %. Conclusions. The results obtained can be used to improve the technology of wheat bread for functional purposes and further use in the bread baking industry.

Keywords: wheat bran; fractional composition; ultrafine grinding; dough; bread; technological properties; subcritical extraction; antioxidant properties; texture.

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТІСТА ТА ХЛІБА, ВИГОТОВЛЕНОГО ІЗ ДОДАВАННЯМ ПШЕНИЧНИХ ВИСІВОК РІЗНОЇ ФРАКЦІЇ АБО ЇХ ЕКСТРАКТІВВанг Фанг¹, Валерій А. Сукманов², Анатолій М. Шостя², Світлана О. Усенко²,
Лариса М. Кузьменко², Ольга В. Бараболя², Вікторія М. Шелудько²¹Сін'янський сільськогосподарський та лісничий університет, коледж харчових наук та інженерії, 1, вул. Бейхуань, район Пінцяо, місто Сін'ян, провінція Хенань, 464000, Китай.²Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, 36003, Україна.**Анотація**

Пшеничні висівки (ПВ) є основним побічним продуктом зернопереробної промисловості та містять велику кількість біологічно активних речовин, які на сьогодні не використовують у харчовій промисловості. Мета дослідження – порівняти вплив ПВ різного фракційного складу в технології хліба пшеничного, ПВ надтонкого помелу та субкритичного екстракту ПВ. Методи. Надтонке подрібнення ПВ проводили на млині ультратонкого помелу серії Ultrafine Mill SCM800. Екстракти отримували на установці РВД-02-500. Дослідження обраних властивостей об'єктів – з використанням загальноприйнятих методів. Результати. Використання ПВ надтонкого помелу або субкритичного екстракту дозволило отримати найвищі позитивні ефекти. Найкращі технологічні властивості та структура були отримані під час використання екстракту ПВ та ПВ10. Пружність хліба практично не зменшилася за використання екстракту ПВ. Збільшення розміру частинок і кількості доданих ПВ призвели до темнішого, більш червонуватого і менш жовтуватого кольору скоринки, але використання екстракту ПВ мінімізувало зміни кольору хліба. Використання ПВ значно підсилило антиоксидантні властивості хліба з доданнями ПВ. Всі зразки були прийнятними для споживачів, але найвищі бали отримали зразки з доданням екстракту ПВ та ПВ10 у кількості до 30 %. За умови використання ПВ10 та ПВ50 кількість доданих ПВ може становити до 30 %; за використання ПВ325 та ПВ620 – до 20 %. Висновки. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення технології пшеничного хліба.

Ключові слова: пшеничні висівки; фракційний склад; надтонкий помел; тісто; хліб; технологічні властивості; субкритична екстракція; антиоксидантні властивості; текстура.

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

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v33i3.330240

Вступ

Більшість споживачів віддають перевагу продуктам з рафінованого білого борошна в порівнянні з цільнозерновими продуктами, оскільки вважають текстурні властивості цільнозернових продуктів менш привабливими. Проте з міркувань здоров'я бажано значно збільшити щоденне споживання цільнозернових продуктів. Найкращий спосіб стимулювати споживання цільнозернових продуктів – покращити їх сприйнятливості привабливості.

Відомо, що додавання висівок знижує якість хліба, призводить до зниження питомого об'єму та підвищення щільності м'якушки [1]. Більшість досліджень намагаються визначити вплив висівок або додавання різноманітних інгредієнтів рослинного походження, багатих клітковиною, на якість хліба.

Для зменшення негативного впливу висівок на смакові та текстурні властивості продукту і покращення якості хліба на сьогодні використовують технології попередньої обробки висівок, включаючи замочування, бродіння або теплову обробку [2]. Іншим способом зменшення негативного впливу висівок є додавання глютену або використання поверхнево-активних речовин [3].

Пшеничні висівки, (ПВ) (*англ.* – wheat bran, WB), привертають все більшу увагу як джерело, багате розчинними харчовими волокнами (РХВ), та можуть бути використані як джерело субстрату декстрази (СДФ) завдяки високому вмісту некрохмальних полісахаридів, зокрема арабіноксилану, целюлози та декстрану [4].

Зменшення споживання харчових волокон (ХВ) розглядається як основна причина збільшення випадків так званих «багатих захворювань», таких як діабет, ожиріння, ішемічна хвороба серця, різні серцево-судинні та цереброваскулярні захворювання. ХВ зазвичай визначаються як харчові інгредієнти (полісахариди – целюлоза, геміцелюлози, пектин, камедь, резистентний крохмаль та лігнін), які є стійкими до перетравлення та всмоктування в тонкому кишечнику людини. ХВ сприятливо впливають на здоров'я людини, включаючи зниження ризику ішемічної хвороби серця, діабету, ожиріння та деяких форм раку [5]. За критерієм розчинності в воді ХВ класифікують на нерозчинні НХВ та розчинні РХВ. У порівнянні з НХВ, РХВ відіграють помітну роль у сприянні

проліферації кишкових пробіотиків, контролі індексу глюкози в крові, зниженні рівня ліпідів у крові, загального холестерину в сироватці крові, ліпопротеїнів низької щільності та інших фізіологічних функціях [6]. РХВ є сприятливими загусниками, емульгаторами, стабілізаторами та заміниками жиру різних рідких продуктів харчування та напоїв [7]. Більшість дієтологів вважають, що 20–30 % нашого щоденного споживання клітковини надходить із РХВ [8].

На сьогодні існують різні фізичні, хімічні та біохімічні методи екстракції РХВ та перетворення НХВ на РХВ з ПВ [9], такі як ферментативний [10], екструзія [11], надтонке подрібнення [12] та ін. Кожен метод має свої переваги та недоліки щодо складності процесу, витрат часу та матеріалів, а також безпеки харчових продуктів та впливу на навколишнє середовище. Ще одним важливим моментом є те, що процеси екстракції різними методами мають значний вплив на вихід цільової речовини, структурні характеристики та функціональність РХВ, а також на їх користь для здоров'я людини та біоактивність [13].

Волокна ПВ діють на властивості продукту шляхом комбінації фізичних і хімічних механізмів. Фізичний механізм пов'язаний зі зв'язуванням води та явищами зменшення розміру; хімічний механізм пов'язаний з наявністю ферулової кислоти. Автори роботи [14] дослідили вплив фракцій висівок на формування глютенної сітки та оцінили вплив та особливості приготування хліба, щоб зрозуміти механізм, який спричиняє несприятливий вплив висівок на якість хліба.

Додавання ПВ пов'язують із деяким негативним впливом на властивості тіста та хліба [15]. Дослідження додавання висівок до рецептурного складу хліба [16] довели, що їх властивості відіграють значну роль через взаємодію з глютенном і компонентами борошна. Взаємодія між висівками та борошном вважається фізичною, хімічною або ферментативною за своєю природою [17]. Механізми, за допомогою яких висівки негативно впливають на якість тіста, автори пояснюють фізичними перешкодами [18; 19], змінами в структурних механізмах глютену через зниження його розчинності [20], а також хімічною взаємодією між компонентами ПВ і білками глютену, які впливають на формування його мережі (сітки?). Показано, що додавання висівок впливає не тільки на структуру клейковини, але й на його

властивості під час нагрівання, зміщуючи температури желатинізації крохмалю [21].

Вплив фракційного складу та надтонкого помелу ПВ на властивості тіста та хліба. У роботі [22] доведено, що концентрація висівок і розмір їх частинок суттєво вплинули на всі параметри, які були визначені на фаринографі. Поглинання води було максимальним у тісті з більшим додаванням дрібних висівок і було мінімальним у сумішах, що містять грубі висівки.

ПВ становлять 15–20 % ваги насіння пшениці та є основним побічним продуктом помелу пшеничного борошна з річним світовим виробництвом близько 187 мільйонів тонн [23]. ПВ складаються з навколоплідного шару (епідермісу, гіподерми, поперечних клітин і трубчастих клітин), проміжного шару (насіenneвої оболонки та ядерного епідермісу), алейронового шару та крохмалистого ендосперму [24]. ПВ є поживним харчовим інгредієнтом, особливо сприятливим джерелом харчових волокон і фенольних речовин, демонструючи потенціал для зниження ризику ожиріння, діабету 2 типу та серцево-судинних захворювань [25]. Йому приділяють все більшу увагу в розробці нових харчових продуктів (наприклад, хлібобулочних виробів і сухих сніданків) і дослідженнях функціональних інгредієнтів. Окрім харчових волокон (40–45 %), ПВ також містять значну кількість білка (12–20 %) [26]. Білок ПВ має збалансований за поживністю амінокислотний склад, що містить більше незамінних амінокислот, ніж пшеничне борошно, особливо лізин, гістидин і серин [27]. Оскільки попит на білок рослинного походження продовжує зростати, білок висівок можна використовувати як хороше джерело білка в харчуванні людини.

Незважаючи на високу потенційну поживну цінність білків висівок, вони присутні в формі, яка важко засвоюється [27]. Алейроновий шар є частиною з найбільшим вмістом білка (~23 г/100 г ПВ). Білки, присутні в ПВ, інкапсульовані в алейроновому шарі складною нерозчинною матрицею клітинної стінки (переважно арабіноксиланом) [28], що ускладнює нормальне їх перетравлення та всмоктування в шлунково-кишковому тракті людини навіть у подрібненому вигляді. Неушкоджена клітинна стінка рослини діє як бар'єр, обмежуючи доступність травних ферментів, і визначена як ключовий фактор, що впливає на швидкість травлення та

кількість всмоктаного білка [29]. Для покращення засвоювання білків висівок окремі дослідження були зосереджені на руйнуванні клітинних стінок висівок лужними розчинами з подальшим осадженням білка в ізоелектричній точці для приготування концентратів білка ПВ. Білкові концентрати ПВ мали вищий вміст білка, ніж висівки, і демонстрували чудові функціональні властивості та засвоюваність [25]. Біообробка ПВ молочнокислими бактеріями та ферментами, що руйнують клітинні стінки, є ефективним інструментом для модифікації хімічних та технологічних властивостей білків висівок. Біообробка, особливо з додаванням ферментів, розкладає крохмаль та полісахариди клітинної стінки, солюбілізуючи білки з матриці висівок [28].

Надтонкий помел (мікронізація) – це нова технологія з унікальним потенціалом у виробництві харчових продуктів. Процес мікронізації головним чином змінює структуру частинок (розмір, морфологію та питому поверхню) матеріалу та індукує модифікації реакційної здатності поверхні, фізико-хімічних і функціональних властивостей [30; 31]. Результати досліджень [26] продемонстрували, що процес мікронізації порушує структуру тканини ПВ, зменшує вміст нерозчинної клітковини, покращує індекс розчинності в воді та стабільність дисперсії. Порушення матриці висівкових волокон привело до вивільнення фенольних сполук, які покращили антиоксидантну активність мікронізованих висівок. Крім того, зменшення розміру частинок висівок суттєво покращило екстракцію та засвоюваність білка [32]. Тим не менш, велика кількість алейронових клітин (D 50 = 50 мкм) залишалася в подрібнених висівках, і частина білків (> 20 %) важко вивільнялася з висівок.

У попередніх дослідженнях нами був використаний надтонкий помел соєвого шроту та його використання в технології хрусткого печива. За результатами досліджень реологічних властивостей печива з додаванням різної кількості борошна соєвого шроту надтонкого помелу, показників кольору та органолептичних властивостей доведено, що додавання шроту надтонкого помелу в кількості 15–25 % є оптимальним. Зі збільшенням додавання борошна соєвого шроту вміст харчових волокон у хрусткому печиві збільшувався, тим самим зменшуючи

вміст глютену в тісті та впливаючи на формування глютенної сітки, що призводило до збільшення твердості хрусткого печива. З іншого боку, збільшення вмісту харчових волокон забезпечувало збереження олії в хрусткому печиві, що приводило до зниження твердості продукту. Додавання порошку соєвого шроту мало значний вплив на колір, текстуру та сенсорні властивості хрусткого печива порівняно з контролем. Хрустке печиво з додаванням порошку соєвого шроту в кількості 15–20 % мало хрустку структуру, золотистий колір та приємний соєвий смак [24–36]. Високоєфективною в повному руйнуванні тканини та алейронової клітинної структури висівок для отримання високоякісних ПВ стала техніка ударного млина з повітряним потоком [36]. Можна припустити, що руйнування алейронових клітин цим методом помелу змінить розподіл білків висівок і сприятиме їх вивільненню. Крім того, шлунково-кишковий тракт людини містить численні протеази, які сприяють перетравленню білків і виробленню біологічно активних пептидів і амінокислот [37]. Мікронізовані висівки мають більшу питому поверхню, що може бути більш сприятливим для перетравлення та гідролізу білків висівок пепсином і панкреатином. Таким чином, мікронізовані висівки можуть мати кращу засвоюваність білка *in vitro* та виробляти більше біологічно активних пептидів і амінокислот, що допоможе висівкам як багатфункціональній поживній речовині покращити якість раціону людини.

В ході дослідження впливу помелу на розподіл і профіль білка ПВ, його засвоюваність, гідроліз і функціональну активність під час травлення *in vitro*, доведено, що надтонкий помел ефективно вивільняє білок висівок шляхом руйнування алейронових клітин і додатково покращує його розчинність і екстрагування. Високоподрібнені ПВ (19 мкм) мали вищу перетравність білка (53.1 %) і ступінь гідролізу (12/7 %) порівняно з грубими ПВ (84–1110 мкм). Крім того, травлення в кишківнику сприяло вивільненню вільних амінокислот, головним чином аргініну (16.4 %), тирозину (12.8 %) і фенілаланіну (9.5 %). Гідролізат високодисперсного білка висівок продемонстрував найвищу антиоксидантну активність і інгібіторну активність крохмалевих травних ферментів, що могло полегшити застосування висівок як

багатфункціональної поживної речовини [38].

Дослідження впливу розміру частинок ПВ на якість випікання хліба на пару з використанням середнього або надтонкого помелу під час додавання до пшеничного борошна із низьким/середнім вмістом білка показало, що зменшення розмірів частинок ПВ з ~433 мкм до ~39 мкм шляхом надтонкого помелу мало значний вплив на властивості тіста та якість приготування хліба на пару та відносну кристалічність крохмалю під час зберігання. Водопоглинання, пікова в'язкість, стабільність крохмалю в гарячому гелі та ретроградація були значно збільшені, та час формування тіста значно зменшився, як результат зменшення розміру частинок висівок [39].

Використання субкритичних екстрактів ПВ. Існуючі дослідження екстрактів ПВ, демонструють їхні потужні функціональні властивості, включаючи антиоксидантну та ферменто-інгібуючу активність, підкреслюючи їхній потенціал як природних альтернатив для застосування в харчовій та косметичній промисловостях. Незважаючи на відмінності в методах екстракції, екстракти ПВ постійно демонструють значну присутність фенольних сполук та високу антиоксидантну активність. У харчовій промисловості екстракти ПВ цінуються за їхню поживну цінність, включаючи харчові волокна, білки та біоактивні сполуки, такі як арабіноксилани. Ці сполуки покращують текстуру їжі, стабільність та властивості випічки. Крім того, екстракти ПВ продемонстрували антимікробний потенціал, покращили якість продукції та проявили себе як природні консерванти [40].

Екстракція субкритичною водою (SWE) продемонструвала високу ефективність для вилучення широкого спектру біологічно активних сполук, включаючи РХВ з рослин та харчових матриць [41].

У субкритичній воді постійна іонізація води збільшується, в результаті чого вода легко іонізується на іони водню і гідроксиду, тим самим посилюючи ступінь реакції гідролізу, тому SWE має кілька потенційних переваг, таких як висока ефективність екстракції, короткий час процесу, відсутність залишків органічного розчинника та екологічність.

Доведено, що методи, засновані на субкритичній екстракції, впливають на фізико-хімічні та функціональні властивості

ХВ, їх антиоксидантну та інгібуючу активність [42].

Проведений аналітичний огляд сучасних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності використання ПВ у технологіях хліба, дозволив виділити перспективні напрями цих досліджень: вивчення впливу фракційного складу ПВ на якість тіста та хлібобулочних виробів; використання ПВ надтонкого помелу та екстрактів ПВ, отриманих у субкритичному водному середовищі. Використання в технології хліба як ПВ надтонкого помелу, так і екстрактів ПВ, отриманих у субкритичному водному середовищі, може по-різному впливати на окремі властивості тіста та випеченого хліба (технологічні, реологічні, органолептичні; харчову цінність, антиоксидантні властивості та ін.). Порівняльні дослідження ефективності вищенаведених методів використання ПВ на сьогодні відсутні.

Метою даного дослідження було порівняння ефективності впливу використання ПВ різного фракційного складу в технології хліба пшеничного, ПВ надтонкого помелу та субкритичного екстракту ПВ.

Експериментальна частина

Використана сировина. В дослідженні були використані ПВ, отримані від ТОВ «Агросільпром», що вироблені згідно з ТУ У 15.8-24239651-007:2007 «Добавки дієтичні із насіння, жмихів харчових олійних та зернових культур, висівок. Технічні умови». Показники якості зразків ПВ були визначені в Лабораторії моніторингу якості кормів і сировини інституту кормів та господарства Поділля НААН України: масова частка вологи – 13.08 %; масова частка крохмалю, % у перерахунку на натуральну речовину – 28.52; масова частка крохмалю, % у перерахунку на абсолютно суху речовину – 32.81; % фракції, яка пройшла крізь сито 0.16–15.7 мм; масова частка золи в фракції, яка пройшла крізь сито 0.16 мм, % у перерахунку на натуральну речовину – 1.15; масова частка золи в фракції, яка пройшла крізь сито 0.16 мм, % у перерахунку на абсолютно суху речовину – 1.32.

Робота виконана в Сіньянському сільськогосподарському та лісничому університеті (коледж харчових наук та інженерії) та Полтавському державному аграрному університеті (науково-дослідна лабораторія «Субкритичні технології в

харчових виробництвах» та науково-дослідна лабораторія якості зерна ім. І.М. Жемели).

Використане обладнання. Надтонке подрібнення ПВ проводили на млині надтонкого помелу серії SCM SCM Series Ultrafine Mill (45-5 μ m) SCM800 (General Raymond mill, Китай). Отримання екстрактів ПВ проводили в реакторі високого тиску РВД-02-500 («Uoslab» НВП Укрорганітез, Україна) з об'ємом робочої камери 500 мл у НДЛ «Субкритичні технології у харчових виробництвах» ПДАУ. Для створення необхідних температурних режимів та ротаційного перемішування реагентів у робочій камері використовували магнітну мішалку з підігрівом платформи РІВА -04.3 («Uoslab» НВП Укрорганітез, Україна). Вимірювання розподілу частинок за розмірами виконували на аналізаторі Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, UK) методом лазерного дифракційного аналізу в діапазоні розмірів частинок ПВ 0.01–1500 мкм. Випікання дослідних зразків хліба проводили в науково-дослідній лабораторії якості зерна ім. І.М. Жемели (ПДАУ).

Методика приготування дослідних зразків хліба. Дослідні зразки хліба були приготовані за безопарним способом. Під час випікання хліба було використано основні (борошно, вода, дріжджі та сіль) і додаткові (цукор, жир) інгредієнти. Використано борошно вищого гатунку за ДСТУ 46.004-99 «Борошно пшеничне. Технічні умови». Рецептурний склад контрольного зразка хліба (на 1 кг борошна): вода: 0.6–0.7 л (в залежності від вологості борошна); дріжджі сухі: 0.005 кг; сіль: 0.02 кг; цукор: 0.01 кг; рослинна олія: 0,01 кг. Технологія виготовлення дослідних зразків (контрольних) хліба складалася з наступних основних етапів. Змішували борошно, сіль, цукор та дріжджі (для реактивації сухих дріжджів використовували теплий, 30 °С, 50 %-вий розчин цукру); поступово додавали воду, замішуючи тісто до утворення гладкої, еластичної маси; додавали олію; тісто залишали для бродіння в термостаті з постійною температурою 30 \pm 2 °С і відносною вологістю повітря 75...80 %. Тривалість бродіння тіста до формування – 120 хв. Першу обробку тіста тісто (1.5–2.5 хв) робили після 60, другу – після 90, а третю обробку і формування шматків – після 120 хв бродіння. Під час виготовлення дослідних зразків з ПВ частку борошна (10, 20, 30, 40 %) було замінено на ПВ з різним фракційним

складом. У виготовленні зразків з додаванням екстракту ПВ 10 % борошна було замінено на екстракт ПВ, отриманий за раціональних параметрів екстрагування.

Методика визначення фракційного складу матеріалу. Розподіл частинок за розмірами є важливим критерієм якості досліджуваної сировини. На сьогодні в аналізі фракційного складу тонкодисперсних матеріалів, згідно з ISO 9276-2:2014. Representation of results of particle size analysis. Part 2: Calculation of average particle sizes/diameters and moments from particle size distributions, використовують параметри D10, D50 і D90, що представляють 10-й, 50-й і 90-й проценти загального обсягу відповідно, та які вказують розподіл частинок у різних інтервалах (так звані відсоткові значення). Вони вказують розмір, нижче за який знаходяться 10 %, 50 % або 90 % всіх частинок та відображає ступінь однорідності порошку, який являє собою полідисперсну систему. В наших дослідженнях у якості еквівалентного розміру частинок було використано показник D50, що відповідає визначенню середнього розміру зерна ПВ. У залежності від мети окремих вимірювань використовували ситовий аналіз (комплект Сит лабораторних СЛ-300).

Методика екстрагування. Екстрагування проводили в статичному режимі закритого об'єму робочої камери реактора. Підготовлені для екстрагування наважки ПВ заливали гарячою дистильованою водою (95 ± 1.0 °C) у

лабораторній тарі, перемішували до рівномірного змочування частинок і відразу встановлювали до камери реактору. Екстрагування проводили за сталого надлишкового тиску (5 ± 1 МПа) та постійного перемішування магнітною мішалкою (700 хв⁻¹). Вміст реактору нагрівали термоблоком до цільового значення температури T_i , після витримки протягом заданого часу t , вимикали. Суміш у реакторі охолоджували до температури навколишнього середовища на крижаній бані, після чого її вилучали й відділяли рідкий екстракт від твердого залишку методом вакуумної фільтрації. Відділений рідкий екстракт природнім чином охолоджували до кімнатної температури. Екстракт очищали через мембранний фільтр 0.25 мкм (Dismic-25CS, Advantech Toyo, Токіо, Японія). Висівки екстракти зберігали в холодильнику за 4 °C до аналізу. Отримані екстракти випарювали на роторному випарнику за 40 °C та в подальшому висушували до вмісту вологи 4 ± 0.5 %, пакували в герметичні поліетиленові пакети та зберігали за температури 4 ± 0.5 °C для подальшого використання в дослідженнях.

Методика визначення показників текстури. Дані були згенеровані за допомогою програмного забезпечення Exponent (версія 5.1.2.0), що постачається разом із приладом (рис. 1). Кожне вимірювання було повторено 5 разів.

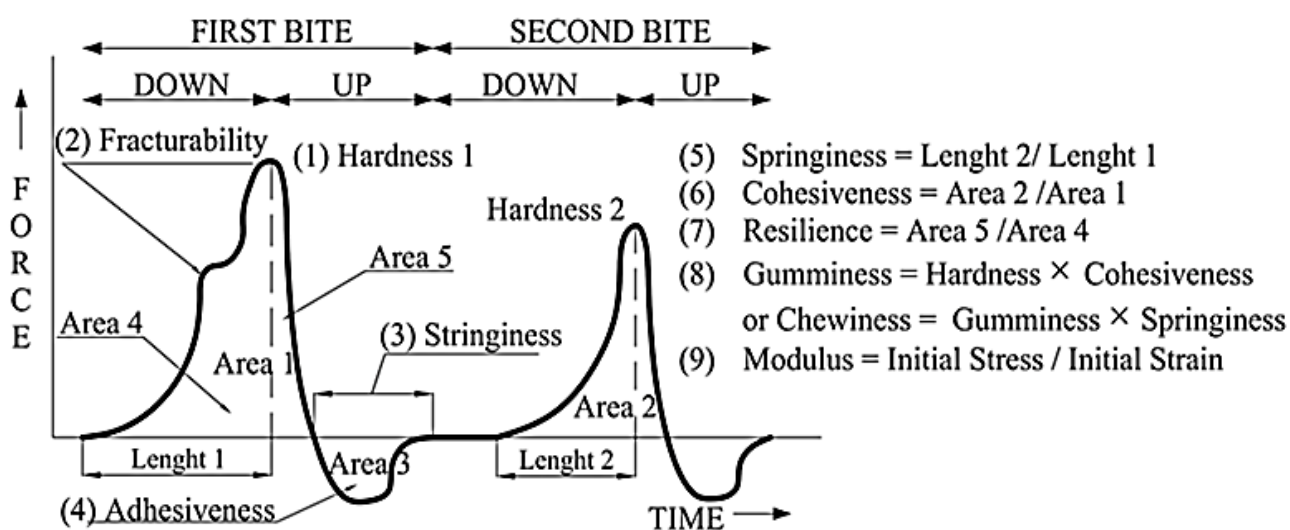


Fig. 1. Interpretation of texture parameters determination by the analytical rheological curve method – Operating instructions texture analyzer TA-XT plus (Stable Micro Systems Ltd., UK) [43].

Рис. 1. Інтерпретація визначення параметрів текстури аналітичним методом реологічної кривої – Інструкція з експлуатації аналізатора текстур TA-XT plus (Stable Micro Systems Ltd., UK) [43]

Визначали такі параметри, як (рис. 1):

1). *Твердість (Hardness)*: це найбільший пік під час першого стиснення.

2). *Пружність (Springiness)*: частка або відношення об'єму стиснутого деформованого зразка до попередньо деформованого стану після усунення деформуєчої сили. Пружність виражається відношенням (довжина 2/довжина 1) висоти відновлення зразка (довжина 2), виміряної під час другого стиснення, до першої деформації стиснення (довжина 1).

3). *Когезія (Cohesiveness)*: Відносний опір досліджуваного зразка другому стисненню після першої деформації стиснення, що показано на кривій (рис. 1) як відношення позитивної роботи (Площа 2/Площа 1) двох стиснень. Це значення представляє загальну роботу, необхідну для подолання тяжіння між двома поверхнями, коли зонд вступає в контакт із зразком.

4). *Клейкість (Gumminess)*: Це значення являє собою енергію, необхідну для пережовування напівтвердої їжі, поки вона не буде готова до ковтання, виражену чисельно через добуток твердості та когезії (твердість × когезія).

Методика визначення вмісту сухих речовин. Вміст сухих речовин (СР) визначали з урахуванням ДСТУ 4855:2007. «Продукція безалкогольної промисловості. Методи визначення сухих речовин». До попередньо зваженого (m_1) плоскодонного бюкса діаметром 50 мм і заввишки близько 30 мм поміщали наважку 2.00 г рідкого екстракту, після чого бюкс із зразком зважували (m_2). Зразок випарювали до сухого стану на водяній бані й висушували за температури 100...105 °С протягом 3 год у сушильній шафі. Зразок охолоджували в ексікаторі над оксидом фосфору або безводним силікагелем і зважували (m_3). Вміст (вихід) сухих речовин C_{CP} зразка рідкого екстракту визначали за формулою:

$$C_{CP} = (m_3 - m_1) / (m_2 - m_1) 100, \% \quad (3)$$

Методика визначення вмісту цукрів. Визначення масової частки цукрів проводили спектрофотометричним методом з використанням глюкози як стандарту [25].

Загальний вміст вуглеводів визначали шляхом віднімання вмісту білка, сирого жиру, золи та вологи від 100.

Методика визначення вмісту білка. Вміст білка в екстракті визначали тестом Лоурі-

Фоліна з використанням бичачої сироватки альбуміну як стандарту. Даний метод заснований на перебігу біуретової реакції (на пептидні зв'язки) та реакції Фоліна (на залишки тирозину і триптофану).

Методика визначення кольору зразків. Колір оцінювали згідно з ISO 11664-2:2007, за допомогою колориметра CR-400 Konica Minolta (Японія) у декартових координатах CIELab, де L^* позначає світлоту (від 0 – чорний до 100 – білий), a^* і b^* представляють протилежні колірні координати, що варіюються від -60 до +60, де негативне a^* є зеленим, а позитивне a^* – червоним, а негативне b^* є синім, а позитивне b^* – жовтим. Параметри були відкалібровані в стандартному білому фарфорі з площею вимірювання діаметром 8 мм, кутом спостереження 10° і джерелом світла D65 з включеним дзеркальним компонентом.

Аналіз вмісту ферулової кислоти. Аналіз фенольних кислот [44] проводили з використанням ВЕРХ-системи Shimadzu (LC-MS 2020, Shimadzu, Японія), оснащеної діодно-матричним детектором (DAD) та колонкою C18 XBridge (46 × 250 мм, 3.5 мкм; Waters, Ірландія). В кожному зразку ПВ визначали вміст ферулової кислоти (ФК), оскільки вона є переважною фенольною кислотою в ПВ, і її часто використовують як індикатор антиоксидантів пшениці [45]. У якості контролю був використаний розчин з концентрацією 1 мг ФК/мл. Екстрагований розчин фільтрували в скляну пробірку об'ємом 2 мл за допомогою мембранного фільтру з порами 0.45 мкм. Використовувалися дві рухомі фази (рухома фаза А: оцтова кислота/Н₂О, 2 : 98, об./об.; рухома фаза В: оцтова кислота/ацетонітрил/Н₂О, 2 : 30 : 68, об./об./об.). ФК у зразках визначали шляхом порівняння з еталоном ФК за часом утримування. Площу піку використовували для розрахунків, а вміст ФК у зразках кількісно визначали на основі відповідних стандартних калібрувальних кривих ФК. Для характеристики піків записували спектри від 200 до 600 нм, а довжина хвилі детектування для визначення ферулової кислоти (ФК) становила 323 нм. Через великий діапазон значень вмісту ФК у зразках борошна та висівок кількість ФК у борошні розраховували за калібрувальною кривою ФК ($y = 51881x - 11642$, $R^2 = 0,9989$) з нижнім діапазоном калібрувальної концентрації ФК 5–50 мкг/мл, а кількість ФК у висівках розраховували за калібрувальною кривою ($y = 50049x + 104$, $R^2 =$

0.9959) з вищим діапазоном калібрувальної концентрації ФК 400–1000 мкг/мл.

Аналіз загального вмісту поліфенолів (ЗВФ). Антиоксидантну активність екстрактів характеризували за допомогою активності поглинання ТРС, АВТС^{•+} та DPPH[•], дотримуючись методів [46; 47] з модифікаціями. Екстрагований розчин (1 мл) змішували з Н₂О (3 мл) та реактивом Фоліна Чокальтеу (1 : 5 Н₂О, 1 мл). Після 3-хвилинної інкубації за кімнатної температури додавали Na₂CO₃ (10 %, 5 мл) та суміш витримували в темряві протягом 30 хв. Поглинання стандарту (галової кислоти) та зразка вимірювали за 725 нм. на УФ-видимий спектрофотометр (UV-VIS спектрофотометр, PD-3000UV, Сайтама, Японія). Результат виражали як мкг еквівалента галової кислоти (ГАЕ)/г, розрахованого за калібрувальною кривою ($y = 1.5719x + 0.0685$, $R^2 = 0,9961$).

Активність поглинання DPPH[•]. Стандарт (ВНТ) або екстрагований розчин (2 мл) змішували зі свіжоприготованим розчином DPPH[•] (0.2 мМ, 2 мл). Поглинання суміші вимірювали за 517 нм після інкубації в темряві протягом 30 хв. Активність поглинання DPPH[•] виражали у мкмоль еквівалента бутильованого гідрокситолуолу; ВНТ (ВНТЕ)/г, розрахованого за калібрувальною кривою ($y = -0.3259x + 0.6588$, $R^2 = 0.9991$).

Активність поглинання АВТС^{•+}. Робочий розчин АВТС щодо вільних радикалів (АВТС^{•+}) готували відповідно до процедури [48]. Потім стандартний (тролокс) або екстрагований розчин (0.4 мл) змішували з робочим розчином АВТС^{•+} (3 мл) та інкубували протягом 30 хв у темряві. Потім визначали активність поглинання АВТС^{•+} за 734 нм та виражали в мкмоль еквівалента тролоксу (ТЕ)/г, розрахованого за калібрувальною кривою ($y = -3.0971x + 0.715$, $R^2 = 0.9962$).

Усі досліді проводили в трьох примірниках і виражали як ЕС50 – концентрація екстракту, що забезпечує 50 % максимальної антиоксидантної активності.

Як результат аналізів приймали середнє арифметичне значення отриманих величин показника. Статистичну оцінку отриманих результатів виконували із довірчим інтервалом $p = 0.95$. Оцінку відтворюваності повторних дослідів виконували перевіркою однорідності дисперсій за G-критерієм Кохрена. Придатність дослідних даних у паралельних дослідах перевіряли за відповідністю відхилень результатів нормальному розподілу за t-критерієм Стьюдента.

Етапи проведення експериментальних досліджень представлено на рис. 2.

Результати та їх обговорення

Під час визначення раціональних параметрів субкритичного екстрагування, що забезпечать максимальне вилучення біологічно активних речовин, були проведені дослідження, в яких рідкі водні екстракти були отримані на лабораторній установці на базі реактора високого тиску з варіюванням параметрів у наступних діапазонах: температура – 140–180 °С; час – 3–18 хв; розмір фракції – 0.25±0.05; 0.50±0.08 та 0.75±0.1 мм, гідромодуль – 1 : 10, 1 : 15, 1 : 20, 1 : 25 та тиск 5 МПа. Визначений вплив параметрів процесу екстрагування на досліджувані цільові речовини та встановлені значення параметрів (гідромодуль 1 : 20, розмір фракції ПВ 0.5 мм, тиск 5 МПа, температура – 170 °С, тривалість екстрагування 12.0–14.9 хв. залежно від цільової речовини), за яких досягаються максимальні значення зазначених показників: вміст цукрів – 317.9 мг/г СР; білку – 184.2 мг/г СР; загальний вміст поліфенолів – 31.2 мг/г СР та активність поглинання радикалів 0.162 ммоль/г СР. Сухі екстракти було отримано шляхом послідовного застосування вакуумно-ротаційного випарника та сушіння при 95 °С у сушильній шафі [49]. Отримані нами результати узгоджуються з даними, наведеними в роботі [50].

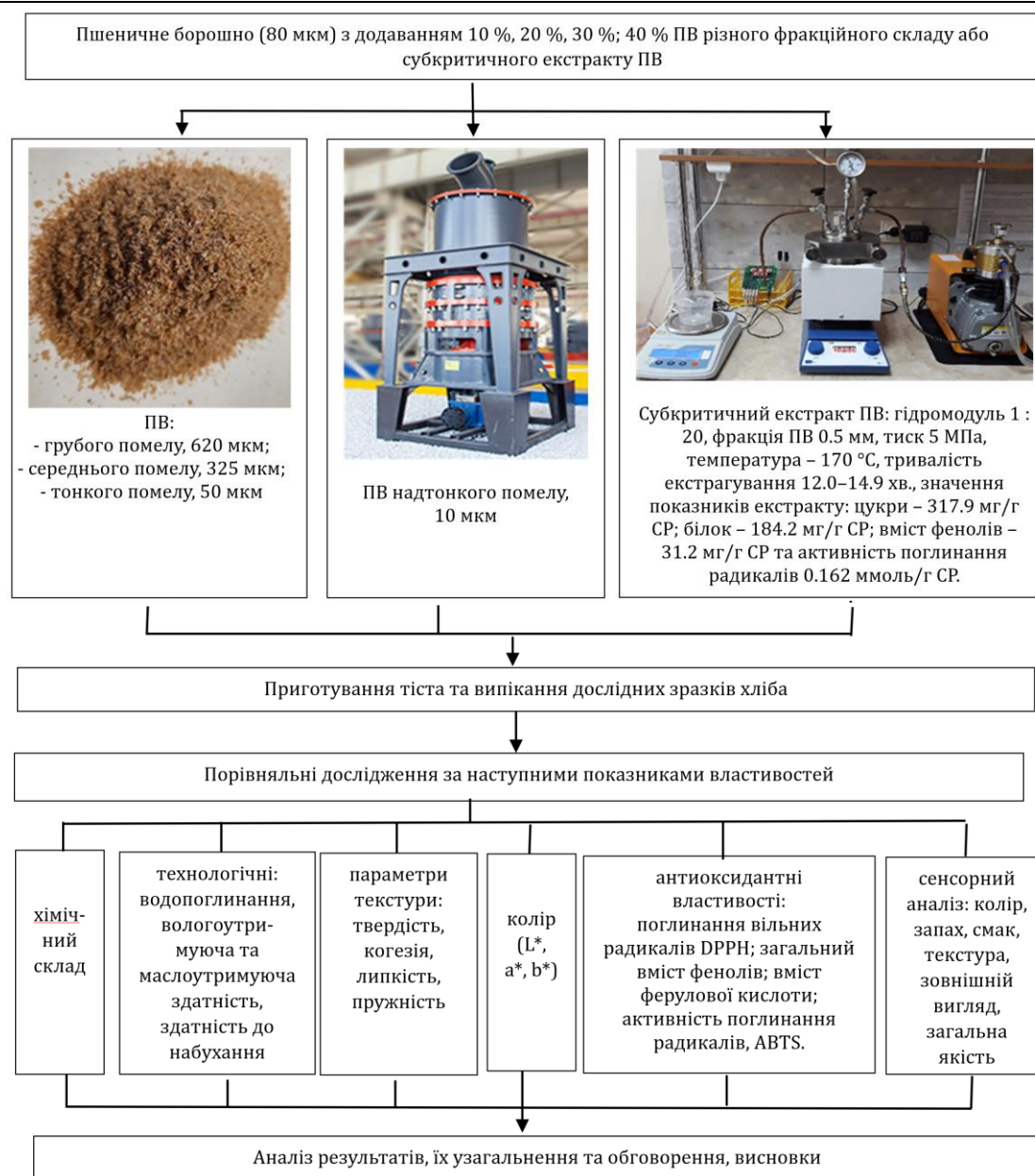


Fig. 2. Stages of conducting experimental research
Рис. 2. Етапи проведення експериментальних досліджень

Аналіз хімічного складу зразків хліба з ПВ різного фракційного складу та в різній їх кількості (10–40 %) дозволив визначити, що зменшення розміру частинок доданих висівок призводить до зменшення вмісту води, клітковини, білка, жиру та золи та збільшення вмісту вуглеводів (табл. 1).

Це пов'язано з тим, що частинки з меншими розмірами розташовані в пшеничному зерні ближче до ендосперму і отже містять менше клітковини, жиру, білка і золи, ніж зовнішні висівкові шари. Аналогічні факти були повідомлені в роботі [51]. Збільшення

кількості доданих ПВ призвело до аналогічних змін властивостей хліба. Так, за зростання кількості доданих ПВ фракції 50 мкм з 10 до 40 % у порівнянні з контрольним зразком хліба без додавання ПВ (ПВ фракції 80 мкм з вмістом води 3.42 мкм), вміст води збільшився з 5.33 % до 8.41 % відповідно. Суттєво збільшився вміст золи: за наявності 0.66 % її у контролі (без додавання ПВ), зразки хліба з 10 % ПВ містили 1.96 % золи; 20 % – 2.77 %; 30 % – 3.97 % та за 40 % ПВ – 4.03 % відповідно.

Chemical composition of wheat bran bread

Таблиця 1

Хімічний склад хліба з пшеничними висівками

Samples	Particle size, μm	Moisture, (%)	Crude Fat, (%)	Crude Fiber, (%)	Ash, (%)	Protein, (%)	Carbohydrates, (%)
Control, 0% WB	80	3.42±0.33	2.52±0.4	1.18±0.27	0.66±0.23	10.41±1.1	81.81±5.3
10% WB	620	5.51±0.32	4.10±0.55	3.88±0.21	2.20±0.24	7.19±1.0	77.12±5.0
	325	5.48±0.27	3.87±0.42	3.39±0.25	2.11±0.18	6.94±0.6	78.21±5.1
	50	5.33±0.28	3.62±0.58	3.07±0.29	1.96±0.21	6.75±0.5	79.27±5.4
	10	5.30±0.22	3.24±0.29	2.95±0.18	1.68±0.19	6.39±0.4	80.44±4.6
20% WB	620	7.28±0.49	5.01±0.45	6.39±0.69	2.99±0.22	5.49±0.5	72.84±4.2
	325	7.18±0.33	4.91±0.38	6.11±0.31	2.97±0.18	5.45±0.6	73.38±4.9
	50	7.12±0.28	4.46±0.41	5.65±0.43	2.77±0.18	5.21±0.2	74.79±5.1
	10	7.03±0.24	4.38±0.33	5.21±0.26	2.67±0.13	5.14±0.6	75.57±4.6
30% WB	620	8.32±0.34	5.99±0.41	9.75±0.24	4.12±0.33	4.11±0.5	67.71±3.1
	325	8.21±0.29	5.82±0.61	9.38±0.65	4.02±0.27	3.92±0.6	68.65±5.1
	50	8.17±0.21	5.71±0.46	8.55±0.57	3.97±0.22	3.88±0.3	69.72±5.0
	10	8.02±0.30	5.67±0.31	7.69±0.27	3.82±0.23	3.73±0.5	71.07±5.2
40% WB	620	8.82±0.32	6.52±0.29	10.01±0.51	4.31±0.29	3.37±0.8	66.20±5.3
	325	8.65±0.21	6.49±0.31	9.34±0.33	4.12±0.20	3.29±0.4	68.11±4.8
	50	8.41±0.22	6.47±0.28	9.11±0.21	4.03±0.21	3.11±0.4	68.87±4.6
	10	8.39±0.19	6.41±0.29	8.99±0.22	3.91±0.22	3.08±0.2	69.22±5.0
Extract, WB	-	3.96±0.18	2.89±0.22	1.43±0.23	1.02±0.21	8.2±0.2	82.50±4.9

Випікання хліба з додаванням екстракту ПВ, отриманого методом субкритичного екстрагування, призвело до певних змін його хімічного складу в порівнянні з контрольним зразком: зростання вмісту вологи з 3.42 до 3.96 %; жиру – з 2.52 до 2.89 %; клітковини – з 1.18 до 1.43 %; золи – з 0.66 до 1,02% та зменшення вмісту білку з 10,41 до 8,2%.

Функціональні властивості ПВ можуть впливати на поведінку харчових систем під час переробки та зберігання. Результати досліджень функціональних властивостей дослідних зразків наведено на рис. 3. Одними з важливих показників тіста є водопоглинальна здатність (ВПЗ) – кількість води, необхідної для отримання тіста консистенції, еквівалентної 500 од. фаринографа та водоутримуюча здатність (ВУЗ) – спроможність зберігати воду в процесі замісу тіста без утворення проблеми липкості внаслідок втрати води біополімерами борошна. Відомо, що чим більше показник ВПЗ та вище ВУЗ, тим більший вихід продукції, довші терміни зберігання, тим краще

економічні показники хлібопекарського підприємства.

Визначення ВПЗ суміші борошна і ПВ (рис. 3) показали, що підвищення вмісту висівок і розміру їх частинок сприяв збільшенню даного показника. Як приклад, водопоглинання збільшилося з 59.9 % (контроль) до 67.2 % для зразків, що містять 30 % висівок з розміром частинок 620 мкм. Велика кількість гідроксильних груп гідроколідів висівок (білки, целюлоза та інші полісахариди) мають більшу взаємодію з водою через водневі зв'язки. Вище значення водопоглинання висівок більшого розміру може бути пов'язано з наявністю більшої кількості волокон матеріалів у цих частинках, які сприяють засвоєнню вологи.

Аналіз отриманих результатів показав, що, за незмінного розміру ПВ водопоглинальна здатність значно зростала зі збільшенням концентрації висівок. За заданої концентрації висівок значення ВПЗ збільшувалося зі зменшенням розміру частинок висівок.

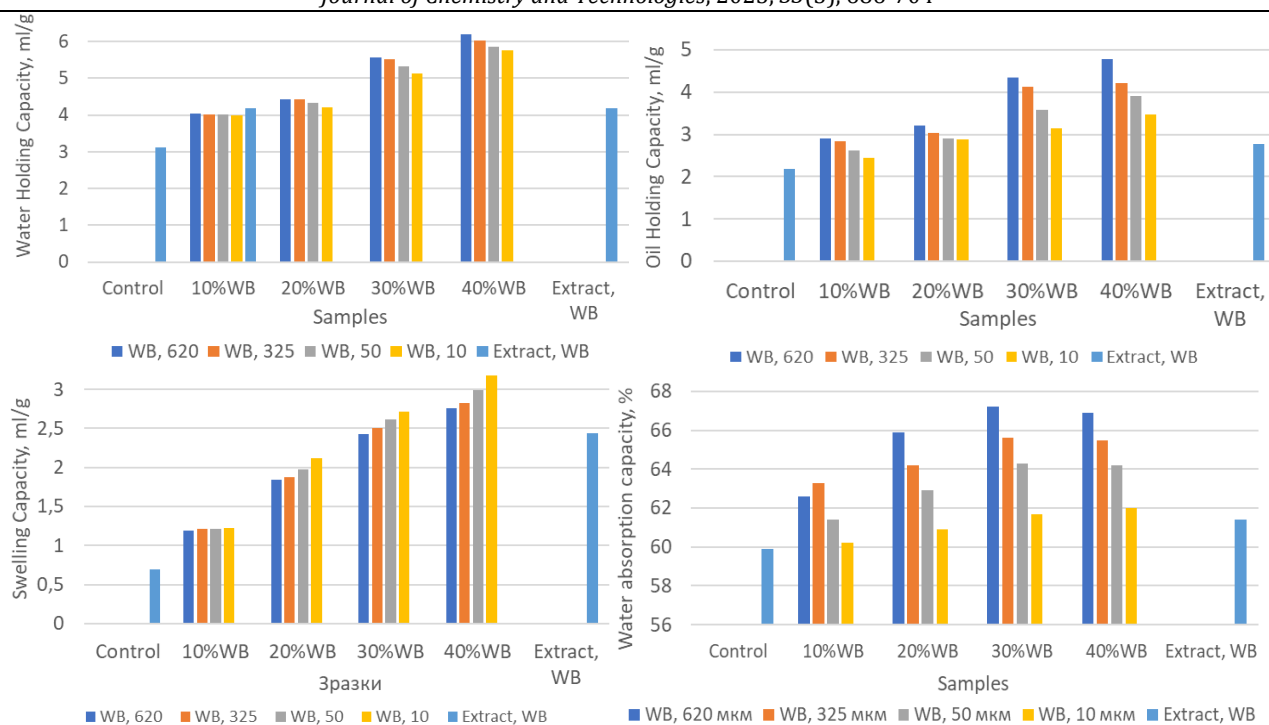


Fig. 3. Water absorption capacity of mill streams by quality groups for different mill plants

Рис. 3. Водопоглинання борошна як функція кількості та розміру частинок доданих ПВ або їх екстракту

Враховуючи гідратаційні та гігроскопічні властивості ПВ, тенденція до зростання ВПЗ з мікронізацією висівків за заданої концентрації може бути пояснена тим, що певна кількість відносно міцно зв'язаної води в нанопорах у висівках, з урахуванням капілярних сил зберігається і зв'язується з молекулами полісахаридів через водневий зв'язок [52]. Поясненням збільшення водопоглинаючої здатності тіста з мікронізованими висівками може бути і більша кількість гідроксильних груп у тонковолокнистих елементах, і їх більша взаємодія з водою через водневі зв'язки [53]. Крім того, більша площа поверхні мікронізованих ПВ, що були додані до борошна, сприяли збільшенню водопоглинання тістовою системою в цілому. Подібний результат збільшення водопоглинаючої здатності спостерігали, коли цілнзернове борошно подрібнювали (середній розмір від 125 мкм до 43 мкм) [54]. До того ж, пошкоджений крохмаль може змінити поверхневі властивості своїх гранул шляхом збільшення гідрофільних зв'язків, що поглинають більше води, ніж непошкоджений крохмаль [55], і це також може сприяти підвищенню водопоглинаючої здатності. Тому кількість води, яка використовується для приготування хліба, повинна бути збільшена в ході збагачення тіста висівками надтонкого помелу. Таким чином, поглинання води було

максимальним у тісті з більшим вмістом ПВ та більшим додаванням дрібних висівків (надтонкий помел, 10 мкм).

Щоб інтерпретувати цю тенденцію, слід враховувати деякі фактори. Пошкоджені гранули крохмалю можуть поглинути більше води, ніж непошкоджені гранули крохмалю [55], що мало б збільшити ВУЗ мікронізованих висівків. Тому слід враховувати важливу роль утримання води в їх капілярах щодо зв'язування води [56]. Автори роботи [57] продемонстрували, що під час тесту ВУЗ загальне поглинання води висівками здебільшого включало молекулярне зв'язування води, заповнення нанопор та мікропор у висівках та накопичення води між частинками. Вода, утримувана двома останніми типами сил, була відносно слабкозв'язаною [58]. Враховуючи ці фактори, можна зробити висновок, що мікронізація висівків призвела до втрати мікропор, що стало результатом руйнування та сегрегації тканин висівків, а також зменшення порожнистого простору між частинками, що зрештою призводить до нижчого значення ВУЗ.

За даними [59], жирутримуюча здатність впливає на консистенцію та смак продуктів, і збільшення даного показника в збагачених ПВ зразках хліба можна пояснити наявністю гідрофобних груп або полярних амінокислот на поверхні білка.

Аналіз профілю текстури хліба. Результати аналізу профілю текстури наведені на рис. 4. Додавання ПВ у рецептурний склад хліба

істотно вплинули на його текстурні властивості.

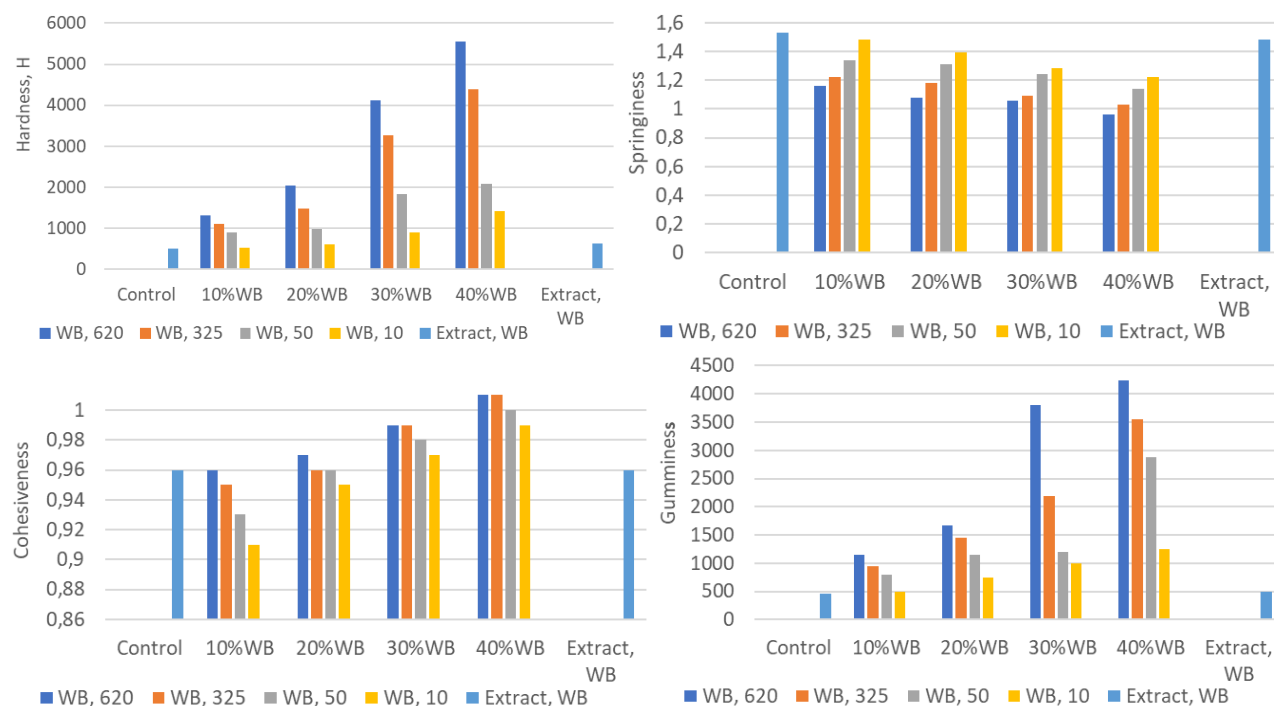


Fig. 4. Texture parameters of the studied bread samples
Рис. 4. Параметри текстури досліджуваних зразків хліба

Твердість зразків монотонно збільшувалася зі збільшенням розміру фракції ПВ та кількості доданих ПВ. За значення цього показника для контрольного зразка 451 ± 24 та під час додавання ПВ620–ПВ50 і збільшенні кількості внесених ПВ з 10 до 40 %, твєдрість зростала в 4.25–4.33 рази; а водночас за додавання ПВ надтонкого помелу (ПВ10) збільшення склало лише 2.7 рази та за додавання екстракту ПВ – лише 1.03 рази.

Значення показника когезії (у контролі – 0.96 ± 0.11) також монотонно підвищувалося зі збільшенням кількості доданих ПВ (ПВ620 – у 1.05 рази; ПВ50 – у 1.07 рази та ПВ10 – у 1.08 рази відповідно), але зменшувалося після зменшення розміру фракції ПВ. Під час додавання ПВ надтонкого помелу в кількості 20–30 % та екстракту ПВ, когезія практично співпадала з когезією контрольного зразка.

Збільшення кількості доданих ПВ з 10 до 40 % призвело до збільшення показника липкості. Так, за його значення у 462 ± 48 од. для контрольного зразка, після використання ПВ620 цей показник збільшився у 2.48 (10 %) до 9.1 (40 % вмісту). Використання ПВ надтонкого помелу (ПВ10) призвело до підвищення даного показника в 1.08 та 2.7 разів відповідно. Найменший вплив на

показник липкості мало додавання екстракту ПВ: збільшення даного показника склало лише 1.02 од.

Пружність контрольного зразка складає 1.53 ± 0.17 , але за збільшення кількості доданих ПВ620 зменшилася до 1.16 ± 0.1 (10 % ПВ) – 0.96 ± 0.1 (40 %). Використання ПВ10 та екстракту ПВ забезпечило пружність зразків 1.48 ± 0.2 (10 % ПВ), 1.22 ± 0.2 (40 % вмісту ПВ) та 1.48 ± 0.2 (за додавання екстракту ПВ).

Збільшення твердості зразків може бути пояснено присутністю амілози та амілопектинової матриці, яка сприяє формуванню загальної текстури хліба [60]. У роботі [61] було пояснено, що твердість хліба зумовлена взаємодією між глютенем і волокнами матеріалів. За даними [62], взаємодія між желатинізованим крохмалем і клейковиною тіста, які сприяють утворенню тіста більш еластичного, після випікання може утворюватися суцільна губчаста структура хліба. Тому висока пружність може бути пояснена розподілом структури клейковини в зразках хліба, збагачених ПВ. Менша кількість глютену призводить до зниження здатності утримувати гази, які сприяли зниженню еластичності хліба [63].

Антиоксидантні властивості хліба. У нашому дослідженні для оцінки антиоксидантних властивостей

досліджуваних зразків хліба ми обрали різні методи визначення антиоксидантної активності, які доповнюють один одного.

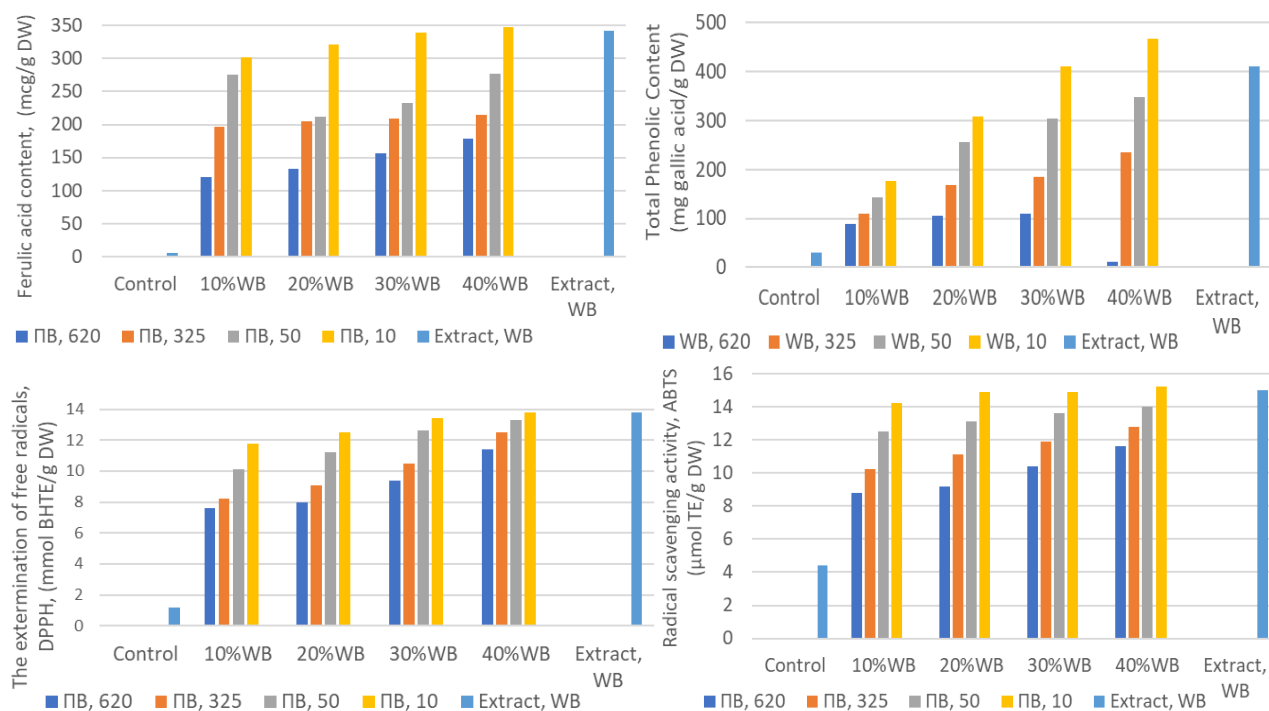


Fig. 5. Antioxidant properties of bread samples
Рис. 5. Антиоксидантні властивості зразків хліба

Як показано на рис. 5, ПВ продемонстрували значно сильнішу антиоксидантну активність, ніж борошно. Це очікувалося, оскільки антиоксидантна активність пшениці може бути пов'язана з її фенольними сполуками, які переважно присутні в висівках [64]. Оскільки ферулова кислота (ФК) є переважною частиною (складовою?) в складі поліфенольних сполук ПВ, її часто використовують як індикатор антиоксидантної активності [45]. Збільшення активності поглинання ЗВФ, ABTS^{•+} та DPPH• приблизно в 4.0, 1.6 та 1.7 рази відповідно після додавання ПВ10 може бути результатом збільшення вивільнення фенольних кислот після мікронізації ПВ.

Зазвичай ПВ складаються з окремих шарів з індивідуальною товщиною [66]: шар перикарпію товщиною 30–55 мкм, шар насінневої оболонки 5–8 мкм, шар нуцелярного епідермісу 15–20 мкм та шар алейрону до 65 мкм. Таким чином, відсоток частинок із розміром менше 65 мкм можна розглядати як показник пошкодження, зокрема, найглибших алейронових клітин. Крім того повідомлялося, що антиоксиданти, включаючи фенольні кислоти, концентруються в алейроновій фракції ПВ

[44]. Таким чином, мікронізація ПВ стимулювала руйнування алейронового шару, що привело до вивільнення фенольних кислот, зрештою, підвищуючи їх антиоксидантну активність (активність поглинання радикалів DPPH та ABTS). З іншого боку, оскільки фенольні кислоти, такі як ФК, можуть бути ковалентно пов'язані з галловою кислотою [66], часткове розщеплення ковалентних зв'язків всередині молекул галлової кислоти в висівках під час інтенсивного подрібнення [67] також може сприяти утворенню фенольних сполук у вільній формі. Це свідчить про позитивний вплив надтонкого подрібнення на антиоксидантні властивості ПВ, що вказує на їх перспективне застосування в виробництві функціональних харчових продуктів. Включення ПВ у рецептуру хліба привело до збільшення загального вмісту фенолів. Хліб, що містив 40 % ПВ, мав найвищий вміст фенолів та найвищі антиоксидантні властивості в порівнянні з іншими зразками і контрольним зразком хліба. Наведені результати узгоджуються з [67], де виявлено максимальну радикальну DPPH активність ПВ у 70 % за умови використання етанольного екстракту порівняно з метанолом і ацетоновим екстрактом. Інші дослідження –

[68] – також визначили поглинання вільних радикалів у ПВ подібно до даного дослідження. За даними [69] висівкові шари мають найвищий рівень загального вмісту фенолів, та антиоксидантна активність має різні дані для висівок і цільного зерна різних сортів пшениці. Продукти реакції Майяра, що утворюються під час випікання хліба, також

можуть діяти як антиоксиданти та поглинати вільні радикали, що, як наслідок, сприяє посиленню антиоксидантної активності хліба [70].

Вимірювання кольору хліба. Результати вимірювання кольору хлібної скоринки хліба, випеченого з додаванням ПВ різної фракції та екстракту ПВ, наведені у табл. 2.

Table 2

Crust color indicators of bread prepared with the addition of PV of different fractions and PV extract

Таблиця 2

Показники кольору хлібної скоринки хліба, приготованого з додаванням ПВ різної фракції та екстракту ПВ

Samples	Particle size, μm	L^*	a^*	b^*
Control	80	79.29±6.24	+1.135±0.8	+13.01±2.12
10 % WB	620	61.42±4.32	+3.196±0.2	+20.79±3.02
	325	62.2±4.02	+2.14±0.19	+22.01±2.01
	50	63.3±3.98	+1.99±0.14	+22.11±2.13
	10	65.1±4.11	+1.52±0.46	+22.84±1.99
20 % WB	620	54.92±4.28	+6.57±0.8	+25.27±3.83
	325	55.31±3.44	+6.01±0.47	+26.11±3.11
	50	56.07±4.02	+4.22±0.33	+27.16±2.78
	10	57.45±3.81	+3.21±0.24	+27.56±2.91
30 % WB	620	42.43±3.37	+10.63±1.37	+35.12±5.37
	325	42.99±3.34	+9.03±0.78	+36.54±4.12
	50	44.62±2.99	+7.98±1.18	+37.11±3.88
	10	45.29±3.17	+5.04±0.97	+39.03±3.94
40 % WB	620	28.33±3.34	14.02±0.58	42.17±2.99
	325	29.15±2.89	+10.32±0.33	+43.22±3.79
	50	33.45±3.18	+8.12±0.20	+44.91±3.44
	10	33.17±2.98	+8.98±0.51	+44.22±2.96
Extract, WB	-	63.56±4.02	+3.99±0.18	+19.97±1.96

Вплив додавання ПВ на колір хліба (скоринки та м'якушки) призвів до значних змін всіх оцінюваних параметрів кольору. Найбільший вплив на показник світлості L^* мала кількість доданих ПВ незалежно від їх фракційного складу, що призвело до потемніння дослідних зразків. Так, за значення L^* (79.29) для контрольного зразка, дослідні зразки за додавання 10 %, 20 %, 30 % та 40 % ПВ мали наступні середні (без урахування фракції ПВ) значення L^* : 63.23; 55.94; 43.83; 31.02 відповідно. Фракційний склад ПВ мав менший вплив на світлість скоринки хліба: після зменшення фракції з 620 мкм до 50 мкм показник світлості L^* зменшився в середньому на 3.45 одиниці світлості.

Зменшення фракції до 10 мкм (надтонкий помел) не призвело до подальшого потемніння скоринки хліба. Світлість зразків хліба L^* з додаванням субкритичного екстракту ПВ призвела до незначного потемніння зразків (з 79.29 до 63.56), що подібно до світлості зразків з 10 % ПВ фракції 10–50 мкм.

Почервоніння скоринки (a^*) і значення показника жовтизи (b^*) значно зросли з

додавання ПВ на всіх рівнях заміни. Як і в випадку з показником світлості зразків, розмір фракції мав більший вплив на значення показників a^* та b^* в порівнянні з впливом фракційного складу в межах окремого відсотка доданих ПВ.

Таким чином, на основі представлених результатів було виявлено, що збільшення розміру частинок і рівня доданих ПВ призвели до темнішого (менше значення L^*), більш червонуватого і менш жовтуватого кольору скоринки. Це може бути пов'язано з наявністю темних пігментів у доданих висівках, що стає більш помітним за збільшення розміру фракції та більшому відсотку внесених ПВ. Реакції Майяра та карамелізація під час випікання тіста є основними причини утворення коричневого кольору скоринки. Основними елементами, необхідними для цих реакцій, є амінокислоти і відновлюючи цукри, яких багато в ПВ. Таким чином, включення висівок може посилювати ці реакції, що призводить до темнішого кольору скоринки.

Отримані нами результати узгоджуються з даними, наведеними в роботі [71]. Додавання висівок грубого помелу призвело до

зменшення об'єму та темнішого кольору скоринки хліба порівняно з додаванням дрібних висівок. Додавання грубих висівок призвело до збільшення вмісту нерозчинних харчових волокон, а додавання дрібних висівок привело до збільшення вмісту розчинних харчових волокон. Додавання дрібних висівок покращило функціональні властивості хліба більше, ніж додавання грубих висівок. Крім того, було встановлено, що додавання висівок сприяло поліпшенню поживних властивостей хліба.

Органолептична оцінка. Результати органолептичного оцінювання досліджуваних зразків хліба наведено на рис. 6. Сенсорне

оцінювання було проведено експертною групою (7 експертів), яка була сформована з представників хлібокомбінатів, споживачів, фахівців з експертизи якості продуктів харчування за баловою методикою.

Сенсорний аналіз за кольором, ароматом, смаком, текстурою, зовнішнім виглядом та загальною прийнятністю зразків хліба підсумував середні бали сенсорної оцінки за 9-бальною шкалою. Результати попереднього оцінювання узгодженості думок експертів з використанням коефіцієнта конкордації ($W = 0.893$) були використані в якості обґрунтування достовірності отриманих результатів.

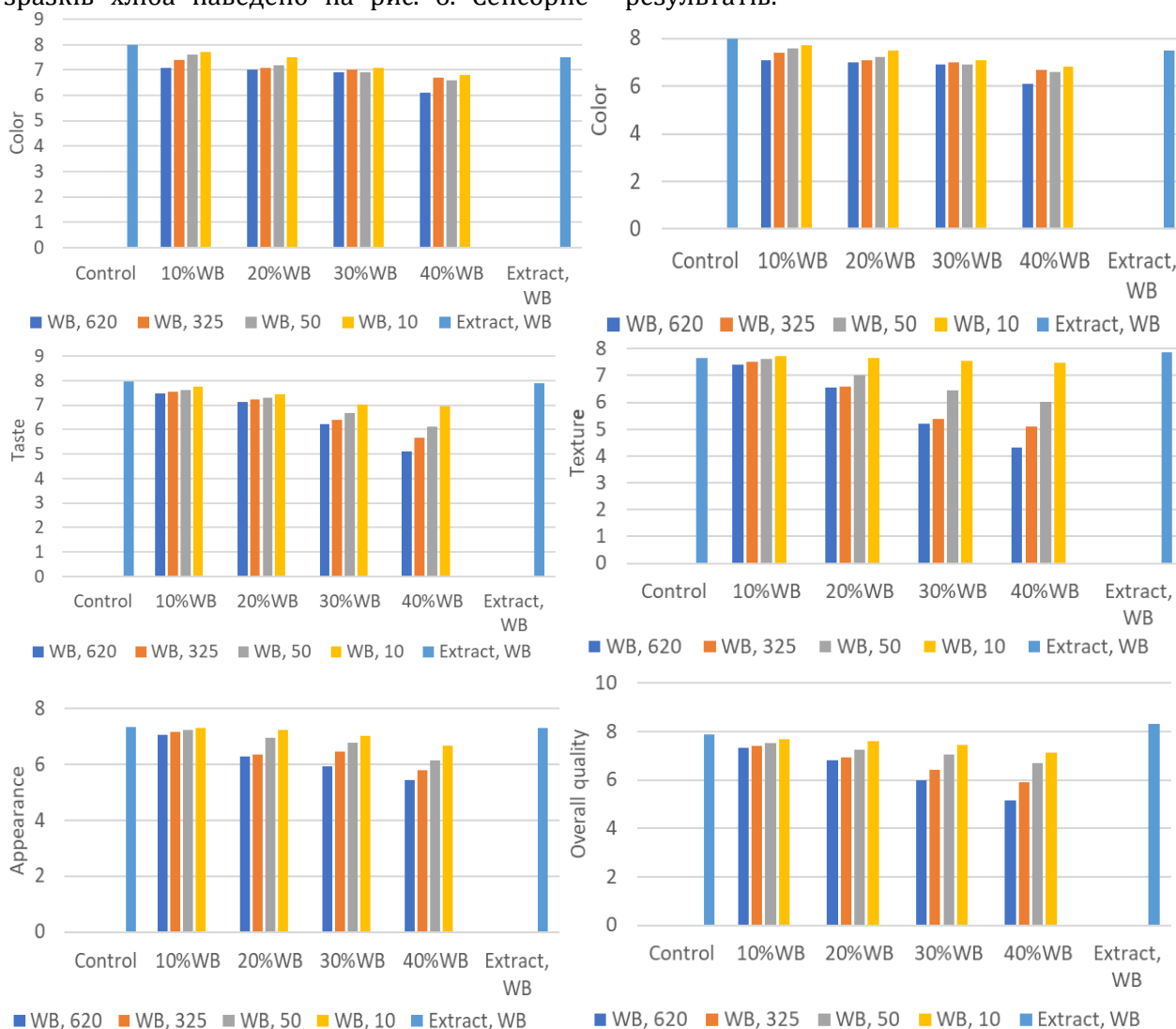


Fig. 6. Results of organoleptic evaluation of the tested bread samples
Рис. 6. Результати органолептичного оцінювання досліджуваних зразків хліба

Як видно, заміна 10–40 % ПВ мала значний вплив на сенсорні властивості та загальну прийнятність зразків хліба. Для споживачів колір хліба є одним із важливих факторів сенсорної оцінки їхнього сприйняття хліба. Додавання ПВ призвело до темнішого кольору

та щільнішої текстури, що на рівні 20 % ПВ здається прийнятним для споживачів (табл. 2). Однак збільшення включення ПВ до 40 %, негативно вплинуло на загальну прийнятність хліба споживачами. Середні бали (оцінки?) смаку хліба були значно нижчими за 30 % та

40 % доданих ПВ порівняно з контрольним зразком хліба, який показав, що додавання ПВ більше 20 % негативно впливає на кінцевий продукт з точки зору смаку. Як показано на рис. 6, аналогічна тенденція спостерігалася для показників аромату, текстури та зовнішнього вигляду. Результати оцінювання текстури хліба корелюють із результатами визначення твердості зразків: збільшення вмісту ПВ у рецептурі може призвести до збільшення твердості хліба та погіршення сенсорних оцінок його текстури.

В роботі [73] повідомили про сенсорний аналіз хліба з ПВ з точки зору кольору, текстури, смаку, аромату та загальної прийнятності хліба; значення показників цих властивостей також знижувалися зі збільшенням кількості доданих ПВ, що корелює з результатами нашого дослідження.

Висновки

Узагальнення отриманих результатів дозволило дійти висновку, що збагачення пшеничного хліба ПВ різного фракційного складу, надтонкого помелу або їх субкритичного екстракту підвищує його функціональні властивості. Проте, використання ПВ надтонкого помелу або субкритичного екстракту дозволило отримати найвищі позитивні ефекти. За результатами органолептичного оцінювання показник хліба з екстрактом ПВ отримав вищі бали в порівнянні з контролем. У цілому, додавання ПВ до рецептурного складу пшеничного хліба покращило його технологічні властивості (водопоглинання, вологоутримуюча та жирутримуюча здатність, здатність до набухання) та суттєво змінило структуру хліба: твердість хліба збільшується за збільшення фракції ПВ, та найкращі результати були отримані під час використання екстракту ПВ та ПВ10. Пружність хліба зменшувалася зі збільшенням кількості доданих ПВ та крупності їх фракції, але практично не зменшилася за

використання екстракту ПВ. Когезія та липкість аналогічним чином збільшувалися, але використання екстрактів ПВ дозволило отримати показники, наближені до їх значень у контрольному зразку. Збільшення розміру частинок і рівня доданих ПВ призвели до темнішого (менші значення L^*), більш червонуватого і менш жовтуватого кольору скоринки, але використання екстракту ПВ привело до мінімальних змін кольору хліба.

Використання ПВ значно підсилило антиоксидантну активність зразків хліба, що може бути пов'язане з фенольними сполуками, які переважно присутні в висівках, і в першу чергу, – з феруловою кислотою. За результатами органолептичного оцінювання дослідних зразків хліба встановлено, що всі зразки були прийнятними для споживачів, але найвищі бали отримали зразки з додавання екстракту ПВ та ПВ10 у кількості до 30 %.

Спираючись на результати досліджень зробили висновок, що ефективність впливу використання ПВ різного фракційного складу в технології хліба пшеничного, ПВ надтонкого помелу та субкритичного екстракту ПВ має наступну послідовність: субкритичний екстракт ПВ > ПВ10 > ПВ50 > ПВ325 > ПВ620. За умови збагачування пшеничного хліба ПВ та використанні ПВ10 та ПВ50 кількість доданих ПВ може становити до 30 %; за умови використання ПВ фракції 325 та 620 мм кількість доданих ПВ (враховуючи органолептичні властивості зразків хліба) може становити до 20 %.

Отримані результати можна використати для удосконалення технології пшеничного хліба функціонального призначення та подальшого використання в галузі хлібопечення. Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на розробки технологій інших видів хлібопродуктів та дослідження реологічних властивостей хліба на окремих етапах технології тіста різних сортів хлібобулочних виробів.

References

- [1] Pomeranz, Y., Shogren, M.D., Finney, K.F., Bechtel, D.B. (1977). Fiber in breadmaking Effects on functional properties. *Cereal Chemistry* 54(1), 25e41.
- [2] Nelles, E.M., Randall, P.G., Taylor, J.R.N. (1998). Improvement of brown bread quality by prehydration treatment and cultivar selection of bran. *Cereal Chemistry* 75(4), 536e540. <https://doi.org/10.1094/CHEM.1998.75.4.536>.
- [3] Rouzaud-Sánchez, O., Pavlovich-Abril, A., Salazar-García, M.G., Robles-Sánchez R.M., Vidal-Quintanar R.L. (2022) Multivariate analysis to select chemical compounds and rheological parameters as predictors of bread quality: interaction of wheat genotype and particle size of fine bran. *J Food Sci Technol* 59, 2694–2704. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05290-3>.
- [4] Jing-Kun Yan, Li-Xia Wu, Wu-Dan Cai, Gao-Sheng Xiao, Yuqing Duan, Haihui Zhang. (2019) Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran. *Food Chemistry*. 298(15) 124987. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124987>.
- [5] Mann, J. I., Cummings, J. H. (2009). Possible implications for health of the different definitions of dietary fibre.

- Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 19, 226–229.
<https://doi.org/10.1016/j.numecd.2009.02.002>.
- [6] Chawla, R., Patil, G. R. (2010). Soluble dietary fiber. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 178–196. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00099.x>.
- [7] Cui, S. W., Wu, Y., Ding, H. H. (2013). *The range of dietary fibre ingredients and a comparison of their technical functionality*. In J. A. Delcour, K. Poutanen (Eds.). *Fibre-rich and wholegrain foods: Improving quality*, FL: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095787.1.96>.
- [8] Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C., Attia, H. (2011). Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry*, 124, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.077>.
- [9] Zhang, Z., Smith, C., Li, W. (2014). Extraction and modification technology of arabinoxylans from cereal by products: A critical review. *Food Research International*, 65, 423–436. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.068>.
- [10] Li, Q., Liu, R., Wu, T., Zhang, M. (2017). Aggregation and rheological behavior of soluble dietary fibers from wheat bran. *Food Research International*, 102, 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.064>.
- [11] Yan, X., Ye, R., Chen, Y. (2015). Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran. *Food Chemistry*, 180, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.127>.
- [12] Zhu, K. X., Huang, S., Peng, W., Qian, H. F., Zhou, H. M. (2010). Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber. *Food Research International*, 43, 943–948. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.01.005>.
- [13] Yan, X., Ye, R., Chen, Y. (2015). Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran. *Food Chemistry*, 180, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.127>.
- [14] Martijn W.J. Noort, Daan van Haaster, Youna Hemery, Henk A. Schols, Rob J. Hamer. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality – Evidence for fibre–protein interactions. *Journal of Cereal Science*. Volume 52, Issue 1. 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.003>.
- [15] Renzetti, S.; Theunissen, M.; Horrevorts, K. A (2021). Systematic Comparison of the Intrinsic Properties of Wheat and Oat Bran Fractions and Their Effects on Dough and Bread Properties: Elucidation of Chemical Mechanisms, Water Binding, and Steric Hindrance. *Foods*, 10, 2311. <https://doi.org/10.3390/foods10102311>.
- [16] Gan, Z.; Galliard, T.; Ellis, P.R.; Angold, R.E.; Vaughan, J.G. (1992) Effect of the Outer Bran Layers on the Loaf Volume of Wheat Bread. *J. Cereal Sci.* 15, 151–163. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80066-0](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80066-0).
- [17] Hemdane, S.; Jacobs, P.J.; Dornez, E.; Verspreet, J.; Delcour, J.A.; Courtin, C.M. (2016). Wheat (*Triticum aestivum* L.) Bran in Bread Making: A Critical Review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 15, 28–42. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12176>.
- [18] Hemdane, S.; Langenaeken, N.A.; Jacobs, P.J.; Verspreet, J.; Delcour, J.A.; Courtin, C.M. (2018.) Study of the role of bran water binding and the steric hindrance by bran in straight dough bread making. *Food Chem.* 253, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.152>.
- [19] Han, W.; Ma, S.; Li, L.; Zheng, X.; Wang, X. (2019). Impact of wheat bran dietary fiber on gluten and gluten-starch microstructure formation in dough. *Food Hydrocoll.* 95, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.033>.
- [20] Zanoletti, M.; Marti, A.; Marengo, M.; Iametti, S.; Pagani, M.A.; Renzetti, S. (2017). Understanding the influence of buckwheat bran on wheat dough baking performance: Mechanistic insights from molecular and material science approaches. *Food Res. Int.* 102, 728–737, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.052>.
- [21] Noort, M.W.J.; van Haaster, D.; Hemery, Y.; Schols, H.A.; Hamer, R.J. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality—Evidence for fibre-protein interactions. *J. Cereal Sci.* 52, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.003>.
- [22] J.M. Sanz Penella, C. Collar, M. Haros. (2008). Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread. *Journal of Cereal Science*. 48(3). 715–721. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.03.006>.
- [23] Wen Cheng, Yujie Sun, Mingcong Fan, Yan Li, Li Wang, (2022). Haifeng Qian. Wheat bran, as the resource of dietary fiber: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 62(6):7269-7281. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1913399>.
- [24] Li, Y., Wang, H., Wang, L., Qiu, J., Zaigui L, Wang, L. (2023). Milling of wheat bran: Influence on digestibility, hydrolysis and nutritional properties of bran protein during in vitro digestion. *Food Chemistry*. Volume 404, Part A, 15, 134559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134559>.
- [25] Gong, X., Hui, X., Wu, G., Morton, J. D., Brennan, M. A., Brennan, C. S. (2022). *In vitro* digestion characteristics of cereal protein concentrates as assessed using a pepsin-pancreatin digestion model. *Food Research International*. 152, 110715. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110715>.
- [26] Yang Li, Mengli Li, Lili Wang, Zaigui Li. (2022). Effect of particle size on the release behavior and functional properties of wheat bran phenolic compounds during *in vitro* gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*. Volume 367, 130751. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130751>.
- [27] Nabeel T. Alzuwaid, Christopher M. Fellows, Barbara Laddomada, Mike Sissons. (2020). Impact of wheat bran particle size on the technological and phytochemical properties of durum wheat pasta. *Journal of Cereal Science*, 95, 103033. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103033>.
- [28] Arte, E., Huang, X., Nordlund, E., Katina, K. (2019). Biochemical characterization and technofunctional properties of bioprocessed wheat bran protein isolates. *Food Chemistry*. 289, 15. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.020>.
- [29] Alzuwaid, N. T., Fellows, C. M., Laddomada, B., Sissons, M. (2020). Impact of wheat bran particle size on the technological and phytochemical properties of durum wheat pasta. *Journal of Cereal Science*. 95. 103033. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103033>.
- [30] Qingran Meng Dr., Feng Chen Dr., Wenjie Gao. (2021). Effects of superfine grinding on asparagus pomace. Part II: Changes on intestinal function and health.

- LWT. 140. 110799. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110799>.
- [31] Yu, T., Yuan, B., Huang, G., Zhang, Y., Ren, X., Xiao, J., Huang, D. (2024). Effects of ultrafine grinding on nutritional, physicochemical and protein composition of Acheta domesticus powder. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 97. 103816. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103816>.
- [32] Codam, R., Rizzello, C. G., José Antonio Curiel, J.A., Poutanen, K., Katina, K. (2014). Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 25, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.11.012/>
- [33] Wang, F., Zeng, J., Tian, X., Gao, H., Sukmanov, V. (2022). Effect of ultrafine grinding technology combined with high-pressure, microwave and high-temperature cooking technology on the physicochemical properties of bean dregs. *LWT - Food Science & Technology*. 154(15), 112810. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112810>.
- [34] Wang, F., Zenga, J., Gao, H., Sukmanov, V. (2021). Effects of different physical technology on compositions and characteristics of bean dregs. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 73, 102789. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102789>.
- [35] Wang, F., Sukmanov, V., Zeng, Jiang, J. (2020). Improving the quality of soybean by-products by physical methods during its use in bakery technology. Review. *Ukrainian Food Journal*. Volume 9. Issue 3. 513-545 <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2020-9-3-4>.
- [36] Li, Y., Wang, L., Wang, H., Li, Z., Qiu, J., Wang, L. (2022). Correlation of microstructure, pore characteristics and hydration properties of wheat bran modified by airflow impact mill. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 77, 102977 <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102977>.
- [37] Phongthai, S., D'Amico, S., Schoenlechner, R., Homthawornchoo W., Rawdkuen, S. (2018). Fractionation and antioxidant properties of rice bran protein hydrolysates stimulated by in vitro gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*. 240(1), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.080>.
- [38] Li, Y., Wang, H., Wang, L., Qiu, J., Li, Z., Wang, L. (2023). Milling of wheat bran: Influence on digestibility, hydrolysis and nutritional properties of bran protein during in vitro digestion. *Food Chemistry*. 404, Part A, (15), 134559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134559>.
- [39] Xu, X., Xu, Y., Wang, N., Zhou, Y. (2018). Effects of superfine grinding of bran on the properties of dough and qualities of steamed bread. *Journal of Cereal Science*. 81. 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.002>.
- [40] Kobayashi, K., Suzauddula, M., Bender, R., Li, C., Li, Y., Sun, X. S., Wang, W. (2025). Functional Properties and Potential Applications of Wheat Bran Extracts in Food and Cosmetics: A Review of Antioxidant, Enzyme-Inhibitory, and Anti-Aging Benefits. *Foods*, 14(3), 515. <https://doi.org/10.3390/foods14030515>.
- [41] Plaza, M., Marina, M.L. (2023). Pressurized hot water extraction of bioactives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 166. 117201. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117201>.
- [42] Yan, J.-K., Wu, L.-X., Cai, W.D., Xiao, G. S., Duan, Y., Zhang, H. (2019). Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran. *Food Chemistry*. Volume 298, 15. 124987. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124987>.
- [43] Wang, F., Sukmanov, V., Zeng, J. (2021). Effect of the addition of soybean dregs treated by ultrafine grinding and microwave technology on the quality of crispy biscuits. *Ukrainian Food Journal*. 10(4), 678-690. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-4-4>.
- [44] Lu, Y. (2014). *Chemical compositions, antioxidant and antiproliferative properties of wheat*. Thesis: University of Maryland. <https://doi.org/10.13016/M2PW37>
- [45] Zhou, K., Laux, J. J., Yu, L. (2004). Comparison of Swiss red wheat grain and fractions for their antioxidant properties. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 52(5), 1118-1123. <https://doi.org/10.1021/jf030640w>.
- [46] Airin, P., S. Islam. (2022). Measurement of Total Phenolics Using Modified Folin-Ciocalteu Method Processing. *Journal of Agricultural, Environmental and Consumer Sciences*, 22, 24-30.
- [47] Xu, J., Wang, W., Li, Y. (2019). Dough properties, bread quality, and associated interactions with added phenolic compounds: A review. *Journal of Functional Foods*, 52, 629-639. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104434>.
- [48] Xu, X., Luo, Z., Yang, Q., Xiao, Z., Lu, X. (2019). Effect of quinoa flour on baking performance, antioxidant properties and digestibility of wheat bread. *Food Chemistry*, 294, 87-5. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.037>.
- [49] Sukmanov, V. A., Shostya, A. M., Usenko, S. O., Kuzmenko, L. M., Barabolia, O. V. (2025). Subcritical extraction of biologically active substances from wheat bran. *Journal of Chemistry and Technologies*. 33(1), 200-212. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i1.321987>.
- [50] Pazo-Cepeda, M. V., Aspromonte, S. G., Alonso, E. (2021). Extraction of ferulic acid and feruloylated arabinosylo-oligosaccharides water. *Food Bioscience*, 44, Part A. 101374 <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101374>
- [51] Shenoy, A. H., Prakash, J. (2002). Wheat Bran (*Triticum aestivum*): Composition, Functionality and Incorporation in Unleavened Bread. *J. Food Quality*, 25: 197-211. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2002.tb01019.x>.
- [52] Jacobs, P. J., Hemdane, S., Dornez, E., Delcour, J. A., Courtin, C. M. (2015). Study of hydration properties of wheat bran as a function of particle size. *Food Chemistry*, 179, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.117>.
- [53] Sudha, M. L., Vetrmani, R., Leelavathi, K. (2007). Influence of fibre from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food Chemistry*, 100(4), 1365-1370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.013>.
- [54] Niu, M., Hou, G. G., Wang, L.i., Chen, Z. (2014). Effects of superfine grinding on the quality characteristics of whole-wheat flour and its raw noodle product. *Journal of Cereal Science*, 60(2), 382-388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2014.05.007>.
- [55] Barrera, G. N., Bustos, M. C., Iturriaga, L., Flores, S. K., Leon, A. E., Ribotta, P. D. (2013). Effect of damaged starch on the rheological properties of wheat starch suspensions. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 233-239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.020>.
- [56] Chaplin, M. F. (2003). Fibre and water binding. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(1), 223-227. <https://doi.org/10.1079/PNS2002203>.

- [57] Jacobs, P. J., Hemdane, S., Dornez, E., Delcour, J. A., Courtin, C. M. (2015). Study of hydration properties of wheat bran as a function of particle size. *Food Chemistry*, 179, 296–3. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.117>.
- [58] Blandino, M.; Marinaccio, F.; Ingegno, B.L.; Pansa, M.G.; Vaccino, P.; Tavella, L., Reyneri, A. (2015). Evaluation of common and durum wheat rheological quality through Mixolab® analysis after field damage by cereal bugs. *Field Crops Research*, 179: 95–102. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.014>.
- [59] Sattanathan, K., Dhanapal, C.K., Umarani, R., Manavalan, R. (2011). Beneficial health effects of rutin supplementation in patients with diabetes mellitus. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 1(8): 227–231.
- [60] Schiraldi, A. and Fessas, D. (2000). *Mechanism of staling*. In C. Pavinee, Vodovotz, (eds). Bred Staling, New York : CRC Press, Inc. <https://dx.doi.org/10.1201/9781351070348-1>.
- [61] Curti, E.; Carini, E.; Bonacini, G.; Tribuzio, G., Vittadini, E. (2013). Effect of the addition of bran fractions on bread properties. *Journal of Cereal Science*, 57, 325–332. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2012.12.003>.
- [62] Shenoy A. H., Prakash, J. (2007) Wheat bran (triticum aestivum): composition, functionality and incorporation in unleavened bread. *Journal of Food Quality*. 197–211. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2002.tb01019.x>.
- [63] Plyer, E.J. (1988). *Baking Science and Technology*. 3rd edition, Merriam, Kansas USA, Sosland publishing.
- [64] Stevenson, L., Phillips, F., O'sullivan, K., Walton, J. (2012). Wheat bran: Its composition and benefits to health, a European perspective. *International Journal of Food Sciences & Nutrition*, 63(8), 1001–1013. <https://doi.org/10.3109/09637486.2012.687366>.
- [65] Vauterin, D. (2015). Characterisation of the microstructure and enzyme diffusion in bran using CLSM and FRAP. Thesis: Ghent University. 1–8. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002217422>.
- [66] Van Craeyveld, V., Holopainen, U., Selinheimo, E., Poutanen, K., Delcour, J. A., Courtin, C. M. (2009). Extensive dry ball milling of wheat and rye bran leads to in situ production of arabinoxylan oligosaccharides through nanoscale fragmentation. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 57(18), 8467–8473. <https://doi.org/10.1021/jf901870r>.
- [67] Kim, S.-G.; Park, S.-H.; Auh, J.-H. (2024). Antioxidant and Anti-Inflammatory Activities of the Methanol Extract from the Bran of the Colored Wheat, "Ariheuk". *Appl. Biol. Chem.* 67, 19. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00872-z>.
- [68] Brewer, L. R., Kubola, J., Siriamornpun, S., Herald, T. J., Shi, Y. C. (2014). Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties. *Food Chemistry*, 152, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.128>.
- [69] Li, C.; Stump, M.; Wu, W.; Li, Y. (2023). Exploring the Chemical Composition, Antioxidant Potential, and Bread Quality Effects of the Nutritional Powerhouse: Wheat Bran—A Mini-Review. *J. Agric. Food Res.*, 14, 100898. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100898>.
- [70] Jing, H., Kitts, D.D. (2000). Comparison of the antioxidative and cytotoxic properties of glucoselysine and fructose-lysine maillard reaction products. *Food Research International*, 33, 509–516. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00076-4).
- [71] Cingöz, A. (2022). Effect of different wheat bran fractions on bread quality. *The Journal of Food. GIDA*. 47(2) 372–386. <https://doi.org/10.15237/gida.GD22019>.
- [72] Khateeb, S.M., Kumar, A. (2019). Effect of different level of wheat bran on quality of bread. *International Journal for Technological Research In Engineering*, 7(4), 6271–6274.