

УДК 664.644.5:577.152.3

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2026.82>

ПОТЕНЦІАЛ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЗИМУ ЦЕЛЮЛАЗИ У ХЛІБОПЕКАРСЬКІЙ ГАЛУЗІ

Анастасія Євгенівна Кулаківська

студентка

<https://orcid.org/0009-0001-8188-7779>

Роксолана Тарасівна Конечна

кандидат фармацевтичних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0001-6420-9063>

Національний університет Львівська політехніка

79013, Україна, м. Львів, вул. С. Бандери, 13.

Олена Іванівна Вічко

кандидат технічних наук, доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-5440-548X>

Ірина Степанівна Назарко

кандидат педагогічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0001-6961-0091>

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,

46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

Святослав Володимирович Половкович

доктор хімічних наук, професор

<https://orcid.org/0000-0002-7143-6931>

Національний університет Львівська політехніка

79013, Україна, м. Львів, вул. С. Бандери, 13.

Анотація. Зміна споживчих уподобань українців щодо функціональних та оздоровчих хлібобулочних виробів, поряд із традиційними пшеничними та житніми сортами хліба, стимулює розширення номенклатури продукції. Промислові виробники почали активно збільшувати асортимент та впроваджувати нові рецептури, зокрема некласичних видів хліба – безглютенового, на заквасці, бездріжджового. Одним із пріоритетних напрямків є заміна синтетичних добавок природними компонентами, зокрема ензимними препаратами. Мета даної роботи полягає у систематизації даних літератури щодо перспектив застосування ензиму целюлази для суттєвого підвищення якості хлібобулочних виробів.

У ході дослідження було узагальнено та упорядковано інформацію щодо переваг та перспектив целюлолітичного гідролізу як цілеспрямованого біотехнологічного інструменту для модифікації компонентів клітинної стінки зерна. Основним результатом дослідження є обґрунтування високої ефективності ензиматичного гідролізу целюлози: встановлено, що ензим целюлаза, розщеплюючи β -1,4-глікозидні зв'язки у целюлозі, вивільняє пентозани та зв'язану воду, змінюючи реологію продукту. Це позитивно впливає на м'якушку хліба або іншого хлібобулочного виробу та покращує об'єм хліба. Ензиматична обробка пшеничних і вівсяних висівків, доданих до хліба, знижує водопоглинальну здатність тіста, покращує його еластичність та прискорює процес випікання. Застосування целюлази у поєднанні з іншими гідролазами дозволяє досягти оптимальної пористості та покращити органолептичні показники якості хліба. Доведено, що застосування целюлази при виробництві заморожених напівфабрикатів інгібує міграцію молекул води у тісті, зменшуючи негативний вплив кристалів льоду на дріжджові клітини після розморожування.

Практична цінність даної роботи полягає у наданні рекомендації, щодо застосування ензиму целюлази для покращення органолептичних показників хліба. Отримані результати можуть бути застосовані виробниками харчової промисловості у розробці нових рецептур функціональних хлібобулочних виробів з покращеними характеристиками та подовженим терміном зберігання. Впровадження таких біотехнологічних інновацій сприятиме розширенню асортименту функціональних продуктів із «чистою етикеткою». Це забезпечить високу конкурентоспроможність виробів вітчизняної хлібопекарської галузі та повністю задовольнить актуальні запити сучасних споживачів.

Ключові слова: ензим целюлаза, хлібобулочні вироби, целюлоза, висівки, заморожені напівфабрикати хлібобулочних виробів.

UDC 664.644.5:577.152.3

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2026.82>

THE POTENTIAL FOR APPLICATION OF ENZYME CELLULASE IN THE BAKING INDUSTRY

Anastasiia Kulakivska

Student

<https://orcid.org/0009-0001-8188-7779>

Roksolana Konechna

PhD., Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0001-6420-9063>

*Lviv Polytechnic National University,
79013, Stepan Bandera Street, 12, Lviv, Ukraine*

Olena Vichko

PhD, Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0002-5440-548X>

Iryna Nazarko

PhD, Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0001-6961-0091>

*Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
46001, 56 Ruska Str., Ternopil, Ukraine*

Svyatoslav Polovkovych

Doctor of Science, Professor

<https://orcid.org/0000-0002-7143-6931>

*Lviv Polytechnic National University,
79013, Stepan Bandera Street, 12, Lviv, Ukraine*

Abstract. The shift in Ukrainian consumer preferences from traditional rye or wheat loaves toward health-promoting, wellness-oriented bakery products has enriched the food market. Industrial manufacturers have begun to actively expand their product range and introduce new recipes, particularly for non-traditional types of bread – gluten-free, sourdough, and yeast-free varieties. One of the priority areas is replacing synthetic additives with natural ingredients, particularly enzyme-based ones. The aim of this study is to systematize the relevant literature on the prospects for using cellulase to significantly improve the quality of bakery products.

In this study, information on the prospects and advantages of cellulolytic hydrolysis as a targeted biotechnological tool for modifying grain cell wall components was summarised and organized. The key finding of the study is the justification for the high efficiency of cellulolytic hydrolysis: it was established that by cleaving β -1,4-glycosidic bonds in cellulose, cellulase releases pentosans and bound water, thereby altering the rheology of the product. This modification

positively affects the crumb structure of bread and other bakery products, increases loaf volume. Furthermore, the enzymatic treatment of wheat and oat bran added to the dough reduces its water absorption capacity, enhances its elasticity, and accelerates the baking process. The application of cellulase, in combination with other hydrolases, enables the achievement of optimal porosity and improves the organoleptic quality of the bread. It has been demonstrated that the application of cellulase in the production of frozen semi-finished products inhibits the migration of water molecules within the dough, thereby mitigating the negative impact of ice crystals on the yeast and the fermentative activity of yeast cells after thawing.

The practical value of this study lies in providing recommendations for the use of cellulase in bread production technology to improve its organoleptic quality. The findings obtained can be applied by food manufacturers to develop new formulations for functional bakery products with enhanced characteristics and extended shelf life. Implementing such biotechnological innovations will expand the range of "clean label" functional products. This will ensure the high competitiveness of the domestic baking industry and fully satisfy the current demands of modern consumer.

Key words: cellulase enzyme, bakery products, cellulose, bran, frozen semi-finished bakery products.

ВСТУП. Хлібопекарська промисловість є стратегічно важливою складовою харчової промисловості, яка забезпечує населення продуктами щоденного споживання та формує близько 10 % загального обсягу виробництва харчової продукції. Сучасний розвиток галузі характеризується не лише необхідністю забезпечення стабільних обсягів виробництва, а й постійним удосконаленням асортименту та технологій відповідно до змін у споживчих уподобаннях. Зокрема, зростає попит на нетрадиційні та функціональні види хлібобулочних виробів: безглютеновий хліб, вироби на заквасках, продукцію з підвищеним вмістом харчових волокон, а також хлібобулочні вироби, у технології яких застосовують ензимні препарати, зокрема продукцію лінійок «Вітапам» та «Ензим» українського виробництва (Vakulenko et al., 2024; Enzyme Group).

Зазначені тенденції супроводжуються активним розвитком світового ринку ензимних препаратів для хлібопекарської промисловості. За аналітичними даними, у 2024 році його обсяг оцінювався у 869,1 млн дол. США, а у 2025 році – вже у 916,9 млн дол. США, що відповідає середньорічному темпу зростання близько 5,5 % (Market, 2025). Розширення цього сегмента пов'язане з технологічними перевагами ензимних препаратів, які дають змогу цілеспрямовано регулювати властивості сировини й напівфабрикатів, покращувати структурно-механічні характеристики тіста, стабілізувати перебіг технологічного процесу та забезпечувати необхідні показники якості готових виробів.

Ензими здатні спрямовано змінювати властивості окремих компонентів сировини та традиційно відіграють важливу роль у процесах приготування тіста. Ще до розвитку промислової біотехнології у хлібопеченні використовували закваски, у яких поряд із життєдіяльністю дріжджів і молочнокислих бактерій відбувалися біохімічні перетворення за участю природних ензимів зернової сировини. Сучасні досягнення ензимології, біотехнології та біохімії суттєво розширили можливості застосування ензимів і перетворили їх на ефективний технологічний інструмент для керування процесами формування якості хлібобулочних виробів (Kumar et al., 2024; Putseys et al., 2019).

Особливе місце серед ензимних препаратів, перспективних для хлібопекарської промисловості, займають целюлолітичні ензими – целюлази. Вони є комплексом гідролітичних ензимів, здатних каталізувати розщеплення β -1,4-глікозидних зв'язків у молекулах целюлози. Целюлоза є одним із основних структурних полісахаридів клітинних стінок рослинної сировини та входить до складу оболонкових частин зерна, а тому в різній кількості присутня у зерновій сировині й продуктах її перероблення, які використовуються у виробництві хлібобулочних виробів (De Souza et al., 2021).

Технологічний ефект застосування целюлаз пов'язаний із модифікацією некрохмальних полісахаридів зернової сировини та зміною функціонально-технологічних властивостей її структурних компонентів. Контрольований ензиматичний гідроліз рослинних клітинних стінок може сприяти вивільненню зв'язаної води та інших компонентів, зміні водопоглинальної здатності борошна, реологічних властивостей тіста та умов формування його структури. Унаслідок цього створюються передумови для більш рівномірного розподілу вологи та компонентів рецептури, оптимізації процесів бродіння і газотримання та формування необхідних структурно-механічних властивостей тістових напівфабрикатів.

Використання целюлаз має значний потенціал для покращення споживчих і технологічних характеристик хлібобулочних виробів. За раціонально підібраних дозувань та умов ензиматичної дії їх застосування може сприяти збільшенню питомого об'єму хліба, формуванню більш розвиненої та рівномірної пористості м'якушки, покращенню її текстури та загальної якості готових виробів (Askari et al., 2025). Водночас ефективність целюлолітичних ензимів визначається їх активністю, дозуванням, властивостями борошна, рецептурним складом виробу, тривалістю ферментації та температурно-вологісними умовами технологічного процесу. Надмірний ступінь гідролізу структурних полісахаридів, навпаки, може негативно впливати на консистенцію тіста, що обґрунтовує необхідність наукового визначення раціональних параметрів застосування таких препаратів.

Застосування целюлаз у технології борошняних і хлібобулочних виробів може здійснюватися за декількома основними напрямками: безпосереднє внесення ензимного препарату для регулювання властивостей тіста та покращення якості виробів із пшеничного борошна; попередня ензиматична модифікація рослинної сировини й функціональних добавок; підвищення технологічної стабільності тістових напівфабрикатів; а також покращення збереження їх структурних властивостей під час заморожування, низькотемпературного зберігання та подальшого розморожування.

Таким чином, використання целюлолітичних ензимів є перспективним напрямом удосконалення технологій хлібобулочних виробів. Їх застосування дає можливість цілеспрямовано впливати на структурні компоненти зернової сировини та регулювати властивості тістових напівфабрикатів і готової продукції. Водночас технологічний результат значною мірою залежить від виду й активності ензимного препарату, його дозування та параметрів технологічного процесу. Це зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей впливу целюлаз на властивості сировини, перебіг технологічних процесів та формування показників якості хлібобулочних виробів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. Дослідження ґрунтувалося на систематизованому аналізі, критичному опрацюванні та узагальненні наукових публікацій, присвячених застосуванню целюлолітичних ензимів у технології хлібобулочних і борошняних виробів. Інформаційну базу дослідження сформували релевантні наукові праці, опубліковані переважно протягом останніх десяти років (2015–2025 рр.) та представлені в Google Scholar, Scopus і на платформі Taylor & Francis. Додатково було проаналізовано чинні нормативно-правові документи Європейського Союзу, що регламентують використання харчових ензимів, їх безпечність та умови застосування у виробництві харчових продуктів.

Для забезпечення максимально повного охоплення наукових публікацій пошук здійснювали англійською та українською мовами із застосуванням ключових слів і їх комбінацій: «enzyme cellulase in baking», «enzyme cellulase in bread», «enzyme cellulase in cookies», «ензим целюлаза у хлібопеченні», «целюлаза у виробництві хліба», «застосування целюлази у хлібобулочних výroбах». Під час відбору джерел враховували відповідність публікації тематиці дослідження, наявність опису методики експерименту та кількісних або якісних даних щодо впливу целюлаз на технологічні властивості сировини й напівфабрикатів та показники якості готових виробів.

Основним критерієм включення публікацій до поглибленого аналізу була наявність експериментальних даних щодо впливу целюлолітичних ензимів на властивості тіста та/або хлібобулочних і борошняних виробів. Особливу увагу приділяли дослідженням, у яких оцінювали реологічні та структурно-механічні властивості тіста, питомий об'єм і пористість виробів, текстурні характеристики м'якучки, органолептичні показники, а також зміни якості продукції під час зберігання.

Із подальшого аналізу виключали публікації, які не стосувалися використання целюлаз у технології борошняних і хлібобулочних виробів, не містили достатнього опису експериментальних умов або результатів, а також дублікати матеріалів, виявлені в різних інформаційних ресурсах. Нормативні документи та окремі фундаментальні праці використовували незалежно від установленого часового діапазону, якщо вони мали принципове значення для характеристики механізму дії, безпечності або нормативного регулювання харчових ензимів.

За результатами пошуку, первинного скринінгу та оцінювання відповідності визначеним критеріям було відібрано й детально проаналізовано понад 30 наукових та нормативних джерел. Отриману інформацію систематизували за напрямками застосування целюлаз, видом борошняної сировини, характеристиками ензимних препаратів, умовами їх використання та встановленими ефектами щодо технологічних властивостей тіста і показників якості готових виробів. На основі порівняльного аналізу узагальнено сучасні підходи до використання целюлаз у хлібопеченні, визначено основні технологічні ефекти їх застосування та окреслено перспективні напрями подальших досліджень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ. Основою будь-якого хлібобулочного виробу є борошно із зерна, яке багате на харчові волокна: нерозчинні (целюлоза, деякі геміцелюлози та лігнін) та розчинні (пектин та камеді). Нерозчинні харчові волокна позитивно впливають на функції товстого кишечника, тоді як розчинні харчові волокна знижують рівень холестерину в сироватці крові, зв'язуючись з жовчними кислотами, а також мають пребіотичну та гіпоглікемічну дію.

Оскільки злаки мають дуже високу частку нерозчинних харчових волокон і відносно низьку частку розчинних харчових волокон, то зміна їх співвідношення за допомогою фізичних, хімічних і біологічних чинників була досліджена такими методами як автоклавування, бланшування, екструзія та ензиматичний каталіз (Yoon et al., 2022). При цьому ензиматичний гідроліз целюлазою має високий потенціал для застосування, оскільки целюлоза є найпоширенішим полісахаридом у рослинах.

1. Перспективи використання целюлолітичного гідролізу у хлібопекарстві.

Практика застосування ензимів у хлібопеченні включає використання ендогенних ензимів у борошні (зерні), ензимів доданих мікроорганізмів, наприклад *Saccharomyces cerevisiae*, екзогенних готових ензимних препаратів (Ozatay et al., 2020). Перші два пункти висвітлюють використання біотехнології ензимів ще в доісторичний період, а третій пункт описує оновлення рецептур хлібобулочних виробів шляхом додавання ензимів, що вже давно застосовуються (наприклад, додатково вносять бактеріальну чи грибкову α -амілазу і нових ензиматичних препаратів. Одними з перших робіт у даному напрямку були стаття 1948 р. журналу «Хімія зернових», що стосувалася додавання до випічки α -амілази, отриманої із *Aspergillus oryzae* – Дж. А. Джонсон, Б. С. Мілер «Високі рівні альфа-амілази у пекарстві. I. Визначення ефекту альфа-амілази з різних джерел» (Jonson et al., 1948) та дисертація одного з авторів на здобуття доктора філософії Мілера Б. С. «Вплив високої концентрації певних ензимів на випічку» 1948 р.

Сучасний біотехнологічний процес ензиматичного каталізу у хлібобулочній продукції має ряд переваг над традиційними хімічними добавками: зменшення використання токсичних реагентів і, відповідно, менший вплив на довкілля; їх можна безпечно додавати

безпосередньо до харчових продуктів, оскільки після випікання ензими стають інактивованими білками; вони покращують функціональність продуктів, наприклад, текстуру та зовнішній вигляд; сприяють підвищенню поживної цінності, терміну зберігання та безпеки харчових продуктів, а також дозволяють створювати нові продукти для збільшення комерційної пропозиції (De Souza et al., 2021).

Недоліками додавання ензиму є зміна амінокислотного та протеїнового складу продукту, а також спричинення алергічної реакції у споживачів. Тому про це варто зазначати на упаковці (Chowdhury et al., 2024).

Ензим целюлаза або целюлолітичний гідроліз, який був відкритий у 1950-х роках, використовується порівняно нещодавно у хлібопеченні, що описано в одному з перших патентів за даною тематикою: US5108765A «Склад для покращення властивостей тіста та спосіб його використання» (1989 р.).

Основною перспективою до використання саме целюлази та целюлолітичного гідролізу це є зміни в кількості нерозчинних волокон після ензиматичного оброблення, що покращує якість виробів та тіста. Целюлази у складі продукту як при додаванні тільки даного ензиму, так і в суміші з іншими гідролітичними ензимами (амілаза, протеаза та ксиланаза, тощо) збільшують об'єм виробу, покращують якість хліба та призводять до утворення пухкішої пористішої м'якушки (Sharma et al., 2016).

Далі охарактеризуємо целюлазу як унікальний комплексний ензим, його механізм гідролізу у хлібобулочних виробках.

2. Характеристика типових целюлаз, які використовують у хлібопекарстві: характеристика, механізм дії.

Целюлази гідролізують целюлозні мікрофібрили зерна, в результаті чого вивільняється глюкоза, олігосахариди та целобіоза, що покращує властивості тіста під час обробки. Оскільки целюлази діють на целюлозні волокна, присутні в житньому та пшеничному борошні, тісто стає м'яким та знижується його водопоглинальна здатність, що скорочує час випікання (рис.1).

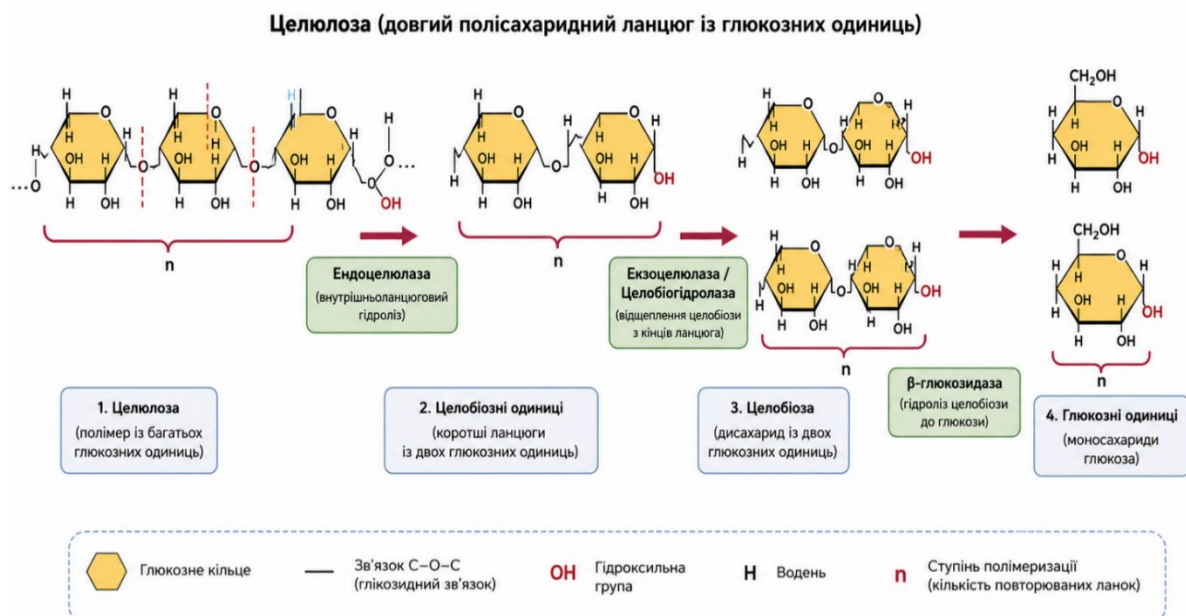


Рисунок 1. Механізм дії целюлази (ендоцелюлази, екзоцелюлази та

β-глюкозидази), що розкладає целюлозу до моносахариду глюкози (Dahiya et al., 2020).

Целюлази – ензими класу гідролаз, які поступово гідролізують β-1,4-глікозидні зв'язки полісахариду целюлози. Даний ензим включає три основних компоненти: β-1,4-

ендоглюканаза (ЕС 3.2.1.4), целобіогідролаза або екзоглюканаза (ЕС 3.2.1.91, β -1,4-D-глюканцелобіогідролаза), β -глюкозидаза або целобіаза (ЕС 3.2.1.21) (Ejaz et al., 2021).

Пентозани – це невеликі компоненти пшеничного борошна, які відіграють вирішальну роль у реології тіста та якості хліба завдяки своїй здатності зв'язувати воду. Розчинні пентозани беруть участь у формуванні еластичності тіста, а ензиматична модифікація нерозчинних у воді пентозанів сприяє змінам реології (Dahiya et al., 2020).

Розглянемо вимоги до продуцентів ензимних препаратів для харчової промисловості.

3. Продуценти, що безпечні для синтезу харчового ензиму целюлази.

Харчова промисловість має ряд обмежень у виборі продуценту для синтезу целюлази та ряд вимог до самого ензиму, на відміну від інших галузей застосування. Зокрема, Офіційні документи Європейського союзу («Робочий документ ЄС про харчові процеси, в яких використовуються харчові ензими») схвалюють використання ензиму целюлази та ряду інших ензимів у виробництві борошняних виробів при зазначенні цього у складі продукту; даний продукт є безпечним при вживанні та відповідає технологічній потребі (Register of food enzymes, 2024). Щодо продуценту, то Регламенти (ЄС) зазначають такі вимоги до мікроорганізмів, що синтезують ензими: культура має бути ідентифікованою за сучасною номенклатурою та описана методика отримання даного організму (для бактерій – на основі послідовностей повного геному (WGS), для цвілевих грибів – філогеномний аналіз з порівнянням із доступними спорідненими геномами та альтернативно ідентифікують за порівняння гена 18S рРНК, тощо); для продуценту бактерії має бути проведений аналіз на чутливість до антимікробних препаратів; необхідний аналіз безпечності використання (токсичність, патогенність) (Kocabas et al., 2019; Silano et al., 2019; Commission regulation (EU), 2011). І останнім важливим пунктом є визнання генетичної чистоти продуценту, оскільки як Україна, так і ЄС встановлюють обмеження на ГМО. Українське законодавство встановлює обмеження у 0,9 % на ГМО (Law of Ukraine, 2025).

Ключовими промисловими продуцентами целюлази є бактерії та гриби, причому гриби є кращими продуцентами ензимів завдяки синтезу екзоензимів, тоді як бактеріальні целюлази мають розширений оптимум дії. Регламент ЄС щодо ензимів схвалив використання целюлаз, синтезованих цвілевими грибами *Aspergillus niger*, *Humicola insolens*, *Penicillium funiculosum*, *Trichoderma reesei*, *Disporotrichum dimorphosporum*, *Penicillium multicolor*, *Talaromyces emersonii*, *Talaromyces versatilis*, *Talaromyces cellulolyticus* або *Talaromyces pinophilus* та бактеріями *Bacillus subtilis*, *Cellulosimicrobium cellulans* (Register of food enzymes, 2020).

4. Стратегії використання ензиму целюлази при у хлібопекарстві.

Целюлази використовуються у тісті для забезпечення кращої текстури та якості. Як було зазначено вище, ензим целюлаза вивільняє водоутримувальні пентозани, що покращує еластичність тіста (De Souza et al., 2021). Аналіз літератури дозволяє виділити три основні напрямки застосування целюлази, які відрізняються за видом продукції та технологічними завданнями.

Першим напрямком є використання целюлаз різного походження у виробництві борошняних виробів в поєднанні з іншими ензимами.

Критичним моментом технологічного процесу є забезпечення стабільності ензимів, оскільки дозрівання тіста зазвичай протікає у кислому середовищі. У цьому контексті науковий інтерес становлять результати, отримані вченими з Університету Марварді та Коледжу Христа (Індія), які успішно ізолювали термо- та кислотостійку ендогенну целюлазу з *Bacillus licheniformis* з оптимумом дії при рН 4,0. Авторами доведено, що тривала інкубація впродовж 2 та 24 год при 30 С даного ензиму, внесеного до складу дріжджового тіста, дозволяє знижувати його клейкість, а також зменшує твердість пшеничного хліба (Chauhan et al., 2023).

Ефект зниження твердості та покращення пористості за рахунок гідролізу структурних полісахаридів корелює з висновками української команди вчених з Харківського державного університету харчування та торгівлі. На відміну від використання монопрепаратів, вітчизняні

вчені комбінували Целюлад (целюлаза; виробник «Ензим», Україна), Ксилолад (ксилиназа) і Глюкооксидазу, що поліпшило органолептичні (стан м'якушки, колір скоринки, форма) та фізико-хімічні властивості: вологість зросла з 45,2 % до 46,0 %; питомий об'єм з 1,9 см³/г до 2,6 см³/г, а пористість з 57 % досягла 63 %. При цьому спостерігалось закономірне зниження кислотності з 3,8 до 2,9 (Oliynyk et al., 2016).

Вчені Хенанського технологічного університету вивчали і детально охарактеризували вплив целюлази на зміну властивостей цільнозернового борошна. Воно багатше на вуглеводи, білки, ліпіди, клітковину, мінерали, вітаміни, каротиноїди та фенольні сполуки порівняно із рафінованим пшеничним борошном. Поєднання ензиму целюлази (Cel) та пентазани (Pn) (виробник ензимів Novozymes Biotechnology Co., Ltd, Тяньцзінь, Китай) та лактобактерій (*Lactobacillus brevis* – Lbr; *L. plantarum* – Lpl) змінило реологічні властивості тіста: зразок тіста оброблений Lpl -Cel/Pn (60,6) мав нижчий коефіцієнт утримання газу, ніж тісто оброблене Lbr -Cel/Pn (62,0), що може бути пов'язано з вивільненням антиоксидантів, таких як феноли та активні пептиди. При впливі цих ензимів ультрадисперсні клітини пшеничних висівок руйнуються, активні речовини вивільнюються, а структура крохмально-глютенової мережі сітки руйнується, що призводить до розширення газу в певному напрямку та впливає на утримання газу. Динамічні реологічні властивості тіста, напруга на розтяг з комбінацією ензимів теж покращилися (Liang et al., 2024).

Перспективи інтенсифікації дії ензимних препаратів за допомогою фізичної модифікації детально розкрито у роботі, здійсненій в Люблінському університеті наук про життя. Авторами встановлено, що суха фізична обробка у комбінації з ензимним комплексом ксилинази (VERON 292, AB Enzymes GmbH) і целюлази (Bakezyme, WholeGain DSM Food Specialties BV, Делфт, Нідерланди) підвищує стійкість тіста до замішування завдяки стабілізації структури білка та суттєво збільшує фракцію розчинних арабіноксиланів, які виконують структуроутворюючу функцію. Водночас виявлено обмеження у застосуванні інтенсивної обробки гідротермальними та екструзійними методами, що негативно впливає на якість білкових фракцій, але суттєво змінює гелеутворюючі властивості, незалежно від того, чи проводилася вона без ензимів, чи з ними. Вчені виокремили екструзію, як потенційний метод обробки борошна, що може надати йому властивостей схожих до модифікованого крохмалю або гідроколоїдів (Lewko et al., 2024).

Другим аспектом напрямком є використання ензиму целюлази у хлібобулочних продуктах, збагачених функціональними добавками. Протягом останнього десятиліття зросла популярність на функціональні продукти, серед яких хліб з висівками, оскільки такий продукт збагачується харчовими волокнами з β -глюканами (високорозчинна у воді клітковина, яка може легко утворювати в'язкі розчини та позитивно впливає на шлунково-кишковий тракт).

Аналіз літератури вказує на обмежену технологічну ефективність застосування одного ензимного препарату в складних матрицях. Зокрема, використання виключно целюлази (ензимний препарат Cellulast BG 3.2.1.4, виробник Novozymes, Австралія) у дослідженнях хліба з вівсяними висівками, проведених дослідниками Університету Чонджінг технологій та бізнесу (Китай) та Університету Лінкольна (Нова Зеландія), Школи науки (Австралія) зменшило водопоглинання, розм'якшення та стабільність, стійкість до розтягування, але не змінило властивостей доданих висівок. Значно вищу ефективність демонструє синергетична дія мультиензимних комплексів, що підтверджується дослідженнями під керівництвом Лю В. Авторами підтверджено, що ензими - целюлаза, амілаза (Fungamyl 2500 SG, EC 3.2.1.1) та ксилиназа (Pentopan Mono BG, EC 3.2.1.8) у комбінації поєднанні покращують водопоглинання, розтяжність, стійкість до замішування, липкість тіста для китайського парового хліба з пшеничними висівками у концентраціях: α -амілаза – 6 ppm, ксилиназа – 120 ppm, целюлаза - 60 ppm (Liu et al., 2017). Відповідно у подальших дослідженнях було підтверджено, що дана група також позитивно впливає на тісто для хліба з вівсяними

висівками та пшеничні висівки, оскільки при цьому йде вплив як на целюлозу, так і на крохмаль і ксилани (Liu, Brennan, Tu, Brennan et al., 2023; Liu, Brennan, Brennan, et al., 2023).

Подібний ефект спостерігається і при використанні нетрадиційних видів борошна, які зазвичай порушують структуру глютенowego каркасу. Дослідження показують, що внесення целюлази до тіста з гречаним борошном дозволяє коригувати його реологію: знижується поглинання води з 65,07 % до 62,43 %; тривалість обробки з 7,12 хв до 6,23 хв; стабільність з 8,73 хв до 5,03 хв; липкість з 77,59 г до 52,93 г та підвищується м'якість з 53,37 ФЮ до 90,46 о.ф. ФЮ, а також зростає толерантність до замішування (Liu, Brennan, Tu, Brennan, Huang et al., 2023). Аналогічні результати були отримані вченими Шандунського технологічного університету (Китай) і для печива з картопляним борошном, де додавання ензиму целюлази у концентрації 0,2 % покращило взаємодію між глютенем картопляного борошна, що у підсумку підвищило хрусткість, розсипчастість печива (Liu, et al., 2024).

Варто окремо виділити інший технологічний підхід, при якому ензимом обробляють не тісто, а безпосередньо добавку перед її внесенням. В'єтнамські вчені застосували ензим пектиназу з додатковою целюлолітичною активністю (Viscozyme Cassava C, Novozymes Inc., Багсверд, Данія) для обробки пшеничних висівок, що додавали до печива. Ензиматичний гідроліз (концентрація целюлази 9 Од/г, час інкубації при 28 °C – 120 хв) знизив відношення кількості нерозчинних у воді харчових волокон до розчинних до значення 42%, завдяки чому зменшилася твердість печива, підвищило його сенсорну оцінку (Nguyen et al., 2021). Цей метод також є дієвим для підвищення загальної сенсорної оцінки печива при додаванні ензиматично обробленого листя чаю, що описано дослідниками Технологічного університету Хошимін та В'єтнамського національного університету (В'єтнам). Вони ензиму целюлазою (Cellulast 1.5 L, ендоглюканазна активність 80 Од/мл, Novozymes Inc., Багсверд, Данія) модифікували відпрацьоване листя чаю за наступних оптимальних умов: концентрація целюлази 20 Од/г, тривалість 1,5 год. Дана обробка збільшила частку розчинної харчової клітковини на 144,5% порівняно з контролем. Однак автори підкреслюють, що кількість такої добавки слід обмежувати (оптимально на рівні 20%), щоб зберегти текстурні та смакові властивості (Nguyen et al., 2022).

Перспективним напрямком є використання ензиму для заморожених хлібобулочних напівфабрикатів. Заморожування тіста дозволяє продовжити термін його зберігання та стандартизувати процес у невеликих пекарнях. Проте цей процес зазвичай погіршує механічні властивості напівфабрикату та знижує активність дріжджів. Дослідження свідчать, що додавання ензиму допомагає ефективно нівелювати ці негативні наслідки. Зокрема, застосування целюлази (ЕС 3.2.1.4, Cellulast BG) дозволило помітно покращити сенсорні та якісні показники готового хліба порівняно з контрольними зразками. Під час органолептичного оцінювання зразки, оброблені ензимом, отримали 15 балів, а контроль – 10. Крім того, висота готових виробів зросла на 19,7%, що вказує на підвищення активності бродіння. Водночас автори виявили цікаву закономірність у газоутворювальній активності тіста: у перший тиждень зберігання об'єм газу був вищим порівняно з контролем, тоді як після чотирьох тижнів об'єм зменшувався через утворення кристалів льоду, що спричиняло пошкодження клітин дріжджів. Дані термодинамічного аналізу підтвердили, додавання ензиму зменшує кількість замороженої вологи (Wang et al., 2017).

Детальніше механізми утримання вологи у тісті було досліджено у праці Фу та ін. Автори проаналізували синергічний ефект від поєднання закваски та ензиму целюлази Sternzym C 29018 (активність 3200 мкг/г, Stern Ingredients Co.,Ltd, Сучжоу, Китай) у технології заморожених парових булочок, які піддавалися циклічному заморожуванню і розморожуванню. Така комбінація забезпечила підвищення питомого об'єму виробу, покращення текстури, а також сприяла інтенсивному накопиченню відновлювальних цукрів і водорозчинних полісахаридів. Аналіз за допомогою ядерногомагнітного резонансу (LF-NMR) у низькому полі підкреслив, що целюлаза у тісті пригнічує міграцію води, збільшуючи частку

щільно міцно зв'язаної води та зменшуючи кількість вільної води під час температурних коливань (Fu et al., 2025).

Систематизація та критичний аналіз наукових джерел дозволяють оцінити глобальні перспективи застосування целюлази у хлібопечінні, а також виділити ключові переваги та обмеження існуючих технологічних підходів. Для наочного порівняння ефективності ензиму за різними напрямками було зроблено зведену таблицю (Табл. 1).

Таблиця 1. Узагальнення ефективності застосування ензиму целюлази у хлібобулочних виробках

Напрямок застосування	Публікації за тематикою	Технологічні виклики та обмеження	Перспективи та позитивні технологічні ефекти
Вироби з ензимом целюлазою	Chauhan et al., 2023; Oliynyk et al., 2016; Liang et al., 2024; Lewko et al., 2024	- обмежена кількість публікацій в Україні за даною темою; - ризик надмірного розрідження тіста та зниження коефіцієнту утримання газу; - необхідність підбору, безпечних штамів – продуцентів.	- значний потенціал для подальших досліджень в Україні; - підвищення питомого об'єму, пористості, вологості хліба; - зниження твердості і клейкості м'якушки; - підвищення стійкості тіста завдяки стабілізації білкової матриці.
Вироби з ензимом целюлазою та добавками	Liu et al., 2017; Liu, Brennan, Tu, Brennan et al., 2023; Liu, Brennan, Brennan, et al., 2023; Liu, Brennan, Tu, Brennan, Huang et al., 2023; Liu, et al., 2024; Nguyen et al., 2021; Nguyen et al., 2022	- високі концентрації добавок після ензиматичного гідролізу можуть погіршувати загальну сенсорну оцінку; - складність підбору оптимального дозування ензиму для різних видів нетрадиційної сировини.	- зниження водопоглинальної здатності борошна добавкам; - трансформація нерозчинної клітковини у розчинну (пребіотичний ефект); - покращення розтяжності тіста та хрусткості готових виробів (печива).
Вироби з ензимом целюлазою у вигляді напівфабрикатів	Wang et al., 2017; Fu et al., 2025	- зменшення об'єму виробу через кристалізацію вологи.	- зменшення кількості вільної замороженої вологи та пригнічення міграції води; - збереження ензиматичної активності дріжджів після розморожування; - покращення кольору скоринки та текстури напівфабрикатів.

Джерело: розроблено на основі узагальнення джерел даної статті

Порівняльний аналіз літературних даних свідчить, що ефективність застосування целюлази у технології хлібобулочних виробів значною мірою залежить від способу її використання, активності та дозування ензиму, складу ензимного препарату, а також характеристик борошняної сировини. Узагальнення результатів досліджень показало, що особливо перспективним є застосування поліензимних систем, у яких дія целюлази доповнюється активністю інших ензимів. Зокрема, синергічне поєднання целюлази з ксиланазою та глюкозооксидазою забезпечує комплексний вплив на полісахаридні й білкові компоненти тіста, сприяючи оптимізації його структурно-механічних властивостей, газоутримувальної здатності та формуванню більш розвиненої пористості м'якушки. У результаті може спостерігатися збільшення питомого об'єму та покращення текстурних характеристик готових виробів (Oliynyk et al., 2016; Chauhan et al., 2023).

Водночас застосування окремих ензимів також може забезпечувати виражений технологічний ефект завдяки їх специфічній дії на певні компоненти борошняної матриці. Целюлаза каталізує гідроліз целюлози та інших доступних целюлозовмісних структур клітинних стінок рослинної сировини, сприяючи їх частковій деструкції та зміні функціонально-технологічних властивостей. Такі перетворення можуть впливати на водопоглинальну здатність борошна, розподіл вологи у тісті, його реологічні характеристики та, відповідно, на формування об'єму, структури й текстури готового хліба (Oliynyk et al., 2016; Chauhan et al., 2023). Отже, вибір між моноензимними та поліензимними препаратами має здійснюватися з урахуванням властивостей сировини, рецептурного складу та необхідного технологічного ефекту.

Окремим перспективним напрямом є ензиматична модифікація рослинних добавок, які використовують для підвищення харчової та біологічної цінності хлібобулочних виробів. Аналіз літературних джерел дає змогу виокремити два основні технологічні підходи до застосування целюлаз. Перший передбачає безпосереднє внесення ензимного препарату разом із функціональною добавкою під час замішування тіста. За такого способу целюлаза діє не лише на компоненти внесеної рослинної сировини, але й на доступні структурні полісахариди борошняної матриці. Це забезпечує комплексну модифікацію системи та може впливати на консистенцію тіста, його водозв'язувальну і газоутримувальну здатність та структурні характеристики готового виробу.

Другий підхід полягає у попередній ензиматичній обробці рослинних добавок до їх внесення у рецептуру. У цьому випадку параметри гідролізу – концентрацію ензиму, температуру, тривалість обробки та рН середовища – можна регулювати незалежно від основного процесу приготування тіста. Контрольований гідроліз компонентів клітинних стінок сприяє модифікації структури рослинної сировини та може підвищувати технологічну придатність добавок із високим вмістом харчових волокон. Такий підхід є особливо актуальним під час розроблення збагачених хлібобулочних виробів, оскільки дає змогу вводити більшу кількість волокнистої рослинної сировини за умови збереження прийнятних структурно-механічних та органолептичних характеристик готової продукції (Liu, Brennan, Tu, Brennan, Huang et al., 2023; Nguyen et al., 2022).

Ще одним перспективним напрямом використання целюлаз є технологія заморожених тістових напівфабрикатів. Під час заморожування та подальшого зберігання відбувається перерозподіл вологи й формування кристалів льоду, які здатні порушувати структурну цілісність тіста. Повторна кристалізація води та збільшення розмірів кристалів під час тривалого зберігання можуть додатково послаблювати структурну матрицю, погіршувати газоутримувальну здатність тіста та негативно впливати на об'єм і текстуру готових виробів після розморожування та випікання. Застосування целюлази може опосередковано впливати на ці процеси завдяки контрольованій модифікації полісахаридних компонентів тіста, зміні характеру зв'язування та розподілу води в системі. Унаслідок цього потенційно підвищується стабільність тістових напівфабрикатів під час заморожування і зберігання та

зменшується негативний вплив низькотемпературної обробки на якість готових хлібобулочних виробів.

ВИСНОВКИ. Проведений аналіз наукових джерел підтвердив перспективність застосування целюлолітичних ензимів у технології хлібобулочних виробів. Встановлено, що контрольований гідроліз целюлозовмісних компонентів рослинної сировини сприяє модифікації її структурних і функціонально-технологічних властивостей, що позитивно впливає на реологічні характеристики тіста, питомий об'єм, пористість і текстуру м'якушки готових виробів.

За результатами узагальнення літературних даних систематизовано три основні напрями застосування целюлаз у хлібопеченні: покращення якості традиційних і збагачених хлібобулочних виробів; ензиматична модифікація рослинної сировини та добавок із підвищеним вмістом харчових волокон; підвищення стабільності заморожених тістових напівфабрикатів. Встановлено, що використання препаратів із целюлазною та β -глюканазною активністю є перспективним для виробів із пшеничними й вівсяними висівками, гречаним і картопляним борошном та іншими рослинними компонентами, оскільки дає змогу зменшити негативний вплив підвищеного вмісту харчових волокон на структуру тіста та якість готової продукції.

Перспективним є також застосування целюлаз у технології заморожених тістових напівфабрикатів. Модифікація полісахаридної матриці тіста сприяє регулюванню стану та перерозподілу вологи під час заморожування і зберігання, що дає змогу зменшити негативний вплив кристалізації води на структуру тіста та краще зберегти якісні характеристики виробів після розморожування і випікання.

Отже, целюлази доцільно розглядати як ефективний інструмент цілеспрямованого регулювання технологічних властивостей сировини й тістових систем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на обґрунтування оптимальних дозувань і режимів дії целюлаз залежно від виду сировини, складу рецептури та технології виробництва, а також на оцінювання ефективності комбінованих ензимних систем для отримання хлібобулочних виробів із прогнозованими показниками якості.

Подяки. Немає.

Конфлікт інтересів. Немає.

References.

- Askari, H., Soleimanian-Zad, S., Kadivar, M., Shahbazi, S. (2025). Enhancement of wheat bread quality using xylanase cellulase from gamma radiated *Trichoderma afroharzianum* mutant. *Scientific Reports*, 15(1), 43001. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27026-5>
- Chauhan, J., Shukla, R., Bishoyi, A. K., Goyal, S., Sanghvi, G. (2023). Investigation of physical, nutritional and sensory properties of wheat bread treated with purified thermostable cellulase and alpha amylase. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2261839>
- Chowdhury, M. H., Sarkar, F., Reem, C. S. A., Rachman, S. M., Mahamud, A. G. M. S. U., Rachman, M. A., Ashrafudoulla. M. (2024). Enzyme applications in baking: From dough development to shelf-life extension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282(Pt 4), 137020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137020>
- Commission regulation (EU) a common authorisation procedure for food additives, food enzymes and food flavourings (2011, March). Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2011/234/oj
- Dahiya, S., Bajaj, B. K., Kumar, A., Tiwari, S. K., Singh, B. (2020). A review on biotechnological potential of multifarious enzymes in bread making. *Process Biochemistry*, 99, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.09.002>

- De Souza, T. S. P., & Kawaguti, H. Y. (2021). Cellulases, hemicellulases, and pectinases: Applications in the food and beverage industry. *Food and Bioprocess Technology*, 14(8), 1446–1477. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02678-z>
- Ejaz, U., Sohail, M., Ghanemi, A. (2021). Cellulases: From Bioactivity to a Variety of Industrial Applications. *Biomimethics*, 6(3), 44. <https://doi.org/10.3390/biomimethics6030044>
- Enzym Group. (n.d.). Retrived from <https://enzymgroup.com/uk/solutions/bakery-solutions>.
- Fu, Z., Sun, X., Zhu, K., Guo, X.-N. (2025). Improving the quality of frozen steamed stuffed buns after freeze-thaw cycles: Synergistic effects of cellulase, xylanase and sourdough. *Food Bioscience*, 68, 106524. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106524>
- Jonson, J. A., Miller, B. S. (1948) High levels of alfa-amylase in baking. L evaluation of the effect of alpha-amylase from various sources. *Cereal chemistry*, 25, 168-178.
- Kocabaş, D. S., & Grumet, R. (2019). Evolving regulatory policies regarding food enzymes produced by recombinant microorganisms. *GM Crops & Food*, 10(4), 191–207. <https://doi.org/10.1080/21645698.2019.1649531>
- Kumar, A., Dhiman, S., Krishan, B., Samtiya, M., Kumari, A., Pathak, N., Kumari., A., Aluko, R. E., Dhewa., T. (2024). Microbial enzymes and major applications in the food industry: a concise review. *Food Production Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-024-00261-5>
- Law of Ukraine No. 35 “On the State Biosafety System for the Creation, Testing, Transportation and Use of Genetically Modified Organisms”. (2007, May). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1103-16/ed20201016#Text>
- Lewko, P., Wójtowicz, A., & Kamiński, D. M. (2024). The Influence of Processing Using Conventional and Hybrid Methods on the Composition, Polysaccharide Profiles and Selected Properties of Wheat Flour Enriched with Baking Enzymes. *Foods*, 13(18), 2957. <https://doi.org/10.3390/foods13182957>
- Liang, X., Hong, J., Liu, B., Cui, Y., Zhang, S., Choi, L., Guan, E., Omer, S. H. S., Hu, Z., Zheng, X. (2024). Effect of cellulase and pentosanase with lactic acid bacteria to increase gluten formation and elasticity in whole-wheat dough sheets. *LWT*, 205, 116521. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116521>
- Liu, W., Brennan, M., Brennan, C., You, L. (2023). Individual and combined effects of α -amylase, xylanase, and cellulase on the breadmaking and nutritional properties of steamed bun enriched in wheat bran. *Journal of Food Science*, 88(8), 3228-3238 <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16665>
- Liu, W., Brennan, M., Tu, D., & Brennan, C. (2023). Influence of α -amylase, xylanase and cellulase on the rheological properties of bread dough enriched with oat bran. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31591-y>
- Liu, W., Brennan, M., Tu, D., Brennan, C., Huang, W. (2023). Effect of enzyme compositions on the rheological properties of bread dough enriched in buckwheat flour. *Food Science and Technology*, 43. <https://doi.org/10.5327/fst.114322>
- Liu, X., Zhu, X., Zhu, Y., Wang, C., Li, H., Chen, S. (2024). Effect of cellulase on dough structure and quality characteristics of tough biscuits enriched with potato whole flour. *Journal of Food Science*, 89(6), 3484–3493. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17091>
- Liu, W., Brennan, M. A., Serventi, L., Brennan, C. S. (2017). Effect of cellulase, xylanase and α -amylase combinations on the rheological properties of Chinese steamed bread dough enriched in wheat bran. *Food Chemistry*, 234, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.160>
- Market.us. (2025). *Baking Enzymes Market Size, Share CAGR of 5.5%*. Retrieved from <https://market.us/report/baking-enzymes-market/>
- Maat, J., Roza, M. (1989, March 23). *US5108765A - Composition for improving the properties of dough and method of using same* - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US5108765A/en>

- Nguyen, N. D. T., Phan, T. T. H., Tran, T. T. T., Ton, N. M. M., Vo., D. L. T., Le. V. V. M. (2022). Enzymatic treatment of spent green tea leaves and their use in High-Fiber cookie production. *Food Technology and Biotechnology*, 60(3), 396–405. <https://doi.org/10.17113/ftb.60.03.22.7474>
- Nguyen, S. N., Vien, M. D., Le, T. T. T., Tran, T. T. T., Ton, N. M. N., Le, V. V. M. (2021). Effects of enzymatic treatment conditions on dietary fibre content of wheat bran and use of cellulase-treated bran in cookie. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(8), 4017–4025. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15022>
- Oliynyk, S. G., Zaparenko, G. V., & Dyakov, O. G. (2016). Optimization of the composition of enzyme preparations for improving the quality of grain bread. *Food Science and Technology*, 10(1). <https://doi.org/10.21691/fst.v10i1.76>
- Ozatay, S. (2020). Recent applications of enzymes in food industry. *Journal of Current Researches on Engineering Science and Technology*, 6(6 (1)), 17–30. <https://doi.org/10.26579/jocrest.52>
- Putseys, J. A., & Schooneveld-Bergmans, M. E. (2019). Enzymes used in baking. In *Industrial Enzyme Applications* (pp. 95–123). https://doi.org/10.1002/9783527813780.ch2_1
- Register of food enzymes to be considered for inclusion in the union list (2024, July). Retrieved from https://food.ec.europa.eu/document/download/910b596e-aa10-4c5f-9831-677c28f4a973_en?filename=fs_food-improvement-agents_enzymes_register.pdf
- Sharma, A., Tewari, R., Rana, S. S., Soni, R., Soni, S. K. (2016). Cellulases: Classification, methods of determination and industrial applications. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 179(8), 1346–1380. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2070-3>
- Silano, V., Baviera, J. M. B., Bolognesi, C. et al. (2019). Characterisation of microorganisms used for the production of food enzymes. *EFSA Journal*, 17(6). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5741>
- Vakulenko, O. O., & Zhuravel, O. S. The increasing of the energy efficiency for production of bakery products // Abstracts of the VII International Scientific and Technical Conference “Lighting and Electrical Engineering: History, Problems, Prospects” (May 15-17, 2024). – Ternopil – P. 93-94.
- Wang, X., Pei, D., Teng, Y., Liang, J. (2017). Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism. *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 389–398. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2950-8>
- Yoon, J., Lee, K., & Lee, H. (2022). Physicochemical properties of enzyme treated-dietary fibers from whole grain and the quality characteristics of cakes. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 54(5), 490–497. <https://doi.org/10.9721/kjfst.2022.54.5.490>