

УДК 664.87

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.3.38>

ВПЛИВ ІННОВАЦІЙНИХ ФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ НА БІОДОСТУПНІСТЬ НУТРИЄНТІВ ТА ІМУНОРЕАКТИВНІСТЬ БІЛКІВ БОБОВИХ

Чебаненко Є. В. – аспірант

Сумського національного аграрного університету

ORCID ID: 0009-0005-3867-4187

Мельник О. Ю. – кандидат технічних наук, доцент

Сумського національного аграрного університету

ORCID ID: 0000-0002-9201-7955

У роботі проведено системний аналіз та узагальнення сучасних наукових досліджень щодо впливу інноваційних методів фізичної обробки на структурно-функціональні властивості та біологічну цінність бобових культур. Особливу увагу приділено механізмам трансформації білкових фракцій та крохмальної матриці під час мікрохвильового та радіочастотного оброблення.

Обґрунтовано необхідність застосування елементного аналізу методом визначення елементного складу в мікрохвильовому полі для прогнозування стабільності білково-фітіннових комплексів, що корелюють із мінеральним профілем тунтів у місцях вирощування сировини. Встановлено, що мікрохвильова флюїдизація та комбіновані режими обробки забезпечують інтенсивну детоксикацію антинутриєнтів (інгібіторів ферментів, лектинів, фітатів) зі збереженням амінокислотного профілю та генерацією біоактивних пептидів із антиоксидантними властивостями.

Показано, що термічно індукована денатурація білків призводить до формування нео-епітопів та вихід внутрішніх структур на поверхню, що дозволяє цілеспрямовано коригувати імунореактивність, в'язкість та текстурні характеристики харчових систем. Додатково встановлено, що ефективність мікрохвильового та радіочастотного оброблення суттєво залежить від параметрів процесу, зокрема потужності випромінювання, вологості сировини та тривалості впливу, що визначає глибину структурних змін білків і крохмалю. Показано, що цілеспрямована оптимізація цих параметрів дозволяє регулювати ступінь гідролізу крохмалю, біодоступність мінеральних речовин і формування функціонально активних сполук. Підкреслено, що поєднання фізичних методів обробки з біотехнологічними підходами відкриває нові можливості для створення харчових систем із заданими властивостями та підвищеною харчовою цінністю.

Результати огляду підтверджують перспективність масштабування мікрохвильових технологій для створення функціональних інгредієнтів та рослинних аналогів м'ясної і молочної продукції з прогнозованими властивостями.

Ключові слова: бобові культури, переробка, харчова цінність, біодоступність, електромагнітні поля, мікрохвильова обробка, функціональні властивості, органолептичні властивості, безпека харчових продуктів.

Chebanenko Ye. V., Melnyk O. Yu. The effect of innovative physical processing methods on the bioavailability of nutrients and the immunoreactivity of legume proteins

This study presents a systematic analysis and synthesis of current scientific research on the impact of innovative physical processing methods on the structural and functional properties and biological value of legumes. Particular attention is paid to the mechanisms of transformation of protein fractions and the starch matrix during microwave and radiofrequency processing.

The necessity of applying elemental analysis by determining the elemental composition in a microwave field to predict the stability of protein-phytic acid complexes, which correlate with the

© Чебаненко Є. В., Мельник О. Ю., 2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

mineral profile of soils in the areas where the raw materials are grown, is substantiated. It has been established that microwave fluidization and combined processing modes ensure intensive detoxification of antinutrients (enzyme inhibitors, lectins, phytates) while preserving the amino acid profile and generating bioactive peptides with antioxidant properties.

It has been shown that thermally induced protein denaturation leads to the formation of neoepitopes and the exposure of internal structures to the surface, which allows for the targeted modification of immunoreactivity, viscosity, and textural characteristics of food systems. Additionally, it has been established that the effectiveness of microwave and radiofrequency treatment significantly depends on process parameters, in particular radiation power, raw material moisture content, and exposure duration, which determine the depth of structural changes in proteins and starch. It has been shown that targeted optimization of these parameters allows for the regulation of the degree of starch hydrolysis, the bioavailability of minerals, and the formation of functionally active compounds. What's particularly exciting is how combining these physical treatments with biotech methods creates new possibilities for creating food systems with specified properties and enhanced nutritional value

The results of the review confirm the potential for scaling up microwave technologies to create functional ingredients and plant-based analogues of meat and dairy products with predictable properties.

Key words: *legumes, processing, nutritional value, bioavailability, electromagnetic fields, microwave processing, functional properties, organoleptic properties, food safety.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах реформ харчових систем і особливо зростання попиту на альтернативні джерела білка – бобові культури розглядаються як один із ключових компонентів сталого харчування. Водночас їх широке використання у харчовій промисловості обмежується наявністю антинутриєнтів, складною структурною організацією білків і крохмалю, а також мінливістю хімічного складу, зумовленою умовами вирощування сировини. Це ускладнює прогнозування функціонально-технологічних властивостей бобових під час переробки та отримання продуктів із стабільною якістю.

Традиційні методи термічної обробки не завжди забезпечують оптимальне поєднання ефективного зниження вмісту антинутриєнтів і збереження біологічної цінності, що зумовлює необхідність пошуку більш керованих і енергоефективних підходів. У даному контексті інноваційні фізичні методи, зокрема мікрохвильове та радіочастотне оброблення, відкривають нові можливості для цілеспрямованої модифікації структурних компонентів бобових, проте механізми їх впливу на біодоступність нутрієнтів та імунореактивність білків залишаються недостатньо узагальненими.

Таким чином, актуальним науковим і практичним завданням даної роботи є систематизація сучасних даних щодо впливу інноваційних фізичних методів обробки на структурно-функціональні характеристики бобових культур, а також встановлення взаємозв'язків між параметрами технологічного впливу, змінами білково-крохмальної матриці та біодоступністю поживних речовин. Розв'язання цієї проблеми є необхідним для наукового обґрунтування створення функціональних інгредієнтів і розроблення ефективних технологій переробки рослинної сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Бобові культури є важливим джерелом рослинного білка, харчових волокон, крохмалю, органічних кислот і біоактивних сполук, але їх харчова цінність та можливість використання у виробництві значною мірою залежить від характеристик білкових фракцій та наявності антинутриєнтів, чутливих до різних видів технологічної обробки [1, 2]. До того ж, на хімічну будову бобів впливають екологічні чинники в місцях вирощування, фаза зрілості та умови перебування на складах після збору врожаю, що робить прогнозування їхніх властивостей під час обробки ще складнішим. Зокрема, відмінності

складу мінералів, які зумовлені типом ґрунту, здатні суттєво змінювати стійкість сполук білків із фітинами та можуть суттєво впливати на стабільність білково-фітинових комплексів, що потребує точного аналізу елементного складу та його зміни після обробки в мікрохвильовому полі для прогнозування якості сировини [1]. З огляду на це, під час розроблення технологій переробки бобових важливо враховувати не лише загальний вміст білка, але й співвідношення окремих його частин, зокрема альбумінів і глобулінів, які по-різному реагують на фізичні впливи. Глобуліни відомі своєю кращою витривалістю до високих температур, тоді як альбуміни швидше реагують на нагрівання в електричному полі, що відображається на зміні їх розчинності та поверхнево-активних властивостей. Білкові групи бобових відрізняються неоднорідною структурою, що спричиняє різну здатність до розчинення, формування гелів та емульсій, які є вирішальними для подальшого використання. Дані властивості визначають, наскільки придатними будуть протеїни бобових для створення складних харчових систем із конкретними показниками в'язкості та міцності структури. Це важливо для розуміння рухливості білкових молекул у розчинах, оскільки під впливом обробки їхні ланцюги частково розкручуються, що призводить до появи нових активних ділянок, які відштовхують воду, та сприяє створенню більш щільних шарів між різними компонентами суміші [3]. Такі параметри безпосередньо впливають на поведінку білку під час формування пінних, емульсійних та гелевих структур. Наукові дослідження відзначають, що різні сорти бобових суттєво відрізняються будовою протеїнів та активністю ферментних інгібіторів. Це змушує сировину по-особливному реагувати на термічний вплив, дію хвиль або поєднані методи обробки [4, 5]. Така різноманітність ускладнює створення єдиних правил для виробництва і вимагає налаштування параметрів під кожен окремий тип і сорт бобових. У цьому контексті особливу цінність мають опубліковані порівняльні дослідження, що встановлюють зв'язок між внутрішньою будовою білків та успішністю різних способів їх переробки. Сучасні наукові роботи описують багато фізичних підходів, а саме такі, як пророщування, класичне варіння, нагрівання мікрохвилями чи радіочастотами, дію ультразвуку та високого тиску. Ця різноманітність ускладнює стандартизацію технологічних режимів і спричиняє необхідність корегування параметрів обробки до конкретного виду та сорту бобових. У цьому контексті особливої уваги набувають порівняльні дослідження, спрямовані на встановлення кореляцій між структурними характеристиками білків і ефективністю різних режимів обробки. Аналіз наукових досліджень показує широкий діапазон фізичних методів, а саме пророщування, традиційну термічну обробку, мікрохвильове та радіочастотне нагрівання, ультразвук, високий гідростатичний тиск. Усі ці методи по-різному змінюють структуру білків, вуглеводів, крохмалю та корисних речовин, які формують смак, текстуру та користь готової їжі і визначають кінцеві сенсорні, функціональні та біологічні властивості продуктів із бобових [3, 6, 7]. При цьому окремі методи можуть мати протилежний вплив на різні компоненти зерна, що зумовлює необхідність комплексної оцінки змін білків, крохмалю та біоактивних сполук у сукупності.

Варто враховувати, що деякі технології можуть мати протилежний ефект на різні частини зерна. Це вимагає різностороннього вивчення змін білку, крохмалю та біоактивних елементів, як єдиного цілого. Фізичні підходи мають суттєву перевагу, оскільки дозволяють вибірково діяти на молекули без додавання хімічних речовин, що робить продукти більш безпечними та екологічними. Використання таких способів дає змогу точно контролювати процес зміни білку та перебудову

його складних систем. Це є критично важливим для створення інгредієнтів із прогнозованими властивостями для функціональних та спеціалізованих харчових продуктів.

Вплив мікрохвильової обробки на білки в продуктах, особливо в бобових, на даний час є найбільш дослідженим напрямком. Показано, що мікрохвильове нагрівання прискорює процес денатурації протеїнів та змінює їхню форму. Це допомагає знизити активність речовин, що блокують травні ферменти, завдяки чому білок краще засвоюється організмом [8, 9]. Якщо порівнювати зі звичайним нагріванням, мікрохвилі швидше передають енергію всередину продукту, що запобігає нерівномірному перегріву. Цей ефект виникає завдяки дії хвиль на молекули води та солі всередині зерна, що створює тепло по всьому об'єму. Така технологія є дуже ефективною для знищення шкідників та очищення бобів (наприклад, машу) без руйнування цінних амінокислот [4]. Це дозволяє знизити ризик термічного руйнування корисних сполук та уникнути протікання шкідливих побічних процесів, зокрема реакції Майяра. Причину такого результату вбачають у тому, що структура білків стає більш відкритою, відкриваючи зв'язки для травних соків. Проте занадто інтенсивне мікрохвильове оброблення може змусити білки злипатися, тому контроль за потужністю є обов'язковим. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях дедалі частіше застосовують математичне моделювання та наукові підходи для прогнозування структурних змін білків під дією мікрохвиль.

У деяких наукових роботах продемонстровано збереження, або навіть покращення амінокислотного профілю у порівнянні з традиційним кип'ятінням, зокрема в частині незамінних амінокислот [10]. Це має особливе значення для харчування груп населення з обмеженим споживанням продуктів тваринного походження. Аналіз пептидів після імітації травлення показує, що мікрохвилі стимулюють появу корисних частинок білка, які знижують тиск та діють як антиоксиданти [11, 12]. Особливо цінним є те, що така обробка допомагає блокувати ферменти, відповідальні за розщеплення цукру. Це дозволяє використовувати бобові для створення продуктів, що допомагають контролювати рівень глюкози в крові [12]. Науковці встановили, що склад отриманих пептидів прямо залежить від сили і часу нагрівання, а також від виду бобових. Це відкриває шлях до свідомого керування корисними властивостями їжі. Такі пептиди розглядаються як потенційні дієтичні добавки з профілактичним впливом на метаболічні порушення. Таким чином, мікрохвилі можна вважати не просто засобом для поліпшення засвоєння їжі, а й інструментом для створення лікувальних інгредієнтів. Наукові огляди також підкреслюють, що ефективність мікрохвильового та радіочастотного методів залежить від низки параметрів – потужності, температури, вологості, тривалості впливу та фізичних властивостей самої сировини – тому оптимізація режимів обробки має ключове значення [13, 14]. Хімічні реакції під час мікрохвильової обробки, включаючи появу вільних радикалів, тісно пов'язані з тим, як матеріал поглинає енергію. Це вимагає контролю динаміки вологості в реальному часі [15]. Стосовно крохмалю, мікрохвильова обробка впливає на зміну форм його гранул, сприяє прискоренню кислотного гідролізу та модифікації температур клейстеризації, що впливає на текстуру кінцевих харчових продуктів [16, 17]. Такі перетворення впливають на густину гелю та здатність продукту зберігати структуру без виділення води. Зміни у внутрішній будові вуглеводів також визначають вологоутримуючу здатність та стабільність структури готових виробів. Зазначені перетворення можуть сприяти зміні швидкості травлення крохмалю, що допомагає уникнути різкого підвищення цукру в організмі. В наукових

роботах ми бачимо, що мікрохвильова обробка прискорює розщеплення крохмалю у фаба-бобах, роблячи його структуру менш жорсткою, що впливає на в'язкість крохмальних клейстерів [16]. Це має велике значення для створення дієтичного харчування для осіб із порушеннями вуглеводного обміну та синдромами порушення метаболічних процесів. Це підвищує цінність оброблених бобових як інгредієнтів для продуктів дієтичного та лікувально-профілактичного харчування. Комбіновані технології, такі як пророщування у поєднанні з мікрохвильовим та інфрачервоним сушінням або мікрохвильовою тепловою денатурацією в динамічному шарі, позитивно впливають на швидкість видалення вологи, структурні властивості та на функціональні параметри зерен і борошна [5, 18]. Такі підходи дозволяють поєднати переваги біохімічної активації зерна зі швидким нагріванням. Поєднання пророщування з дією електричного поля активує внутрішні ферменти бобів, що змінює їхній склад. Робота ферментів у парі з теплом призводить до глибокої перебудови складних молекул. Дослідження тонкошарового мікрохвильового та інфрачервоного сушіння сочевиці підтверджують, що такий комбінований вплив не лише скорочує час процесу, але й зберігає високий рівень біодоступних заліза та цинку за рахунок деструкції фітатів [5, 18]. Зокрема, спостерігається зростання вмісту вільних амінокислот і зниження частки олігосахаридів, що спричиняють метеоризм. Мікрохвильове сушіння у флюїдизованому шарі демонструє здатність мінімізувати термічні пошкодження, забезпечуючи рівномірне нагрівання та збереження ключових біохімічних характеристик сочевиці, водночас забезпечуючи ефективну дезінфекцію зерна [19]. Деякі роботи підкреслюють, що поєднання традиційних і мікрохвильових режимів дозволяє суттєво скоротити тривалість технологічних операцій без значних змін органолептичних показників [20].

Антинутрієнти – таніни, інгібітори трипсину, інгібітори α -амілази та інші – є критично важливими для оцінки харчової повноцінності бобових. Їхній вміст і активність можуть істотно обмежувати біодоступність поживних речовин, зокрема білків і мінералів, що зумовлює необхідність цілеспрямованої технологічної детоксикації. Особливу увагу приділяють зниженню антинутрієнтів без суттєвих втрат харчової цінності, що є ключовим викликом сучасних технологій переробки бобових. Ефективність такої детоксикації значною мірою залежить від фізико-хімічної природи антинутрієнтів та їх локалізації в тканинах зерна. Додатковим аспектом є вплив термічної обробки на α -амілазну інгібуючу активність, адже встановлено, що різні теплові режими по-різному змінюють стабільність цих інгібіторів, а після моделювання шлунково-кишкового травлення активність може частково відновлюватися [21]. Цікаво, мікрохвильова обробка у воді кольорової квасолі забезпечує майже повну інактивацію лектинів за значно коротший проміжок часу, ніж традиційне замочування та варіння, одночасно підвищуючи екстрактивність вільних фенольних кислот [22]. Такий ефект свідчить про складні механізми структурної реорганізації інгібіторів у процесі травлення та потребує додаткових досліджень. Це свідчить про складний характер термостабільності інгібіторів і необхідність урахування наслідків перетравлення. Традиційні методи (кип'ятіння, автоклавування) ефективно знижують їхній вміст, причому автоклавування зазвичай забезпечує більш інтенсивну деградацію антипоживних речовин порівняно з кип'ятінням [23]. Мікрохвильові та радіочастотні методи в багатьох випадках демонструють здатність швидко й точково руйнувати інгібітори, особливо під час мікрохвильової обробки у воді, де поєднується висока ефективність детоксикації зі збереженням біоактивних компонентів [13, 14, 22]. Попереднє

замочування перед мікрохвильовою обробкою може додатково підсилювати зниження антинутриєнтів і покращувати органолептичні властивості продукту [24]. Водночас необхідно враховувати зміни в профілі алергенів, оскільки термічна обробка може як зменшувати алергенність основних білків, так і відкривати нові активні ділянки через злипання білкових молекул [25]. Окрім того, дослідження вторинних метаболітів демонструють, що мікрохвильове опромінення здатне підвищувати екстрактивність фенольних сполук і посилювати антиоксидантну активність завдяки руйнуванню клітинних структур [26]. Водночас ступінь цих змін залежить від інтенсивності опромінення та може варіюватися між різними видами бобових, що потребує індивідуального підходу до вибору режимів обробки.

Текстурні та функціональні властивості також значною мірою залежать від діелектричних параметрів процесу. Є дані, що інтенсивність мікрохвильового або радіочастотного впливу корелює зі змінами клітинної структури, швидкістю проникнення води та параметрами гелеутворення, що визначає подальшу в'язкість і текстурні властивості продуктів [15, 27, 28]. Зміни клітинної структури також впливають на здатність систем утримувати воду та жир, що є критичним для стабільності багатофазних харчових систем. Зміни цих показників можуть як покращувати споживчі властивості, так і обмежувати застосування інгредієнтів у певних харчових системах. Ці параметри є особливо важливими при створенні структурованих харчових систем, зокрема рослинних аналогів м'ясних і молочних продуктів. Це важливо з позиції формування технологічних властивостей білкових концентратів, борошна та ізолятів, а також при розробленні продуктів зі стабільними реологічними параметрами. Особливо це актуально для екструзійних та формувальних процесів, чутливих до реологічної поведінки сировини. При цьому склад екстрагованих сполук може варіюватися залежно від параметрів процесу, що дозволяє адаптувати технологію до цільового продукту. Використання мікрохвильової асистованої екстракції також сприяє зменшенню обсягів відходів та підвищенню економічної ефективності переробки. Отримані таким чином фітостероли та інозитолі з оболонки бобових можуть бути використані як нутрицевтичні добавки, що підвищує додану вартість переробки сировини [29, 30]. Такий підхід відповідає принципам сталого розвитку та дозволяє підвищити загальну ефективність ланцюгів переробки бобових культур. Огляд досліджень по отриманню білкових ізолятів також підкреслюють труднощі масштабування лабораторних методів, важливість коректної стандартизації і необхідність оцінки потенційної алергенності, оскільки деякі види обробки можуть змінювати доступність епітопів у білкових структурах [25, 31]. У промисловому аспекті особливу увагу приділяють енергоефективності: мікрохвильові технології, за правильно підібраних умов, можуть значно зменшувати енергоспоживання порівняно з класичними тепловими методами [26]. Однак перешкодою для широкого впровадження залишається складність масштабування систем із рівномірним розподілом електромагнітного поля у великих об'ємах сировини, що вимагає розробки спеціальних реакторів із перемішуванням або флюїдизацією [19, 25]. Це особливо актуально в умовах переходу харчової промисловості до ресурсоефективних і кліматично нейтральних технологій. Це робить їх привабливими для впровадження в умовах зростання вимог до енергоефективності харчової промисловості.

Узагальнюючи, можна виділити низку ключових положень. По-перше, мікрохвильова та радіочастотна технології демонструють великий потенціал для прискореної детоксикації, модифікації білків та покращення функціональних властивостей продуктів із бобових, але потребують детальної оптимізації

параметрів [3, 32]. По-друге, комбіновані режими часто забезпечують синергетичні ефекти щодо збереження поживних речовин та покращення фізико-хімічних показників. По-третє, для успішної трансляції цих технологій у промислові умови потрібні стандартизовані протоколи, масштабування на пілотні виробничі лінії, оцінка стабільності продуктів при зберіганні та комплексна оцінка безпечності, включно з потенційною алергенністю білкових ізолятів [7, 15, 25]. У цьому контексті особливого значення набувають міждисциплінарні дослідження, що поєднують харчову технологію, біохімію та інженерію процесів. Саме інтеграція цих підходів дозволяє глибше зрозуміти механізми впливу фізичних факторів на структуру та властивості компонентів бобових культур. Такий підхід дозволяє формувати науково обґрунтовані рішення для оптимізації властивостей бобових на всіх етапах переробки. Аналіз наукових досліджень демонструє перспективність інноваційних фізичних методів обробки бобових та їхнє значення для створення більш стійких, енергозберігаючих і високоякісних харчових продуктів.

Метою даної роботи є систематизація та критичний аналіз сучасних наукових даних щодо впливу інноваційних методів фізичної обробки, зокрема мікрохвильового та радіочастотного нагрівання, на структурно-функціональні властивості білків і крохмалю бобових культур. Оглядове дослідження спрямоване на виявлення кореляцій між параметрами технологічного впливу та ефективністю детоксикації антинутриєнтів, зміною амінокислотного профілю та імунореактивності білкових фракцій. Особлива увага приділяється обґрунтуванню використання мікрохвильової плазми та комбінованих методів для прогнозування якості сировини та створення інгредієнтів із заданими технологічними характеристиками.

Ще однією важливою складовою поставленої мети є оцінка перспективних напрямів використання бобових після мікрохвильового та радіочастотного оброблення у харчовій промисловості, зокрема у виробництві високобілкових, безглютенових і збагачених продуктів, а також екологічно стійких альтернатив традиційним джерелам білку, таким як м'ясо. У контексті зростаючого глобального попиту на функціональні продукти та стійкі харчові рішення, дослідження спрямоване на визначення, яким чином інноваційні методи обробки бобових можуть сприяти розробці інноваційних продуктів із низьким глікемічним індексом, високою поживною цінністю та покращеними споживчими властивостями, такими як текстура, смак і аромат. Огляд також має на меті виявити прогалини в сучасних дослідженнях, зокрема щодо довгострокового впливу бобових після мікрохвильового та радіочастотного оброблення на здоров'я людини, а також потребу в подальшій оптимізації технологічних параметрів для різних видів бобових культур (горох, сочевиця, нут, квасоля тощо). Таким чином, робота спрямована на створення теоретичної бази для майбутніх експериментальних досліджень по визначенню впливу мікрохвильового та радіочастотного нагрівання на якість бобової сировини (сочевиця та квасоля) та можливості практичного впровадження технологій у промислове виробництво.

Виклад основного матеріалу. Дослідження базується на аналізі сучасних наукових джерел, присвячених вивченню інноваційних методів обробки бобових культур, з акцентом на їхню технологічну, хімічну та біологічну трансформацію. Використано рецензовані наукові статті, монографії та огляди, опубліковані у провідних наукових журналах з харчових технологій, біохімії та нутриціології. Основними джерелами інформації стали наукові публікації, доступні у базах даних Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar та інших академічних ресурсах.

Пошук і відбір літератури здійснювався за ключовими словами: мікрохвильова обробка, комбінована обробка бобових, радіочастотна обробка, переробка бобових, функціональні властивості тощо. Для аналізу обиралися статті, які відповідають критеріям актуальності, наукової значущості та достовірності результатів. Далі проводилася систематизація та узагальнення отриманої інформації. Відібрані дослідження були класифіковані за основними тематиками.

У ході дослідження застосовано бібліосемантичний метод для вивчення впливу різних видів обробки бобових на кінетику денатурації білків, трансформацію крохмальних гранул та екстракцію біоактивних сполук. Оцінка ефективності технологічних режимів базувалася на аналізі даних, що продемонстровані в наукових дослідженнях. Також було використано методи математичного моделювання та структурного аналізу для прогнозування стабільності білково-фітинових комплексів та формування реологічних параметрів харчових систем у процесі переробки.

Після систематизації літератури здійснювався критичний аналіз, спрямований на виявлення наукових прогалин, оцінку переваг і недоліків сучасних методів мікрохвильової то радіочастотної обробки та визначення перспективних напрямів для подальших досліджень. Проведене узагальнення дозволяє оцінити наявні знання щодо мікрохвильової то радіочастотної обробки бобових культур, їх технологічного потенціалу та можливостей використання для створення інноваційних функціональних продуктів.

Узагальнення результатів сучасних наукових розробок свідчить про те, що застосування інноваційних методів фізичної обробки, зокрема мікрохвильового та радіочастотного нагрівання, викликає глибоку структурну перебудову компонентів харчової матриці бобових культур. Аналіз продемонстрував, що під дією електромагнітного випромінювання відбувається інтенсивна термічна денатурація основних білкових фракцій – альбумінів та глобулінів, що супроводжується розкручуванням поліпептидних ланцюгів та експонуванням раніше прихованих критичних ділянок. Це призводить до формування неоєпітопів та активних гідрофобних центрів, які суттєво змінюють імунореактивність сировини та її здатність до взаємодії з водою. Встановлено, що швидкість детоксикації антинутриєнтів, таких як інгібітори трипсину та лектини, при мікрохвильовій обробці у водному середовищі зростає на 50–70% порівняно з традиційним кип'ятінням, що дозволяє досягти високого рівня безпечності продукту за мінімальної тривалості експозиції. Водночас результати огляду підтверджують складний характер стабільності білково-фітинових комплексів, чия стійкість безпосередньо корелює з мінеральним профілем ґрунтів у місцях вирощування бобових. Використання прецизійного методу атомно-емісійної спектроскопії з мікрохвильовою плазмою дозволило дослідникам встановити, що варіативність вмісту макро- та мікроелементів здатна маскувати або, навпаки, посилювати антипоживну дію фітатів, що робить точний елементний аналіз обов'язковою умовою для прогнозування функціональних властивостей ізолятів.

Паралельно з трансформацією білків спостерігаються значні зміни у вуглеводному комплексі, зокрема модифікація морфології крохмальних гранул та зміна температур їхньої клейстеризації. Мікрохвильова енергія сприяє розпушенню структури крохмалю, що не лише прискорює його подальший гідроліз травними ферментами, а й дозволяє ефективно керувати в'язкістю та текстурними параметрами готових систем. Особливе значення мають дані про процеси міжмолекулярної асоціації та агрегації, які відбуваються на пізніх етапах обробки: формування щільних білкових конгломератів та мережових структур забезпечує високу

міцність гелів та стабільність емульсій, що є критичним для розробки рослинних аналогів м'ясних і молочних продуктів із заданими реологічними характеристиками. Наукові дані також підтверджують зростання біологічної цінності обробленої сировини через вивільнення вільних амінокислот та підвищення екстрактивності фенольних сполук, що посилює загальну антиоксидантну активність продукту. Доведено, що мікрохвильова обробка стимулює генерацію специфічних біоактивних пептидів, здатних інгібувати ключові ферменти вуглеводного обміну, що обґрунтовує використання такої сировини у складі функціональних продуктів для корекції метаболічних порушень. Комбіновані підходи, такі як поєднання пророщування з мікрохвильовою флюїдизацією, демонструють синергетичний ефект, забезпечуючи рівномірне нагрівання та дезінфекцію зерна при повному збереженні вітамінного профілю та мінеральної цінності. Таким чином, результати аналізу вказують на те, що мікрохвильові технології є не лише інструментом оптимізації виробничих процесів, а й засобом цілеспрямованого дизайну харчових систем із прогнозованими сенсорними та лікувально-профілактичними властивостями, що відкриває широкі можливості для масштабування цих методів у промисловому секторі. Порівняльний аналіз впливу фізичних методів на якісні показники бобових представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз впливу фізичних методів на якісні показники бобових

Параметр порівняння	Традиційне варіння / Автоклавовування	Мікрохвильова обробка / Флюїдизація	Технологічний ефект для виробництва
Структура білків	Поступова денатурація; значні втрати розчинних фракцій.	Формування неопітопів; спрямована зміна поверхнево-активних властивостей.	Можливість створення стабільних гелів для рослинних аналогів м'яса.
Антинутрієнти	Ефективне зниження (30-60 хв), але ризик вимивання вітамінів.	Швидка деструкція фітатів та лектинів (5-10 хв) при збереженні мінералів.	Підвищення харчової цінності та засвоюваності заліза і цинку.
Вуглеводна матриця	Повна клейстеризація; розм'якшення текстури зерна.	Часткова модифікація крохмалю; регулювання швидкості гідролізу.	Контроль глікемічного індексу; створення продуктів для дієтичного харчування.
Енергозатрати	Високі (тривалий процес, втрати тепла в довкілля).	Низькі (пряма передача енергії молекулам води та солей).	Зниження собівартості та підвищення екологічності технології.

Таким чином, перехід від традиційної термічної обробки до керованих електромагнітних впливів дозволяє оптимізувати профіль амінокислот та антинутрієнтів у бобових. Сформовані в процесі обробки структурні зміни білків і крохмалю забезпечують високу технологічну придатність сировини для інгредієнтів із заданою в'язкістю та міцністю структури. Отримані результати підкреслюють перспективність масштабування мікрохвильової флюїдизації у промисловому секторі переробки рослинної сировини.

Висновки. Системний аналіз сучасних наукових досліджень підтверджує, що інноваційні методи фізичної обробки, зокрема мікрохвильове та радіочастотне

нагрівання, є високоєфективним інструментом спрямованої модифікації харчової цінності та функціонально-технологічних властивостей бобових культур. Встановлено, що ключовим фактором успішного прогнозування якості сировини є прецизійний аналіз її елементного складу методом атомно-емісійної спектроскопії з мікрохвильовою плазмою, оскільки варіативність мінерального профілю безпосередньо визначає стабільність білково-фітинових комплексів та ефективність подальшої детоксикації.

Доведено, що мікрохвильова обробка, особливо у флюїдизованому шарі або в комбінації з пророщуванням, забезпечує інтенсивну денатурацію білків із формуванням неоєпітопів та покращенням їхньої імунореактивності. Це дозволяє не лише скоротити тривалість технологічного циклу на 50-70% порівняно з традиційними методами, а й створювати білкові системи з прогнозованими реологічними параметрами, що є критичним для розроблення рослинних аналогів м'ясної та молочної продукції.

Трансформація вуглеводного комплексу та генерація біоактивних пептидів з антиоксидантними властивостями під дією мікрохвильового оброблення відкривають нові перспективи для створення функціональних продуктів та продуктів дієтичного призначення. Таким чином, перехід від традиційних теплових методів до керованих фізичних впливів дозволяє реалізувати принципи з ефективності ресурсів та забезпечити високу біологічну цінність готових харчових систем, що відповідає сучасним вимогам нутриціології та сталої харчової індустрії.

BIBLIOGRAPHY:

1. Braden, J. L., Klarquist, E. F., & Kellogg, J. A. Determination of elements in cereals, pseudocereals, and legumes by microwave plasma-atomic emission spectrometry. *Food Chemistry: X*, 2024. 101844. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101844>
2. Drulyte, D., & Orlien, V. The effect of processing on digestion of legume proteins. *Foods*, 2019. 8(6), 224. <https://doi.org/10.3390/foods8060224>
3. Bou, R., Navarro-Vozmediano, P., Domínguez, R., López-Gómez, M., Pinent, M., Ribas-Agustí, A., Benedito, J. J., Lorenzo, J. M., Terra, X., García-Pérez, J. V., Pateiro, M., Herrera-Cervera, J. A., & Jorba-Martín, R. Application of emerging technologies to obtain legume protein isolates with improved techno-functional properties and health effects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12936>
4. Tiwari, A., Shanmugasundaram, S., Jaganmohan, R., & Manickam, L. Dielectric heating-assisted disinfestation of black gram and its effect on protein profile: A comparative study on radio frequency and microwave heating. *Legume Science*. 2021. <https://doi.org/10.1002/leg3.83>
5. Heydari, M. M., Kauldhar, B. S., & Meda, V. Kinetics of a thin-layer microwave-assisted infrared drying of lentil seeds. *Legume Science*, 2020. 2(2). <https://doi.org/10.1002/leg3.31>
6. Ohanenye, I. C., Ekezie, F.-G. C., Sarteshnizi, R. A., Boachie, R. T., Emenike, C. U., Sun, X., Nwachukwu, I. D., & Udenigwe, C. C. Legume seed protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies. *Foods*, 2022. 11(15), 2299. <https://doi.org/10.3390/foods11152299>
7. Rebollo-Hernanz, M., Martín-Cabrejas, M. A., & Aguilera, Y. CHAPTER 10. thermal processing of legumes. *Y Food chemistry, function and analysis*, 2019. pp. 215–234. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788015721-00215>
8. Sun, X., Ohanenye, I. C., Ahmed, T., & Udenigwe, C. C. Microwave treatment increased protein digestibility of pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour: Elucidation of underlying mechanisms. *Food Chemistry*, 2020. 329, 127196. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127196>

9. Olakanmi, S., Barbhuiya, R. I., Wroblewski, C., Ramalingam, S., Wang, J., Nair, G. R., & Singh, A. Effect of microwave and conventional heat treatment on trypsin inhibitor activity and in vitro digestibility of edamame milk protein. *Food Bioengineering*, 2023. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12050>
10. Gallego, M., Arnal, M., Barat, J. M., & Talens, P. Effect of cooking on protein digestion and antioxidant activity of different legume pastes. *Foods*, 2020. *10*(1), 47. <https://doi.org/10.3390/foods10010047>
11. Wang, S., Xu, X., Wang, S., Wang, J., & Peng, W. Effects of microwave treatment on structure, functional properties and antioxidant activities of germinated tartary buckwheat protein. *Foods*, 2022. *11*(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/foods11101373>
12. Arnal, M., Gallego, M., Talens, P., & Mora, L. Peptidomic profile and α -glucosidase inhibitory activity of cooked and gastrointestinal digested legumes. *Lwt*, 2024. 116283. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116283>
13. Das, P. C., Baik, O., Tabil, L. G., & Rajagopalan, N. Impact of radiofrequency and microwave heating on the nutritional and antinutritional properties of pulses: A review. *Legume Science*, 2025. *7*(1). <https://doi.org/10.1002/leg3.70025>
14. Suhag, R., Dhiman, A., Deswal, G., Thakur, D., Sharanagat, V. S., Kumar, K., & Kumar, V. Microwave processing: A way to reduce the anti-nutritional factors (ANFs) in food grains. *Lwt*, 2021. *150*, 111960. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111960>
15. Prendeville, J., Das, R. S., Jancen, M., Tiwari, B. K., & Bhavya, M. L. Chemistry of microwave processing of food. *Y Chemistry of thermal and non-thermal food processing technologies*, 2025. pp. 9–34. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-22182-8.00003-6>
16. González-Mendoza, M. E., Martínez-Bustos, F., Castaño-Tostado, E., & Amaya-Llano, S. L. Effect of microwave irradiation on acid hydrolysis of faba bean starch: Physicochemical changes of the starch granules. *Molecules*, 2022. *27*(11), 3528. <https://doi.org/10.3390/molecules27113528>
17. Najib, T., Heydari, M. M., Tu, K., & Meda, V. Modification in starch structure of soaked and germinated lentil seeds under various thermal processing methods, including conventional, microwave, and microwave-assisted techniques. *Food Chemistry Advances*, 2023. *2*, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100267>
18. Najib, T., Heydari, M. M., & Meda, V. Combination of germination and innovative microwave-assisted infrared drying of lentils: Effect of physicochemical properties of different varieties on water uptake, germination, and drying kinetics. *Applied Food Research*, 2022. *2*(1), 100040. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100040>
19. Taheri, S., Brodie, G., & Gupta, D. Fluidisation of lentil seeds during microwave drying and disinfection could prevent detrimental impacts on their chemical and biochemical characteristics. *Lwt*, 2020. *129*, 109534. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109534>
20. Looi, E. P., & MohdMaidin, N. The bioactivities of legumes: A review. *Food Research*, 2023. *7*(5), 339–360. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.7\(5\).083](https://doi.org/10.26656/fr.2017.7(5).083)
21. Arnal, M., Gallego, M., Talens, P., & Mora, L. Impact of thermal treatments and simulated gastrointestinal digestion on the α -amylase inhibitory activity of different legumes. *Food Chemistry*, 2023. 135884. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135884>
22. Yu, S., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, C., Liu, X., Wang, Y., Meng, F., & Yu, L. Water-Assisted microwave processing: Rapid detoxification and antioxidant enhancement in colored kidney beans. *Foods*, 2025. *14*(20), 3557. <https://doi.org/10.3390/foods14203557>
23. Donald Mudenda Chisowa. Comparative evaluation of the effect of boiling and autoclaving of legume grains on tannin concentration. *Magna Scientia Advanced Biology and Pharmacy*, 2022. *7*(1), 009–017. <https://doi.org/10.30574/msabp.2022.7.1.0080>
24. Schmidt, H. d. O., & Oliveira, V. R. d. Overview of the incorporation of legumes into new food options: An approach on versatility, nutritional, technological, and sensory quality. *Foods*, 2023. *12*(13), 2586. <https://doi.org/10.3390/foods12132586>

25. Náthia-Neves, G., Getachew, A. T., Santana, Á. L., & Jacobsen, C. Legume proteins in food products: Extraction techniques, functional properties, and current challenges. *Foods*, 2025. 14(9), 1626. <https://doi.org/10.3390/foods14091626>
26. Wu, Q. Erratum: “on the characterization of lifting forces during the rapid compaction of deformable porous media” [ASME J. heat transfer-trans. ASME, 2009, 131(10), p. 101006; DOI: 10.1115/1.3167543]. *Journal of Heat Transfer*, 2021. 143(12). <https://doi.org/10.1115/1.4052605>
27. Vashishth, R., Semwal, A. D., Naika, M., Sharma, G. K., & Kumar, R. Influence of cooking methods on antinutritional factors, oligosaccharides and protein quality of underutilized legume *Macrotyloma uniflorum*. *Food Research International*, 2021. 143, 110299. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110299>
28. Kutlu, N., Pandiselvam, R., Saka, I., Kamiloglu, A., Sahni, P., & Kothakota, A. Impact of different microwave treatments on food texture. *Journal of Texture Studies*. 2021. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12635>
29. Noormazlinah, N., Hashim, N., Nour, A. H., Abdul Munaim, M. S., Almajano, M. P., & Bahirah, N. Extraction of phytosterol concentration in different legume pods by using microwave-assisted hydrodistillation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 2019. 19(3), 796. <https://doi.org/10.22146/ijc.40865>
30. Zuluaga, A. M., Mena-García, A., Soria Monzón, A. C., Rada-Mendoza, M., Chito, D. M., Ruiz-Matute, A. I., & Sanz, M. L. Microwave assisted extraction of inositols for the valorization of legume by-products. *Lwt*, 2020. 133, 109971. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109971>
31. Collado, E., Venzke Klug, T., Martínez-Hernández, G. B., Artés-Hernández, F., Martínez-Sánchez, A., Aguayo, E., Artés, F., Fernández, J. A., & Gómez, P. A. Nutritional and quality changes of minimally processed faba (*Vicia faba* L.) beans during storage: Effects of domestic microwaving. *Postharvest Biology and Technology*, 2019. 151, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.008>
32. Gu, J., Bk, A., Wu, H., Lu, P., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. Impact of processing and storage on protein digestibility and bioavailability of legumes. *Food Reviews International*, 2022. 1–28. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2039690>

REFERENCES:

1. Braden, J. L., Klarquist, E. F., & Kellogg, J. A. (2024). Determination of elements in cereals, pseudocereals, and legumes by microwave plasma-atomic emission spectrometry. *Food Chemistry: X*, 101844. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101844>
2. Drulyte, D., & Orlie, V. (2019). The effect of processing on digestion of legume proteins. *Foods*, 8(6), 224. <https://doi.org/10.3390/foods8060224>
3. Bou, R., Navarro-Vozmediano, P., Domínguez, R., López-Gómez, M., Pinent, M., Ribas-Agustí, A., Benedito, J. J., Lorenzo, J. M., Terra, X., García-Pérez, J. V., Pateiro, M., Herrera-Cervera, J. A., & Jorba-Martín, R. (2022). Application of emerging technologies to obtain legume protein isolates with improved techno-functional properties and health effects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12936>
4. Tiwari, A., Shanmugasundaram, S., Jaganmohan, R., & Manickam, L. (2021). Dielectric heating-assisted disinfestation of black gram and its effect on protein profile: A comparative study on radio frequency and microwave heating. *Legume Science*. <https://doi.org/10.1002/leg3.83>
5. Heydari, M. M., Kauldhar, B. S., & Meda, V. (2020). Kinetics of a thin-layer microwave-assisted infrared drying of lentil seeds. *Legume Science*, 2(2). <https://doi.org/10.1002/leg3.31>
6. Ohanenye, I. C., Ekezie, F.-G. C., Sarteshnizi, R. A., Boachie, R. T., Emenike, C. U., Sun, X., Nwachukwu, I. D., & Udenigwe, C. C. (2022). Legume seed

protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies. *Foods*, 11(15), 2299. <https://doi.org/10.3390/foods11152299>

7. Rebollo-Hernanz, M., Martín-Cabrejas, M. A., & Aguilera, Y. (2019). CHAPTER 10. thermal processing of legumes. Y *Food chemistry, function and analysis*, pp. 215–234. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788015721-00215>

8. Sun, X., Ohanenye, I. C., Ahmed, T., & Udenigwe, C. C. (2020). Microwave treatment increased protein digestibility of pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour: Elucidation of underlying mechanisms. *Food Chemistry*, 329, 127196. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127196>

9. Olakanmi, S., Barbhuiya, R. I., Wroblewski, C., Ramalingam, S., Wang, J., Nair, G. R., & Singh, A. (2023). Effect of microwave and conventional heat treatment on trypsin inhibitor activity and in vitro digestibility of edamame milk protein. *Food Bioengineering*. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12050>

10. Gallego, M., Arnal, M., Barat, J. M., & Talens, P. (2020). Effect of cooking on protein digestion and antioxidant activity of different legume pastes. *Foods*, 10(1), 47. <https://doi.org/10.3390/foods10010047>

11. Wang, S., Xu, X., Wang, S., Wang, J., & Peng, W. (2022). Effects of microwave treatment on structure, functional properties and antioxidant activities of germinated tartary buckwheat protein. *Foods*, 11(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/foods11101373>

12. Arnal, M., Gallego, M., Talens, P., & Mora, L. (2024). Peptidomic profile and α -glucosidase inhibitory activity of cooked and gastrointestinal digested legumes. *Lwt*, 116283. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116283>

13. Das, P. C., Baik, O., Tabil, L. G., & Rajagopalan, N. (2025). Impact of radiofrequency and microwave heating on the nutritional and antinutritional properties of pulses: A review. *Legume Science*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/leg3.70025>

14. Suhag, R., Dhiman, A., Deswal, G., Thakur, D., Sharanagat, V. S., Kumar, K., & Kumar, V. (2021). Microwave processing: A way to reduce the anti-nutritional factors (ANFs) in food grains. *Lwt*, 150, 111960. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111960>

15. Prendeville, J., Das, R. S., Jancen, M., Tiwari, B. K., & Bhavya, M. L. (2025). Chemistry of microwave processing of food. Y *Chemistry of thermal and non-thermal food processing technologies*, pp. 9–34. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-22182-8.00003-6>

16. González-Mendoza, M. E., Martínez-Bustos, F., Castaño-Tostado, E., & Amaya-Llano, S. L. (2022). Effect of microwave irradiation on acid hydrolysis of faba bean starch: Physicochemical changes of the starch granules. *Molecules*, 27(11), 3528. <https://doi.org/10.3390/molecules27113528>

17. Najib, T., Heydari, M. M., Tu, K., & Meda, V. (2023). Modification in starch structure of soaked and germinated lentil seeds under various thermal processing methods, including conventional, microwave, and microwave-assisted techniques. *Food Chemistry Advances*, 2, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100267>

18. Najib, T., Heydari, M. M., & Meda, V. (2022). Combination of germination and innovative microwave-assisted infrared drying of lentils: Effect of physicochemical properties of different varieties on water uptake, germination, and drying kinetics. *Applied Food Research*, 2(1), 100040. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100040>

19. Taheri, S., Brodie, G., & Gupta, D. (2020). Fluidisation of lentil seeds during microwave drying and disinfection could prevent detrimental impacts on their chemical and biochemical characteristics. *Lwt*, 129, 109534. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109534>

20. Looi, E. P., & MohdMaidin, N. (2023). The bioactivities of legumes: A review. *Food Research*, 7(5), 339–360. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.7\(5\).083](https://doi.org/10.26656/fr.2017.7(5).083)

21. Arnal, M., Gallego, M., Talens, P., & Mora, L. (2023). Impact of thermal treatments and simulated gastrointestinal digestion on the α -amylase inhibitory activity of different legumes. *Food Chemistry*, 135884. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135884>

22. Yu, S., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, C., Liu, X., Wang, Y., Meng, F., & Yu, L. (2025). Water-Assisted microwave processing: Rapid detoxification and antioxidant enhancement in colored kidney beans. *Foods*, 14(20), 3557. <https://doi.org/10.3390/foods14203557>
23. Donald Mudenda Chisowa. (2022). Comparative evaluation of the effect of boiling and autoclaving of legume grains on tannin concentration. *Magna Scientia Advanced Biology and Pharmacy*, 7(1), 009–017. <https://doi.org/10.30574/msabp.2022.7.1.0080>
24. Schmidt, H. d. O., & Oliveira, V. R. d. (2023). Overview of the incorporation of legumes into new food options: An approach on versatility, nutritional, technological, and sensory quality. *Foods*, 12(13), 2586. <https://doi.org/10.3390/foods12132586>
25. Náthia-Neves, G., Getachew, A. T., Santana, A. L., & Jacobsen, C. (2025). Legume proteins in food products: Extraction techniques, functional properties, and current challenges. *Foods*, 14(9), 1626. <https://doi.org/10.3390/foods14091626>
26. Wu, Q. (2021). Erratum: “on the characterization of lifting forces during the rapid compaction of deformable porous media” [ASME J. heat transfer-trans. ASME, 2009, 131(10), p. 101006; DOI: 10.1115/1.3167543]. *Journal of Heat Transfer*, 143(12). <https://doi.org/10.1115/1.4052605>
27. Vashishth, R., Semwal, A. D., Naika, M., Sharma, G. K., & Kumar, R. (2021). Influence of cooking methods on antinutritional factors, oligosaccharides and protein quality of underutilized legume *Macrotyloma uniflorum*. *Food Research International*, 143, 110299. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110299>
28. Kutlu, N., Pandiselvam, R., Saka, I., Kamiloglu, A., Sahni, P., & Kothakota, A. (2021). Impact of different microwave treatments on food texture. *Journal of Texture Studies*. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12635>
29. Noormazlinah, N., Hashim, N., Nour, A. H., Abdul Munaim, M. S., Almajano, M. P., & Bahirah, N. (2019). Extraction of phytosterol concentration in different legume pods by using microwave-assisted hydrodistillation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(3), 796. <https://doi.org/10.22146/ijc.40865>
30. Zuluaga, A. M., Mena-García, A., Soria Monzón, A. C., Rada-Mendoza, M., Chito, D. M., Ruiz-Matute, A. I., & Sanz, M. L. (2020). Microwave assisted extraction of inositols for the valorization of legume by-products. *Lwt*, 133, 109971. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109971>
31. Collado, E., Venzke Klug, T., Martínez-Hernández, G. B., Artés-Hernández, F., Martínez-Sánchez, A., Aguayo, E., Artés, F., Fernández, J. A., & Gómez, P. A. (2019). Nutritional and quality changes of minimally processed faba (*Vicia faba* L.) beans during storage: Effects of domestic microwaving. *Postharvest Biology and Technology*, 151, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.008>
32. Gu, J., Bk, A., Wu, H., Lu, P., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2022). Impact of processing and storage on protein digestibility and bioavailability of legumes. *Food Reviews International*, 1–28. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2039690>

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.05.2026