
ВИРОБНИЦТВО ПОСТБІОТИКІВ НА ОСНОВІ НОВІТНІХ НЕТЕРМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Негода Т. С., Полова Ж. М.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-695-9-11>

ВСТУП

Постбіотики, що визначаються як неживі мікробні клітини та їхні компоненти, що надають користь здоров'ю хазяїна, являють собою значний прогрес у функціональних продуктах харчування та дієтичних добавках¹. Порівняно з пробіотиками та пребіотиками, постбіотики пропонують переваги у стабільності продукту, безпеці та гнучкості рецептури. У загальній практиці, знищення нагріванням є широко використовуваним методом виробництва постбіотиків. Однак, знищені нагріванням постбіотики мають мало недоліків, таких як присмак горіння, денатурація імуномодуючих молекул та втрата функціональних метаболітів. Новітні нетермічні технології працюють порівняно з традиційними методами виробництва постбіотиків, підкреслюючи їх придатність для впровадження в промислових масштабах та переваги, які вони надають порівняно з традиційною термічною обробкою. Нещодавні досягнення в постбіотичних дослідженнях та нетермічній обробці вказують на значні інноваційні можливості². Однак залишаються проблеми в масштабуванні методів, уточненні параметрів та усуненні регуляторних та економічних обмежень. Промислова інтеграція нетермічних технологій вимагає додаткових доказів для підтвердження доцільності, економічної ефективності та дотримання вимог безпеки, виявлення ключових прогалин в оптимізації протоколів інактивації, взаємозв'язків між впливом та реакцією, а також клінічного впливу.

Споживання достатньої кількості пробіотиків продемонструвало низку переваг для здоров'я людини. Всесвітня організація охорони здоров'я визначила пробіотики як живі організми, корисні для хазяїна,

¹ Aggarwal, Sunita, et al. "Postbiotics: From emerging concept to application". *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6 (2022): 887642.

² Amobonye, Ayodeji, et al. "Postbiotics: an insightful review of the latest category in functional biotics". *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 41.8 (2025): 293.

коли вони споживаються в бажаній кількості. Тому їжа/добавка повинні зберігати мінімальну кількість клітин протягом усього терміну придатності, щоб приносити користь споживаному хазяїну³. Однак під час обробки, транспортування та зберігання відбувається значна втрата кількості пробіотичних клітин, що вимагає інноваційних рішень для подолання цих проблем. На основі досліджень у галузі пробіотиків було запроваджено нові номенклатури, такі як постбіотики, парaproбіотики/постбіотики, тиндалізовані пробіотики, фармабіотики, психобіотики та пробіоцевтики. Міжнародна наукова асоціація пробіотиків та пребіотиків (ISAPP) визначила термін постбіотики як неживі мікроорганізми або їхні компоненти, які надають користь для здоров'я хазяїна при споживанні в необхідній дозі⁴. Це широке визначення значно розширює традиційне розуміння функціональних харчових інгредієнтів, зміщуючи фокус з життєздатних мікроорганізмів на включення їх неживих форм та похідних клітинних компонентів.

Склад постбіотиків надзвичайно різноманітний, охоплюючи широкий спектр біоактивних компонентів, таких як коротколанцюгові жирні кислоти (КЖК), фрагменти клітинних стінок мікробів, екзополісахариди (ЕП), клітинні лізати, тейхоеві кислоти та вітаміни. Ці компоненти демонструють різноманітну біологічну активність, включаючи імуномодуляцію, посилення кишкового бар'єру та прогизапальну дію. КЖК, включаючи ацетат, пропіонат та бутират, особливо помітні своєю роллю в регуляції метаболізму, здоров'ї кишкового епітелію та контролі апетиту. Окрім коротколанцюгових жирних кислот (SCFA), позаклітинні білки (ЕР) та фрагменти мікробних клітинних стінок зміцнюють слизові бар'єри та мають потенційні антиоксидантні та антимікробні властивості.

Однак, різна ефективність різних компонентів підкреслює необхідність глибших досліджень того, як ці речовини діють окремо та синергетично.

Постбіотики пропонують помітні переваги порівняно з традиційними пробіотиками та пребіотиками, зокрема з точки зору стабільності продукту, безпеки та адаптивності рецептури. На відміну від живих пробіотиків, які чутливі до обробки та умов навколишнього середовища порівняно з пробіотиками, постбіотики за своєю суттю стабільніші, оскільки складаються з неживих речовин. Більше того, постбіотики не залежать від управління постачанням холодового ланцюга, тому мають перевагу

³ Ashrafudoulla, Md, et al. "Challenges and opportunities of non-conventional technologies concerning food safety". *World's Poultry Science Journal* 79.1 (2023): 3-26.

⁴ Asefa, Zerihun, et al. "Postbiotics and their biotherapeutic potential for chronic disease and their feature perspective: a review". *Frontiers in Microbiomes* 4 (2025): 1489339.

над пробіотиками. Крім того, відсутність живих клітин у постбіотиках усуває ризик несприятливих взаємодій, таких як системні інфекції або мікробна транслокація, особливо у вразливих групах населення, таких як особи з ослабленим імунітетом. Постбіотики можуть безпосередньо модулювати імунну систему, взаємодіючи з епітеліальними клітинами хазяїна, позбавленими будь-якої потреби в колонізації. Постбіотики не взаємодіють з харчовою матрицею, погоджуючись додавати їх до харчових продуктів/інших рецептур у широкому діапазоні рН та температур без шкоди для біоактивної функції. Крім того, їхня стабільність полегшує їх інтеграцію в різні харчові та фармацевтичні рецептури, включаючи термічно оброблені або стійкі до зберігання продукти. Ця адаптивність розширює потенціал для ширшого промислового застосування та підтримує розробку продуктів з точним контролем дозування⁵.

Термічна обробка залишається каменем постбіотичного виробництва завдяки її встановленій ефективності в інактивації мікробів та екстракції біоактивних сполук. Однак традиційні методи, такі як тиндалізація/термічна обробка, що використовуються для постбіотичного виробництва, призводять до денатурації біоактивних метаболітів, таких як ферменти, поверхневі білки, коротколанцюгові жирні кислоти, та втрати структурної цілісності епітеліальних білків, що впливає на функціональність та знижує штам специфічність постбіотиків. Аналогічно, зниження тепла викликало грубість та шорсткість клітин, погіршуючи імунomodуючі ефекти постбіотиків та зменшуючи вивільнення оцтової та масляної кислот, при підвищенні температури тепла від 65 до 95 °C можлива деградація. Ці обмеження, включаючи потенціал для зміни чутливих біоактивних речовин та впливу на сенсорні якості, викликали інтерес до вдосконалення цього підходу шляхом оптимізації параметрів та інтеграції з іншими, більш інноваційними та нетермічними методами. Деякі з нетермічних технологій, такі як імпульсні електричні поля (ІЕП), ультразвукова обробка, опромінення, холодна плазма, імпульсна та ультрафіолетова (УФ) технологія світла, а також обробка високим тиском (ОВТ), використовуються як методи, що зберігають якість та збільшують стабільність без будь-яких втрат профілю. Нетермічні технології не містять хімікатів та потребують менше енергії, ніж термічні методи, що сприяє сталому розвитку. Ці нетермічні технології легко сприяють руйнуванню клітинних стінок пробіотиків, вивільняючи внутрішньоклітинні компоненти. Ультразвук та холодна плазма привертають дедалі більшу увагу завдяки своїй здатності

⁵ Benkowski, Andrzej A., et al. "Postbiotics: considerations for safety and quality management". *Poster presented at International Association of Food Protection* (2023).

зберігати термочутливі постбіотичні складові та покращувати властивості продукту⁶.

Центральне дослідницьке питання, що розглядається в цьому огляді, полягає в тому, чи мають нові нетермічні технології здатність революціонізувати виробництво постбіотиків і чи підходять вони для масштабування для промислового застосування. Критично аналізуючи це питання, цей огляд також заповнює важливу прогалину в сучасній літературі, синтезуючи міждисциплінарні знання з мікробіології, харчових технологій та біотехнології для оцінки ефективності, результативності та масштабованості нетермічних методів постбіотичного виробництва. Цей огляд є одночасно своєчасним та інноваційним через зростаючий глобальний акцент на розробці сталих та ефективних методів постбіотичного виробництва, які зберігають максимальну біоактивність та функціональні переваги. Він також розглядає брак комплексних оцінок, які б безпосередньо зосереджувалися на тому, як ці методи впливають на постбіотичну стабільність, біоактивність та безпеку. Додаткова увага приділяється оцінці їхнього потенціалу для впровадження в промислового масштабі та конкретних переваг, які вони пропонують порівняно з традиційною термічною обробкою.

1. Переваги постбіотиків

Ферментація молочнокислими бактеріями виробляє різні корисні для здоров'я клітинні компоненти, а також метаболіти. Постбіотики мають такі переваги для здоров'я, як імуномодуючі, протизапальні, протиракові, антимікробні, антиоксидантні, гіпохолестеринемічні, антигіперчутливі. Постбіотики поділяються на мікробні метаболіти (ліпіди, білки, ЕП, органічні кислоти, ферменти тощо) та компоненти (тейхоева кислота, пептидоглікан та білки клітинної поверхні). Їх також можна класифікувати за структурою та складом. Ці постбіотики взаємодіють з хазяїном та забезпечують терапевтичні підходи для систематичного та локального впливу⁷.

Джерела для виробництва постбіотиків, їхня зареєстрована користь для здоров'я та можливий механізм дії.

Екзополісахариди. ЕП – це мікробні метаболіти, що вивільняються за межі клітинної стінки бактерій під час ферментації, які головним

⁶ Almahbashi, Amtalsaboer, and Evrim Gunes Altuntas. "From preparation to Bioactivity: A comparative study on preparation methods and characterization of postbiotics". *Food Science & Nutrition* 13.5 (2025): e70294.

⁷ Thirumdas, Rohit, and Priti Mudgil. "Emerging nonthermal Technologies for the Production of postbiotics". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24.6 (2025): e70335.

чином сприяють адгезії бактерій. ЕП виробляються позаклітинно та прикріплюються до мікробних клітин у вигляді шару слизу, впливаючи на імунітет господаря, метаболізм ліпідів та колонізацію патогенів. Вони класифікуються як біополімери з довголанцюговими розгалуженими гомо- або гетерополісахаридами. Основними складовими ЕП є ліпополісахариди та пептидоглікани з різними цукрами, такими як глюкоза, галактоза, глюкани, арабіноза, ксилоза, маноза та галактоза. ЕП проявляють біоактивні властивості як антиоксиданти, антихолестеринемічні, антиобезогенні та мають імуномодулюючу дію⁸. ЕП широко використовуються в харчовій, молочній та фармацевтичній промисловості як стабілізатори та емульгатори для модифікації реологічних властивостей. ЕП мають імуномодулюючу дію, взаємодіючи з макрофагами та дендритними клітинами, модулюючи активність Т- та НК-лімфоцитів. ЕП стимулює проліферацію лімфоцитів, посилюючи вироблення IgA у слизовій оболонці кишечника. Кефіран – один із позаклітинних протеїнів (ЕП), що продукуються *Lactobacillus*, який знижує артеріальний тиск під час випробувань на тваринах⁹. Однак продукція ЕР головним чином залежить від штаму, складу середовища, рН, температури та віку клітин під час ферментації (таблиця 1).

Таблиця 1

Останні наукові дані про користь постбіотиків для здоров'я

Мікроорганізм	Постбіотична молекула	Користь для здоров'я
<i>Lb. fermentum L-14</i>	Екзополісахарид	Проти ожиріння
<i>Lactobacillus sp. (La1 та La2)</i>	Безклітинний супернатант	Антиоксидантна активність
Штам <i>Lb. paracasei D3-5</i>	Ліпотейхоєві кислоти	Антивіковий ефект
<i>Lb. fermentum</i>	Безклітинний супернатант	Імуномодуляція
<i>Lb. animalis</i>	Бактеріальні везикули	Зменшення апоптозу клітин
<i>Lb. plantarum</i>	Позаклітинні везикули	протизапальний ефект
<i>Lb. fermentum</i>	Безклітинні супернатанти	Противірусні ефекти проти герпесу
<i>Lb. plantarum</i>	Коротколанцюгові жирні кислоти та молочна кислота	Модулював кишкові бактерії
<i>Lb. rhamnosus GG</i> <i>Lb. reuteri</i>	Безклітинний супернатант	Антимікробний ефект
<i>Lb. helveticus 611</i>	Безклітинні супернатанти	Антибактеріальна та протигрибкова активність

⁸ Hijová, Emília. "Postbiotics as metabolites and their biotherapeutic potential". *International journal of molecular sciences* 25.10 (2024): 5441.

⁹ Fang, Fang, et al. "Effect of potential postbiotics derived from food-isolated *Lactobacillus parabuchneri* on different enterotypes of human gut microbiome". *Lwt* 182 (2023): 114782.

Продовження таблиці 1

Мікроорганізм	Постбіотична молекула	Користь для здоров'я
<i>Lb. paracasei</i>	Безклітинні супернатанти	Модуляція імунної відповіді хазяїна
<i>Lb. plantarum RM1</i>	Безклітинні супернатанти	Знезараження афлатоксином M1
<i>L. rhamnosus CRL1505</i>	Пептидоглікан	Імуномодулюючий
<i>Lb. acidophilus LA-5</i>	Тепло знищує клітини	Антиоксидантна властивість та протипухлинні властивості
<i>Lb. curvatus B.67</i>	Бактеріоцин	Антимікробна активність
<i>Lb. plantarum</i>	Безклітинні супернатанти	Імуномодуляція
<i>Lb. paracasei</i>	Безклітинний екстракт	Антиоксидантна активність
<i>Bifidobacterium (B.) bifidum MG731</i>	Ізоляти, убиті нагріванням	Протизапальний потенціал
<i>Schleiferilactobacillus harbinensis LH 991</i>	Коротколанцюгові жирні кислоти	Антимікробна активність
<i>B. longum CECT 7347</i>	Коротколанцюгові жирні кислоти	Антихолестеринемічний
<i>Faecalibacterium prausnitzii</i>	Коротколанцюгові жирні кислоти	Модуляція кишкової мікробіоти
<i>Lb. plantarum</i>	Безклітинні супернатанти	Протизапальна активність
<i>B. bifidum</i> <i>Lb. plantarum DSA</i> <i>Lb. acidophilus</i> <i>Lb. helveticus CNRZ 32</i> <i>Lb. rhamnosus GG</i>	Вітаміни, органічні кислоти та коротколанцюгові жирні кислоти	Антимікробна, антиоксидантна активність
<i>Лімосилактобактерія реутері</i>	Коротколанцюгові жирні кислоти	Антибактеріальні властивості
<i>Lb. parabuchneri MF2103</i>	Коротколанцюгові жирні кислоти	Модуляція кишкової мікробіоти
<i>Лактиплантибациллус плантарум</i>	Органічні кислоти	Антимікробна активність та антиоксидантна активність
<i>Ентерокок феціум</i>	Бактеріоцин	Антимікробна активність
<i>Ентерокок фекаліс</i>	Бактеріоцин	Антимікробна активність та активність проти проростання спор
<i>Lb. plantarum</i>	Безклітинні супернатанти	Антибактеріальний та антибіоплівковий
<i>Lb. plantarum EIR/IF-1</i>	Безклітинні середовища для культивування	Антимікробна активність
<i>Saccharomyces boulardii</i>	Сублімована та розпилювальна сушка	Профілактика виразкового коліту
<i>Bacillus subtilis H4</i> і <i>Bacillus amyloliquefaciens LFB112</i>	Ферментація листя шовковиці	Протизапальний та антиоксидантний

Закінчення таблиці 1

Мікроорганізм	Постбіотична молекула	Користь для здоров'я
<i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i> (<i>Lc. rhamnosus</i>) GG і <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> (<i>L. plantarum</i>)	Термічно інактивовані культури	Імуномодулюючі властивості
<i>Lb. plantarum</i>	Термічно інактивовані культури Ультразвукові культури	Антибактеріальний та протигрибковий
<i>Lactocaseibacillus paracasei</i> SNB	Капсулярний полісахарид Білок поверхневого шару	Покращення дисфункції кишкового бар'єру та кишкової мікробіоти
<i>Lb. paracasei</i> Shirota	Безклітинний супернатант	Біоповерхнево-активні речовини/біоемульгатор, ліпаза та бактеріоцини
фунт <i>plantarum</i> subsp. <i>plantarum</i> і <i>Bifidobacterium animalis</i> spp. <i>lactis</i> BB-12	Безклітинний супернатант	Антимікробна дія
Фелінус лінкеус	Полісахарид, багатий на галактуронову кислоту	Імуномодулюючі властивості
Кордицепс військовий	Полісахариди	Покращені агрегаційні властивості та вироблення метаболітів пробіотиками

Коротколанцюгові жирні кислоти. КЖК є найважливішими та широко вивченими з кількох метаболітів з різною терапевтичною активністю. КЖК – це леткі органічні метаболіти, що в основному утворюються в результаті ферментації рослинних полісахаридів (пребіотиків) бактеріями товстої кишки. КЖК (ацетат, пропіонат та бутирати) виробляються кишковою мікробіотою шляхом ферментації харчових волокон. Бутират є джерелом енергії для еритроцитів, які відповідають за відновлення кишкового епітелію та модуляцію експресії генів¹⁰. КЖК необхідні для підтримки імунологічного та шлунково-кишкового гомеостазу. Кишкова мікробіота виробляє КЖК, які регулюють метаболізм глюкози та знижують рівень глюкози в крові, що корисно для пацієнтів з діабетом. Протизапальна активність КЖК зумовлена моноцитами та мононуклеарними клітинами крові, що секретують простагландини, цитокіни та хемокіни. Постбіотики, зокрема КЖК, пом'якшують серцево-судинні захворювання, знижуючи оксидативний стрес, рівень холестерину

¹⁰ Maiuolo, Jessica, et al. "The postbiotic properties of butyrate in the modulation of the gut microbiota: the potential of its combination with polyphenols and dietary fibers". *International Journal of Molecular Sciences* 25.13 (2024): 6971.

та запальні процеси. Ацетатні КЖК, отримані з кишкової мікроби, змінюють метаболізм субстратів у всьому організмі зі збільшенням окислення жирів натщесерце, зменшуючи кардіометаболічні фактори ризику¹¹. Бутират натрію як постбіотик зменшує тяжкість болю в животі та інших симптомів, пов'язаних із синдромом подразненого кишечника, покращуючи якість життя пацієнтів.

Безклітинні супернатанти (БКС). БКС, отримані з пробіотичних штамів *Lactobacillus*, багаті на антиоксиданти та протизапальні, антимікробні та протиракові компоненти. Ці біоактивні метаболіти утворюються під час ферментації та збираються центрифугуванням¹². Біоплівки, отримані з включеними постбіотиками *Lb. gasseri*, показали значну кількість поліфенолів з сильними антиоксидантними та антибактеріальними властивостями. БКС *Lb.fermentum*, *Lb.paracasei* та *Lb.brevis* містили вищі рівні поліфенолів, а флавоноїди проявляли антиоксидантну, антибіоплішкову активність та протизапальні властивості. Аналогічно, вміст флавоноїдів спостерігався в пробіотичному екстракті *Lb.rhamnosus*¹³.

Безклітинний екстракт *Lb.fermentum* продемонстрував протиракові властивості щодо клітин колоректального раку¹⁴. Спостерігається ефект боротьби з ожирінням за допомогою безклітинного екстракту *Bacillus velezensis*. Безклітинні супернатанти *Lactobacillus* знизили життєздатність грибків та метаболічну активність і покращили стійкість епітелію до грибків¹⁵.

Пептиди. Більшість кишкових лактобактерій виробляють пептиди, що мають антимікробні властивості, ефективні в боротьбі з бактеріальними та вірусними інфекціями. Ці антимікробні пептиди пригнічують дію бактерій, створюючи пори в клітинних стінках. Антимікробний пептид пригнічує синтез макромолекулярних речовин та руйнує мікробну мембрану. Механізм дії антимікробного пептиду включає підкислення клітинної мембрани, порачію клітинної мембрани, продукцію певних

¹¹ Mousavi Ghahfarrokhi, Seyed Sadeq, et al. "Management of cardiovascular diseases by short-chain fatty acid postbiotics". *Current Nutrition Reports* 13.2 (2024): 294–313.

¹² Prajapati, Nidhi, et al. "Postbiotic production: harnessing the power of microbial metabolites for health applications". *Frontiers in Microbiology* 14 (2023): 1306192.

¹³ Salva, Susana, et al. "Lactobacillus rhamnosus postbiotic-induced immunomodulation as safer alternative to the use of live bacteria". *Cytokine* 146 (2021): 155631.

¹⁴ Sornsenee, Phoomjai, et al. "Lyophilized cell-free supernatants of *Limosilactobacillus fermentum* T0701 exhibited antibacterial activity against *Helicobacter pylori*". *Scientific Reports* 14.1 (2024): 13632.

¹⁵ Spaggiari, Luca, et al. "Lactobacillus acidophilus, *L. plantarum*, *L. rhamnosus*, and *L. reuteri* cell-free supernatants inhibit *Candida parapsilosis* pathogenic potential upon infection of vaginal epithelial cells monolayer and in a transwell coculture system in vitro". *Microbiology spectrum* 10.3 (2022): e02696-21.

ферментів, смертельних для клітин, та пошкодження внутрішніх органел клітин. Бактеріоцини, що виробляються лактобактеріями, є катіонними пептидами переважно впливають на цитоплазматичну мембрану через пори.

Бактеріоцини – це рибосомні пептиди з бактерицидною та бактериостатичною дією. Бактеріоцини отримують користь завдяки шести фундаментальним принципам, які включають стабільність, спектр, безпеку, різноманітність, біоінженерію та виробництво. З кількох бактеріоцинів нізин та педіоцин є найбільш широко використовуваними постбіотиками у харчових продуктах¹⁶. Постбіотичні поверхневі білки проявляють кілька протизапальних властивостей, поглинають шкідливі важкі метали та зміцнюють функцію епітеліального бар'єра. Постбіотичні пептиди також використовуються для приготування пакувальних матеріалів з антимікробними властивостями.

Вітаміни та ферменти. Вітаміни є важливими постбіотиками, що виробляються кишковою мікробіотою. Люди не біосинтезують вітаміни; вони отримуються з їжею, а деякі вітаміни, такі як B12, виробляються кишковою мікробіотою. Деякі молочнокислотні організми (МКБ) можуть синтезувати вітамін B2 та фолієву кислоту. *Propionibacterium freudenreichii* може синтезувати B12. У промислових масштабах великий інтерес представляють ферменти, такі як протеази, отримані з *Bacillus subtilis*¹⁷. Багато вітамінів діють як коферменти в кількох метаболічних шляхах. Іншим класом постбіотичних метаболітів є ферменти. Ферменти, пов'язані з захисним механізмом, є важливими та відіграють роль у боротьбі з вільними радикалами. Ферменти, отримані з бактерій та грибів, мають промислове значення. Відомо, що пробіотичні ферменти, такі як супероксиддисмутаза, металоферменти, глутатіонпероксидаза та каталази, борються з активними формами кисню. Каталаза, як постбіотичний фермент з *Lb. lactis*, пригнічувала рак товстої кишки у мишей.

2. Фактори, що впливають на постбіотичне виробництво

Субстрат для ферментації. Методи та субстрати ферментації дозволяють цілеспрямовано виробляти постбіотики, використовуючи специфічні мікробні штами, вирощені в умовах, оптимізованих для цієї

¹⁶ Yordshahi, Aidin Shafipour, et al. "Design and preparation of antimicrobial meat wrapping nanopaper with bacterial cellulose and postbiotics of lactic acid bacteria". *International journal of food microbiology* 321 (2020): 108561.

¹⁷ Dobreva, Lili, et al. "Candidate-probiotic lactobacilli and their postbiotics as health-benefit promoters". *Microorganisms* 12.9 (2024): 1910.

мети¹⁸. Вибір субстрату ферментації суттєво впливає не лише на вихід, але й на функціональні властивості отриманих постбіотиків. Крім того, тип субстрату, що використовується під час ферментації, безпосередньо впливає на спектр та концентрацію утворених метаболітів, демонструючи значний вплив на біоактивні властивості отриманих постбіотиків.

Використання різноманітних ферментаційних субстратів, таких як молочні білки, сирна сироватка або відновлювані біоресурси, поряд з інноваційними мікробними штамами, може розширити як спектр, так і ефективність біоактивних метаболітів у постбіотиках. Ці ферментаційні субстрати також відрізняються своєю здатністю підтримувати ріст мікробів та сприяти виробленню різних біоактивних сполук¹⁹. Спостережувані дані свідчать про те, що бульйон MRS (середовище Блікфельда) загалом підтримує більшу проліферацію бактерій порівняно з молоком та демонструє порівнянну ефективність із сироваткою. Однак постбіотики, отримані з бульйону MRS, показали кращі антимікробні властивості, демонструючи більші зони інгібування проти патогенних бактерій, ніж постбіотики, отримані з молока або сироватки, що вказує на залежні від субстрату варіації антимікробної ефективності. Постбіотики, отримані з MRS, також показали кращі характеристики наночастинок порівняно з молоком або сироваткою, що є критично важливим для біодоступності та функціонального застосування постбіотиків у харчових та фармацевтичних системах. Ці результати підкреслюють критичну роль вибору субстрату у формуванні функціональних властивостей постбіотиків, особливо в умовах промислового виробництва, де відтворюваність та ефективність є ключовими факторами. Мінливість у продуктивності субстрату свідчить про необхідність систематичного підходу до оцінки субстрату, забезпечуючи відповідність вибраного середовища виробничим цілям та передбачуваному застосуванню.

Крім того, використання ферментаційних субстратів для постбіотичного виробництва також надає унікальну можливість для промислової переробки та утилізації відходів. Перетворюючи рясні промислові побічні продукти на високоцінні функціональні інгредієнти, це відповідає ширшим цілям сталого розвитку та сприяє скороченню відходів. Це дійсно особливо актуально у випадку сироватки, побічного продукту молочного виробництва, оскільки сироватка служить ефективним ферментаційним субстратом, виробляючи постбіотики з функціональними властивостями,

¹⁸ O'Sullivan, Aaron, Kevin M. Ryan, and Luis Padrela. "Production of biopharmaceutical dried-powders using supercritical CO₂ technology". *The Journal of Supercritical Fluids* 187 (2022): 105645.

¹⁹ Pimentel, Tatiana Colombo, et al. "Postbiotics: An overview of concepts, inactivation technologies, health effects, and driver trends". *Trends in Food Science & Technology* 138 (2023): 199–214.

порівнянними або перевищуючими ті, що отримані з більш традиційних середовищ.

Мікробні штами та консорціуми. Окрім ферментаційних субстратів, оптимізація мікробних штамів та їх консорціумів у вибраних ферментаційних субстратах забезпечує ще один шлях для покращення цільового виробництва постбіотиків за допомогою прецизійної ферментації. На сьогоднішній день різні мікроорганізми, такі як бактерії (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Leuconostoc*, *Weissella*, *Bacillus*, *Streptococcus*, *Faecalibacterium*, *Enterococcus* та *Pediococcus*), гриби (*Aspergillus oryzae*, *Phellinus linteus* та *cordyceps militaris*) та дріжджі (*Pichia*, *Kluuyveromyces*, *Torulaspora* та *Saccharomyces*), є найбільш широко використовуваними для виробництва постбіотиків²⁰. Недавні дослідження показують, що різна мікробна динаміка може підвищити загальну біоактивність постбіотиків, тим самим дозволяючи розробляти рецептури зі специфічними перевагами для здоров'я.

Метод ферментації. Тип ферментації, такий як занурений (партійний, підживлюваний) або твердофазний ферментація, є ще одним фактором, який слід враховувати для оптимізованого виробництва постбіотиків. Було показано, що точний контроль над умовами навколишнього середовища максимізує виробництво метаболітів та їх біологічну функцію²¹. В одному з таких досліджень постбіотики, отримані з шовковиці, вироблені в оптимізованих умовах зануреного ферментації, продемонстрували підвищену антиоксидантну активність та зниження маркерів запалення *in vitro*. Досягнення в сенсорних технологіях можуть забезпечити моніторинг у режимі реального часу під час ферментації та забезпечити критично важливі засоби забезпечення якості та консистенції продукту. Ці досягнення в сенсорних технологіях можуть допомогти в регулюванні параметрів ферментації для підтримки оптимальних умов для росту мікробів та виробництва метаболітів, зм'якшуючи мінливість від партії до партії. Однак впровадження технологій моніторингу в режимі реального часу часто обмежується високою вартістю та потребою в спеціалізованій експертизі, що створює перешкоди для їх широкого використання в промислових умовах. Подальший розвиток доступних та економічно ефективних інструментів моніторингу може підвищити надійність постбіотичного виробництва на основі ферментації.

²⁰ Thorakkattu, Priyamvada, et al. "Postbiotics: current trends in food and pharmaceutical industry". *Foods* 11.19 (2022): 3094.

²¹ Zhong, Yujie, et al. "Recent advances and potentiality of postbiotics in the food industry: Composition, inactivation methods, current applications in metabolic syndrome, and future trends". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 64.17 (2024): 5768–5792.

Консенсус ISAPP підкреслює, що процеси ферментації та подальші методи інактивації повинні відповідати певним стандартам, щоб узгодитися з визначенням постбіотиків як препаратів неживих мікроорганізмів та/або їх компонентів, що надають користі для здоров'я²². Консенсус також підкреслює важливість ретельної валідації процесів для забезпечення безпеки продукту, біоактивності та відповідності нормативним вимогам. Консенсус ISAPP також підкреслює, що чіткість нормативних актів є важливою для правильного позиціонування постбіотиків у ширшому ландшафті функціональних харчових продуктів та нутрицевтиків. Встановлення загальноприйнятих визначень та стандартів сприятиме зростанню промисловості, одночасно забезпечуючи безпеку та довіру споживачів. Ці вимоги підкреслюють ширші наслідки оптимізації ферментації, пов'язуючи наукові досягнення з нормативними базами для забезпечення узгодженості та відтворюваності в галузі.

Впровадження підходів «чистого етикетування» у постбіотичному виробництві, які наголошують на використанні натуральних та мінімально оброблених інгредієнтів, робить постбіотики, отримані шляхом ферментації, особливо придатними для цього підходу, пропонуючи такі переваги, як природний контроль росту мікробів та збереження біоактивних сполук. Однак методи виробництва «чистого етикетування» стикаються з труднощами, включаючи вищі витрати та технічні обмеження, пов'язані з масштабуванням систем на основі ферментації.

3. Перспективні методи виробництва постбіотиків

Ефективне виробництво постбіотиків спирається на різноманітні інноваційні методи, розроблені для оптимізації виходу, безпеки та функціональності біоактивних сполук. З розвитком цієї галузі, балансування ефективності, безпеки та промислової доцільності залишається центральним для перетворення наукових знань у практичне застосування. Тому в цьому розділі досліджуються методи, які забезпечують збереження ключових властивостей, що сприяють здоров'ю, водночас забезпечуючи масштабовані, стійкі виробничі процеси шляхом вивчення як традиційних, так і нових технологій.

Традиційні методи термічної обробки.

Традиційні методи в основному використовуються у виробництві постбіотиків, що забезпечують інактивацію мікробів та екстракцію біоактивних сполук. Вони добре обізнані в розробці стабільних

²² Salminen, Seppo, et al. "The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics". *Nature reviews Gastroenterology & hepatology* 18.9 (2021): 649–667.

та безпечних постбіотичних продуктів, що слугують мостом між інноваційними технологіями та практичним промисловим застосуванням.

Термічна обробка вже давно вважається одним з найпоширеніших та економічно ефективних методів виробництва постбіотиків завдяки її ефективності в інактивації мікробів та здатності посилювати вивільнення біоактивних сполук²³. Було відзначено, що термічна обробка, така як пастеризація, автоклавування та омичний нагрівання, при застосуванні до пробіотичних мікробних культур ефективно сприяє екстракції антимікробних, імуномодуючих та антиоксидантних метаболітів. Ступінь інактивації мікробів є значним у харчовій та фармацевтичній галузях, де мікробне забруднення становить значний ризик. Умови термічної обробки, включаючи температуру та тривалість, а також тип штаму, відіграють роль як у виході постбіотиків, так і у фізико-хімічних характеристиках. Специфічність штаму, інтенсивність та тривалість термічної обробки повинні бути ретельно збалансовані для досягнення інактивації мікробів, мінімізуючи небажані зміни властивостей. Крім того, термічна обробка також може впливати на текстурний та розмірний профіль отриманих пробіотиків, що, у свою чергу, може вплинути на їх включення до різних харчових продуктів. Наприклад, було показано, що застосування термічної обробки в діапазоні 70–100 °C впливає на розподіл розмірів наночастинок постбіотиків²⁴. Вищі температури можуть призвести до утворення менших, більш однорідних частинок, що може сприяти кращому диспергуванню та засвоєнню при включенні до харчових матриць. Зміна температури та часу обробки може призвести до отримання постбіотиків з різними функціональними профілями. Високі температури негативно впливають на сенсорні та харчові якості кінцевого продукту. Високотемпературна обробка може призвести до втрати аромату, смаку, кольору та необхідних поживних речовин, тим самим обмежуючи прийнятність термічно оброблених постбіотиків серед споживачів. Застосування тепла також створює ризик зміни структурної цілісності термочутливих біоактивних речовин, таких як пептиди та коротколанцюгові жирні кислоти²⁵. Ці структурні зміни можуть зменшити їхню біологічну активність або змінити їхні корисні для здоров'я властивості.

Нормативна база для постбіотиків, яка наголошує на включенні неживих мікробних клітин або їх компонентів, добре узгоджується з цілями

²³ Sun, Zhe, et al. "Effect of thermal inactivation on antioxidant, anti-inflammatory activities and chemical profile of postbiotics". *Foods* 12.19 (2023): 3579.

²⁴ Dharumadurai, Dhanasekaran. *Postbiotics*. Springer, 2023.

²⁵ Zhou, Zhongkun, and Peng Chen. "Short-chain fatty acids as postbiotics". *Postbiotics*. Academic Press, 2025. 207–227.

контрольованої термічної інактивації. Термічна обробка особливо добре підходить для виконання цих регуляторних вимог шляхом ефективної нейтралізації мікробних клітин без шкоди для фундаментального визначення постбіотиків. Постійний розвиток методів термічної обробки підкреслює її незмінну актуальність у цій галузі, водночас підкреслюючи необхідність інновацій для вирішення поточних проблем. До них належать нові підходи, такі як мікрохвильовий нагрів, радіочастотний нагрів та інфрачервоний нагрів, які пропонують потенційні переваги з точки зору енергоефективності та скорочення часу обробки порівняно з традиційними термічними методами.

Нетермічні технології.

Нетермічні технології пропонують інноваційні підходи до виробництва та покращення виробництва постбіотиків, зберігаючи їхні біоактивні сполуки та забезпечуючи мікробну безпеку. Ці передові методи, починаючи від фізичних і закінчуючи альтернативними методами обробки, відіграють вирішальну роль в оптимізації виробничих процесів, покращенні стабільності продукту та дотриманні стандартів сталого розвитку та нормативних актів²⁶. Ці нові методи, починаючи від високого тиску до ультразвуку, опромінення та холодної плазми, пропонують інноваційні шляхи збереження біоактивних сполук, одночасно підвищуючи мікробну безпеку.

Фізичні методи. Прихильники нетермічних фізичних методів стверджують, що вони перевершують традиційні термічні технології, зберігаючи функціональну та харчову цілісність постбіотиків. Нетермічні фізичні методи демонструють значний промисловий потенціал у виробництві функціональних продуктів харчування. На відміну від термічної обробки, нетермічні методи, такі як ультразвукова обробка, високопродуктивне фотохімічне випаровування та полімерні фільтри, інактивують мікроорганізми без термічної деградації біоактивних сполук, поєднуючи безпеку, сталий розвиток та економічні переваги. Це гарантує, що термочутливі молекули, такі як коротколанцюгові жирні кислоти та бактеріоцини, зберігають свої властивості, такі як антиоксидантна здатність та антимікробна ефективність. Ці технології також покращують ключові сполуки, що сприяють здоров'ю, такі як бактеріоцини та епітеліальні білки, важливі для метаболічного здоров'я та імунomodulaції. З огляду на зростаючий споживчий попит на функціональні продукти, багаті на біоактивні речовини, здатність нетермічних технологій забезпечувати

²⁶ Jadhav, Harsh Bhaskar, Uday S. Annapure, and Rajendra R. Deshmukh. "Non-thermal technologies for food processing". *Frontiers in Nutrition* 8 (2021): 657090.

безпеку, зберігаючи при цьому біоактивність, робить їх кращими за традиційні методи. Крім того, продукти, отримані нетермічними методами, відповідають руху за чисту етикетку, який споживачі асоціюють з більшою користю для здоров'я. Знижене споживання теплової енергії забезпечує економічні та екологічні переваги. Постбіотики, вироблені за допомогою нетермічних процесів, зберігають вищу біодоступність, посилюючи їхню взаємодію з системою хазяїна²⁷. Це збереження сприяє лікуванню хронічних захворювань та системному метаболізму, тоді як збереження структурних особливостей постбіотиків підвищує їхню ефективність у лікуванні запальних та метаболічних розладів. Ці переваги позиціонують нетермічні методи як місток між функціональними продуктами харчування та біотерапією, сприяючи інноваціям у персоналізованому харчуванні та клінічному застосуванні.

4. Потенційне використання новітніх нетермічних технологій з у постбіотичному виробництві

Підсумовуючи, нетермічні фізичні методи пропонують багатообіцяючі досягнення у постбіотичному виробництві, покращуючи екстракцію біоактивних сполук, зберігаючи функціональну цілісність та підтримуючи цілі сталого розвитку. Однак, для оптимізації цих технологій для широкого промислового застосування необхідні подальші інновації в масштабуванні, зниженні витрат та узгодженні нормативних актів.

Ультразвукова технологія. Ультразвукова обробка стала одним з найінноваційніших та найпопулярніших методів серед нетермічних фізичних методів для покращення виробництва постбіотиків. Ультразвукову обробку застосовували до та після ферментації для сприяння руйнуванню мікробних клітин та екстракції метаболітів²⁸. Цей процес базується на принципах акустичної кавітації, де високочастотні звукові хвилі генерують мікробульбашки, які згодом руйнуються, створюючи інтенсивні локалізовані сили зсуву, здатні руйнувати стінки мікробних клітин. Механічний вплив не тільки сприяє ефективному вивільненню постбіотичних компонентів, таких як біосурфактанти, бактеріюцини та епітелієві кислоти, але й дозволяє обробляти складні субстрати для використання мікробами, покращуючи виробництво постбіотиків.

Застосування ультразвукової обробки на певних стадіях ферментації значно знижує значення поверхневого натягу, що свідчить про

²⁷ Żółkiewicz, Jakub, et al. "Postbiotics – a step beyond pre-and probiotics". *Nutrients* 12.8 (2020): 2189.

²⁸ Behzadnia, Asma, et al. "Lactobacillus plantarum-derived biosurfactant: Ultrasound-induced production and characterization". *Ultrasonics Sonochemistry* 65 (2020): 105037.

покращення виходу біосурфактантів. Крім того, цей процес покращив протівірусні властивості під час виробництва постбіотиків з *Lc. plantarum* з використанням агропромислових відходів, таких як меляса та пермеат молочної сироватки, що підкреслює подвійне досягнення: підвищення цінності недорогих субстратів та покращення виробництва та екстракції постбіотиків. Ці результати підкреслюють подвійну роль ультразвукової обробки у підвищенні як сталості використання субстрату, так і функціональної продуктивності постбіотичних продуктів. Однак застосування ультразвуку має бути точно вчасно. Втручання протягом 12-ї години ферментації призвели до оптимального вилучення метаболітів порівняно з попереднім або пізнішим застосуванням. Це підкреслює необхідність ретельного калібрування процесу для максимізації ефективності та одночасного збереження якості вироблених постбіотиків. Окрім покращеного виробництва постбіотиків, високоінтенсивний ультразвук, наприклад, також виявився ефективним у покращенні біоактивних та сенсорних якостей молочних постбіотиків, що робить ці продукти більш привабливими для споживачів.

Постбіотики, отримані з використанням ультразвукової обробки, перевершили термічну обробку з точки зору їхньої антибактеріальної активності (65%) проти *Escherichia coli* порівняно з 51% інактивацією, що спостерігалася в термічно отриманих постбіотичних зразках.

Ультразвукова обробка прискорює час обробки та зменшує споживання енергії, вирішуючи критичні операційні проблеми у великомасштабному виробництві. Ці властивості не лише підвищують економічну ефективність промислових процесів, але й підтримують розробку нових застосувань у рослинних альтернативах.

Емпіричні дослідження показали, що ультразвукова обробка, при стратегічному застосуванні під час процесів ферментації, значно підвищує вихід біоактивних метаболітів та знижує значення поверхневого натягу, як це спостерігається в багатих на біосурфактанти постбіотиках, отриманих з субстратів агропромислових відходів. Ці результати підкреслюють потенціал ультразвуку для оптимізації відновлення високоцінних компонентів, забезпечуючи помітне покращення порівняно з традиційними методами екстракції, одночасно досягаючи цілей сталого розвитку.

Здатність ультразвукової технології зберігати термочутливі біоактивні сполуки, уникаючи при цьому деградації харчових та сенсорних якостей, є основною перевагою над методами термічної обробки. Традиційні методи на основі тепла, хоча й широко використовуються, часто призводять до денатурації або втрати критично важливих постбіотичних

молекул, включаючи бактеріоцини, органічні кислоти та епітеліальні кислоти, тим самим знижуючи біоактивність отриманих продуктів. На противагу цьому, процеси з використанням ультразвуку підтримують структурну та функціональну цілісність цих сполук, забезпечуючи збереження їхніх корисних для здоров'я властивостей. Таке збереження особливо важливе де збереження сенсорних властивостей, таких як смак, колір та текстура, є пріоритетом для прийняття на ринку. Крім того, ультразвукова обробка дозволяє уникнути утворення небажаних термічних побічних продуктів, таких як фурани, які не тільки шкідливо впливають на безпеку продукту, але й не відповідають тенденціям щодо «чистого» етикетування. Ці особливості роблять ультразвукову технологію привабливим варіантом для розробки постбіотиків, які відповідають потребам споживачів у високоякісних, корисних для здоров'я продуктах харчування.

Нещодавні дослідження підкреслили високу ефективність екстракції за допомогою ультразвукової технології, особливо у відновленні фенольних та інших біологічно активних сполук. Покращена екстракція метаболітів, таких як флавоноїди, органічні кислоти та біоактивні пептиди, безпосередньо пов'язана з підвищеною антиоксидантною здатністю, яка є невід'ємною частиною користі постбіотиків для здоров'я, включаючи їх протизапальні властивості та властивості, що посилюють кишковий бар'єр. Покращений вихід та функціональні властивості цих сполук підкреслюють потенційну цінність ультразвукової технології для виробництва потужних постбіотиків, а також з широким спектром біоактивності. Крім того, здатність екстрагувати ці сполуки з ферментаційних бульйонів та складних матриць демонструє універсальність та масштабованість ультразвуку для промислового застосування.

Інтеграція ультразвукової обробки з методами ферментації являє собою передовий підхід до адаптації постбіотичних профілів для конкретних застосувань. Зокрема, було показано, що використання ультразвуку на критичних стадіях ферментації, таких як 12-та година для виробництва біосурфактантів, покращує функціональні характеристики, включаючи протівірусну активність проти патогенів. Модулюючи ступінь порушення клітинної стінки та вивільнення внутрішньоклітинних метаболітів, ультразвук сприяє виробництву постбіотиків з підвищеною біоактивністю та цільовою користю для здоров'я.

Екологічні та економічні переваги ультразвукової технології особливо важливі для її впровадження в промислових масштабах. Як нетермічний метод, ультразвук працює за кімнатної або нижчої температури, що призводить до значного зниження споживання енергії порівняно

з традиційними термічними процесами²⁹. Його швидке та цілеспрямоване руйнування мікробів зменшує потребу в додаткових етапах стерилізації або очищення, що ще більше мінімізує використання ресурсів, включаючи воду та миючі хімікати. Нижча потреба в енергії та ресурсах не тільки зменшує викиди парникових газів, але й знижує експлуатаційні витрати, що робить ультразвук привабливим варіантом для великомасштабного виробництва. Його потенціал для досягнення як економічних, так і екологічних цілей позиціонує його як переконливий вибір для виробників, які прагнуть досягти глобальних цілей сталого розвитку, зберігаючи при цьому високу ефективність виробництва.

Відповідність ультразвукової обробки сучасному визначенню постбіотиків забезпечує її актуальність у регуляторному та ринковому контекстах. Ультразвукова технологія ефективно інактивує мікроорганізми, зберігаючи при цьому їх структурні конфігурації та біоактивні властивості, виробляючи постбіотики, які відповідають цим критеріям визначення. Ця здатність до стандартизації та узгодженості є важливою для прийняття регуляторними органами та точного маркування, підтримки виробників в обґрунтуванні заяв про користь для здоров'я та підтримки довіри споживачів. Крім того, виробництво чітко визначених, високоякісних постбіотиків за допомогою ультразвукової обробки відповідає нормативним базам, що розвиваються, для нових харчових продуктів, сприяючи виходу на міжнародний ринок та зміцнюючи довіру до функціональних харчових продуктів.

Розширення використання ультразвуку в постбіотичному виробництві не лише відповідає цілям сталого розвитку та безпеки, але й стимулює інновації в розробці функціональних продуктів харчування та нутрицевтиків. Зберігаючи біоактивну цілісність, підвищуючи ефективність екстракції та сприяючи сталому використанню ресурсів, ультразвукова технологія вирішує критичні проблеми в процесі постбіотичного виробництва. Її сумісність з існуючими системами виробництва харчових продуктів та здатність інтегруватися з іншими нетермічними методами забезпечують додаткову гнучкість для промислового застосування. Подальші дослідження та вдосконалення параметрів ультразвукової обробки будуть важливими для повної реалізації її потенціалу, що дозволить розробляти постбіотики, які відповідають різноманітним потребам споживачів та клінічним потребам, одночасно підтримуючи глобальні цілі сталого розвитку.

²⁹ Cassani, Lucía, Esteban Gerbino, and Andrea Gómez-Zavaglia. "Technology aspects of probiotic production and live biotherapeutics". *Probiotics for human nutrition in health and disease*. Academic Press, 2022. 143–170.

Обробка під високим тиском.

Хоча високотемпературний полімерний розчин (ВПР) є ще однією перспективною нетермічною технологією з величезним потенціалом для комерціалізації у виробництві постбіотиків, пропонуючи значні переваги у збереженні термочутливих біоактивних сполук та мікробних метаболітів³⁰. Подібно до інших нетермічних технологій, ВПР інактивує мікроорганізми без значної термічної деградації, тим самим забезпечуючи збереження поживних та функціональних якостей, а також передбачувану користь для здоров'я від постбіотичних продуктів. На відміну від традиційних методів на основі тепла, ВПР працює шляхом застосування тиску, який зазвичай коливається від 100 до 600 МПа при кімнатній або злегка підвищеній температурі, ефективно інактивуючи мікроорганізми, уникаючи втрати або денатурації необхідних постбіотичних молекул, включаючи коротколанцюгові жирні кислоти, бактеріоцини та епітеліальні білки. ВПР можна застосовувати для парабіотичного формування *Lc. plantarum* M1UG BL21 з посиленою протипухлинною дією. Здатність ВПР до консервування має вирішальне значення для створення інноваційних рецептур, що дозволяє використовувати конкретні заяви про користь для здоров'я, такі як покращена функція кишкового бар'єру та імунomodуляція. Більше того, нетермічна природа високообробленого харчового продукту (ВПР) робить його сумісним з екологічно чистим етикетуванням та мінімальними обробними рухами, тенденціями, які дедалі більше віддають перевагу сучасним споживачам.

Крім того, ВПР може забезпечити стабілізацію постбіотичних метаболітів, таких як КЖК, бактеріоцини та ЕР, зберігаючи цілісність мікробних клітин до стратегічно цілеспрямованого лізису. Це контрольоване вивільнення може підвищити вихід та біоактивність ключових постбіотичних сполук, полегшуючи їх використання в оздоровчих та біотерапевтичних. Час обробки ВПР у робочому процесі постбіотичного виробництва також можна оптимізувати, наприклад, застосовуючи процес після ферментації, але до повної інактивації, щоб максимізувати як якість, так і кількість вироблених біоактивних сполук. Така оптимізація може призвести до постбіотичних рецептур, збагачених такими сполуками, як молочна кислота, ацетат та циклічні дипептиди, відомі своїми антимікробними та оздоровчими перевагами. Ця здатність робить ВПР цінним інструментом для розробки цільових постбіотичних профілів зі специфічним застосуванням у сфері охорони здоров'я. Мікробні

³⁰ Huang, Hsiao-Wen, et al. "Current status and future trends of high-pressure processing in food industry". *Food control* 72 (2017): 1–8.

штами, такі як *Lactobacillus* та *Bifidobacterium*, унікально реагують на ВПР, впливаючи на вихід та біоактивність похідних постбіотиків. Ця динаміка надає можливості для диференціації продукту та цільової функціональності, пропонуючи величезний потенціал для створення інноваційних рецептур, збагачених постбіотиками, з використанням технології ВПР.

Імпульсні електричні поля (ІЕП).

ІЕП – це дуже ефективний нетермічний метод, який працює як малоінвазивна техніка завдяки своїй точності у балансуванні проникності клітинних мембран та постбіотичного виробництва³¹. ІЕП працює шляхом застосування інтенсивних електричних імпульсів, які створюють тимчасові пори в мембранах мікробних клітин, що дозволяє вибірково екстрагувати внутрішньоклітинні сполуки. Таким чином, цей метод сприяє екстракції внутрішньоклітинних біологічно активних сполук, таких як білки, ЕР та мікробні метаболіти, не викликаючи значних молекулярних пошкоджень, часто пов'язаних зі звичайними термічними методами. Експериментальні дослідження, такі як ті, що стосуються *Lc. rhamnosus*, *L. paracasei* та *Saccharomyces cerevisiae*, продемонстрували здатність ІЕП вивільняти цінні біологічно активні речовини, зберігаючи при цьому їх структурну та функціональну цілісність. Крім того, умови ІЕП, такі як напруженість електричного поля, тривалість імпульсів та частота обробки, можуть бути оптимізовані для максимізації вивільнення внутрішньоклітинних метаболітів для конкретних штамів мікробів та бажаних постбіотичних профілів, зберігаючи при цьому життєздатність клітин до моменту необхідності інактивації. Такі коригування відкривають шлях для адаптованих процесів постбіотичного виробництва, забезпечуючи вищу врожайність та покращену специфічну функціональну або пов'язану зі здоров'ям біоактивність. Ще однією переконливою перевагою ІЕП є його здатність перевершувати традиційні термічні методи у збереженні структурної та функціональної цілісності термочутливих біоактивних сполук. Дослідження підтвердили, що зразки, оброблені ІЕП, демонструють вищий вихід біоактивних сполук та сильнішу біоактивність порівняно зі зразками, що піддавалися термічним процесам. Крім того, швидший час обробки, пов'язаний з ІЕП, який зазвичай коливається від наносекунд до міросекунд, мінімізує ризики термічної деградації, що робить цю технологію особливо придатною для виробництва термолабільних харчових компонентів, корисних для здоров'я.

³¹ Salar, Francisco J., et al. "Ifs and buts of non-thermal processing technologies for plant-based drinks' bioactive compounds". *Food Science and Technology International* 29.5 (2023): 445–479.

Його здатність підтримувати якість продукції, забезпечуючи інактивацію мікробів, позиціонує цю технологію як практичний вибір для великомасштабного виробництва.

Ще однією важливою особливістю ІЕП є його відповідність нормативним та визначеним стандартам для постбіотиків, що постійно розвиваються, яким ІЕП відповідає, забезпечуючи повну інактивацію мікробних клітин, зберігаючи при цьому їхні функціональні метаболіти. Ця відтворювана та точна здатність до інактивації не лише сприяє дотриманню правил безпеки та маркування, але й підтримує забезпечення якості. Така узгодженість є важливою для формування довіри споживачів та забезпечення точної класифікації постбіотичних продуктів, особливо враховуючи, що нормативно-правові бази щодо постбіотиків продовжують розвиватися. З іншого боку, інтеграція ІЕП з іншими нетермальними технологіями пропонує додаткові можливості для покращення постбіотичного виробництва. Дослідження досліджували синергію між ІЕП та ультразвуком, показуючи, що їхні додаткові механізми – ІЕП для цільової пермеабілізації та ультразвук для механічного руйнування клітин – призводять до покращення виходу метаболітів та функціональних властивостей. Наприклад, обробка ІЕП у поєднанні з руйнуванням клітин *S. cerevisiae* під високим тиском показала ефективну та селективну екстракцію різних внутрішньоклітинних компонентів, таких як білки та іонні компоненти. Подібні результати також були описані, де обробка ІЕП дріжджової біомаси призвела до економічно ефективної послідовної екстракції кількох біомолекул з доданою вартістю, таких як β -глюкани. Ці результати підкреслюють потенціал гібридних технологій для оптимізації використання ресурсів, скорочення часу обробки та мінімізації впливу на навколишнє середовище великомасштабних виробничих процесів. Тому подальше дослідження таких синергетичних підходів є важливим для повної реалізації комбінованого потенціалу та переваг цих передових технологій як у виробництві функціональних харчових продуктів, так і в біотерапевтичних застосуваннях. Підсумовуючи, подальше вдосконалення інтеграції ІЕП з іншими технологіями та врахування регуляторних питань може відіграти трансформаційну роль у розвитку галузі постбіотиків та функціональних харчових продуктів.

Альтернативна обробка.

Альтернативні нетермічні методи обробки, такі як холодна плазма, надкритичний CO₂, УФ-випромінювання та іонізуюче випромінювання, також привернули значну увагу до постбіотичного виробництва завдяки їхній здатності досягати ефективної мікробної інактивації, зберігаючи при цьому функціональну та харчову цілісність біоактивних

сполук³². На відміну від традиційних термічних методів, ці технології забезпечують цілеспрямований мікробний контроль без шкоди для структурних властивостей постбіотичних компонентів. Подібно до фізичних нетермічних методів, ці методи також підтримують і можуть навіть підвищувати біоактивність та стабільність ключових постбіотичних метаболітів, таких як коротколанцюгові жирні кислоти та епітеліальні кислоти, тим самим розширюючи їхню корисність у розробці функціональних харчових продуктів. Однак, незважаючи на їхні перспективні властивості, впровадження цих методів вимагає ретельного вивчення їх масштабності, економічної доцільності, сумісності з різноманітними виробничими матрицями, прийнятності для споживачів, необхідності спеціалізованого обладнання та точного калібрування, щоб уникнути надмірного впливу, а також створює труднощі для широкого промислового впровадження альтернативних нетермічних методів обробки для постбіотичного виробництва. Крім того, початкові інвестиції у спеціалізоване обладнання та навчання персоналу викликають сумніви щодо економічної доступності цих методів для малих та середніх підприємств, особливо в менш розвинених регіонах.

Холодна плазма є однією з таких особливо перспективних технік у постбіотичному виробництві завдяки їхній подвійній здатності ефективно інактивувати мікроорганізми та вибірково зберігати або підвищувати концентрації біоактивних молекул. Нові дані також підкреслюють потенціал інтеграції альтернативних нетермічних методів обробки з прецизійними конструкціями ферментації та субстратами для створення постбіотичних рецептур з унікальними функціональними властивостями. Було показано, що специфічні комбінації методів ферментації з альтернативними нетермічними втручаннями збагачують біоактивні профілі вироблених постбіотиків, посилюючи їхню антимікробну, антиоксидантну та протизапальну активність.

Загалом, альтернативні нетермічні методи обробки надають трансформаційну можливість для постбіотичного виробництва, пропонуючи чудове збереження біоактивних речовин, підвищену стабільність продукту та додаткові переваги для сталого розвитку порівняно з традиційними термічними підходами. Однак, подолання проблем стандартизації, масштабності та економічної доцільності матиме вирішальне значення для реалізації їхнього повного промислового потенціалу. У розділах нижче детально представлені ці передові методи.

³² Silva, Eric Keven, M. Angela A. Meireles, and Marleny DA Saldaña. "Supercritical carbon dioxide technology: A promising technique for the non-thermal processing of freshly fruit and vegetable juices". *Trends in Food Science & Technology* 97 (2020): 381–390.

Обробка холодною плазмою.

Обробка холодною плазмою являє собою передову нетермічну технологію, яка привернула увагу завдяки своєму потенціалу в інактивації мікробів, зберігаючи при цьому цілісність чутливих біоактивних компонентів. Механізм, за допомогою якого холодна плазма досягає інактивації мікробів, зосереджений на дії реактивних частинок, таких як кисень та азот, які проникають через мембрани мікробних клітин, що призводить до внутрішньоклітинного порушення та, зрештою, до загибелі клітин без термічної деградації, пов'язаної зі звичайними процесами на основі тепла³³. Зберігаючи структурну та функціональну цілісність температурно-чутливих постбіотичних сполук, таких як коротколанцюгові жирні кислоти та бактеріоцини, обробка холодною плазмою може сприяти виробництву високоякісних постбіотиків зі збереженими властивостями, що сприяють здоров'ю.

Дослідження продемонстрували здатність обробки холодною плазмою зберігати необхідні метаболіти, критично важливі для ефективності постбіотиків, включаючи коротколанцюгові жирні кислоти та епітеліальні кислоти. Ця здатність до збереження робить холодну плазму універсальною технологією, здатною підвищити як безпеку, так і ефективність продуктів, збагачених постбіотиками, і є особливо вигідною для виробництва функціональних інгредієнтів, де збереження біоактивності є надзвичайно важливим.

Порівняно з традиційними термічними процесами, нетермічний підхід холодної плазми значно мінімізує деградацію критично важливих поживних речовин, таких як вітаміни, пептиди та полісахариди, на які часто негативно впливає тепло. Уникнення такої деградації підтримує виробництво постбіотичних продуктів з підвищеною біоактивністю та функціональною цінністю, і таким чином підкреслює здатність холодної плазми досягати подвійних цілей безпеки та ефективності в постбіотичному виробництві.

Експериментальні дані підтверджують здатність продуктів, оброблених холодною плазмою, зберігати мікробіологічну безпеку, зберігаючи при цьому високий рівень біоактивних компонентів. Ця подвійна функціональність робить холодну плазму надійним вибором для розробки продуктів, які відповідають нормативним стандартам безпеки та одночасно мають функціональні переваги для здоров'я. Крім того, порівняльні дослідження показують, що обробка холодною плазмою має

³³ White, Shecoya, et al. "A review of non-thermal interventions in food processing technologies". *Journal of Food Protection* 88.6 (2025): 100508.

менш негативний вплив на сенсорні властивості, такі як колір, текстура та смак, ніж традиційні методи високої температури. Ця здатність підтримує постійні тенденції в харчовій промисловості, де перевага натуральним та мінімально обробленим варіантам відіграє ключову роль у формуванні купівельної поведінки.

Промислова масштабованість холодної плазми підтримується досягненнями в технологіях плазмових пристроїв, включаючи модульні та безперервні потокові системи, які сприяють інтеграції у високопродуктивні виробничі середовища. Однак, мінливість конфігурацій пристроїв, джерел плазми та робочих параметрів створює проблеми, що потребують систематичної оптимізації та стандартизації.

Крім того, сумісність обробки холодною плазмою з іншими біотехнологічними підходами, такими як ферментація, дозволяє розробляти інноваційні постбіотичні рецептури, розроблені для задоволення конкретних потреб у сфері охорони здоров'я або демографічних показників споживачів. Завдяки своїй здатності підтримувати стійкі, безпечні та високоякісні виробничі процеси, холодна плазма являє собою трансформаційну технологію для секторів функціональних продуктів харчування та нутрицевтиків. Використовуючи свій міждисциплінарний потенціал, галузі промисловості можуть розробляти інноваційні рішення, що забезпечують постбіотики, що сприяють здоров'ю, з широкою привабливістю для споживачів та відповідністю нормативним вимогам. Однак подальші дослідження взаємодії між різними видами плазми, мікробними штамами та харчовими матрицями мають вирішальне значення для розробки найкращих практик, які забезпечують стабільні результати у постбіотичному виробництві.

Опромінення.

Опромінення (УФ-випромінювання, γ -опромінення та імпульсне світло) відіграє значну роль у виробництві пробіотичних та постбіотичних харчових продуктів, слугуючи методом підвищення безпеки та подовження терміну придатності без залишення шкідливих хімічних залишків або негативного впливу на сенсорні та харчові властивості³⁴. Застосування технології опромінення в харчовій промисловості привернуло увагу завдяки її здатності ефективно зменшувати мікробне забруднення без необхідності термічної обробки, яка часто може погіршити харчові та сенсорні якості харчових продуктів.

³⁴ Yan, Bing, et al. "From laboratory to industry: The evolution and impact of pulsed electric field technology in food processing". *Food Reviews International* 41.2 (2025): 373–398.

У постбіотичному виробництві опромінення може бути використане для інактивації живих мікроорганізмів, залишаючи після себе їхні корисні метаболіти та клітинні компоненти. Ці методи використовують електромагнітне випромінювання для порушення мікробної ДНК, досягаючи високого рівня мікробної інактивації. Опромінення може ефективно припинити мікробну активність, зберігаючи при цьому структурну цілісність біоактивних сполук, таких як коротколанцюгові жирні кислоти, ферменти та пептиди, які відповідають за постбіотичні ефекти. Тому технології опромінення в поєднанні з деякими методами лізису клітин є особливо вигідними для функціональних харчових систем, де споживчі уподобання все більше віддають перевагу мінімально обробленим продуктам з «чистим» етикетуванням. Дослідження продемонстрували ефективність обробки ультрафіолетовим та імпульсним світлом у підтримці якості та безпеки продуктів, збагачених постбіотиками, уникаючи при цьому термічного або окислювального пошкодження, часто пов'язаного з традиційними методами.

Контрольоване застосування опромінення дозволяє зменшити мікробне навантаження без суттєвої зміни харчових та сенсорних якостей харчового продукту. Крім того, опромінення також може підтримувати свіжість та якість пробіотичних та постбіотичних продуктів, потенційно продовжуючи термін їхнього зберігання та зменшуючи харчові відходи.

Однак, слід ретельно враховувати дозу опромінення, оскільки надмірне опромінення може змінити структуру постбіотичних сполук та інших поживних речовин. Визначення оптимальних параметрів опромінення має вирішальне значення для досягнення балансу між мікробною безпекою та збереженням корисних компонентів. Такі фактори, як тип харчової матриці, цільові мікроорганізми та бажаний термін придатності, необхідно враховувати під час розробки протоколів опромінення для постбіотичних продуктів. Крім того, використання опромінення в харчовій промисловості підлягає регуляторному нагляду для забезпечення безпеки споживачів. Різні країни мають різні правила щодо застосування технології опромінення та маркування опромінених продуктів. Виробники повинні суворо дотримуватися цих правил та надавати споживачам прозору інформацію про використання опромінення у своїй продукції.

Поточні дослідження спрямовані на оптимізацію протоколів опромінення, щоб максимізувати переваги постбіотичного виробництва харчових продуктів, забезпечуючи при цьому безпеку та якість продукції. Вчені досліджують інноваційні підходи, такі як поєднання опромінення з іншими методами для створення нових постбіотичних сполук або підвищення біодоступності існуючих. Ретельно контролюючи процес

опромінення, можна викликати корисні зміни в мікробних метаболітах, що потенційно може призвести до покращення стану здоров'я споживачів. Ці досягнення можуть ще більше підвищити ефективність та застосовність опромінення у функціональній харчовій промисловості.

Оскільки попит на функціональні продукти харчування продовжує зростати, технологія опромінення, ймовірно, відіграватиме дедалі важливішу роль у забезпеченні безпеки, якості та ефективності цих функціональних харчових продуктів. Тому подальші дослідження та розробки в цій галузі сприятимуть удосконаленню методів переробки харчових продуктів та розширенню ринку пробіотиків і постбіотиків.

Надкритичний CO₂.

Обробка надкритичним CO₂ (Sc-CO₂) стала перспективним методом у постбіотичному виробництві, пропонуючи низку переваг порівняно з традиційними методами. Цей інноваційний процес включає вплив на мікробні клітини високого тиску CO₂ у їх надкритичному стані, що викликає руйнування клітин та посилює вивільнення внутрішньоклітинних компонентів. Механізм дії головним чином залежить від здатності Sc-CO₂ проникати крізь клітинні мембрани, спричиняючи швидке зниження тиску та подальший лізис клітин. Унікальні властивості Sc-CO₂ роблять його ідеальним середовищем для постбіотичного виробництва. Його низька в'язкість та висока дифузійність дозволяють йому ефективно проникати в клітинні структури, тоді як низький поверхневий натяг дозволяє легко видаляти його з кінцевого продукту. Таке контрольоване руйнування дозволяє ефективно екстрагувати біоактивні сполуки, включаючи пептиди, ферменти та метаболіти, які складають постбіотичну фракцію.

Крім того, використання Sc-CO₂ у постбіотичному виробництві пропонує низку переваг для навколишнього середовища та безпеки. CO₂ нетоксичний, негорючий та легкодоступний, що робить його безпечнішою альтернативою органічним розчинникам, які зазвичай використовуються в традиційних методах екстракції. Більше того, процес можна проводити за відносно низьких температур, що зменшує споживання енергії та мінімізує ризик термічного розкладу цінних сполук. Крім того, антимікробні властивості Sc-CO₂ сприяють збереженню цих екстрагованих компонентів, забезпечуючи їхню стабільність та біоактивність. Ця притаманна антимікробна дія допомагає запобігти забрудненню під час процесу екстракції та продовжує термін зберігання отриманих постбіотичних продуктів. Нетермічний характер обробки Sc-CO₂ також допомагає підтримувати структурну цілісність та функціональність термочутливих постбіотичних компонентів, що робить

її потенційно придатною для виробництва високоякісних постбіотиків та продуктів з високими сенсорними властивостями.

Більше того, універсальність обробки Sc-CO₂ дозволяє точно налаштувати параметри процесу, такі як тиск, температура та час експозиції. Ця адаптивність дозволяє дослідникам та виробникам оптимізувати умови екстракції для конкретних мікробних штамів або бажаних постбіотичних компонентів, що призводить до більш цілеспрямованих та ефективних виробничих процесів. Крім того, метод обробки Sc-CO₂ добре узгоджується з принципами зеленої хімії та сталого виробництва. CO₂, що використовується в процесі, може бути перероблений, що зменшує кількість відходів та вплив на навколишнє середовище. Цей екологічний аспект у поєднанні з його ефективністю позиціонує обробку Sc-CO₂ як перспективну технологію для майбутнього функціональної харчової промисловості, постбіотичного виробництва та нутрицевтичної промисловості.

Оскільки дослідження в цій галузі продовжують розвиватися, ймовірно, що обробка Sc-CO₂ відіграватиме дедалі важливішу роль у розробці нових постбіотичних продуктів з підвищеною біоактивністю та стабільністю. Потенційне застосування цієї технології виходить за рамки харчової промисловості та нутрицевтиків, з можливим використанням у фармацевтичній, косметичній та інших галузях промисловості, де цінним є вилучення біоактивних сполук з мікробних джерел.

5. Методи нетермічної обробки

Що стосується методів нетермічної обробки, що використовуються для постбіотичного виробництва, кілька нетермічних процедур набули поширення в комерційних умовах. Серед них високотемпературна обробка наразі є однією з найбільш комерційно передових нетермічних технологій, що використовуються в харчовій промисловості, включаючи постбіотичне виробництво. Однак, незважаючи на її зростаюче впровадження, комерційне впровадження високотемпературної обробки у постбіотичному виробництві дещо обмежене такими факторами, як високі капітальні витрати та робота в пакетному режимі, що може вплинути на виробництво та масштабованість. Тим не менш, доведена ефективність цієї технології у збереженні сенсорної та поживної якості підтримує її подальше та ширше застосування в постбіотичному секторі, особливо для продуктів, що потребують м'якої мікробної інактивації та збереження біоактивності. Далі ультразвукова обробка також виходить на передній план і все частіше використовується компаніями в постбіотичному виробничому секторі для вилучення внутрішньоклітинних біоактивних сполук з мікробних клітин.

Ультразвукова обробка виявилася цінною для підвищення ефективності ферментації та збільшення виходу цільових постбіотичних речовин без піддавання їх шкідливому нагріванню. Однак її комерційне використання все ще зростає, а не є повністю усталеним, оскільки компанії продовжують оптимізувати такі параметри, як інтенсивність, тривалість та контроль температури, щоб збалансувати порушення клітин, зберігаючи при цьому біоактивність. Проблеми, пов'язані з масштабуванням та інтеграцією ультразвукової обробки в безперервні промислові процеси, залишаються, але постійні дослідження та промисловий інтерес свідчать про ширше впровадження в найближчому майбутньому для ефективної постбіотичної екстракції.

Екстракція Sc-CO₂ є переважною для отримання специфічних постбіотичних сполук, оскільки це екологічний метод без розчинників, який зберігає стабільність та біоактивність чутливих метаболітів. Однак її використання в постбіотичній екстракції обмежене такими проблемами, як високі початкові інвестиційні витрати, складність обробки гетерогенних мікробних матриць та потреба в спеціалізованому обладнанні та технічних знаннях. Крім того, для ефективного вилучення різноманітних мікробних метаболітів необхідна оптимізація через їхні різні хімічні властивості та спорідненість. Ці фактори обмежують широке комерційне впровадження, хоча поточні дослідження спрямовані на подолання цих бар'єрів та повне використання переваг надкритичного CO₂ для селективного постбіотичного відновлення високої чистоти.

Збільшення масштабів опромінення для постбіотичного виробництва може вплинути як на безпеку, так і на сприйняття на ринку кількома способами. З точки зору безпеки, опромінення ефективно інактивує мікроорганізми без нагрівання, зберігаючи клітинні структури та метаболічну активність. Однак забезпечення постійного дозування та рівномірного впливу в промислових масштабах має вирішальне значення для уникнення неповної інактивації або ненавмисних змін у клітинних компонентах, які можуть вплинути на безпеку або ефективність. З точки зору сприйняття на ринку, опромінення стикається з проблемами через сприйняття споживачами та вимоги регуляторних органів до маркування. Багато споживачів залишаються настороженими до опромінених продуктів через хибні уявлення про радіаційні ризики, що потенційно обмежує проникнення на ринок. Регулюючі органи також вимагають чіткого маркування опромінених продуктів, що може ще більше вплинути на рішення споживачів про купівлю. Тому необхідні зусилля для навчання споживачів щодо безпеки та переваг опромінення, щоб покращити сприйняття споживачами. Крім того, експлуатаційні витрати та вимоги

до інфраструктури для великомасштабних установок опромінення можуть впливати на ціноутворення та конкурентоспроможність продукції. Врахування цих факторів є важливим для успішного комерційного впровадження опромінення у постбіотичному виробництві.

Технології холодної плазми перебувають на ранній стадії впровадження у постбіотичному виробництві, при цьому поточні дослідження та пілотні застосування показують багатообіцяючі результати, але також виявляють значні перешкоди. Технологія холодної плазми є значною мірою експериментальною, з раннім комерційним інтересом до постбіотичного виробництва. Її цінують за здатність інактивувати мікроби та змінювати властивості поверхні, не спричиняючи термічного пошкодження, що може захистити або покращити функціональну якість постбіотичних інгредієнтів. Прагнення до безпечної обробки без залишків позиціонує холодно плазму як потенційне рішення для стерилізації та біоактивної модуляції. Тим не менш, поточне впровадження обмежене проблемою контролю впливу плазми для оптимізації антимікробної дії без пошкодження корисних молекул та складністю масштабування безперервного промислового виробництва. Вартість обладнання, відтворюваність процесу та відсутність усталених регуляторних баз є основними обмежувальними факторами. Загалом, нетермічні технології мають значний майбутній потенціал як методи наступного покоління у постбіотичному виробництві. Досягнення в інженерії, управлінні процесами та науковому розумінні, ймовірно, розширять їх комерційне застосування, що дозволить безпечно та ефективно виробляти високоякісні постбіотики. Якщо ці проблеми вдасться вирішити, нетермічні технології можуть допомогти стимулювати інновації, покращити сталий розвиток процесів та задовольнити зростаючий попит на натуральні та функціональні інгредієнти в харчовому секторі та секторі охорони здоров'я.

6. Промислове застосування

Оптимізація різних параметрів процесу та забезпечення якості є життєво важливими кроками у переході інноваційних постбіотичних технологій від лабораторних досліджень до промислового використання. Загалом, такі фактори, як калібрування процесу, технологічний прогрес та суворий контроль якості, підтримують виробництво безпечних, ефективних та масштабованих постбіотичних продуктів. Ці дані мають вирішальне значення для повного використання нетермічних методів у ширшій сфері розвитку рішень, що сприяють здоров'ю, у харчовій та нутрицевтичній промисловості.

Оптимізація процесів

Зростаюче визнання постбіотиків на ринках функціональних продуктів харчування підкреслює важливість підтримки стандартів якості та безпеки продукції, які є критично важливими для прийняття споживачами та зростання ринку³⁵. Перехід від лабораторного виробництва постбіотиків до промислового середовища вимагає точного застосування оптимізованих параметрів та валідованих концентрацій. Хоча поточні досягнення є багатообіцяючими, необхідні подальші зусилля для створення глобальних регуляторних баз, що підтримують комерціалізацію постбіотиків. Оптимізація нетермічних процесів виробництва постбіотиків передбачає ретельне калібрування умов обробки для адаптації до специфічних характеристик мікробних штамів та субстратів. Такі фактори, як рівень тиску, напруженість електричного поля, а також частота, потужність і тривалість обробки під час ультразвукової обробки, суттєво впливають на вихід постбіотичного продукту та біоактивність кінцевих продуктів. Тому систематична оцінка різних параметрів процесу для нетермічних технологій є вкрай важливою для виявлення взаємодій між змінними та їх впливу на результати мікробної ферментації. Такий підхід не тільки сприятиме відтворюваності постбіотичного виробництва, але й дозволить проводити прогнозне моделювання для промислової масштабованості. Впровадження стратегій контролю процесів не лише забезпечує дотримання нормативних вимог, але й зміцнює довіру споживачів, постійно постачаючи безпечні та ефективні постбіотичні продукти.

Крім того, завдання забезпечення ефективної інактивації мікробів разом зі збереженням чутливих біоактивних сполук є центральним для оптимізації нетермічних процесів. Нетермічні методи, що працюють за м'якших умов, дозволяють уникнути деградації біоактивних речовин, яка зазвичай спостерігається в підходах на основі тепла. Цей баланс є важливим для виробництва постбіотиків, що відповідають консенсусному визначенню, яке вимагає нежиттєздатних мікробних клітин або їх компонентів для забезпечення користі для здоров'я. Досягнення цієї подвійної мети залишається критичною сферою досліджень, особливо щодо підтримки узгодженості між ефективністю та регуляторними стандартами.

Ще одним аспектом оптимізації ефективності постбіотичного виробництва є динамічна природа харчових матриць, які потребують постійного моніторингу в режимі реального часу та адаптивного

³⁵ Thorakkattu, Priyamvada, et al. "Postbiotics: current trends in food and pharmaceutical industry". *Foods* 11.19 (2022): 3094.

коригування параметрів нетермічної обробки для забезпечення стабільності якості продукту та врахування мінливості партій. Оскільки це є поширеною проблемою при масштабуванні від лабораторних до промислових обсягів, впровадження таких систем не тільки посилить функціональні та безпечні контрольні показники, але й забезпечить стабільність продуктів, збагачених постбіотиками, під час виробництва та зберігання. Розробка прогнозних моделей на основі даних моніторингу в режимі реального часу потенційно може запропонувати шляхи для пом'якшення коливань якості сировини або умов обробки. Однак складність взаємодії між параметрами обробки та мікробними реакціями вимагає вдосконалення цих моделей для ширшого застосування, а поточні обмеження в передових технологіях моніторингу вимагають подальшого розвитку для забезпечення високопродуктивного, відтворюваного виробництва постбіотиків.

Інтеграція нетермічних технологій у промислові виробничі лінії пропонує масштабовані та енергоефективні рішення, що відповідають принципам сталого виробництва. Знижуючи експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище, ці методи забезпечують значні конкурентні переваги для харчової промисловості, особливо враховуючи зростання попиту споживачів на продукти з чистим етикетуванням та мінімально оброблені продукти. Однак економічна доцільність впровадження таких технологій у великих масштабах вимагає додаткового аналізу витрат і вигод для забезпечення їхньої довгострокової стійкості.

Стратегічний вибір нетермічних технологій для досягнення певних характеристик кінцевого продукту є ключовим фактором у промисловому застосуванні. Економічні, регуляторні та екологічні фактори відіграють важливу роль у визначенні доцільності нетермічних технологій для постбіотичного виробництва. Ці рішення повинні керуватися глибоким розумінням можливостей та обмежень кожної технології для узгодження з виробничими цілями. Певні методи пропонують такі переваги, як нижче споживання енергії, зменшення викидів парникових газів та просте дотримання нормативних вимог завдяки послідовній інактивації мікробів та стандартизації. Однак залишаються проблеми у балансуванні цих переваг з початковими інвестиціями, необхідними для впровадження нетермічних технологій, особливо для менших виробників.

Узгодження технологічних рішень з цілями розробки продуктів гарантує, що досягнення постбіотичних досліджень будуть ефективно перетворені на масштабовані, готові до виходу на ринок застосування. Таке узгодження підтримує еволюцію сектору функціональних продуктів харчування до стійких, корисних для здоров'я продуктів, які відповідають очікуванням споживачів та регуляторних органів. Хоча досягнення

цього узгодження є перспективним, воно вимагає подальшої співпраці між дослідниками, виробниками та політиками для вирішення проблем промислової інтеграції та глобальної конкурентоспроможності.

Забезпечення якості.

Забезпечення якості у нетермічному постбіотичному виробництві приділяє значну увагу контролю параметрів безпеки, щоб гарантувати, що постбіотики не містять життєздатних та потенційно патогенних мікроорганізмів. Технологія високого тиску та імпульсного світла була ретельно вивчена та визнана за свою ефективність в інактивації широкого спектру мікроорганізмів, тим самим мінімізуючи ризик виживання життєздатних клітин у кінцевому продукті. Це особливо актуально для постбіотичних рецептур, оскільки вони призначені для забезпечення користі для здоров'я без потенційних побічних ефектів, пов'язаних з живими бактеріями. Надійна мікробна інактивація, що забезпечується нетермічними технологіями, підтверджує їхню надійність та ширше застосування у функціональних харчових продуктах. Однак, необхідні подальші дослідження для оцінки довгострокових профілів безпеки постбіотиків, оброблених цими методами, та того, як їх антимікробна дія змінюється залежно від різних субстратів та мікробних складів. Комплексні заходи контролю безпеки є незамінними для забезпечення того, щоб нетермічні процеси постбіотичного виробництва відповідали як регуляторним, так і споживчим очікуванням. Регулярний моніторинг кількості мікробів, виявлення ендотоксинів та оцінка інших мікробних побічних продуктів є критично важливими компонентами стратегій контролю якості. Крім того, ці заходи повинні бути узгоджені зі стандартами харчової переробки та міжнародними визначеннями постбіотиків. Забезпечення безпеки цих продуктів особливо варте уваги, оскільки їхні переваги над пробіотиками, а саме відсутність життєздатних організмів, досягаються лише завдяки суворому нагляду під час виробництва. Потрібна подальша робота для стандартизації протоколів виявлення та забезпечення їх сумісності з широким спектром технологічних середовищ, гарантуючи, що як дрібномасштабні, так і промислові виробники зможуть дотримуватися суворих порогів безпеки.

Нетермічні технології значно підвищують безпеку постбіотичного виробництва, уникаючи утворення забруднюючих речовин, що утворюються в процесі виробництва, які часто пов'язані з термічною обробкою. Наприклад, високопродуктивне виробництво, полімерне виробництво та імпульсне світло не утворюють продуктів розкладу, індукованих нагріванням, що відповідає вимогам споживачів до продуктів з чистим етикетуванням та мінімально оброблених продуктів. Аспект

сталого розвитку цих методів також підкреслює їхню здатність зменшувати вплив постбіотичного виробництва на навколишнє середовище, одночасно забезпечуючи високоякісну продукцію без залишків. Незважаючи на ці переваги, подальші порівняльні дослідження є необхідними для оцінки відмінностей у типі та ступені забруднення між різними нетермічними методами та для закріплення їхнього статусу як екологічно чистих альтернатив.

Ще одним аспектом, який слід враховувати при забезпеченні якості постбіотиків, є довговічність та стабільність при зберіганні постбіотиків, вироблених нетермічними методами. Вкрай важливо, щоб постбіотики могли зберігати та забезпечувати суттєву комерційну та наукову користь навіть за складних умов зберігання. Відомо, що постбіотики демонструють надзвичайну стійкість до впливу навколишнього середовища, таких як коливання температури, вологість та вплив світла, що різко контрастує з крихкістю живих пробіотичних формуляцій. Ця підвищена стабільність розширює логістичну можливість інтеграції постбіотиків у різні харчові системи. Однак необхідні більш масштабні дослідження, щоб кількісно визначити точне покращення терміну придатності, що забезпечується різними нетермічними методами, та створити прогностичні моделі, які корелюють конкретні умови виробництва з довгостроковою стабільністю та ефективністю продукту.

Тривалий термін придатності нетермічно оброблених постбіотиків безпосередньо сприяє їхній економічній та практичній придатності для інтеграції в широкий спектр харчових форматів. Незалежно від того, чи включені вони у вигляді сухих порошків, рідких концентратів чи активних компонентів упаковки, ці продукти демонструють мінімальну деградацію за типових умов розповсюдження та зберігання. Ця практична перевага позиціонує постбіотики як кращу альтернативу продуктам на основі живих культур, які часто стикаються з логістичними проблемами через свою чутливість до зовнішніх умов. Тим не менш, необхідні додаткові дослідження для оцінки сумісності постбіотиків зі складними харчовими матрицями, щоб забезпечити їхню функціональну цілісність під час застосування в промислових масштабах.

Здатність нетермічних методів обробки зберігати біоактивні властивості дозволяє розробляти постбіотики зі стабільною ефективністю та передбачуваною користю для здоров'я, сприяючи довірі споживачів та підтверджуючи заяви про користь для здоров'я. Інактивуючи ферментативні та метаболічні процеси розщеплення, нетермічні технології гарантують, що біоактивні сполуки, такі як бактеріоцини, епітеліальні кислоти та органічні кислоти, залишаються неушкодженими. Однак залишається

критично важливим дослідити, якою мірою зберігається структурна цілісність цих молекул за різних умов обробки, та оптимізувати методи виробництва для максимальної функціональності.

Протоколи контролю якості в постбіотичному виробництві повинні забезпечувати цілісність та функціональність чутливих біоактивних сполук, які часто схильні до денатурації під час термічної обробки. Нетермічні технології, такі як холодна плазма та ультразвук, особливо ефективні для збереження структурних та функціональних властивостей цих молекул, що робить їх ідеальними для постбіотичного виробництва. Аналітичні методи для регулярного кількісного визначення концентрації та біоактивності функціональних компонентів мають вирішальне значення для підтвердження ефективності та забезпечення відповідності специфікаціям продукту. Це ще більше підкреслює необхідність стандартизованих у галузі методів для перевірки збереження антимікробних та антиоксидантних властивостей у різноманітних харчових матрицях після обробки.

Безперервна оцінка є життєво важливою для забезпечення стабільності біоактивних профілів у всіх виробничих партіях та масштабованих обсягах, від лабораторних до промислових. Ця узгодженість підтверджує регуляторні та маркетингові заяви щодо безпеки та ефективності постбіотиків. Вкрай важливо розробити надійні системи, які забезпечують відтворюваність від партії до партії, зберігаючи при цьому функціональну цілісність біоактивних сполук. Однак, необхідні додаткові дослідження для вивчення мінливості, що вноситься складом субстрату, вибором штаму мікробів та параметрами нетермічної обробки.

Крім того, регуляторне визначення та належне маркування постбіотиків відіграють вирішальну роль у забезпеченні можливості отримання дозволу на продаж та зміцненні довіри споживачів. Дотримання таких структур, як ті, що встановлені ISAPP, гарантує, що постбіотики точно ідентифікуються як неживі мікроорганізми або їх компоненти з доведеною користю для здоров'я. Прозорі практики маркування, які розкривають методи виробництва, джерела мікробів та підтвержені заяви про користь для здоров'я, є важливими для сприяння регуляторним переглядам та зміцнення довіри споживачів. Однак досягнення узгодженості в регуляторних визначеннях на різних ринках залишається постійною проблемою, яку необхідно вирішити для сприяння глобальному впровадженню постбіотиків як функціональних харчових інгредієнтів. На сьогоднішній день регуляторна база для постбіотиків все ще формується та варіюється в різних куточках світу, тоді як кілька нетермічних процесів починають впроваджуватися компаніями, а інші залишаються переважно на стадії досліджень та розробок. Регуляторний ландшафт

для постбіотиків наразі змінюється, що відображає відносно недавню появу цієї категорії в секторах функціональних харчових продуктів та фармацевтики. На відміну від пробіотиків або пребіотиків, постбіотики не мають універсально встановлених та специфічних регуляторних рамок, що створює як складність, так і гнучкість для компаній, які прагнуть вивести продукцію на ринок. Наразі регуляторний нагляд застосовується відповідно до класифікації продукту – чи то як харчовий інгредієнт, дієтична добавка, чи як фармацевтичний засіб. Такі органи, як FDA у Сполучених Штатах та Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) у Європі, вимагають комплексної оцінки безпеки, ідентичності, чистоти та передбачуваної користі для здоров'я, значною мірою спираючись на загальні рекомендації, встановлені для біоактивних сполук та нових харчових інгредієнтів. Виробники повинні дотримуватися належної виробничої практики (GMP), забезпечувати узгодженість від партії до партії, контролювати забруднювачі та проводити оцінки ризиків, які демонструють безпеку для споживання людиною. Відсутність спеціальної регуляторної бази для постбіотиків створює проблеми для стандартизації, але також заохочує ретельну наукову характеристику та перевірку безпеки, що має вирішальне значення для прийняття регуляторними органами та довіри споживачів у всьому світі. Крім того, зусилля з гармонізації та глобальні регуляторні діалоги посилюються для розробки чітких визначень та критеріїв прийнятності постбіотиків, що сприятиме процесу їхнього затвердження регуляторними органами та розширенню ринку в найближчі роки.

Дотримання регуляторних визначень є особливо важливим для експорту та міжнародної торгівлі постбіотиками. Різниця у визначеннях або недостатня документація можуть суттєво обмежити доступ до світових ринків. Встановлення гармонізованих глобальних визначень та регуляторних практик залишається незадоволеною потребою в цій галузі, що потенційно перешкоджає масштабованості виробництва постбіотиків.

Хоча у нетермічному постбіотичному виробництві досягнуто значного прогресу, все ще існують прогалини в гармонізованих стандартах, механістичному розумінні та перевірці безпеки. Подальші зусилля повинні бути зосереджені на створенні універсально застосовних стандартних операційних процедур та валідованих аналітичних методів, щоб забезпечити перехресне дослідження та міжгалузеву порівнянність. Також необхідні механістичні дослідження шляхів дії окремих компонентів, таких як специфічні фрагменти клітинної стінки або вторинні метаболіти. З'ясування цих шляхів не тільки оптимізує виробничі процеси, але й покращить терапевтичний індекс отриманих постбіотичних продуктів.

Оцінки безпеки повинні проводитися в кожному окремому випадку, особливо для нових мікробних штамів та нетрадиційних субстратів, оскільки можуть виникнути непередбачені алергенні або біоактивні реакції. Для створення комплексного профілю безпеки постбіотиків необхідні подальші доклінічні та клінічні випробування. Це включає дослідження мінімальних ефективних доз, тривалості дії та потенційної взаємодії з іншими дієтичними або фармацевтичними сполуками, щоб забезпечити наукове обґрунтування заяв про користь для здоров'я.

Зрештою, у терапевтичному контексті необхідні подальші дослідження для встановлення рекомендацій на основі доказів щодо інтеграції постбіотиків у профілактичні та терапевтичні програми. Визначення чітких рекомендацій щодо їх ефективного використання дозволить розробити цільові постбіотичні продукти зі специфічними функціями для здоров'я. Ці зусилля не лише сприятимуть комерціалізації постбіотиків, але й сприятимуть їхній інтеграції в клінічні та функціональні харчові продукти.

Упаковка харчових продуктів.

Було проведено кілька наукових досліджень щодо використання постбіотичних компонентів у пакувальних матеріалах, що має ряд переваг. Розробили наноматеріал для пакування м'яса, включивши постбіотики *Lb. plantarum* до бактеріальної наноцелюлози для вивчення антимікробних властивостей. Подібну бактеріальну наноцелюлозну антимікробну мембрану було виготовлено проти харчових патогенів для харчового застосування.

Незважаючи на численні переваги, постбіотичні комерційні продукти все ще стикаються з проблемами, включаючи обмежене визнання регуляторними органами та низьку обізнаність споживачів. Хоча пробіотики широко відомі та прийняті, концепція постбіотиків залишається відносно новою, що вимагає від компаній інвестувати в чітку комунікацію та навчання. Крім того, хоча ранні клінічні результати є багатообіцяючими, необхідні додаткові випробування на людях, щоб підтвердити конкретні переваги різних постбіотичних штамів та сполук. Тим не менш, галузь швидко рухається до задоволення цих потреб. Великі компанії з виробництва харчових продуктів та інгредієнтів, інвестують у дослідження та розробки, схвалення регуляторних органів та глобальні партнерства для виведення на ринок продуктів, покращених постбіотиками. Ці зусилля доповнюються зростаючим попитом споживачів на продукти, що сприяють здоров'ю, особливо ті, що забезпечують підтримку імунітету, баланс травлення та сумісні з напруженим способом життя. Постбіотики унікально підходять для задоволення цих потреб завдяки своєму профілю

безпеки, гнучкості рецептури та надійній стабільності зберігання. Оскільки споживачі продовжують надавати пріоритет здоров'ю, прозорості та функціональності у своєму виборі продуктів харчування, очікується, що постбіотики відіграватимуть центральну роль у наступному поколінні інновацій у сфері функціональних харчових продуктів. Зі зростанням застосування постбіотичних продуктів від молочних продуктів та напоїв до снєків, хлібобулочних виробів, добавок і навіть кормів для домашніх тварин, комерційні постбіотичні продукти мають всі можливості для трансформації ландшафту харчових продуктів, орієнтованих на здоров'я, у всьому світі.

7. Нормативно-правова база для постбіотиків

Регуляторний ландшафт для постбіотиків залишається фрагментованим та недостатньо розвиненим у світі. На відміну від усталених категорій, таких як пробіотики, постбіотики наразі не мають спеціальних регуляторних рамок, що створює як виклики, так і можливості для виробників, регуляторів та споживачів. Урядові органи в усьому світі вивчають питання регулювання постбіотиків, але до сьогодні не існує офіційних опублікованих рекомендацій чи правил спеціально для постбіотиків як харчових інгредієнтів або дієтичних добавок. Натомість, постбіотичні продукти регулюються чинними законами для харчових продуктів, дієтичних добавок або фармацевтичних препаратів, залежно від їхнього цільового використання. Регуляторний підхід значно відрізняється в різних юрисдикціях. Наприклад, у Японії харчові продукти, що містять постбіотики, дозволені відповідно до чинних норм харчових продуктів із функціональним призначенням; однак у Таїланді доступні різні добавки, що містять постбіотики та отримали схвалення від тайського FDA. Аналогічно, Сполучені Штати регулюють постбіотичні продукти відповідно до своїх заявок на новий дієтичний інгредієнт (NDI), а Міністерство охорони здоров'я Канади схвалює використання терміну «постбіотики» у ситуації, коли виробники надають достатні докази. Австралійське управління терапевтичних товарів (TGA) також дозволило включення постбіотичних інгредієнтів до списку лікарських засобів. В Індії, Китаї, Бразилії та Південній Америці не знайдено жодних правил щодо постбіотиків. Аналогічно, в Європі не існує спеціальної системи регулювання постбіотиків, і вони повинні відповідати рекомендаціям, пов'язаним з харчовими добавками, залежно від їх передбачуваного використання.

У більшості країн регуляторні органи вимагають, щоб виробництво постбіотиків відповідало GMP, забезпечуючи простежуваність

операцій, відповідність об'єктів специфікаціям та відповідність матеріалів. Комплексні системи повинні гарантувати критерії безпеки, якості, ідентичності, ефективності та чистоти для виробленої продукції. Основні компоненти безпеки включають впровадження систем аналізу небезпек для моніторингу хімічних, алергенних, фізичних та біологічних забруднювачів протягом усього виробництва. Критичні контрольні точки повинні бути визначені та контролюватися, а коригувальні заходи вживатися за потреби. Міркування безпеки постбіотиків повинні відповідати встановленим стандартам для живих мікроорганізмів, оскільки постбіотики походять від батьківських штамів мікробів. Це включає оцінку генів стійкості до антимікробних препаратів, факторів вірулентності та здатності до вироблення токсинів. Відсутність консенсусу щодо визначень постбіотиків ще більше посилює регуляторну невизначеність. Розбіжна термінологія та відсутність узгоджених критеріїв перешкоджають розробці конкретних регуляторних баз. Регуляторні органи стикаються з труднощами в категоризації продуктів, які суттєво відрізняються від споріднених категорій, таких як пробіотики. Крім того, на відміну від пробіотиків, постбіотики створюють унікальні труднощі для характеристики фармацевтичного класу, оскільки постбіотичні формуляції можуть містити різні компоненти (клітини, клітинні фрагменти та метаболіти), що вимагає відповідних аналітичних методів для ідентифікації та кількісного визначення. Крім того, через можливе систематичне поглинання постбіотичних сполук, необхідний ретельний розгляд щодо їхніх можливих імуногенних реакцій. Регуляторна база щодо постбіотиків повинна враховувати, що на етикетках будь-яких продуктів має бути зазначено назву мікроорганізму (рід, вид та штам), з якого отримано інгредієнт, тип постбіотика, кількість у відповідних одиницях, гарантовану наприкінці терміну придатності, розмір порції, умови зберігання, термін придатності та контактну інформацію компанії. Нормативно-правова база розвивається в напрямку визнання постбіотиків препаратами неживих мікроорганізмів, здатних надавати користь здоров'ю. Однак міжнародний консенсус має вирішальне значення для встановлення узгоджених критеріїв оцінки, вимог безпеки та інновацій, які сприятимуть ширшому доступу до світового ринку. Регуляторний ландшафт постбіотиків являє собою нову галузь, що вимагає скоординованих зусиль між промисловістю, академічними колами та регуляторними органами. Зі зростанням наукового розуміння постбіотиків, регуляторні бази повинні розвиватися, щоб забезпечити чіткі шляхи для безпечних та ефективних продуктів до споживачів.

ВИСНОВКИ

У цьому огляді критично оцінюється як традиційні, так і новітні нетермічні технології постбіотичного виробництва, з акцентом на їхній ефективності, масштабованості та промисловій застосовності. Він оцінює потенціал нетермічних методів для вирішення проблем у розробці постбіотиків, таких як підтримка біоактивності, забезпечення безпеки та збереження сенсорних якостей, а також дотримання нормативних стандартів та очікувань споживачів. За допомогою систематичного огляду літератури це дослідження досліджує, чи можуть нетермічні технології революціонізувати постбіотичне виробництво та покращити їх інтеграцію у функціональні харчові продукти. Результати дослідження показують, що нетермічні технології, такі як високоєфективна плазмова обробка, полімерна плазма, ультразвук та холодна плазма, пропонують значні переваги порівняно з традиційними термічними процесами. Ці методи зберігають структурну цілісність та посилюють біоактивні властивості постбіотичних компонентів, які є важливими для користі для здоров'я. Дані свідчать про те, що постбіотики, вироблені нетермічними методами, демонструють чудові метаболічні та імуномодуючі ефекти, підтримують функцію кишкового бар'єра та є перспективними у зниженні ризику хронічних захворювань, долаючи при цьому обмеження традиційних термічних методів. Нетермічні методи виробництва також відповідають сучасним вимогам до виробництва функціональних харчових продуктів, підвищуючи мікробну безпеку, стабільність та консистенцію, необхідні для клінічного застосування. Ці методи оптимізують ефективність обробки, зберігаючи при цьому характеристики, що сприяють здоров'ю, та відповідають галузевим тенденціям до продуктів з чистим етикетуванням, пропонуючи як екологічні, так і економічні переваги. Інтеграція нетермічної обробки з інноваційними стратегіями ферментації може сприяти створенню індивідуальних постбіотичних профілів для конкретних потреб у сфері охорони здоров'я та уподобань споживачів. Цей огляд також підкреслює міждисциплінарний характер постбіотичних досліджень, що охоплюють мікробіологію, харчову інженерію, біотехнологію та громадське здоров'я. Порівнюючи традиційні та нетермічні технології, він демонструє, як інноваційні методи обробки стимулюють розробку функціональних харчових інгредієнтів наступного покоління. Результати підтверджують припущення, що нетермічні технології являють собою фундаментальний зсув у виробництві та використанні постбіотиків, що ще більше посилюється їхньою здатністю відповідати нормативним стандартам. Незважаючи на ці досягнення, кілька обмежень заслуговують на розгляд. Хоча нетермічні методи пропонують технічні переваги, масштабна

валідація їхнього довгострокового впливу на здоров'я залишається недостатньою. Нормативні бази все ще розвиваються, а регіональні відмінності створюють труднощі для гармонізації. Оптимізація параметрів процесу вимагає подальших досліджень для балансування ефективності, безпеки та економічної ефективності під час масштабування, ретельно розглядаючи усунення невідповідностей у дизайні досліджень та стандартах звітності шляхом розробки стандартизованих протоколів для виробництва та забезпечення якості. Інновації необхідні для вдосконалення нетермічних технологій за допомогою передових процесів ферментації, що дозволить точно розробляти постбіотики для цільового застосування. Загалом, нетермічне постбіотичне виробництво стикається з науковими та практичними перешкодами, але надає багатообіцяючі можливості для подальших інновацій та розвитку.

АНОТАЦІЯ

Постбіотики, що визначаються як неживі мікробні клітини та їхні компоненти, що надають користь здоров'ю хазяїна, являють собою значний прогрес у функціональних продуктах харчування та дієтичних добавках. Порівняно з пробіотиками та пребіотиками, постбіотики пропонують переваги у стабільності продукту, безпеці та гнучкості рецептури. У загальній практиці, знищення нагріванням є широко використовуваним методом виробництва постбіотиків. Однак, знищені нагріванням постбіотики мають мало недоліків, таких як присмак горіння, денатурація імуномодуючих молекул та втрата функціональних метаболітів. У цій оглядовій статті розглядається, як новітні нетермічні технології працюють порівняно з традиційними методами виробництва постбіотиків, підкреслюючи їх придатність для впровадження в промислових масштабах та переваги, які вони надають порівняно з традиційною термічною обробкою. На основі літератури в огляді розглядаються ключові нетермічні технології, включаючи обробку високим тиском, імпульсні електричні поля, ультразвук, холодну плазму, надкритичний CO₂ (Sc-CO₂) та опромінення. Їхні принципи та промислова застосовність досліджуються на предмет впливу на біоактивність, стабільність та функціональну цінність постбіотиків, з оцінками, що підкреслюють їхні сильні сторони, обмеження та потенціал оптимізації. Нещодавні досягнення в постбіотичних дослідженнях та нетермічній обробці вказують на значні інноваційні можливості. Однак залишаються проблеми в масштабуванні методів, уточненні параметрів та усуненні регуляторних та економічних обмежень. Промислова інтеграція нетермічних технологій вимагає додаткових доказів

для підтвердження доцільності, економічної ефективності та дотримання вимог безпеки, виявлення ключових прогалин в оптимізації протоколів інактивації, взаємозв'язків між впливом та реакцією, а також клінічного впливу. Огляд ознайомить з основами постбіотики, порівнянням методів виробництва, конкретними нетермічними технологіями та практичними міркуваннями впровадження, тим самим забезпечуючи основу для майбутніх досліджень, спрямованих на оптимізацію використання цих технологій у клінічних та промислових умовах.

Постбіотики нещодавно стали одним із найновіших функціональних харчових продуктів завдяки постійно мінливому ландшафту втручань у здоров'я, спрямованих на мікробіом. Постбіотики, разом з іншими функціональними біотиками, а саме пробіотиками, пребіотиками та синбіотиками, надають свою користь для здоров'я головним чином через модуляцію кишкової мікробіоти. Постбіотики вважаються більш перспективними, ніж пробіотики, оскільки вони викликають подібні ефекти, незважаючи на інактивацію, таким чином усуваючи занепокоєння щодо активності та стабільності штамів, які виникали щодо пробіотиків. Цей огляд намагається дати критичне розуміння постбіотиків, спочатку переглядаючи їх визначення, щоб створити спрощену основу для подальшого обговорення взаємодії між постбіотиками, харчуванням, мікробіотою та здоров'ям. Аналогічно, цей огляд встановлює зв'язок між постбіотиками та пробіотиками, підкреслюючи, що постбіотики також можуть бути отримані з інших мікробів, окрім лактобактерій, таких як дріжджі та гриби. Крім того, представлено огляд екстракції та виробництва постбіотиків, а також біохімію коротколанцюгових жирних кислот, ферментів, пептидів, полісахаридів, пептидогліканів та тейхоевих кислот, які всі були ідентифіковані як компоненти постбіотиків. Нарешті, оцінено їх біоактивність (антиоксидантну, протизапальну, протидіабетичну, імуномодулюючу, антигіпертензивну, антимікробну) та патентний ландшафт постбіотиків з метою сприяння їх інноваційному застосуванню в харчовій, ветеринарній, фармацевтичній та косметичній промисловості. Визначивши основні прогалини та напрямки для вдосконалення, вважається, що цей критичний огляд слугуватиме орієнтиром у зростаючих зусиллях щодо розвитку промислового потенціалу постбіотиків. Таким чином, оскільки було встановлено, що окрім життєздатності пробіотичних мікробів можна отримати різні переваги для здоров'я, інші функціональні класи біотик, включаючи постбіотики, пребіотики та синбіотики, тепер привернули увагу вчених, споживачів, промисловості та інших зацікавлених сторін.

Література

1. Aggarwal, Sunita, et al. "Postbiotics: From emerging concept to application". *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6 (2022): 887642.
2. Amobonye, Ayodeji, et al. "Postbiotics: an insightful review of the latest category in functional biotics". *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 41.8 (2025): 293.
3. Ashrafudoulla, Md, et al. "Challenges and opportunities of non-conventional technologies concerning food safety". *World's Poultry Science Journal* 79.1 (2023): 3–26.
4. Asefa, Zerihun, et al. "Postbiotics and their biotherapeutic potential for chronic disease and their feature perspective: a review". *Frontiers in Microbiomes* 4 (2025): 1489339.
5. Benkowski, Andrzej A., et al. "Postbiotics: considerations for safety and quality management". *Poster presented at International Association of Food Protection* (2023).
6. Almahbashi, Amtalsaboar, and Evrim Gunes Altuntas. "From preparation to Bioactivity: A comparative study on preparation methods and characterization of postbiotics". *Food Science & Nutrition* 13.5 (2025): e70294.
7. Thirumdas, Rohit, and Priti Mudgil. "Emerging nonthermal Technologies for the Production of postbiotics". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24.6 (2025): e70335.
8. Hijová, Emília. "Postbiotics as metabolites and their biotherapeutic potential". *International journal of molecular sciences* 25.10 (2024): 5441.
9. Fang, Fang, et al. "Effect of potential postbiotics derived from food-isolated *Lactobacillus parabuchneri* on different enterotypes of human gut microbiome". *Lwt* 182 (2023): 114782.
10. Maiuolo, Jessica, et al. "The postbiotic properties of butyrate in the modulation of the gut microbiota: the potential of its combination with polyphenols and dietary fibers". *International Journal of Molecular Sciences* 25.13 (2024): 6971.
11. Mousavi Ghahfarrokhi, Seyed Sadeq, et al. "Management of cardiovascular diseases by short-chain fatty acid postbiotics". *Current Nutrition Reports* 13.2 (2024): 294–313.
12. Prajapati, Nidhi, et al. "Postbiotic production: harnessing the power of microbial metabolites for health applications". *Frontiers in Microbiology* 14 (2023): 1306192.
13. Salva, Susana, et al. "*Lactobacillus rhamnosus* postbiotic-induced immunomodulation as safer alternative to the use of live bacteria". *Cytokine* 146 (2021): 155631.

14. Sornsenee, Phoomjai, et al. "Lyophilized cell-free supernatants of *Limosilactobacillus fermentum* T0701 exhibited antibacterial activity against *Helicobacter pylori*". *Scientific Reports* 14.1 (2024): 13632.
15. Spaggiari, Luca, et al. "Lactobacillus acidophilus, *L. plantarum*, *L. rhamnosus*, and *L. reuteri* cell-free supernatants inhibit *Candida parapsilosis* pathogenic potential upon infection of vaginal epithelial cells monolayer and in a transwell coculture system in vitro". *Microbiology spectrum* 10.3 (2022): e02696-21.
16. Yordshahi, Aidin Shafipour, et al. "Design and preparation of antimicrobial meat wrapping nanopaper with bacterial cellulose and postbiotics of lactic acid bacteria". *International journal of food microbiology* 321 (2020): 108561.
17. Dobрева, Lili, et al. "Candidate-probiotic lactobacilli and their postbiotics as health-benefit promoters". *Microorganisms* 12.9 (2024): 1910.
18. O'Sullivan, Aaron, Kevin M. Ryan, and Luis Padrela. "Production of biopharmaceutical dried-powders using supercritical CO₂ technology". *The Journal of Supercritical Fluids* 187 (2022): 105645.
19. Pimentel, Tatiana Colombo, et al. "Postbiotics: An overview of concepts, inactivation technologies, health effects, and driver trends". *Trends in Food Science & Technology* 138 (2023): 199–214.
20. Thorakkattu, Priyamvada, et al. "Postbiotics: current trends in food and pharmaceutical industry". *Foods* 11.19 (2022): 3094.
21. Zhong, Yujie, et al. "Recent advances and potentiality of postbiotics in the food industry: Composition, inactivation methods, current applications in metabolic syndrome, and future trends". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 64.17 (2024): 5768–5792.
22. Salminen, Seppo, et al. "The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics". *Nature reviews Gastroenterology & hepatology* 18.9 (2021): 649–667.
23. Sun, Zhe, et al. "Effect of thermal inactivation on antioxidant, anti-inflammatory activities and chemical profile of postbiotics". *Foods* 12.19 (2023): 3579.
24. Dharumadurai, Dhanasekaran. *Postbiotics*. Springer, 2023.
25. Zhou, Zhongkun, and Peng Chen. "Short-chain fatty acids as postbiotics". *Postbiotics*. Academic Press, 2025. 207–227.
26. Jadhav, Harsh Bhaskar, Uday S. Annapure, and Rajendra R. Deshmukh. "Non-thermal technologies for food processing". *Frontiers in Nutrition* 8 (2021): 657090.
27. Żółkiewicz, Jakub, et al. "Postbiotics – a step beyond pre-and probiotics". *Nutrients* 12.8 (2020): 2189.

28. Behzadnia, Asma, et al. "Lactobacillus plantarum-derived biosurfactant: Ultrasound-induced production and characterization". *Ultrasonics Sonochemistry* 65 (2020): 105037.
29. Cassani, Lucía, Esteban Gerbino, and Andrea Gómez-Zavaglia. "Technology aspects of probiotic production and live biotherapeutics". *Probiotics for human nutrition in health and disease*. Academic Press, 2022. 143–170.
30. Huang, Hsiao-Wen, et al. "Current status and future trends of high-pressure processing in food industry". *Food control* 72 (2017): 1–8.
31. Salar, Francisco J., et al. "Ifs and buts of non-thermal processing technologies for plant-based drinks' bioactive compounds". *Food Science and Technology International* 29.5 (2023): 445–479.
32. Silva, Eric Keven, M. Angela A. Meireles, and Marleny DA Saldaña. "Supercritical carbon dioxide technology: A promising technique for the non-thermal processing of freshly fruit and vegetable juices". *Trends in Food Science & Technology* 97 (2020): 381–390.
33. White, Shecoya, et al. "A review of non-thermal interventions in food processing technologies". *Journal of Food Protection* 88.6 (2025): 100508.
34. Yan, Bing, et al. "From laboratory to industry: The evolution and impact of pulsed electric field technology in food processing". *Food Reviews International* 41.2 (2025): 373–398.
35. Thorakkattu, Priyamvada, et al. "Postbiotics: current trends in food and pharmaceutical industry". *Foods* 11.19 (2022): 3094.

Information about the authors:

Nehoda Tetiana Stepanivna,

Candidate of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor,
Bogomolets National Medical University
13, T. Shevchenko boulevard, Kyiv, Ukraine

Polova Zhanna Mykolaivna,

Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor,
Bogomolets National Medical University
13, Taras Shevchenko boulevard. Kyiv, Ukraine