

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

ННЦ «Інститут біології та медицини»
Кафедра біохімії

Завідувач кафедри проф. Олексій САВЧУК

Протокол № ____ засідання кафедри

від “ ____ ” _____ 20__ р.

**СУЧАСНІ БІОТЕХНОЛОГІЧНІ СТРАТЕГІЇ У ПЕРЕРОБЦІ ТА
ВАЛОРИЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Випускна кваліфікаційна робота
студентки денної форми навчання
за спеціальністю

Біотехнології та біоінженерія
Чивантух Аліни Анатоліївни

Науковий керівник від кафедри
д-р біол. наук, проф. Савчук О.М.

Робота виконана на базі ННЦ «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка під керівництвом завідувача кафедри біохімії, д-ра біол. наук, проф. Савчука Олексія Миколайовича

Оцінка захисту роботи

Київ – 2026 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи біотехнологічної переробки та валоризації.....	6
1.1. Основні поняття переробки та валоризації у біотехнології.....	6
1.2. Сучасні підходи до управління органічними відходами.....	8
1.3. Вплив біотехнологій на формування циркулярної економіки: перетворення відходів на продукти з доданою вартістю.....	13
1.3.1. Біопаливо з органічних відходів.....	15
1.3.2. Біополімери та біорозкладні пластмаси.....	16
1.3.3. Відновлення біологічно активних сполук.....	17
1.4. Екологічні та економічні аспекти біотехнологічної переробки.....	18
РОЗДІЛ 2. Аналіз технологічних рішень та ринкових перспектив біотехнологічної переробки.....	24
2.1. Існуючі технології у біотехнологічній переробці.....	24
2.1.1. Ферментативний гідроліз.....	27
2.1.2. Анаеробне зброджування.....	28
2.1.3. Електроферментація.....	29
2.1.4. Фотоферментація.....	31
2.1.5. Темне бродіння.....	32
2.1.6. Інтегрований підхід.....	33
2.2. Аналіз ринку та тенденцій розвитку біотехнологічної переробки.....	35
2.2.1. Аналіз сегментації ринку біотехнологічної переробки.....	35
2.2.2. Динаміка зростання ринку біотехнологічної переробки.....	37
2.2.3. Регіональні особливості валоризації відходів.....	41

2.2.4. Конкурентне середовище ключових гравців ринку біотехнологічної переробки.....	43
РОЗДІЛ 3. Практична оцінка ефективності біотехнологічної валоризації органічних відходів промисловості	45
3.1. Характеристика органічних відходів харчової та біотехнологічної промисловості.....	45
3.2. Розробка узагальненої біотехнологічної стратегії валоризації	47
3.2.1. Обґрунтування вибору сировини для біотехнологічної валоризації	47
3.2.2. Обґрунтування вибору ферментативно-мікробної стратегії валоризації.....	49
3.2.3. Опис узагальненої технологічної схеми виробництва біоактивних добрив	51
3.3. Техніко-економічна оцінка пілотного біотехнологічного процесу.....	53
3.3.1. Сировина та допоміжні матеріали процесу	54
3.3.2. Лабораторне та аналітичне забезпечення процесу.....	57
3.3.3. Технологічне обладнання пілотної лінії	60
3.3.4. Енергетичні витрати	62
3.3.5. Оцінка трудових ресурсів та виходу продукції.....	64
3.4. Практичний прогноз масштабування та впровадження	65
ПІДСУМКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69

ВСТУП

Сучасний світ стикається з безпрецедентними викликами, пов'язаними із вичерпанням природних ресурсів, деградацією довкілля, зростанням обсягів відходів та зміною клімату. Особливо гостро постає проблема утилізації органічних відходів, зокрема харчових, які складають значну частку у загальному обсязі побутових і промислових відходів. У зв'язку з цим все більшого значення набувають новітні біотехнологічні рішення, здатні не лише ефективно переробляти органічні залишки, але й створювати з них цінні продукти з доданою вартістю. Такий підхід не тільки мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище, а є важливою передумовою для переходу від традиційної лінійної економіки до моделі циркулярної економіки [5].

Циркулярна біоекономіка передбачає використання біологічних ресурсів у замкнених технологічних циклах з метою їх максимального використання та повторного залучення у виробничі процеси. Одним із центральних елементів цього підходу є переробка та валоризація відходів – тобто процес перетворення відходів у ресурси, які можуть бути повторно використані для виробництва біопалива, хімічних речовин, біоматеріалів, кормових добавок тощо [35]. Біотехнології, засновані на використанні мікроорганізмів, ферментів та інших біологічних агентів, демонструють значні можливості в цій сфері.

Особливу увагу в наукових і промислових колах сьогодні приділяють переробці органічних відходів, які мають високу біологічну цінність та можуть бути джерелом поживних речовин і енергії. У багатьох країнах світу вже реалізуються проєкти, спрямовані на екологічну утилізацію харчових залишків із застосуванням біотехнологій [19]. Наприклад, виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування, отримання органічних кислот, ферментів, біопластиків тощо. Біопереробка харчових відходів, зокрема, розглядається як стратегічно важливий напрямок, що сприяє досягненню цілей сталого розвитку, зменшенню викидів парникових газів, підвищенню

ефективності використання ресурсів і створенню нових економічних можливостей.

У світовій практиці вже впроваджуються численні пілотні та промислові проекти, що демонструють реальні можливості біотехнологічної валоризації відходів. Проте для масштабного розвитку цього сектору необхідний глибокий аналіз існуючих технологій, виявлення поточних тенденцій та прогнозування подальших напрямків інноваційного зростання [3].

Метою даної роботи було проаналізувати сучасні біотехнологічні стратегії, що існують на ринку та пов'язані з переробкою та валоризацією відходів промисловості (харчова, біотехнологічна, фармацевтична, тощо) для потенційного прогнозування вектору розвитку даного напрямлення біотехнологічних розробок.

Для досягнення мети було поставлено й виконано такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій переробки та валоризації відходів промисловості (харчова, біотехнологічна, фармацевтична, тощо) із застосуванням сучасних біотехнологічних стратегій.
2. Виявити та порівняти основні тенденції та вектори розвитку цього біотехнологічного напрямку у світовому просторі.
3. Спрогнозувати та обґрунтувати найбільш привабливі технологічні рішення в цьому секторі біотехнології для подальшого розширення даного ринку та створення іноваційних рішень в даній галузі.

Наукова новизна роботи полягає у комплексній систематизації сучасних біотехнологічних стратегій переробки промислових відходів з урахуванням їх комерційної привабливості, екологічної доцільності та потенціалу інтеграції в моделі циркулярної біоекономіки, а також у формуванні прогнозу найбільш перспективних напрямів розвитку даного сектору біотехнології.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ТА ВАЛОРИЗАЦІЇ

1.1. Основні поняття переробки та валоризації у біотехнології

Зростаючий попит на паливо та хімічні речовини, викликаний такими факторами, як перенаселення, загроза глобального потепління та дефіцит викопних ресурсів, навантажує нашу систему ресурсів і вимагає розробки стійких та інноваційних стратегій для хімічної промисловості. Це зумовлює необхідність пошуку стійких та інноваційних стратегій у хімічній промисловості, зокрема шляхом підвищення ефективності існуючих процесів або залучення альтернативної сировини. У цьому контексті органічні відходи, які утворюються в ланцюгу постачання продуктів, набувають великого значення. Їхній склад містить цінні біоактивні речовини та функціональні компоненти, що можуть використовуватись як сировина для отримання біопалива, хімікатів, добрив та функціональних харчових інгредієнтів. Процес, який дозволяє здійснити перетворення відходів на корисні продукти з доданою вартістю, має назву валоризації. У біотехнології валоризація визначається як повторне використання, переробка або трансформація аграрних, харчових, деревних, текстильних та побутових відходів у корисні продукти – хімічні речовини, біопаливо, добрива, біоенергетику, біополімери тощо [9]. Основною сировиною для таких процесів слугують лігноцелюлозні матеріали, що містять геміцелюлозу, целюлозу, лігнін, білки, цукри, смоли, пігменти та інші корисні сполуки. Лігноцелюлозна біомаса є одним із найбільш поширених, але недостатньо використовуваних джерел органічної сировини, що має величезний потенціал для біотехнологічної переробки. Валоризація відходів тісно пов'язана з принципами циркулярної економіки, яка спрямована на мінімізацію утворення відходів і максимально ефективно

використання ресурсів. Вона є ефективним інструментом, сприяючи захисту довкілля, зменшенню викидів та стимулюванню економічного зростання. У країнах ЄС, США та Канаді активно впроваджуються національні програми з розвитку біоекономіки, що базуються на концепції біотехнологічної валоризації як механізмі досягнення екологічної та економічної стійкості. Окремо варто підкреслити роль агрохарчових відходів, які становлять значну частку від загального обсягу біомасових залишків. Сільське господарство, будучи одним із найбільш ресурсомістких секторів, щороку генерує сотні мільйонів тонн органічних відходів, значна частина яких залишається невикористаною. Ефективне управління такими залишками є ключовим фактором у боротьбі з екологічними викликами, зменшенні втрат харчових ресурсів та підвищенні продовольчої безпеки [45].

Основними рушійними силами валоризації є зростаючий інтерес до сталих практик, екологічна свідомість споживачів, посилення регуляторного тиску з боку держав та активне впровадження інновацій у сфері біотехнологій. Сучасні методи попередньої обробки відходів – фізичні, хімічні, біологічні та комбіновані – дозволяють ефективно виділяти цінні речовини з побічних продуктів [9]. Це не лише знижує навантаження на довкілля, а й створює додаткову економічну вигоду для підприємств, які впроваджують подібні практики. Особливо перспективною є концепція біопереробних заводів (біографінерій), що працюють за аналогією з нафтопереробними заводами, але використовують відновлювану біомасу як сировину. Такі підприємства можуть одночасно виробляти паливо, хімікати, енергію та харчові добавки. Біографінерії забезпечують комплексне використання всіх компонентів сировини, зменшують кількість відходів та дозволяють реалізувати принципи замкненого циклу у виробництві [8].

З метою зменшення забруднення навколишнього середовища, ефективним екологічним підходом може бути використання таких побічних продуктів для створення збагачених функціональних продуктів харчування, відновлення біологічно активних речовин, таких як білки, каротиноїди та

феноли, а також інкапсуляція біологічно активних матеріалів. Більше того, різноманітні побічні продукти, які недостатньо використовуються, є величезним джерелом корисних молекул, включаючи вітаміни, мінерали та фітохімічні речовини, що мають позитивний вплив на здоров'я та техніко-функціональні властивості. Підхід циркулярної економіки є важливим інструментом, забезпечуючи захист навколишнього середовища та стимулюючи економічне зростання шляхом зменшення впливу виробництва та переробки харчових продуктів на довкілля [6].

1.2. Сучасні підходи до управління органічними відходами

Величезний обсяг утворення органічних відходів призводить до проблем, пов'язаних з їх управлінням та утилізацією. Крім того, суворіші правила утилізації та потреба у відновлюваних джерелах енергії та біопаливі спонукають дослідників і виробників до стійкої деградації відходів, щоб зменшити витрати та задовольнити вимоги людей. Органічні відходи зазвичай компостують або спалюють; однак ці звичайні методи не є адекватними, оскільки ці процеси створюють токсичні гази, неприємний запах, мають повільну кінетику та потребують високої енергії для реакцій. Багато дослідників зосереджуються на сучасних технологіях деградації та розкладання відходів. Біотехнологічна переробка відходів не тільки обходить проблему їх утилізації, але й сприяє виробництву продукції з доданою вартістю найбільш економічним способом [24]. Органічні відходи, багаті на поживні речовини, можуть служити цінною сировиною для процесів ферментативного та мікробного розкладання. Сучасні дослідження зосереджуються на максимально ефективному використанні цих поживних компонентів для виробництва біопалива, фармацевтичних засобів, ферментів, органічних кислот, добрив та інших корисних продуктів. Цей підхід прокладає шляхи для розвитку економіки, заснованої на зелених технологіях, і

ефективної стратегії підвищення цінності для виробництва біохімічних речовин і біоматеріалів. Зокрема, для нашого суспільства важливо впроваджувати екологічно безпечні та інноваційні методи переробки органічних відходів, оскільки це відіграє ключову роль у досягненні цілей сталого розвитку [21].

Організацію обігу відходів можна визначити як різні стратегії усунення відходів із навколишнього середовища, які включають видалення або деградацію, обробку, повторне використання/переробку або контроль утворення відходів. Стратегії перетворення органічних відходів на товари з доданою вартістю кладуть кінець проблемі, спричиненій харчовими відходами в навколишньому середовищі, і забезпечують економічно життєздатні шляхи виробництва [32]. Основні ознаки, що дозволяють використовувати органічні відходи для отримання високоякісної продукції:

1. Низька вартість обробки.
 - Орієнтація на зменшення витрат, пов'язаних із виробництвом або переробкою сировини/продукту.
 - Важливо для підвищення конкурентоспроможності та доступності кінцевого продукту.
2. Конкурентоспроможність ресурсів.
 - Врахування того, наскільки легко і вигідно отримувати та використовувати необхідні ресурси.
 - Здатність ефективно конкурувати з іншими технологіями або методами за доступ до цих ресурсів.
3. Проблематика вуглецевого сліду.
 - Аналіз викидів парникових газів, пов'язаних із виробничим процесом чи життєвим циклом продукту.
 - Важливий фактор для оцінки екологічності та впливу на зміну клімату.
4. Аспекти сталого розвитку.
 - Забезпечення збалансованості економічних, екологічних та соціальних чинників упродовж усього життєвого циклу.

- Передбачає довгострокове збереження ресурсів і мінімізацію негативного впливу на довкілля.
5. Ефективність процесу.
- Рівень оптимізації технологічних операцій: менше часу, енергії та ресурсів на одиницю продукції.
 - Показник, який безпосередньо впливає на загальну продуктивність та якість кінцевого результату.
6. Доступність відновлюваних джерел.
- Можливість залучення відновлюваних ресурсів чи енергії у процесі виробництва.
 - Важливо для зниження залежності від викопного палива і зменшення негативного впливу на довкілля.
7. Комплексна оцінка повного життєвого циклу.
- Підхід, за якого враховується повний життєвий цикл продукту – від добування сировини до утилізації.
 - Дозволяє всебічно оцінити вплив на довкілля та шукати шляхи для зменшення шкідливих наслідків на кожному етапі.
8. Загальний показник економічної ефективності.
- Співвідношення між витратами та отриманою вигодою (прибутком, економією, користю).
 - Служить ключовим показником для визначення фінансової доцільності впровадження технології або продукту [1].

Органічні відходи утворюються в багатьох типах, включаючи рідкі, тверді та напівтверді, такі як стічні води, жири, відпрацьоване масло, токсичні побутові матеріали та інші. Ці відходи мають потенційно руйнівні наслідки для довкілля та здоров'я людини. Є відходи, що утворюються через використання води у великих кількостях для різних цілей, включаючи прибирання, санітарію, приготування їжі та транспортування. Тверді відходи містять лігнін, целюлозу, амілозу та моносахариди, представляючи собою поживні речовини у забрудненій формі [43]. Зростання життєздатності

екологічно сталих технологій, що базуються на використанні доступніших харчових ресурсів для виробництва біопалива, хімічних речовин та біоматеріалів, обумовлене глобальним попитом, попри підвищення вартості викопного палива, виснаження природних ресурсів і збільшення податкового навантаження на природні матеріали [1].

Протягом останніх років спостерігалось зростання занепокоєння щодо виробництва біопалива з альтернативної сировини з метою збереження ресурсів викопного палива. Переробка лігноцелюлозної біомаси, що вимагає великої кількості відновлюваних харчових відходів для синтезу важливих розчинників, наразі залишається дороговартісним процесом. Водночас останнім часом різко зріс інтерес до використання побутових і промислових харчових відходів як перспективної сировини для отримання цінних продуктів [55]. Крім того, є деякі харчові відходи, які дають невикористану альтернативу поточним промисловим харчовим відходам, які діють як субстрати для синтезу товарів із доданою вартістю для збереження нафтохімічних продуктів. Незважаючи на те, що створення промислово придатних сполук явно надає чудову можливість трансформувати субстрати для харчових відходів, всебічна оцінка автоматизації, що підтримується покращенням економіки обробки, є важливою перед масштабуванням і реалізацією на ринку [5].

Попередні дослідження органічних відходів показують, що щороку майже 85 мільйонів тонн харчових відходів викидається саме з харчових промислових підприємств. Експоненціально зростаюче щорічне зростання населення в усьому світі спричинило високий тиск на їжу та енергію, щоб захопити суспільний попит. Пакування, розповсюдження, зберігання та транспортування не мають користі від підходів до поводження з відходами, які призводять до величезного галасу щодо харчових відходів. Більшість органічних відходів характеризуються різноманітною текстурою, коливаннями рівня рН, а також високими показниками біологічної та хімічної потреби в кисні. Такі відходи сприяють розвитку патогенних мікроорганізмів

під час процесів корозії, що призводить до бактеріального забруднення й створює серйозні екологічні загрози. Перетворення відходів на біоенергію, біопродукти та хімічні сполуки є перспективним науковим напрямом із великим потенціалом для подолання цієї проблеми. У країнах з вищим рівнем доходів бракує відповідних матеріалів, інфраструктури та міцних знань, що розвиваються, тому що країни, що розвиваються, витрачають зайву їжу. Відомі технології, що використовуються на харчових підприємствах, не готові до подолання проблем регулювання відходів; і, отже, необхідно та актуально управляти масовим накопиченням органічних відходів [6].

Враховуючи специфічні фізико-хімічні властивості лігноцелюлози, харчові відходи становлять собою цінний ресурс для реалізації процесів біоконверсії. У численних статтях використовуються різні технології, які перетворюють харчові відходи на корисне яблучне варення та винну їжу. Біохімічні процеси, такі як ферментативна біодеградація, біоокислення та вивільнення глюкози і ксилози з геміцелюлози, дають можливість отримувати паливний етанол шляхом ферментації за допомогою мікроорганізмів. У процесі анаеробного зброджування та піролізу лігнінові молекули здатні утворювати метан і водень. З огляду на обмеженість запасів викопного палива та коливання цін на нафту, харчові відходи розглядаються як перспективне джерело відновлюваних ресурсів та хімічних сполук із високою доданою вартістю. Сучасні технології виробництва масових хімікатів на основі біомаси є втричі ефективнішими з економічної точки зору, ніж її перетворення на біопаливо. Біомаса може бути перероблена на численні екологічно безпечні та економічно вигідні продукти [9, 24].

У сучасних умовах розвитку біотехнологій питання переробки харчових відходів набуває особливої актуальності як з економічної, так і з екологічної точок зору.

Основна ідея процесу переробки охоплює декілька послідовних етапів. Процес починається зі збору харчових відходів (залишків їжі, овочів, фруктів тощо) та їх попередньої обробки, яка включає подрібнення та, за потреби,

ферментативну або механічну обробку для розкладу складних органічних сполук [8]. Результатом цієї стадії є утворення двох основних фракцій: ферментованої біомаси, придатної для подальшої ферментації з метою отримання біологічно активних речовин або платформних хімікатів, та залишкової твердої маси, що направляється для анаеробного збродження.

На наступному етапі залишкова тверда фракція потрапляє в анаеробний реактор, де за участю метаногенних бактерій розкладається з утворенням біогазу (переважно метану та вуглекислого газу), який може бути перетворений на біометан або використаний для виробництва теплової та електроенергії. Паралельно формується дигестат, багатий поживними речовинами, що застосовується як біодобриво [40].

Крім того, передбачається застосування ензиматичних процесів, спрямованих на гідроліз рідких або твердоподібних субстанцій ферментованої біомаси для розкладу складних органічних полімерів до більш простих сполук. Подальші стадії відокремлення та очищення дозволяють виділити тонкі хімічні сполуки з високою комерційною цінністю, що можуть бути використані у фармацевтичній, косметичній, харчовій промисловості та інших галузях.

Такий стандартний опис комплексної системи поводження з органічними відходами не лише сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля, але й відкриває можливості для отримання додаткових джерел доходу та енергії [50].

1.3. Вплив біотехнологій на формування циркулярної економіки: перетворення відходів на продукти з доданою вартістю

Великим потенціалом для зростання ринку валоризації відходів є розробка заходів циклічної економіки, які сприяють мінімізації відходів та оптимізації споживання ресурсів. Зі збільшенням прийняття принципів

сталого розвитку компаніями та урядами зростає попит на розробку ефективних технологій для переробки відходів у корисні продукти [25].

Циркулярна економіка обертається навколо переходу від традиційної лінійної економіки до такої, яка наголошує на стійкості, ресурсоефективності та мінімізації відходів. У лінійній економіці сировина видобувається, перетворюється на продукти та викидається після використання, що призводить до значного виснаження ресурсів і погіршення навколишнього середовища. З іншого боку, циркулярна економіка зосереджується на створенні замкнутих систем, які зменшують споживання ресурсів, подовжують життєві цикли продукту, а також відновлюють і регенерують матеріали в кінці терміну служби [23]. Циркулярна біоекономіка – це підгалузь циркулярної економіки, яка зосереджується на сталому використанні біологічних ресурсів [54]. Вона поєднує принципи циклічності з біоекономікою – економічною системою, що ґрунтується на використанні відновлюваних біологічних ресурсів, таких як біомаса, рослини, тварини та мікроорганізми.

Основна мета циркулярної біоекономіки – максимізація ефективності використання біологічних ресурсів шляхом перетворення біовідходів на цінні продукти, подовження життєвого циклу матеріалів, мінімізації впливу на довкілля. Цей регенеративний підхід сприяє зменшенню змін клімату, втрати біорізноманіття та деградації навколишнього середовища. Одним із ключових напрямів є вилучення з харчових відходів біологічно активних сполук (антиоксидантів, фенольних кислот, харчових волокон), які знаходять застосування у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловості. Це не тільки підвищує економічну цінність, а й сприяє здоров'ю та добробуту людини. Крім того, перетворення харчових відходів на корм для тварин або поживний компост допомагає замкнути біологічний цикл, повертаючи важливі елементи в ґрунт і сприяючи сталому сільському господарству. Таким чином, циркулярна біоекономіка забезпечує постійне повернення біологічних ресурсів в економічний обіг, зменшуючи потребу у нових матеріалах та

підвищуючи екологічну стійкість [34]. Інноваційні стратегії переробки органічних відходів у високоцінні продукти демонструють значні економічні, екологічні та соціальні переваги, роблячи циркулярну біоекономіку ключовою частиною сталого розвитку [19].

1.3.1. Біопаливо з органічних відходів

Перетворення органічних відходів на біопаливо, таке як біоетанол і біогаз, є багатообіцяючою стратегією валоризації відходів у циркулярній біоекономіці. Цей підхід використовує органічний вміст харчових відходів для створення відновлюваних джерел енергії, фактично перетворюючи відходи на цінний ресурс. Недавні дослідження підкреслили, що харчові відходи, такі як відходи хліба, можуть бути ферментовані з використанням специфічних штамів дріжджів, таких як *Saccharomyces cerevisiae*, в результаті чого вихід біоетанолу коливається від 11% до 13% [27]. Цей процес бродіння ефективно перетворює вуглеводи в харчових відходах на етанол, який можна використовувати як стійку альтернативу паливу, таким чином зменшуючи залежність від традиційних викопних видів палива [49]. Окрім біоетанолу, ще одним ефективним методом перетворення харчових відходів у біоенергію є анаеробне зброджування. Висока концентрація метану в біогазі робить його чудовим джерелом для виробництва енергії, і він придатний для виробництва електроенергії та тепла або як автомобільне паливо після очищення [23]. Ці методи виробництва біопалива забезпечують численні переваги, крім виробництва енергії. Вони значно зменшують обсяг відходів, що відправляються на звалища, зменшуючи викиди метану, пов'язані з розкладанням відходів в анаеробних умовах. Крім того, використання органічних відходів для виробництва біопалива узгоджується з цілями циркулярної біоекономіки шляхом зменшення викидів парникових газів, зниження залежності від невідновлюваних джерел енергії та сприяння більш

стійкій та стійкій енергетичній інфраструктурі. Використання органічних відходів для виробництва біопалива одночасно вирішує проблему утилізації відходів і сприяє розвитку відновлюваної енергетики, забезпечуючи як екологічну, так і економічну стійкість. Завдяки цій подвійній перевазі перетворення харчових відходів на біопаливо стає важливим елементом циркулярної біоекономіки, спрямованої на досягнення довгострокового екологічного балансу та раціонального використання ресурсів [32].

1.3.2. Біополімери та біорозкладні пластмаси

Біополімери, отримані з органічних відходів, стають екологічно чистими альтернативами традиційним пластмасам на основі нафти. Одним із яскравих прикладів є пектин, який є цінним біополімером, який отримують із шкірки цитрусових і яблучних вичавок. Пектин має широке застосування в харчовій і фармацевтичній промисловості завдяки своїм гелеутворюючим, згущуючим і стабілізуючим властивостям [18]. Останні досягнення в технології екстракції, такі як екстракція за допомогою мікрохвиль, значно підвищили ефективність відновлення пектину. Екстракція за допомогою мікрохвиль може досягти виходу пектину до 83%, що є значним збільшенням у порівнянні з традиційними методами екстракції. Цей підвищений вихід робить процес більш економічно життєздатним і максимізує цінність, отриману від харчових відходів. Окрім пектину, зростає інтерес до використання органічних відходів для виробництва біорозкладної пластмаси. Ці пластики розроблені таким чином, щоб руйнуватися швидше та безпечніше, ніж звичайні пластики, зменшуючи їх довгостроковий вплив на навколишнє середовище. Використання органічних відходів для виробництва біополімерів і біопластмас відповідає принципам циркулярної економіки, перетворюючи відходи на корисні ресурси. Це не лише зменшує негативний вплив

синтетичного пластику на довкілля, а й стимулює інновації, створюючи нові можливості для зростання ринку [24].

1.3.3. Відновлення біологічно активних сполук

Відновлення біологічно активних сполук із органічних відходів є важливим і перспективним застосуванням у циркулярній біоекономіці, що пропонує значні переваги для стійкості та використання ресурсів. Біологічно активні сполуки, зокрема фенольні кислоти, відомі своїми антиоксидантними властивостями та потенційним застосуванням у фармацевтиці та косметичі. Ці сполуки можуть забезпечити цінні переваги для здоров'я та сприяти розвитку різних галузей промисловості, підвищуючи загальну цінність органічних відходів. Останні технологічні досягнення значно підвищили ефективність вилучення цих біоактивних сполук із харчових відходів. Серед цих досягнень ефективними методами стали екстракція за допомогою ферментів і екстракція за допомогою ультразвуку [32]. Ензиматична екстракція використовує спеціальні ферменти для руйнування клітинної структури органічних відходів, вивільняючи біоактивні сполуки більш ефективно. З іншого боку, екстракція за допомогою ультразвуку використовує високочастотні звукові хвилі для створення мікробульбашок у розчиннику для екстракції, що допомагає руйнувати клітинні стінки та посилювати вивільнення цільових сполук [21]. Наприклад, екстракцію за допомогою ультразвуку було успішно застосовано для вилучення кавової кислоти та ферулової кислоти з харчових відходів, досягнувши виходу у десятки та сотні мікрограмів на грам сировини відповідно. Кавова кислота та ферулова кислота є цінними фенольними кислотами зі значною антиоксидантною активністю, які допомагають запобігти окислювальному пошкодженню в різних продуктах. Високі врожаї, отримані через екстракцію за допомогою ультразвуку, демонструють його ефективність у максимізації відновлення цих біологічно активних сполук із

харчових відходів, таким чином роблячи процес більш ефективним та економічно життєздатним. Покращуючи вилучення біологічно активних сполук, ці технології сприяють стійкості харчової промисловості [48]. Вони дозволяють перетворювати харчові відходи на високоцінні продукти, зменшуючи відходи та створюючи нові економічні можливості. Цей підхід підтримує циркулярну біоекономіку, перетворюючи викинуті матеріали на цінні ресурси, а також стимулює інновації у відновленні ресурсів [21].

1.4. Екологічні та економічні аспекти біотехнологічної переробки

Зростаюче усвідомлення екологічних проблем стимулювало увагу до взаємозв'язку між економічним розвитком і його впливом на навколишнє середовище людини. Існуючий розвиток економічного зростання супроводжується величезним розтратою джерел сировини та енергії та водночас високим екологічним стресом у природі, спричиненим відходами виробництва та споживання. Навколо нас радикально змінюються старі форми та методи соціально-економічного розвитку, організаційні структури, системи управління, філософія людського багатства, старі уявлення про природу. Люди пробуджуються усвідомлення гострої потреби фундаментального перегляду відносин між людиною та природою. Зараз перед людством і планетою Земля стоїть глобальна екологічна криза [14]. Ключовою мотивацією розробки та впровадження промислових біотехнологій є зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Однак точна оцінка цих впливів залишається важким завданням. Вплив промислової біотехнології на навколишнє середовище може бути значним у низці категорій, які включають, але не обмежуються, виснаження невідновлюваних ресурсів, забір та споживання води, зміну клімату та природне перетворення/окупацію землі [1].

Біопродукти та процеси можуть спричиняти вплив на людське суспільство та навколишнє середовище. Цей вплив може відбуватися по всьому ланцюжку створення вартості біопродукції і може бути пов'язаний з виробництвом біомаси, процесами біопереробки, а також з фактичними характеристиками та впливом нових біопродуктів на навколишнє середовище. Широкий спектр виявлених впливів біоекономіки підкреслює, що залучення різних груп зацікавлених сторін та громадян до розробки стратегій, спрямованих на розвиток біоекономіки, має вирішальне значення. Зокрема, можливості для залучення зацікавлених сторін та громадськості до управління біоекономікою виникають на регіональному рівні, де діяльність з переробки біомаси матеріалізується на конкретних переробних підприємствах.

Важливою причиною для просування біопродуктів є сприятливий вплив на навколишнє середовище шляхом заміни нафти або продуктів на її основі. Мотивація цієї заміни виходить за рамки відходу від обмежених ресурсів (і залежності від імпорту) до зниження вуглецевої інтенсивності виробництва. Однак, окрім викидів вуглецю, існує багато інших впливів на навколишнє середовище, таких як зміни/інтенсивність землекористування, якість ґрунту та води. Ці ефекти також мають вплив на біорізноманіття та екосистемні послуги [51].

Одним із найважливіших аспектів біотехнологічної переробки є її вплив на використання земель. Оскільки вирощування сировини для біопалива та біоматеріалів потребує значних площ, це може призводити до скорочення лісових територій, заміни природних екосистем сільськогосподарськими угіддями та підвищення рівня деградації ґрунтів. Важливо враховувати, що використання монокультурних насаджень може негативно впливати на біорізноманіття, а також підвищувати вразливість земель до ерозії.

Біотехнологічна переробка також впливає на водний баланс. Для вирощування сировини часто необхідне велике споживання води, що може спричинити виснаження підземних та поверхневих водних ресурсів. Крім того, агрохімікати, що використовуються у сільському господарстві, можуть

потрапляти у водойми, спричиняючи евтрофікацію та забруднення. У цьому контексті важливо впроваджувати технології повторного використання води та очищення стічних вод [14].

Хоча біотехнологічна переробка сприяє зниженню залежності від викопних палив, її вплив на рівень викидів парникових газів є неоднозначним. У деяких випадках біопаливо може мати менший вуглецевий слід у порівнянні з традиційними енергетичними ресурсами. Проте зміни у землекористуванні та використання добрив можуть сприяти додатковому викиду CO₂ та інших газів, що сприяють глобальному потеплінню.

Процеси переробки біомаси можуть супроводжуватися викидами забруднюючих речовин у повітря, таких як дрібнодисперсні частинки, оксиди азоту та сірки. Ці викиди можуть мати негативний вплив на якість повітря та здоров'я населення [51]. Для мінімізації цього впливу необхідно впроваджувати екологічно безпечні технології виробництва та контролювати рівень шкідливих викидів [1].

Одним із ключових показників екологічної безпеки біотехнологічної продукції є її здатність до біорозкладання. Біорозкладні матеріали можуть сприяти зменшенню забруднення довкілля, проте їхнє виробництво повинно враховувати рівень токсичності компонентів. Важливо розробляти матеріали, які не лише швидко розкладаються, але й не спричиняють додаткового навантаження на екосистеми під час їхнього розкладу. Ще важливою є ефективна утилізація органічних відходів. Використання відходів у виробництві біопалива або добрив може суттєво зменшити навантаження на полігони та сприяти розвитку циркулярної економіки.

Використання біотехнологій може суттєво впливати на флору та фауну. Масове вирощування біосировини, особливо монокультур, може призвести до втрати природних середовищ існування багатьох видів. Це стосується не лише рослин, але й комах-запилювачів та інших живих організмів, які залежать від різноманітних екосистем.

Біотехнологічна переробка має значний потенціал для покращення екологічної ситуації, проте її вплив на довкілля є складним і багатогранним. Використання біотехнологій дозволяє зменшити споживання викопних ресурсів, але вимагає ретельного контролю за змінами у землекористуванні, використанні води, рівнем викидів та забрудненням повітря. Для досягнення екологічної стійкості необхідно впроваджувати сучасні технології моніторингу та регулювання, які дозволять мінімізувати негативний вплив біотехнологічної переробки та зробити її ефективним інструментом у боротьбі за чисте довкілля [38].

Розвиток біотехнологій також має значний соціально-економічний вплив. Нові технології можуть створювати додаткові робочі місця, сприяти розвитку аграрного сектору та збільшувати енергетичну незалежність країн. Проте також існують ризики, пов'язані із доступністю земель для місцевого населення та можливими соціальними конфліктами щодо використання природних ресурсів.

Інновації в біоекономіці відкривають можливості для впровадження нових виробничих процесів, що змінюють попит на продукцію та ресурси. Розширення біоекономіки призводить до зростання попиту на біологічні ресурси та біопродукти, у той час як потреба у продуктах на основі викопного палива може поступово зменшуватися. Проте цей процес залежить від рівня використання викопного палива у виробництві сировини для біоекономіки. Одним із головних мотивів розвитку біопалива є зменшення залежності від імпорту нафти. Досвід Бразилії та США показує, що виробництво біопалива сприяє енергетичній безпеці та стабілізації цін на паливо. Крім того, економія на валютних витратах дозволяє країнам спрямовувати ресурси на інші важливі економічні сфери. Однак такі заходи можуть призвести до введення протекціоністських заходів проти імпорту біопалива, що може обмежити міжнародну торгівлю. Країни з обмеженими ресурсами можуть отримати вигоду від розвитку внутрішнього виробництва біопалива, що зменшить їхню залежність від глобальних ринків нафти [27].

Біоекономіка може стати важливим рушієм відродження сільських територій, оскільки стимулює розвиток сільського господарства та створює нові робочі місця. Особливо це стосується регіонів, де зосереджене вирощування біосировини. На глобальному рівні південні країни можуть отримати вигоду від нових ринків біосировини. Наприклад, виробництво біопалива може позитивно вплинути на зайнятість у сільському господарстві, особливо якщо воно залучає малих фермерів та передбачає переробку біомаси неподалік місць її вирощування.

У Європі біоекономіка, заснована на біотехнологіях, продовжує відігравати важливу роль у формуванні економічних показників. За останніми оцінками, її річний оборот перевищує 60 млрд євро, забезпечуючи зайнятість для понад 300 тис. осіб. Водночас суміжні сектори, зокрема харчова, сільськогосподарська, паперова та лісова промисловість, формують понад 2 трлн євро обороту та забезпечують роботою близько 21 млн осіб. За оцінками Європейська комісія, кожне євро, інвестоване в дослідження та інновації у сфері біоекономіки, здатне генерувати до десяти євро доданої вартості, що підтверджує високий економічний потенціал цього напрямку у 2026 році [54].

Проте біоекономічні стратегії можуть також спричинити проблеми, зокрема порушення прав місцевих громад на землю. Наприклад, в Індонезії спостерігаються випадки втрати земель місцевими жителями через розвиток біоекономіки [38]. Крім того, поява нових технологій біопереробки може негативно вплинути на дрібних виробників, які не мають доступу до інновацій або ринкової підтримки. Збільшення попиту на біологічну сировину та біопродукти може спричинити коливання цін на відповідні товари, такі як продукти харчування, волокна та деревина. Водночас розвиток нових біоекономічних процесів може змінити методи виробництва, підвищити продуктивність біомаси та вдосконалити технології її переробки.

Розвиток біоекономіки також може створити нові економічні можливості для виробників біосировини, відкриваючи для них додаткові джерела доходу.

Однак підвищення цін на сировину може спричинити додатковий економічний тиск на інші категорії споживачів. Зміни у структурі попиту та цін на біопродукти можуть впливати на регіональні та національні торгові баланси, змінюючи економічні перспективи країн та регіонів.

Біоекономіка є важливим інструментом економічного розвитку, який відкриває нові ринки, створює робочі місця та сприяє зростанню валового внутрішнього продукту. Однак вона також може викликати коливання цін на сировину, зміну торгових балансів та залежність від державних субсидій. Для досягнення сталого розвитку необхідно ретельно аналізувати вплив біоекономіки на соціальні та економічні процеси, а також впроваджувати ефективні стратегії регулювання, які дозволять максимізувати позитивний ефект та мінімізувати можливі ризики [27].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ТА РИНКОВИХ ПЕРСПЕКТИВ БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ

2.1. Існуючі технології у біотехнологічній переробці

Переробка органічних відходів на екологічно чисті та цінні хімічні продукти є важливим аспектом сталого розвитку. Використання таких відходів, як сільськогосподарські рештки, в якості джерела сировини для виробництва біопалив, біополімерів та інших хімічних продуктів потребує застосування складних біохімічних процесів. Ці процеси включають делігніфікацію, гідроліз рослинних полісахаридів та бродіння для отримання біопалива, такого як біоетанол [14].

Основні етапи переробки сільськогосподарських відходів на біопаливо чи інші цінні продукти базуються на біокислотах і ферментативних реакціях, де мікроорганізми активно працюють як біокаталізатори.

Процес починається з делігніфікації – розкладу лігніну, що сприяє покращенню доступності целюлози та геміцелюлози для наступних етапів обробки [42]. Целюлоза, яка є основним полісахаридом, гідролізується до простих цукрів, таких як глюкоза, які потім можуть бути зброжені дріжджами для отримання біоетанолу. Для цього часто використовуються штами дріжджів, здатні ефективно ферментувати цукри у біоетанол.

Цей процес часто супроводжується етапами гідролізу з використанням спеціалізованих ферментів, які виділяються певними мікроорганізмами. Наприклад, бактерії і гриби, що використовуються в біоконверсії, мають здатність синтезувати ферменти, які розщеплюють целюлозу і геміцелюлозу на більш прості цукри, що робить їх доступними для подальшої ферментації. Після того як лігноцелюлозні матеріали розщеплені, наступний етап – гідроліз крохмалю в сільськогосподарських відходах з високим вмістом крохмалю,

таких як кукурудза чи картопляні шкірки. Крохмаль гідролізується до зброджуваних цукрів (наприклад, глюкози), які потім ферментуються дріжджами для виробництва біоетанолу. Цей етап є критичним для досягнення високого виходу кінцевого продукту, і він значною мірою визначає ефективність процесу біоконверсії. Для отримання метану, біоводню або інших біогазів відходи можуть бути піддані анаеробному бродінню, в якому мікроорганізми, такі як метаногенні бактерії, використовують органічні сполуки як джерела енергії для виробництва метану. Такий процес зазвичай використовують для переробки органічних відходів. Враховуючи різноманітність сільськогосподарських відходів та їх склад, застосовуються інтегровані підходи до біоконверсії, які об'єднують кілька технологій. Наприклад, темне бродіння та анаеробне збродження можуть бути поєднані для отримання біоводню та метану з фруктових-овочевих відходів [53]. Іншим прикладом є використання електроферментації, яка дозволяє мікроорганізмам проводити ферментацію в умовах, коли електричні потоки використовуються для зменшення енергетичних витрат на процес ферментації. Такий підхід був успішно застосований для отримання масляної кислоти з рисової соломи [11].

В залежності від типу відходів, що підлягають переробці, вибір методів ферментації може варіюватися [6]. Відходи з високим вмістом крохмалю, наприклад, картопляні шкірки, можуть бути легко гідролізовані до глюкози для подальшої ферментації в біоетанол. Відходи, багаті на лігноцелюлозу, такі як солома або тирса, вимагають попередньої обробки для покращення доступності целюлози для ферментативного гідролізу, що дозволяє отримувати більш високу врожайність біоетанолу. Також варто зазначити, що сільськогосподарські відходи тваринного походження, хоча й менш стійкі до біоконверсії через наявність більш складних компонентів, можуть бути використані для виробництва біогазу або інших біопродуктів за допомогою анаеробного бродіння [14]. Для узагальнення ефективності найпоширеніших технологій біоконверсії було створено порівняльний аналіз (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

**Порівняльний аналіз ефективності технологій біотехнологічної
переробки органічних відходів**

Технологія	Час процесу	Вихід продукту (з 1 т відходів)	Енергоспоживання	Основні вимоги до сировини
Ферментативний гідроліз	24-72 год	~150-200 кг цукрів	Середнє	Подрібнена біомаса, ферменти
Анаеробне зброджування	15-30 днів	~200-300 м ³ біогазу	Низьке	Органічні відходи без токсичних домішок
Електроферментація	2-4 дні	~250 кг біопродуктів	Високе	Живильне середовище, електроди
Фотоферментація	7-10 днів	~150 м ³ водню	Середнє	Світло, волога сировина
Темне бродіння	1-3 дні	~100 м ³ водню	Низьке	Вуглеводна сировина
Інтегрований підхід	Залежить від системи	Комплексні продукти (біогаз, добрива, вода)	Високе	Необхідна сортування та попередня обробка

2.1.1. Ферментативний гідроліз

Ферментативний гідроліз став основним методом в обробці та утилізації харчових відходів, а також є попереднім етапом для виробництва біоетанолу з таких відходів. Цей метод має численні переваги, зокрема відсутність токсичних сполук, які можуть утворюватися в результаті бродіння дріжджами. Крім того, ферментативний процес має меншу корозію порівняно з хімічними методами [48].

Ферментативний гідроліз дозволяє розщеплювати полісахариди, що містяться в харчових відходах, на прості цукри, такі як глюкоза, фруктоза, галактоза, ксилоза та рибоза [6]. Дріжджі, зокрема роду *S. cerevisiae*, можуть ефективно використовувати глюкозу та фруктозу, однак для цукрів, які утворюються в результаті гідролізу геміцелюлози, таких як пентози, потрібні інші мікроорганізми або навіть генетично модифіковані організми. Концентрація цукрів, що зброджуються в гідролізованому розчині, впливає на вихід біоетанолу, тому правильний вибір ферментативного складу, що відповідає складу органічних відходів, є критично важливим для оптимізації процесу ферментативного гідролізу. Оскільки різні види відходів можуть потребувати спеціальних або комбінованих ферментних складів, вибір ферментів має вирішальне значення. Одним із найбільш використовуваних ферментів є глюкоамілаза, яка розщеплює глікозидні зв'язки на одиниці глюкози, що потім використовуються дріжджами для виробництва етанолу в процесі бродіння [15].

Хоча ферментативний гідроліз має численні переваги порівняно з хімічними методами, висока вартість ферментів та попередньої обробки залишаються значними перешкодами для масштабного виробництва етанолу. Одним із рішень є виробництво ферментів на місці з дешевших сировинних матеріалів.

Дослідження вказують, що концентрація ферменту, специфічність та характеристики субстрату мають значний вплив на ефективність

ферментативного гідролізу органічних відходів [20]. Вищі концентрації ферментів можуть прискорювати процес, але економічна ефективність та стабільність ферментів залишаються важливими факторами для успішної реалізації цього процесу [15].

2.1.2. Анаеробне зброджування

Анаеробне зброджування – це природний процес розщеплення органічних матеріалів на більш дрібні хімічні компоненти без кисню з одночасним утворенням біогазу [37]. Цей біологічний процес природним чином відбувається в шлунково-кишковому тракті ссавців, болотах і водно-болотних угіддях. Ця концепція широко використовується, в тому числі для зброджування первинного та вторинного осаду стічних вод, твердих побутових відходів, анаеробних реакторів із висхідним потоком та систем активного мулу [51].

В умовах поточної енергетичної кризи анаеробне зброджування використовується для виробництва біогазу з відходів, утворюючи метан, леткі жирні кислоти та водень як первинні продукти. Ці біогази можуть служити теплом, електроенергією, автомобільним паливом та іншими джерелами палива. Крім того, дигестат, багатий поживними речовинами, можна використовувати як біодобриво [38]. Анаеробне зброджування – це динамічна система з численними складними взаємодіями, що включають мікробні, біохімічні та фізико-хімічні процеси, що відбуваються одночасно в чотири етапи: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез [29]. Загальний результат процесу визначається гідролізом, який є кроком, що обмежує швидкість реакції. Мікроорганізми виробляють позаклітинні гідролітичні ферменти під час процесу гідролізу, розщеплюючи складні молекули, такі як білки, вуглеводи та жири, до більш легкокорозчинних речовин, таких як амінокислоти, цукри та вільні жирні кислоти. Потім факультативні та облігатні анаероби

перетворюють ці прості молекули для виробництва коротколанцюгових органічних кислот або летких жирних кислот і спиртів у процесі, відомому як ацидогенез, які далі перетворюються на ацетат, водень і вуглекислий газ шляхом ацетогенезу. Нарешті, метаногенні бактерії реагують з органічними кислотами, утвореними на попередніх етапах, з виділенням метану та вуглекислого газу [37]. Анаеробне зброджування можна проводити в одноступінчатій або двоступінчастій біореакторній системі. Одноетапна конструкція є простою та менш дорогою, оскільки всі етапи відбуваються в одному відділенні системи біореактора. Двоступенева система розділена так, що ацидогенез і ацетогенез відбуваються в різних відділеннях системи біореактора [51]. На вихід бажаного продукту в анаеробному зброджуванні впливають різні фізико-хімічні параметри та параметри поживних речовин, включаючи рН, температуру, склад сільськогосподарських відходів, співвідношення C/N, час роботи та інокулят. Оптимізація цих параметрів необхідна для підвищення виходу кінцевого продукту [49].

Незважаючи на свої переваги, анаеробне зброджування має певні обмеження, зокрема нестабільність процесу, ризики гальмування та високу капіталомісткість установок. Складна мікробна динаміка, що лежить в основі цього процесу, вимагає постійного контролю та належного управління для забезпечення оптимального виходу біогазу. На обсяг виробленого біогазу значно впливають такі чинники, як склад сировини та умови експлуатації, що підкреслює необхідність безперервних досліджень і вдосконалення технологій [6].

2.1.3. Електроферментація

Електроферментація – це новий тип гібридної технології, яка поєднує в собі старі принципи ферментації та електромікробіологію для підвищення врожайності продукту. Він використовує поляризовані електроди для

перенаправлення передачі невеликої кількості електронів у середовище та/або з нього.

Основним джерелом електронів під час процесу електроферментації є органічний матеріал у середовищі, оскільки кількість електронів, що обмінюються на поляризованому електроді, низька порівняно з мікробним електросинтезом. Взаємодія мікроорганізмів з електродом під час електроферментації здійснюється через механізми прямого міжвидового переносу електронів або механізми непрямого міжвидового переносу електронів. *Shewanella oneidensis* і *Geobacter sulfurreducens* є двома найбільш часто досліджуваними електроактивними бактеріями, які вважаються моделлю механізму прямого міжвидового переносу електронів. Цю вражаючу здатність, яку спостерігають деякі бактерії, можна використати для виробництва біоводню. Останнім часом електроферментацію успішно застосовують для переробки харчових відходів, демонструючи багатообіцяючі результати. Зокрема, контроль за концентрацією летких жирних кислот під час цього процесу дозволив підвищити виробництво метану приблизно на 26,3%. Крім того, впровадження послідовної електроферментації після темної ферментації сприяло покращенню виходу водню [14].

Основний принцип технології електроферментації полягає в електрохімічному регулюванні мікробного ферментативного метаболізму. У методі електроферментації електроди можуть змінювати середовище, впливаючи на окисно-відновний баланс бродіння. Електроди функціонують як акцептор електронів або донор, обходячи метаболічні обмеження під час бродіння. Метод електроферментації пропонує кілька переваг, включаючи здатність стимулювати подовження вуглецевого ланцюга карбоксилатів, забезпечувати контроль рН без використання солі шляхом транспортування іонних продуктів із бульйону, а також витягувати та/або перетворювати цільові продукти за допомогою селективної мембрани [11].

Економічний потенціал ферментаційних процесів у промисловості стикається з такими проблемами, як витрата часу, капіталомісткість, низький

вихід, неоптимальна чистота продукту, висока селективність культуральних середовищ, забруднення навколишнього середовища та потреба у високооптимізованих штаммах мікроорганізмів. Електроферментація залучає електроактивні мікроорганізми, використовуючи електроди як донори або акцептори електронів для регулювання редокс-потенціалу ферментаційного середовища, що сприяє створенню більш економічно доцільних біотехнологічних рішень. Цей інноваційний підхід сприяє перетворенню CO₂ на продукти з доданою вартістю та біопаливо з лігноцелюлозної біомаси, тим самим зменшуючи забруднення навколишнього середовища та викиди парникових газів [51].

2.1.4. Фотоферментація

Фотоферментація є перспективною біотехнологічною технологією отримання біоводню, що ґрунтується на використанні світлової енергії для стимулювання мікробних процесів ферментації органічних субстратів. Цей процес покладається на фотосинтезуючі мікроорганізми, що за відсутності кисню і дефіциту азоту здійснюють відновлення органічних сполук до водню. Завдяки своїй ефективності та екологічності, фотоферментація є перспективним методом перетворення відходів сільськогосподарського та харчового виробництва на чисте паливо.

Основу фотоферментації становлять пурпурні несірчані бактерії (PNSB), такі як *Rhodospseudomonas palustris*, *Rhodospseudomonas spheroids O.U001* та *Rhodospirillum rubrum*. Ці мікроорганізми мають здатність виробляти біоводень шляхом розщеплення органічних сполук у присутності світла. Вони використовують фермент нітрогеназу, яка активується за допомогою АТФ і каталізує відновлення метаболічно отриманих протонів до водню [2]. У стандартних умовах нітрогеназа відповідає за фіксацію азоту, однак при його дефіциті фермент спрямовує енергію на продукування водню [14].

Важливим фактором ефективності процесу є вибір субстрату. Органічні сполуки з короткими ланцюгами, такі як ацетат, бутират і лактат, є оптимальними джерелами вуглецю для фотоферментації. Дослідження підтверджують, що гліцерин та харчові відходи з високим вмістом жирних кислот і простих цукрів є перспективними субстратами для фотоферментативного виробництва біоводню [51].

Однією з головних переваг фотоферментації є її екологічна чистота. В процесі не утворюються токсичні відходи, а єдиними побічними продуктами є вода та невелика кількість вуглекислого газу. Це робить біоводень ідеальним альтернативним паливом для різних галузей, включаючи транспорт, виробництво електроенергії, синтез метанолу та аміаку. Крім того, використання харчових і промислових відходів у якості субстрату дозволяє не лише отримувати енергію, але й зменшувати обсяг стічних вод та забруднень [2].

2.1.5. Темне бродіння

Темне бродіння – це біотехнологічний процес, який здійснюється в умовах відсутності світла та кисню, в ході якого мікроорганізми анаеробно розщеплюють органічні матеріали, утворюючи водень, вуглекислий газ та органічні кислоти через процес ацидогенезу. Згодом ці продукти можуть бути трансформовані в метан. Джерелами органічних матеріалів для темного бродіння можуть бути різноманітні сільськогосподарські відходи, харчові продукти, промислові стічні води, тверді міські відходи, а також рослинні залишки, що містять цукри [26].

На ефективність темного бродіння впливають численні фактори, такі як рН середовища, температура, концентрація поживних речовин, гідравлічний час утримування, швидкість завантаження субстрату, а також наявність інгібіторів або токсичних речовин. Важливу роль відіграє температура,

оскільки вона впливає на активність мікроорганізмів. Оптимальні температури для процесу зазвичай становлять 30-40°C, проте вони можуть варіюватися залежно від конкретного мікробного консорціуму. Важливим аспектом темного бродіння є утворення побічних продуктів, таких як леткі органічні кислоти [14]. Встановлено, що шляхи ацетатного і бутиратного бродіння дають вищий вихід водню, тоді як лактатний та алкогольний шляхи є менш ефективними. Крім того, парціальний тиск водню в системі може викликати інгібування процесу, знижуючи загальний вихід біоводню. Для подолання цієї проблеми застосовують методи регулювання параметрів процесу, видалення водню або адаптацію мікробних культур. Оптимізація режимів бродіння також впливає на продуктивність процесу. Різні конфігурації реакторів, такі як реактори з перемішуванням, нерухомим або киплячим шаром, можуть змінювати вихід водню. До ефективних удосконалень належать твердофазне бродіння, використання біовугілля, спільне перетравлення з синтрофними мікроорганізмами, попередня обробка сировини та застосування наноматеріалів [51].

Темне бродіння має великий потенціал для комерційного виробництва водню, проте існують певні виклики, пов'язані з його широкомасштабною реалізацією. Основними бар'єрами є низький вихід водню та висока вартість процесу. Для їх подолання перспективними є методи метаболічної інженерії, створення синтетичних мікробних консорціумів, біоаугментація та адаптація систем бродіння [14].

2.1.6. Інтегрований підхід

Інтегрований підхід передбачає комбінування декількох технологій для ефективного використання органічних відходів у виробництві біопалива. Доведено, що такий підхід сприяє економічній доцільності переробки харчових відходів, знижує виробничі витрати та оптимізує вихід продукції та

енергетичну ефективність [51]. Поєднання таких технологій, як темне бродіння та мікробні паливні елементи, а також інших способів отримання біоводню та цінних продуктів на біопереробних підприємствах набирає популярності. Зокрема, комбінація темної ферментації та фотоферментації значно покращує процес виробництва біоводню, оскільки фотосинтезуючі бактерії сприяють підвищенню виходу водню під час фотоферментації після темного бродіння. Реалізація цього підходу можлива у вигляді одно- або двостадійної системи, причому двостадійна модель є більш ефективною завдяки можливості забезпечення оптимальних умов та додаткової обробки метаболічних побічних продуктів темного бродіння [19].

Окрім поєднання біологічних методів, гібридні системи можуть містити хімічні та термічні процеси. Наприклад, термічна попередня обробка крохмальних стічних вод, збагачених знежиреною макухою арахісу, значно збільшила виробництво біоводню. Подібні результати спостерігалися при додаванні наноксидів металів до стічних вод рисового заводу під час темної ферментації *Clostridium beijerinckii* DSM 791. Додавання наночастинок NiO та CoO збільшило вихід біоводню на 109 % та 90 % відповідно [2].

Загалом, інтегрований підхід демонструє більш перспективні результати у промисловому виробництві водню порівняно з іншими технологіями. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на підвищення ефективності конверсії та збільшення виходу продукту на пілотних та комерційних підприємствах [14].

2.2. Аналіз ринку та тенденцій розвитку біотехнологічної переробки

2.2.1. Аналіз сегментації ринку біотехнологічної переробки

Ринок валоризації відходів відрізняється своєю складною сегментацією, яка включає широкий спектр типів продукції, що підходить для певних застосувань, галузей кінцевих споживачів із різноманітних секторів, а також географічно різноманітний ландшафт, який включає Азіатсько-Тихоокеанський регіон, Північну Америку, Європу, Південну Америку, країни Близького Сходу та Африку. Цей підхід до сегментації підкреслює чіткі потреби та переваги різних ринків, викликані змінами в поведінці споживачів, галузевими розробками та технологічними проривами [25]. Детальне уявлення про динаміку зростання та нові тенденції стає можливим завдяки сегментації ринку, яка поділяє ринок на окремі пропозиції продуктів, додатки та канали розподілу (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Сегментація ринку валоризації відходів за різними критеріями

Критерії	Категорії
1	2
За регіоном	<ul style="list-style-type: none"> • Азіатсько-Тихоокеанський регіон • Північна Америка • Європа • Південна Америка • Близький Схід та Африка
За типом	<ul style="list-style-type: none"> • Органічні відходи • Сільськогосподарські відходи

Продовження таблиці 2.2

1	2
	<ul style="list-style-type: none"> • Відходи лісового господарства • Промислові відходи
За технологією	<ul style="list-style-type: none"> • Ферментативний гідроліз • Анаеробне зброджування • Електроферментація • Фотоферментація • Темне бродіння • Інтегрований підхід
На основі кінцевого користувача	<ul style="list-style-type: none"> • Виробники енергії • Аграрні компанії • Харчова промисловість • Муніципальна влада

За типом ринок валоризації відходів можна розділити на кілька типів, включаючи органічні відходи, сільськогосподарські відходи, відходи лісового господарства та промислові відходи. Очікується, що органічні відходи, які включають харчові залишки та відходи з дворів, будуть домінувати на ринку через їх великий обсяг і потенціал для перетворення на біогаз і компост [39]. Сільськогосподарські відходи, включаючи залишки рослинництва, також важливі, оскільки їх можна перетворити на біопаливо та інші цінні продукти. Відходи лісового господарства, такі як деревна тріска та тирса, сприяють виробленню енергії з біомаси, тоді як промислові відходи пропонують можливості для валоризації за допомогою інноваційних процесів переробки [9].

За технологією ринок можна розділити на анаеробне зброджування, газифікацію, піроліз і бродіння. Анаеробне зброджування широко використовується для перетворення органічних матеріалів у біогаз, що робить

його провідною технологією в галузі. Газифікація та піроліз набувають популярності завдяки своїй здатності перетворювати біомасу на синтетичний газ і біонафту, відповідно, забезпечуючи різноманітні варіанти отримання енергії. Технологія бродіння особливо актуальна для виробництва біоетанолу та інших біохімічних речовин, що задовольняє зростаючий попит на відновлювані альтернативи викопному паливу [13].

Сегмент кінцевих споживачів ринку валоризації відходів включає виробників енергії, сільськогосподарські компанії, підприємства харчової промисловості та виробництва напоїв, а також муніципальні органи влади. Виробники енергії є основними споживачами біомаси для виробництва електроенергії, що стимулює попит на технології валоризації. Сільськогосподарські компанії використовують високоякісні продукти як добрива та покращувачі ґрунту, тоді як сектор харчових продуктів і напоїв шукає стійкі рішення щодо управління відходами, щоб збільшити свій вплив на навколишнє середовище. Муніципальна влада відіграє вирішальну роль у впровадженні ініціатив валоризації, зосереджуючись на зменшенні відходів і відновленні ресурсів для підтримки місцевих цілей сталого розвитку [17].

2.2.2. Динаміка зростання ринку біотехнологічної переробки

Зростаючий тягар різних відходів через великий обсяг економічної діяльності в усьому світі спричинив величезний попит на послуги з переробки відходів. Послуги з переробки відходів стали важливою частиною інфраструктури, яка допомагає захистити здоров'я людей і навколишнє середовище. Збільшення використання одноразових пакувальних матеріалів, різноманітних видів утилізації та витратних матеріалів у різних галузях промисловості, таких як харчові продукти та напої, охорона здоров'я, засоби особистої гігієни та споживчі товари, призводить до зростаючого попиту на послуги з переробки відходів. Очікується, що надзвичайне розширення

індустрії переробки та зростання обізнаності щодо систем переробки відходів матиме значний вплив на зростання ринку [12].

Ринок валоризації відходів і біомаси готовий до значного зростання, що підживлюється зростаючими проблемами навколишнього середовища та потребою в стійких рішеннях щодо управління відходами.

За сучасними аналітичними оцінками, обсяг світового ринку валоризації відходів у 2025 році становив близько 55,65 млрд доларів США, тоді як у 2026 році він досяг приблизно 58,7 млрд доларів США та продовжує зростати з прогнозом до понад 400 млрд доларів США до 2035 року. Середньорічний темп зростання (CAGR) при цьому оцінюється на рівні близько 5,5 % (рис. 2.1) [7].

Таке зростання зумовлене посиленням уваги до перетворення відходів на цінні ресурси, що сприяє зменшенню обсягів їх захоронення та розвитку циркулярної економіки. Основними чинниками є підвищення вимог до скорочення викидів парникових газів, розвиток технологій переробки біомаси (анаеробне зброджування, піроліз, газифікація) та посилення державного регулювання у сфері управління відходами [36].

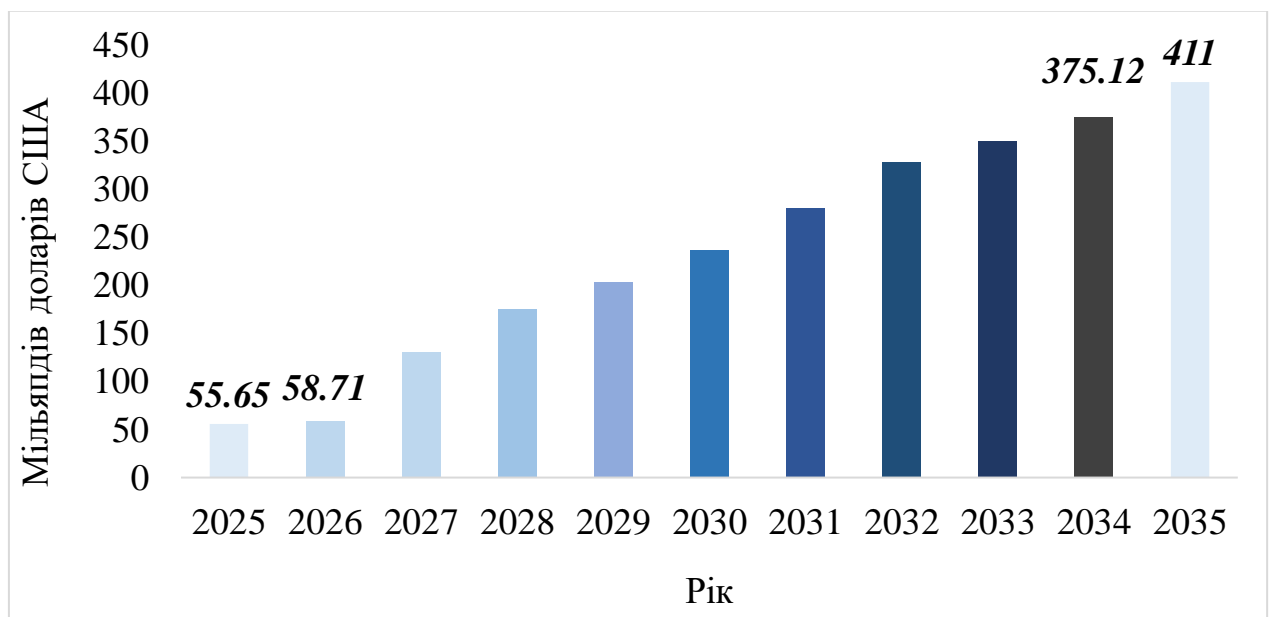


Рис. 2.1. Розмір світового ринку оцінки вартості відходів, 2025-2035 рр. (USD Billion) [7]

У міру того як глобальні екологічні проблеми продовжують зростати, зростає гострота розробки рішень для сталого поводження з відходами. Уряди та міжнародні організації, такі як Світовий банк і Міжнародний валютний фонд, визнали важливість вирішення проблем, пов'язаних з відходами, для боротьби зі зміною клімату. У звіті Світового банку зазначено, що очікується, що до 2050 року утворення міських відходів зросте на 70%, що робить життєво необхідним практику поводження з відходами. Ця тенденція стимулює інвестиції в технології, які можуть перетворювати відходи на цінні ресурси, що призводить до збільшення впровадження методів валоризації відходів і біомаси [51].

Поява інноваційних технологій є ще одним суттєвим фактором розвитку ринку відходів і біомаси. Компанії та дослідницькі установи постійно розробляють новітні методи перетворення відходів у корисну енергію та продукти [25]. Наприклад, Springer представив інноваційну технологію, яка перетворює відходи пластику на цінне паливо за допомогою піролізу. Lystek запустив передову технологію перетворення пластикових відходів на хімікати шляхом газифікації. Цей процес розщеплює пластик на елементарні компоненти, виробляючи паливо, яке може або приводити в дію транспортні засоби, або виробляти електроенергію. Такі досягнення не тільки сприяють переробці, але й сприяють циркулярній економіці, перетворюючи відходи на ресурси. Подібним чином Scimago представила нову технологію, яка перетворює біомасу відходів у біогаз шляхом анаеробного зброджування. Здатність перетворювати органічні відходи на біогаз не тільки забезпечує відновлюване джерело енергії, але й допомагає зменшити викиди метану зі звалищ, узгоджуючи глобальні кліматичні цілі. Ця технологія розкладає пластик на складові елементи, що дозволяє виробляти різні продукти, включаючи добрива та паливо. Інноваційне використання відходів як сировини для цінних хімічних речовин набирає обертів, особливо в той час, як галузі прагнуть досягти цілей сталого розвитку [17].

Урядова політика та нормативні акти відіграють вирішальну роль у розвитку ринку відходів і біомаси. Багато країн запроваджують суворі правила, спрямовані на зменшення відходів і сприяння відновленню ресурсів. До 2030 року ЄС має на меті переробляти 65% міських відходів, створюючи надійний ринок технологій валоризації. Крім того, Агентство з охорони навколишнього середовища США ініціювало програми сприяння зменшенню відходів і відновленню ресурсів, включаючи фінансові заохочення для компаній, які застосовують екологічні методи. Така державна підтримка заохочує бізнес інвестувати в технології утилізації відходів, що зрештою сприяє зростанню ринку.

Зростаючий глобальний попит на енергію є ще одним ключовим фактором розвитку ринку відходів і біомаси. У міру зростання населення та розвитку економіки потреба в стійких і відновлюваних джерелах енергії стає все більш критичною. Традиційне викопне паливо ретельно вивчається на предмет впливу на навколишнє середовище, що призводить до зростання інтересу до альтернативних рішень для отримання енергії з відходів. Компанія Honeywell представила новаторську технологію перетворення біомаси відходів на водень за допомогою парового риформінгу. Цей процес розкладає біомасу в присутності пари, утворюючи водень, який може приводити в дію транспортні засоби або виробляти електроенергію. Оскільки водень стає чистим паливом, технології, які полегшують його виробництво з відходів біомаси, набувають популярності [36]. За даними Міжнародного енергетичного агентства, очікується, що виробництво водню з відновлюваних джерел буде зростати на 20% щорічно до 2030 року, підкреслюючи потенціал валоризації відходів для задоволення майбутніх енергетичних потреб [12]. Ринок валоризації відходів і біомаси керується кількома взаємопов'язаними факторами. Підвищення екологічної обізнаності спонукає уряди та організації до прийняття практик сталого поводження з відходами, а інноваційні технології постійно з'являються, щоб полегшити перетворення відходів у цінні ресурси. У міру зближення цих факторів ринок валоризації відходів і

біомаси зазнає значного зростання в найближчі роки, сприяючи більш стійкому майбутньому [7].

2.2.3. Регіональні особливості валоризації відходів

Ринок валоризації відходів швидко трансформується під впливом регіональних тенденцій, на які впливають екологічна політика, технологічний прогрес і соціально-економічні фактори. У міру того, як глобальний перехід до сталого розвитку прискорюється, різні регіони використовують валоризацію відходів для відновлення ресурсів і мінімізації залежності від звалищ. Географічна структура цього процесу свідчить про суттєві відмінності у рівні впровадження валоризаційних практик, що обумовлено специфікою розвитку окремих країн та регіонів (рис. 2.2) [12].

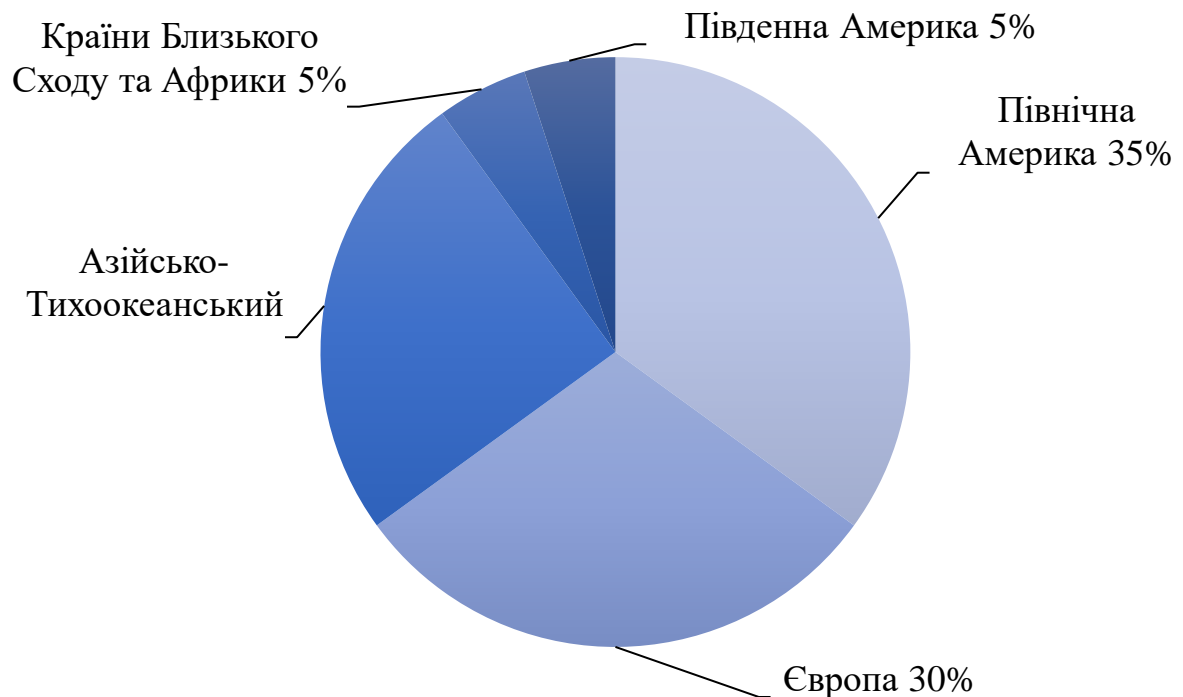


Рис. 2.2. Сегментація валоризації відходів за географічними регіонами [12]

Північна Америка займає значну частку ринку валоризації відходів і біомаси, що становить приблизно 35% від загального ринку. Регіон отримує переваги від добре налагодженої інфраструктури поводження з відходами та сильного акценту на сталому розвитку. Уряди та організації все частіше приймають правила, які заохочують переробку та скорочення відходів, сприяючи зростанню ринку. Наявність великих гравців і передових технологій, зокрема в Сполучених Штатах і Канаді, ще більше посилює позиції регіону. У США ініціативи федеральних і державних агенцій сприяють проєктам з перетворення відходів на енергію та системам відновлення ресурсів [7]. Інвестиції в дослідження та розробки стимулюють інновації, а компанії зосереджуються на передових технологіях перетворення відходів на енергію та інші цінні продукти. Оскільки обізнаність громадськості щодо проблем навколишнього середовища продовжує зростати, очікується, що попит на ефективні рішення утилізації відходів зростатиме, що зміцнить лідерство Північної Америки на ринку.

Європа є ще одним ключовим гравцем на ринку валоризації відходів і біомаси, займаючи ринкову частку близько 30%. Потужна нормативно-правова база регіону та прихильність до економіки замкнутого циклу роблять його лідером у сфері поводження з відходами. У Плані дій Європейського Союзу щодо циркулярної економіки наголошується на переробці та відновленні ресурсів, що узгоджується з цілями технологій утилізації відходів. Такі країни, як Німеччина, Франція та Велика Британія, є передовими у впровадженні інноваційних рішень для переробки відходів. Європейські компанії активно інвестують у дослідження та технологічний прогрес для підвищення можливостей переробки відходів [17]. Наприклад, багато фірм зосереджуються на розробці ефективних технологій анаеробного зброджування та газифікації для перетворення органічних відходів на біогаз та біопаливо. У результаті очікується, що Європа збереже свою сильну позицію на ринку валоризації відходів і біомаси завдяки регулятивній підтримці та технологічним інноваціям [7].

Очікується, що в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні спостерігатиметься швидке зростання ринку валоризації відходів і біомаси з поточною часткою ринку приблизно 25%. Це зростання зумовлене збільшенням утворення відходів через урбанізацію, зростання населення та індустріалізацію в таких країнах, як Китай, Індія та Японія. Уряди цих країн визнають нагальну потребу в стійких рішеннях щодо поводження з відходами та впроваджують політику для підтримки ініціатив з утилізації відходів. Китай є лідером у впровадженні технологій перетворення відходів на енергію, прагнучи перетворити значну частину своїх міських відходів на корисну енергію. Уряд Китаю поставив амбітні цілі щодо скорочення відходів і відновлення ресурсів, сприяючи інвестиціям в інфраструктуру управління відходами [7]. В Індії Swachh Bharat Mission спрямована на покращення поводження з відходами та просування методів переробки, що узгоджується з цілями валоризації біомаси. Крім того, передові системи управління відходами та технологічні інновації в переробці відходів позиціонують Японію як ключового гравця в регіоні. Оскільки обізнаність про екологічні проблеми продовжує зростати в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні, очікується зростання попиту на ефективні рішення щодо управління відходами. Посилення співпраці між приватними компаніями та державними органами сприятиме подальшому зростанню ринку, дозволяючи регіону використовувати величезні ресурси відходів і сприяти сталим практикам. Загалом Азіатсько-Тихоокеанський регіон готовий до значного прогресу у валоризації відходів і біомаси, сприяючи розширенню світового ринку [25].

2.2.4. Конкурентне середовище ключових гравців ринку біотехнологічної переробки

Ринок біотехнологічної переробки характеризується різноманітністю гравців, починаючи від відомих компаній і закінчуючи інноваційними

стартапами, кожен з яких прагне отримати вигоду від зростаючого попиту на стійкі рішення щодо управління відходами. Великі гравці, такі як Veolia, SUEZ і Covanta, мають хороші позиції завдяки своєму великому досвіду та комплексним пропозиціям послуг, які включають збір відходів, переробку та відновлення енергії. Ці компанії отримують вигоду від міцного партнерства з державними органами та значних інвестицій у дослідження та розробки, що дозволяє їм розширювати свої технологічні можливості [25]. Крім того, такі нові учасники, як ThyssenKrupp і Lystek, створюють хвилю своїми передовими технологіями, які перетворюють відходи на волокна та хімікати, відповідно, демонструючи динамічний характер ринку [12]. На конкуренцію також пливають регіональні гравці, які адаптують рішення до місцевих потреб управління відходами, наприклад передові технології анаеробного зброджування та газифікації. Зі збільшенням регуляторного тиску та підвищення обізнаності громадськості щодо сталого розвитку конкуренція посилюється, стимулюючи інновації та спонукаючи компанії диференціювати свої пропозиції. Співпраця між зацікавленими сторонами галузі та дослідницькими установами стає загальноприйнятною, сприяючи прогресу, який покращує ефективність і економічну ефективність процесів валоризації відходів. Оскільки ринок продовжує розвиватися, компанії, які можуть продемонструвати чітку прихильність до сталого розвитку та технологічних інновацій, ймовірно, збережуть конкурентну перевагу, позиціонуючи себе як лідерів у переході до економіки замкнутого циклу [25].

Ринок постійно розвивається внаслідок появи нових конкурентів і розширення використання передових технологій, які змінюють динаміку сектора. Таким чином, щоб зберегти довгострокове зростання та міцну позицію на світовому ринку, компанії зосереджуються на інноваціях, екологічних стандартах та ефективності процесів [13].

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВАЛОРИЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОСТІ

3.1. Характеристика органічних відходів харчової та біотехнологічної промисловості

Органічні відходи харчової та біотехнологічної промисловості становлять собою значну частину побічних продуктів сучасного виробництва продуктів харчування та біотехнологічних препаратів. У межах харчової промисловості такі відходи утворюються в процесах обробки фруктів і овочів, виробництва зернових та кондитерських виробів, а також при переробці м'яса та молока [44]. У біотехнологічній галузі побічними продуктами виступають культуральні середовища після завершення ферментації, осади мікробної біомаси, не спожиті залишки субстратів та проміжні продукти ферментаційних процесів [10].

Органічні відходи цієї категорії характеризуються високим вмістом органічної речовини, що є важливою передумовою для їх біотехнологічної переробки. За даними досліджень, відходи харчової промисловості можуть містити до 70-85 % вологи та значну частку легко доступних вуглеводів, білків і жирів, що визначає їх високий потенціал для біоконверсії. Крім того, складові цієї групи відходів зазвичай мають низький рівень токсичності та не вимагають значної попередньої обробки перед застосуванням біотехнологічних методів, що робить їх перспективними як субстрати для ферментативних та мікробних процесів [28].

Хімічний склад органічних відходів визначає їх біологічну доступність для мікроорганізмів. Вуглеводна складова, представлена моно- і дисахаридами, крохмалем та полісахаридами, є джерелом енергії для мікробних метаболічних шляхів. Білки та пептиди забезпечують азотні

сполуки, необхідні для синтезу клітинних компонентів мікроорганізмів, а ліпіди – додатковий енергетичний ресурс. Така багатокomпонентність дозволяє ефективно використовувати ці відходи у різних біотехнологічних процесах, зокрема у ферментних гідролізах, анаеробних зброджуваннях та ферментаціях для отримання продуктів з доданою вартістю.

Важливою характеристикою органічних відходів є їх біорозкладність, яка визначає здатність матеріалу до трансформації шляхом мікробної активності. Органічні складові, що легко розкладаються (наприклад, прості вуглеводи та білки), сприяють швидкому старту мікробних процесів, тоді як більш складні полімери (целюлоза, геміцелюлоза) можуть вимагати попереднього ферментативного або фізико-хімічного гідролізу для підвищення доступності. З огляду на це, відходи харчової та біотехнологічної промисловості розглядаються як ефективні субстрати для біотехнологічної валоризації, оскільки їх склад сприяє одержанню широкого спектра кінцевих продуктів, включно з біоенергією, біопродуктами та добривами [28, 46].

Органічні відходи даної категорії також мають практичну перевагу у вигляді постійного формування та значних обсягів утворення. Наприклад, великі підприємства з переробки фруктів та овочів щорічно генерують сотні тонн біомаси, що не використовується у виробничих циклах, а залишки ферментаційних процесів біотехнологічних підприємств накопичуються у вигляді значних потоків осадів [31]. Така кількість сировини є достатньою для створення промислових процесів валоризації, забезпечуючи економічну доцільність впровадження відповідних біотехнологій.

Таким чином, характеристика органічних відходів харчової та біотехнологічної промисловості характеризується високою вологістю, значним вмістом органічних компонентів, легкою біорозкладністю та широким спектром потенційних біотехнологічних застосувань. Це створює наукову та практичну основу для подальшого аналізу біотехнологічних стратегій їх переробки та валоризації, що розглядається в наступних підрозділах цієї роботи [16].

3.2. Розробка узагальненої біотехнологічної стратегії валоризації

3.2.1. Обґрунтування вибору сировини для біотехнологічної валоризації

Для практичної реалізації біотехнологічної стратегії валоризації у межах даної магістерської роботи було обрано органічні відходи харчової промисловості, зокрема кавові, фруктові та овочеві відходи. Такий вибір зумовлений їхньою високою доступністю, стабільністю утворення та значним вмістом органічних сполук, придатних для біоконверсії.

Кавові відходи, зокрема відпрацьована кавова гуща, характеризуються підвищеним вмістом органічного азоту, калію, магнію, а також фенольних сполук і залишкових ліпідів. Вони містять значну кількість білкових фракцій, лігноцелюлозних компонентів та біоактивних молекул, що можуть слугувати як джерелом поживних елементів, так і субстратом для мікробного метаболізму. Наявність фенольних сполук обумовлює антиоксидантні властивості кавових відходів, що є важливим фактором при формуванні функціональних біоактивних продуктів, зокрема рідких біостимуляторів та добрив [33].

Фруктові відходи (вичавки, шкірка, некондиційна сировина) є переважно джерелом легкодоступних вуглеводів, органічних кислот, пектинових речовин та харчових волокон. Високий вміст моно- та олігосахаридів створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів у процесі ферментації, а органічні кислоти беруть участь у регуляції кислотності середовища. Крім того, фруктові відходи містять значні концентрації мікроелементів, вітамінів і поліфенольних сполук, що підвищує біологічну цінність отриманих продуктів валоризації [16, 46].

Овочеві відходи (морква, буряк, капуста та інші) доповнюють субстрат за рахунок вмісту клітковини, мінеральних солей, калію, кальцію, магнію та сполук азотного обміну. Вони характеризуються більш стабільною структурою, що забезпечує пролонговане вивільнення поживних речовин у

процесі біоконверсії. Також овочеві відходи сприяють формуванню оптимального співвідношення вуглецю до азоту (C/N), що є критично важливим параметром для ефективної мікробної ферментації [30].

Комбінування кавових, фруктових та овочевих відходів дозволяє сформувати збалансоване поживне середовище з оптимальним вмістом корисних сполук [46]. Такий підхід знижує необхідність внесення додаткових синтетичних поживних компонентів або мінеральних добавок, що позитивно впливає на економічну доцільність процесу та екологічну безпечність кінцевого продукту. З практичної точки зору це дозволяє реалізувати біотехнологічний процес у напівпромислових та пілотних умовах із мінімальними витратами на корекцію складу середовища [22, 30].

З екологічної точки зору, використання кавових, фруктових і овочевих відходів сприяє зменшенню обсягів органічних відходів, що надходять на полігони, мінімізує утворення вторинних забруднень та знижує викиди парникових газів, пов'язані з їх неконтрольованим розкладанням. Такий підхід повністю відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку, розглянутим у розділах 1 і 2 даної роботи, оскільки забезпечує перетворення відходів на продукти з доданою вартістю.

Отже, обрана комбінація кавових, фруктових та овочевих відходів є науково обґрунтованою та практично доцільною сировиною для реалізації біотехнологічних процесів валоризації. Її використання створює передумови для ефективного ферментативно-мікробного перетворення, отримання стабільних біоактивних продуктів і подальшого впровадження розробленої технологічної схеми в пілотному або напівпромисловому масштабі [46].

3.2.2. Обґрунтування вибору ферментативно-мікробної стратегії валоризації

Ефективна валоризація органічних відходів потребує комплексного біотехнологічного підходу, який забезпечує глибоку трансформацію складних біополімерів у біологічно доступні та функціонально активні сполуки. У межах даної роботи для практичної реалізації процесу обрано комбіновану ферментативно-мікробну стратегію, що поєднує попередній ферментативний гідроліз із подальшою керованою аеробною мікробною ферментацією [16].

Доцільність застосування ферментативного етапу обумовлена складною структурою вихідної сировини. Кавові, фруктові та овочеві відходи містять значну кількість целюлози, геміцелюлози, пектинових речовин і білкових комплексів, які у нативному стані є малодоступними для мікроорганізмів. Використання промислових ферментних препаратів (протеаз та целюлаз) дозволяє здійснити контрольований гідроліз макромолекул до амінокислот, пептидів, моносахаридів та органічних кислот. Це, у свою чергу, формує поживне середовище з високим ступенем біодоступності, що істотно підвищує ефективність наступної мікробної ферментації [41].

Ферментативний гідроліз у даній біотехнологічній схемі виконує не лише функцію розщеплення субстрату, але й стабілізує фізико-хімічні параметри середовища, зменшує в'язкість суспензії та забезпечує рівномірний розподіл поживних компонентів. Такий підхід є особливо важливим у пілотних та напівпромислових умовах, де необхідно мінімізувати технологічні ризики та коливання параметрів процесу [10, 22]. Після ферментативної підготовки середовища реалізується етап мікробної аеробної ферментації, який є ключовим з точки зору формування біоактивних властивостей кінцевого продукту. Для цього обрано консорціум мікроорганізмів, до складу якого входять бактерії роду *Bacillus*, мікроміцети *Trichoderma* та асоціації PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria) [16]. Такий вибір обґрунтований їх високою метаболічною активністю, здатністю синтезувати широкий спектр

біологічно активних метаболітів та доведеною ефективністю у виробництві біодобрив і біостимуляторів росту рослин.

Мікроорганізми роду *Bacillus* відзначаються здатністю продукувати фітогормони, амінокислоти, органічні кислоти та ферменти, що стимулюють ріст і розвиток рослин, а також підвищують доступність поживних елементів у ґрунті. *Trichoderma* spp. відіграють важливу роль у синтезі ферментів, стимуляції кореневої системи та покращенні стресостійкості рослин. PGPR-бактерії, у свою чергу, забезпечують фіксацію азоту, мобілізацію фосфору та індукцію системної резистентності рослин, що значно підвищує агрономічну цінність кінцевого продукту [4].

Аеробний режим ферментації з контрольованою подачею кисню обрано з огляду на потреби зазначених мікроорганізмів у високому рівні оксигенації для активного синтезу вторинних метаболітів. Підтримання температурного діапазону 28-35 °C та контроль рН забезпечують стабільність біопроцесу та відтворюваність результатів у кожному виробничому циклі. З практичної точки зору, такі параметри є технологічно досяжними та не потребують надмірних енергетичних витрат [4, 41].

Комбінування ферментативного гідролізу з мікробною ферментацією дозволяє реалізувати багатостадійний біоконверсійний процес, у якому кожен етап логічно доповнює попередній. У результаті відбувається не лише утилізація органічних відходів, а й формування рідкого біоактивного продукту, що містить комплекс біологічно цінних сполук та може бути використаний як екологічно безпечне добриво або біостимулятор росту рослин [33].

Таким чином, обрана ферментативно-мікробна стратегія валоризації є науково обґрунтованою та практично придатною для реалізації в пілотних умовах. Вона забезпечує високу ефективність перетворення органічних відходів у продукти з доданою вартістю та відповідає сучасним вимогам сталого розвитку і циркулярної біоекономіки.

3.2.3. Опис узагальненої технологічної схеми виробництва біоактивних добрив

У межах пілотного проєкту виробництво біоактивних добрив здійснюється за ферментативно-мікробною технологією, що забезпечує максимальне вилучення біологічно активних компонентів із органічних відходів та підвищує агрономічну цінність кінцевого продукту [22]. Технологічна схема включає послідовні етапи підготовки сировини, ферментативного гідролізу, мікробної ферментації, очищення та фасування продукції.

1. Подрібнення сировини.

На цьому етапі кавові, фруктові та овочеві відходи очищуються від сторонніх домішок і механічно подрібнюються до частинок розміром 2-5 мм. Подрібнення збільшує площу контакту субстрату з ферментами та мікроорганізмами, сприяє однорідності суспензії та підвищує ефективність наступних стадій біоконверсії [30].

2. Гомогенізація суспензії.

Подрібнена маса змішується з водою до утворення рівномірної суспензії з контрольованою в'язкістю. Гомогенізація забезпечує рівномірний розподіл частинок, стабільні фізико-хімічні властивості середовища та оптимальні умови для ферментації [10].

3. Пастеризація (термічна обробка).

Суспензія нагрівається до 60-80 °С і витримується 30-60 хв для зменшення кількості природної мікрофлори та інгібіторних речовин. Термічна обробка стабілізує середовище, підвищує мікробіологічну безпеку та підготовлює його для керованого біопроцесу [22].

4. Ферментація та аерація (основний біоконверсійний етап).

4.1. Ферментативний гідроліз.

У пастеризовану суспензію вводяться ферментні препарати – протеази та целюлази. Вони розщеплюють білки та складні полісахариди до амінокислот,

пептидів, моносахаридів та органічних кислот, формуючи високопоживне середовище для мікроорганізмів [41].

4.2. Мікробна ферментація.

У гідролізовану суспензію додаються інокулюми *Bacillus subtilis*, *Trichoderma spp.* та PGPR-бактерії. Ферментація триває 48-96 годин при температурі 28-35 °С та активній аерації. Мікроорганізми синтезують біологічно активні метаболіти: фітогормони, ферменти, амінокислоти, органічні кислоти та вітаміни. Аерація підтримує інтенсивний метаболізм та ефективну біоконверсію субстрату [4].

5. Центрифугування.

Після ферментації суспензія розділяється на рідку та тверду фази. Рідка фракція містить водорозчинні біоактивні сполуки, а тверда – нерозкладену органіку та біомасу. Цей етап забезпечує отримання стабільного продукту без надмірного осаду та готує його до подальшої стабілізації [16].

6. Зберігання проміжної продукції.

Очищений продукт тимчасово витримується у герметичних резервуарах, де проводиться корекція рН, стабілізація сорбіновою кислотою та контроль якості (щільність, кислотність, мікробіологічні показники). Зберігання забезпечує стандартизацію партії перед фасуванням [44].

7. Розлив і фасування.

Готовий продукт розливається у каністри або пляшки об'ємом 1-20 літрів із контролем мікробної чистоти та мінімальним доступом повітря. Фасування формує товарну форму та забезпечує стабільність і якість біоактивного добрива протягом терміну зберігання [31].

Запропонована схема дозволяє комплексно переробляти органічні відходи, поєднуючи ферментативний гідроліз і мікробну ферментацію для отримання рідкого біоактивного продукту з високим вмістом поживних та стимулюючих рост рослин речовин. Такий підхід відповідає принципам циркулярної біоекономіки та є придатним для масштабування в пілотних і напівпромислових умовах.

3.3. Техніко-економічна оцінка пілотного біотехнологічного процесу

Практична реалізація біотехнологічної валоризації органічних відходів потребує не лише наукового обґрунтування технологічної схеми, але й оцінки технічних та економічних параметрів її функціонування. Проведення техніко-економічної оцінки дозволяє визначити ресурсні потреби процесу, оцінити витрати на основні технологічні операції та проаналізувати можливість впровадження запропонованої технології у пілотному або напівпромисловому масштабі.

Пілотний біотехнологічний цикл переробки органічних відходів включає послідовні етапи підготовки сировини, ферментативного гідролізу, аеробної мікробної ферментації, механічного розділення фаз та стабілізації готового продукту. Тривалість одного виробничого циклу становить 3,5 доби.

Як основну сировину використано суміш органічних відходів харчової промисловості – кавових, фруктових та овочевих, які використовуються у рівних масових частках. Загальна маса органічної сировини становить 150 кг, до якої додається 350 л води для формування ферментаційної суспензії загальним об'ємом близько 500 л.

У результаті біоконверсії органічних компонентів та подальшого механічного розділення формується дві фракції:

- рідкий біоактивний концентрат (240-260 л);
- тверда залишкова маса (140-160 кг).

Рідка фракція використовується як біоактивне добриво, тоді як тверда залишкова маса може бути додатково застосована як субстрат для компостування або ґрунтових покращувачів. Такий матеріальний баланс демонструє високий рівень утилізації органічної сировини та мінімізацію вторинних відходів, що відповідає принципам циркулярної біоекономіки та сталого використання ресурсів.

Оцінка вартості сировини, реагентів, обладнання та енергетичних ресурсів виконана на основі аналізу відкритих ринкових джерел, зокрема

даних інтернет-магазинів хімічних реагентів, платформ електронної комерції та комерційних пропозицій постачальників біотехнологічної продукції. Розрахунки здійснено станом на 2026 рік [47, 50].

Для підвищення достовірності отриманих результатів використовувались усереднені значення цін, сформовані на основі декількох ринкових пропозицій для кожного виду компонентів. Це дозволяє мінімізувати вплив коливань цін та забезпечує наближення розрахунків до реальних умов функціонування ринку.

Вартість електроенергії прийнята на рівні середнього тарифу для промислових споживачів в Україні (4,32 грн за кВт·год), що відповідає актуальним економічним умовам досліджуваного періоду.

Слід зазначити, що наведені розрахунки мають оціночний характер та застосовуються для пілотного моделювання процесу валоризації. У разі промислового впровадження можливе уточнення економічних показників з урахуванням конкретних умов виробництва, обсягів закупівлі та регіональних особливостей.

3.3.1. Сировина та допоміжні матеріали процесу

Формування поживного середовища для ферментативно-мікробної переробки здійснюється із використанням доступних органічних відходів. У межах пілотного проєкту вартість основної сировини прийнята рівною нулю, оскільки вона може надходити від підприємств харчової промисловості або закладів громадського харчування на умовах утилізації.

Основні змінні витрати пов'язані з використанням ферментних препаратів, мікробних інокулюмів, регуляторів рН та стабілізуючих компонентів, що забезпечують інтенсивність біоконверсії та стабільність отриманого продукту (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

**Склад поживного середовища та вартість компонентів для одного циклу
пілотного біотехнологічного процесу (500 л)**

№	Компонент	Призначення	Конц., (г/л)	Кількість на цикл (500 л)	Вартість за кг або л, (грн)	Вартість на цикл, (грн)
1	Кавові відходи	Органічна основа, джерело азоту і макроелементів	100	50 кг	0	0
2	Фруктові відходи (яблука, груші)	Вуглеводи та органіка	100	50 кг	0	0
3	Овочеві відходи (морква, буряк, капуста)	Органічні речовини та макроелементи	100	50 кг	0	0
4	Вода (питна/очищ ена)	Середовище для ферментації	700	350 л	0,03	10,5
5	Alcalase (протеаза)	Ферментативна гідролізація білків	0,2	0,1 л	1800	180
6	Neutrased (целюлаза/пр отеаза)	Гідроліз вуглеводів	0,1	0,05 л	2200	110

Продовження таблиці 3.1

№	Компонент	Призначення	Конц., (г/л)	Кількість на цикл (500 л)	Вартість за кг або л, (грн)	Вартість на цикл, (грн)
7	<i>Bacillus subtilis</i> (інокулюм)	Синтез фітогормонів і амінокислот	1,0	0,5 л	2200	1100
8	<i>Trichoderma</i> <i>spp.</i> (інокулюм)	Стимулює кореневу систему, ферментативна активність	1,0	0,5 л	1800	900
9	PGPR (суміш доброзичливих бактерій)	Підвищує ріст рослин	1,0	0,5 л	1800	900
10	NaHCO ₃ (харчова сода)	Регулятор рН	0,4	0,2 кг	35	7
11	Сорбінова кислота	Консервант, стабілізація продукту	0,2	0,1 кг	600	60
12	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Мікроелемент	0,01	0,005 кг	180	0,90
13	FeSO ₄ ·7H ₂ O	Мікроелемент	0,01	0,005 кг	70	0,35
14	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	Мікроелемент	0,01	0,005 кг	110	0,55
Загальна вартість за цикл, грн:						3269,3

Розрахунок кількості компонентів виконано шляхом перерахунку заданих концентрацій (г/л) на об'єм виробничого циклу 500 л з подальшим переведенням у масові та об'ємні одиниці.

Загальна вартість реагентів і допоміжних матеріалів для одного виробничого циклу становить 3 269,3 грн. Найбільшу частку витрат формують мікробні інокулюми та ферментні препарати, які безпосередньо визначають ефективність біоконверсії органічної сировини. У разі масштабування виробництва ці витрати можуть бути знижені за рахунок використання власних маточних культур або закупівлі реагентів у промислових обсягах.

3.3.2. Лабораторне та аналітичне забезпечення процесу

Контроль якості та стабільності пілотного біотехнологічного процесу забезпечується використанням лабораторного скляного посуду та аналітичного обладнання. Лабораторні операції включають вимірювання рН середовища, оптичної щільності, мікробіологічного складу та стабільності продукту на різних етапах технологічного циклу.

Для підготовки проб та проведення лабораторних досліджень використовується стандартний скляний посуд, що забезпечує точність дозування компонентів та коректність аналітичних вимірювань (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Лабораторний скляний посуд, що використовується у пілотному виробництві

№	Скляний посуд	Кількість	Вартість, грн за 1 шт	Загальна вартість, грн
1	Мірні циліндри (100 мл)	2	173	346
2	Мірні циліндри (500 мл)	1	288	288
3	Колби Ерленмейера 250 мл	3	138	414

Продовження таблиці 3.2

№	Скляний посуд	Кількість	Вартість, грн за 1 шт	Загальна вартість, грн
4	Мірні колби (250 мл)	2	207	414
5	Склянка (бекери) 250 мл	3	92	276
6	Воронки скляні	3	115	345
7	Пробірки 20 мл	20	12	240
Загальна вартість, грн:				2 323 грн

Аналітичне обладнання дозволяє здійснювати оперативний контроль параметрів ферментації, стану мікробної культури та якості кінцевого продукту (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Аналітичне обладнання для контролю якості та стабільності процесу

№	Обладнання	Кіль- кість	Вартість, грн за 1 шт	Загальна вартість, грн	Загальна вартість за один цикл, грн	Примітки
1	Аналітичні ваги	1	15 000	15 000	14	Точне зважування реагентів
2	pH-метр	1	20 000	20 000	19	Контроль кислотності середовища

Продовження таблиці 3.3

№	Обладнання	Кількість	Вартість, грн за 1 шт	Загальна вартість, грн	Загальна вартість за один цикл, грн	Примітки
3	Спектрофото метр (UV-Vis)	1	220 000	220 000	211	Вимір оптичної щільності
4	Центрифуга	1	60 000	60 000	57	Розділення твердої та рідкої фаз
5	Інкубатор-шейкер	1	65 000	65 000	62	Культивування мікроорганізму
6	Магнітна мішалка	1	6 600	6 600	6	Приготування розчинів
7	Ламінарний бокс/шафа	1	254 000	254 000	243	Робота зі стерильними інокулюмами
8	Мікроскоп	1	87 000	87 000	83	Контроль чистоти культур
9	Автоклав	1	190 000	190 000	182	Стерилізація інструментів
10	Холодильник /морозильна камера	1	30 000	30 000	29	Зберігання проб або інокулюмів
Загальна вартість:					947 600 грн	
Загальна вартість за цикл:					906 грн	

Сумарна вартість лабораторного обладнання становить 947 600 грн, однак при розрахунку економіки процесу враховується лише умовна частка амортизації, що відповідає приблизно 906 грн на один виробничий цикл. Такий підхід є типовим для оцінки пілотних біотехнологічних процесів.

3.3.3. Технологічне обладнання пілотної лінії

Пілотна виробнича лінія включає обладнання для механічної підготовки сировини, ферментаційної обробки, розділення продукту та фасування. Основними елементами технологічної схеми є подрібнювач органічних відходів, гомогенізатор, резервуар для пастеризації, ферментатор, система аерації, центрифуга та напівавтоматична лінія розливу (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Обладнання виробничої лінії (технологічне обладнання)

№	Обладнання	Кількість	Вартість, грн за 1 шт	Загальна вартість, грн	Загальна вартість за один цикл, грн	Примітки
1	Подрібнювач	1	42 000	42 000	40	Подрібнення відходів
2	Гомогенізатор	1	98 000	98 000	94	Гомогенізація перед пастеризацією
3	Резервуар для пастеризації (1 м ³)	1	270 000	270 000	259	Нагрівання та знезараження

Продовження таблиці 3.4

№	Обладнання	Кількість	Вартість, грн за 1 шт	Загальна вартість, грн	Загальна вартість за один цикл, грн	Примітки
4	Ферментер	1	120 000	120 000	115	Гідроліз ферментами
5	Додаткові резервуари 500 л	2	50 000	100 000	96	Паралельна ферментація та змішування
6	Система аерації (компресор + дифузори)	1	36 000	36 000	34	Для аеробної мікробної ферментації
7	Центрифуга (пілотна)	1	80 000	80 000	77	Додаткове тонке очищення
8	Резервуари зберігання готового продукту (500 л)	2	22 000	44 000	42	Зберігання перед фасуванням
9	Лінія розливу (напівавтоматична)	1	110 000	110 000	106	Заповнення каністр або пляшок
Загальна вартість, грн						900 000 грн
Загальна вартість за цикл, грн:						863 грн

Загальна вартість технологічного обладнання становить 900 000 грн. При оцінці витрат на один виробничий цикл враховується часткова амортизація обладнання, яка становить приблизно 863 грн.

Вибір обладнання обумовлений його універсальністю, відносно невисокою вартістю та можливістю масштабування технологічного процесу. Запропонована схема може бути адаптована для більших виробничих об'ємів без суттєвих змін структури технології.

3.3.4. Енергетичні витрати

Енерговитрати пілотного виробництва біоактивних добрив оцінювали на основі споживання електроенергії основним технологічним обладнанням протягом одного виробничого циклу (табл. 3.5).

Розрахунок виконано за формулою:

$$W = P \times t \times n, \text{ де:}$$

W – споживана електроенергія, кВт·год;

P – потужність обладнання, кВт;

t – час роботи обладнання, год;

n – кількість одиниць обладнання.

Таблиця 3.5

Розрахунок енергоспоживання обладнання пілотної установки

№	Назва обладнання	Потужність, кВт	Час роботи, год	Кількість, шт	Енергоспоживання, кВт·год
1	Подрібнювач органічної сировини	2,0	0,5	1	1,0

Продовження таблиці 3.5

№	Назва обладнання	Потужність, кВт	Час роботи, год	Кількість, шт	Енергоспоживання, кВт·год
2	Міксер/гомогенізатор	1,5	0,5	1	0,75
3	Установка пастеризації	5,0	1,0	1	5,0
4	Ферментатор (підігрів, мішалка, автоматика)	1,0	48	1	48,0
5	Допоміжні резервуари (проміжні, 2 шт)	0,1	1,0	2	0,2
6	Система аерації (компресор)	1,0	48	1	48,0
7	Центрифуга	0,9	0,5	1	0,45
8	Резервуари зберігання готового продукту (2 шт)	0,1	1,0	2	0,2
9	Лінія розливу та фасування	1,0	0,5	1	0,5
Загальне енергоспоживання за цикл:					104,1 кВт·год

Сумарне енергоспоживання пілотної установки становить 104,1 кВт·год на один виробничий цикл. Найбільша частка енерговитрат припадає на ферментаційний етап та систему аерації, що зумовлено тривалістю процесу та необхідністю постійного підтримання аеробних умов. Підготовчі операції, термічна обробка, механічне розділення та фасування характеризуються значно нижчим рівнем енергоспоживання.

Розрахунок вартості електроенергії виконано на основі середнього тарифу для промислових споживачів в Україні станом на 2026 рік, який становить 4,32 грн за кВт·год. Даний показник є усередненим значенням на основі відкритих тарифів енергопостачальних компаній.

Витрати на енергозабезпечення одного виробничого циклу становлять приблизно 450 грн, що свідчить про помірний рівень енергетичних витрат та економічну доцільність реалізації запропонованого біотехнологічного процесу в пілотному масштабі.

3.3.5. Оцінка трудових ресурсів та виходу продукції

Для забезпечення стабільної роботи пілотного біотехнологічного виробництва передбачено мінімально необхідний склад персоналу, який забезпечує виконання основних технологічних операцій та контроль якості продукції. До складу персоналу входять біотехнолог, інженер-технолог, лаборант-аналітик та оператор фасування. Такий підбір персоналу обумовлений необхідністю безперервного контролю технологічного процесу, проведення лабораторного аналізу та обслуговування обладнання на всіх етапах виробництва. Обраний склад є мінімально достатнім для функціонування піотної установки та не передбачає дублювання функцій. Зокрема, інженер-технолог поєднує функції контролю виробничого процесу та технічного обслуговування обладнання, що дозволяє оптимізувати витрати на персонал без зниження ефективності виробництва.

Оцінка витрат на трудові ресурси виконана на основі середніх ринкових показників заробітної плати в Україні станом на 2026 рік. Зокрема, середня заробітна плата біотехнолога становить близько 35 000 грн/міс, інженера-технолога – 30 000 грн/міс, лаборанта – 20 000 грн/міс, оператора – 25 000 грн/міс. Загальні витрати на оплату праці складають орієнтовно 110 000 грн на місяць. З урахуванням тривалості одного виробничого

циклу (3,5 доби) витрати на персонал у розрахунку на один цикл становлять 12 800-12 900 грн. Розрахунок виконано шляхом визначення добових витрат на оплату праці з подальшим множенням на тривалість виробничого циклу.

У результаті одного виробничого циклу отримують приблизно 240-260 л рідкого біоактивного продукту. Готовий продукт фасується у каністри об'ємом 10 л, що відповідає 24-26 товарним одиницям продукції за цикл. Такий обсяг виробництва є типовим для пілотних біотехнологічних установок і дозволяє оцінити ефективність технології перед переходом до промислового масштабу.

Проведена техніко-економічна оцінка процесу показує, що основні змінні витрати пов'язані з використанням ферментних препаратів, мікробних інокулюмів та енергетичних ресурсів. Водночас застосування органічних відходів як основної сировини дозволяє суттєво знизити загальну собівартість виробництва та підвищити ресурсну ефективність процесу.

Отримання 240-260 л біоактивного продукту за цикл при відносно невисоких витратах на реагенти та енергоспоживання свідчить про потенційну економічну доцільність запропонованого біотехнологічного процесу. Використання доступної вторинної сировини, помірні енергетичні витрати та універсальність технологічного обладнання створюють передумови для подальшого масштабування технології та її впровадження у регіональних біотехнологічних виробництвах.

3.4. Практичний прогноз масштабування та впровадження

Розроблена пілотна технологія біотехнологічної переробки органічних відходів з отриманням біоактивних продуктів демонструє потенціал для подальшого масштабування та практичного впровадження у виробничих умовах. Застосування ферментативно-мікробної обробки дозволяє ефективно перетворювати органічну сировину у біологічно активні продукти, які можуть

використовуватися у сільському господарстві як біоактивні добрива або стимулятори росту рослин.

Однією з ключових переваг запропонованої технології є використання вторинної органічної сировини, зокрема відходів харчової промисловості та громадського харчування (кавові, фруктові та овочеві відходи). Такі відходи утворюються у значних обсягах і потребують ефективних методів утилізації. Біотехнологічна переробка дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження на довкілля, але й отримати корисний продукт із доданою вартістю.

Результати техніко-економічної оцінки показали, що пілотна установка об'ємом 500 л здатна забезпечувати отримання приблизно 240-260 л рідкого біоактивного продукту за один виробничий цикл. При масштабуванні технології до ферментерів більшого об'єму (наприклад 2-5 м³) обсяг виробництва може бути пропорційно збільшений без суттєвих змін основних технологічних етапів процесу. Основними операціями залишаються підготовка сировини, ферментативний гідроліз, мікробна ферментація, розділення фаз та фасування готової продукції.

Важливою перевагою технології є відносно невисокі енергетичні витрати, оскільки основне споживання електроенергії пов'язане з роботою ферментера та системи аерації. При цьому значна частина обладнання має універсальний характер і широко використовується у біотехнологічних виробництвах, що спрощує інтеграцію технології у вже існуючу інфраструктуру підприємств.

Крім економічних аспектів, запропонована технологія має важливе екологічне значення. Біотехнологічна утилізація органічних відходів сприяє зменшенню обсягів захоронення біологічних відходів на полігонах, зниженню утворення парникових газів та більш раціональному використанню біологічних ресурсів. Отримані біоактивні продукти можуть використовуватися як елемент екологічно орієнтованих систем землеробства, що відповідає сучасним тенденціям розвитку циркулярної біоекономіки.

Практичне впровадження запропонованої технології можливе на базі підприємств харчової промисловості, агропромислових комплексів або спеціалізованих біотехнологічних установок з переробки органічних відходів. Використання локальних джерел сировини дозволяє знизити транспортні витрати та забезпечити стабільність постачання субстрату для ферментації.

Таким чином, розроблена технологія біотехнологічної валоризації органічних відходів має перспективи подальшого розвитку та масштабування, поєднуючи економічну доцільність, ресурсну ефективність та екологічну безпечність. Запропонований пілотний проект може слугувати основою для створення малих або середніх біотехнологічних виробництв, орієнтованих на переробку органічних відходів та виробництво біоактивних продуктів для аграрного сектору.

ПІДСУМКИ

Таким чином, було досліджено сучасні біотехнологічні стратегії, спрямовані на переробку та валоризацію відходів різних галузей промисловості, а також оцінено їх потенціал для подальшого розвитку та впровадження у межах циркулярної біоекономіки.

1. Проаналізовано сучасний стан технологій переробки та валоризації промислових відходів із застосуванням біотехнологічних підходів. Встановлено, що використання мікробних культур, ферментативних процесів, біоконверсії та ферментаційних технологій дозволяє ефективно трансформувати відходи у біологічно активні сполуки, біодобрива, біоенергетичні продукти та інші цінні біопродукти.
2. Виявлено та проаналізовано основні тенденції розвитку даного біотехнологічного напрямку у світовому просторі. Показано, що сучасні дослідження та промислові розробки спрямовані на інтеграцію технологій біоконверсії відходів у концепцію циркулярної економіки, що забезпечує раціональне використання ресурсів, зменшення екологічного навантаження та формування нових ринків біотехнологічної продукції.
3. Спрогнозовано та обґрунтовано найбільш перспективні технологічні рішення у сфері біотехнологічної переробки відходів. Визначено, що найбільш привабливими напрямками розвитку є використання ферментаційних процесів, біокаталізу, інженерії мікроорганізмів та інтегрованих біотехнологічних платформ, які дозволяють отримувати високододану вартість продуктів із вторинної сировини та сприяють розширенню ринку біотехнологічних інновацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aileni, M. (2022). Environment sustainability and role of biotechnology. *Innovations in Environmental Biotechnology*, [online] pp. 21–64. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4445-0_2 [Accessed 10 May 2022].
2. Albureikan, M. (2024). Enhancement of plant growth with plant-based compost and the heterotrophic *Azotobacter* and *Streptomyces* inoculation under greenhouse conditions. *J Pure Appl Microbiol*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.3.13> [Accessed 30 Apr. 2024].
3. Arias, A., Feijoo, G. and Moreira, M. (2023). Biorefineries as a driver for sustainability: Key aspects, actual development and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137925> [Accessed 15 Sep. 2023].
4. Backer, R., Rokem, J., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., and Smith, D. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473> [Accessed 23 Oct. 2018].
5. Betoret, N., Betoret, E. and Glicerina, V. (2024). Valorization and utilization of food wastes and by-products: Recent trends, innovative technologies, and sustainability challenges. *Foods*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods13010009> [Accessed 07 Dec. 2024].
6. Boruah, B. and Ray, S. (2024). Current progress in the valorization of food industrial by-products for the development of functional food products. *Food Science and Applied Biotechnology*, [online] pp. 289–317. Available at: <https://doi.org/10.30721/fsab2024.v7.i2.349> [Accessed 10 Oct. 2024].
7. Business Research Insights (2025). *Global Waste Valorization Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Biomass Waste, Chemical Waste & Metal Waste), By Application (Municipal Waste & Industrial Waste), Waste Valorization Market (ETIA, Perseo Biotechnology, Hubcycle & UnBound*

- Chemicals) and Regional Forecast to 2033*, [online]. Available at: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/waste-valorization-market-116445> [Accessed 03 Mar. 2025].
8. Cansado, I., Mourao, P., Castanheiro, J., Geraldo, P., Roman Suero, S. and Ledesma Cano, B. (2025). A review of the biomass valorization hierarchy. *Sustainability*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/su17010335> [Accessed 02 Jan. 2025].
 9. Caponio, F., Piga, A. and Poiana, M. (2022). Valorization of Food Processing By-Products. *Foods*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods11203246> [Accessed 08 Oct. 2022].
 10. Chauhan, A., Islam, F., Imran, A., Ikram, A., Zahoor, T., Khurshid, S. and Shah, M. (2023). Biotechnological approaches for the valorization of agro-industrial waste into value-added products. *Food Science & Nutrition*, [online] pp. 6220–6236. Available at: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3546> [Accessed 11 Jul. 2023].
 11. Civelek Yoruklu, H., Oguz Koroglu, E., Demir, A. and Ozkaya, B. (2019). The electromotive-induced regulation of anaerobic fermentation: Electrofermentation. *Biomass, biofuels and biochemical*, [online] pp. 739–756. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00030-3> [Accessed 11 Apr. 2019].
 12. Credence Research (2024). *Waste and Biomass Valorization Market by Type (Organic Waste, Agricultural Waste, Forestry Waste, Industrial Waste); By Technology (Anaerobic Digestion, Gasification, Pyrolysis, Fermentation); By End-User (Energy Producers, Agricultural Companies, Food and Beverage Industries, Municipal Authorities) – Growth, Share, Opportunities & Competitive Analysis, 2024 – 2032*, [online]. Available at: <https://www.credenceresearch.com/report/waste-and-biomass-valorization-market> [Accessed 26 Oct. 2024].
 13. DataEthos (2024). *Waste Valorization Market Emerging Regional Dynamics Shaping Size Insights*, [online]. Available at:

- <https://www.linkedin.com/pulse/waste-valorization-market-emerging-regional-dynamics-shaping-mqe0c/> [Accessed 15 Dec. 2024].
14. Ezeorba, T., Okeke, E., Mayel, M., Nwuche, C. and Ezike, T. (2024). Recent advances in biotechnological valorization of agro-food wastes (AFW): Optimizing integrated approaches for sustainable biorefinery and circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101823> [Accessed 09 Jun. 2024].
 15. Fagundes, V., Freitag, J., Simon, V. and Colla, L. (2024). Enzymatic hydrolysis of food waste for bioethanol production. *Revista Brasileira de Ciencias Ambientais*. Available at: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781978> [Accessed 25 Jun. 2024].
 16. Faria, D., Carvalho, A. and Conte-Junior, C. (2023). Valorization of fermented food wastes and byproducts: Bioactive and valuable compounds, bioproduct synthesis, and applications. *Fermentation*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/fermentation9100920> [Accessed 22 Oct. 2023].
 17. Firstgree (2023). *Current trends and innovations in waste management for a more sustainable future*, [online]. Available at: <https://firstgreen.co/current-trends-and-innovations-in-waste-management-for-a-more-sustainable-future/> [Accessed 25 May 2023].
 18. Fritsch, C., Staebler, A., Happel, A., Cubero Marquez, M. A., Aguilo-Aguayo, I., Abadias, M., Gallur, M., Cigognini, I. M., Montanari, A., Lopez, M. J., Suarez-Estrella, F., Brunton, N., Luengo, E., Sisti, L., Ferri, M. and Belotti, G. (2017). Processing, valorization and application of bio-waste derived compounds from potato, tomato, olive and cereals: A review. *Sustainability*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/su9081492> [Accessed 17 Aug. 2017].
 19. Gomez-Garcia, R., Campos, D., Aguilar, C., Madureira, A. and Pintado, M. (2021). Valorisation of food agro-industrial by-products: From the past to the present and perspectives. *Journal of Environmental Management*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113571> [Accessed 01 Dec. 2021].

20. Gomez-Garcia, R., Campos, D., Aguilar, C., Madureira, A. and Pintado, M. (2021). Biological protein precipitation: A green process for the extraction of cucumisin from melon (*Cucumis melo L. inodorus*) by-products. *Food Hydrocolloids*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106650> [Accessed 02 Feb. 2021].
21. Laureti, L., Costantiello, A., Anobile, F., Leogrande, A. and Magazzino, C. (2024). Waste management and innovation: Insights from Europe. *Recycling*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/recycling9050082> [Accessed 17 Sep. 2024].
22. Liu, Z., de Souza, T., Holland, B., Dunshea, F., Barrow, C. and Suleria, H. (2023). Valorization of food waste to produce value-added products based on its bioactive compounds. *Processes*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr11030840> [Accessed 10 Mar. 2023].
23. Mallek-Ayadi, S., Bahloul, N. and Kechaou, N. (2017). Characterization, phenolic compounds and functional properties of *Cucumis melo L.* peels. *Food Chemistry*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.117> [Accessed 15 Apr. 2017].
24. Manea, E., Bumbac, C., Dinu, L., Bumbac, M. and Nicolescu, C. (2024). Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: Current practices and potential improvements. *Sustainability*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16156329> [Accessed 22 Jul. 2024].
25. Market Research Future (2025). *Opportunities in Waste Valorization Market 2025–2033: Waste Valorization by Application (Municipal Waste, Industrial Waste), by Types (Biomass Waste, Chemical Waste, Metal Waste, Others), by Region*, [online]. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/waste-valorization-market-emerging-regional-dynamics-shaping-mqe0c/> [Accessed 03 Apr. 2025].
26. Melitos, G., Voulkopoulos, X. and Zabaniotou, A. (2021). Waste to sustainable biohydrogen production via photo-fermentation and biophotolysis – A systematic review. *Renewable Energy, Environment and Sustainability*, [online]. Available

- at: https://www.rees-journal.org/articles/rees/full_html/2021/01/rees210064/rees210064.html
[Accessed 05 Nov. 2021].
27. Mishra, B., Mohanta, Y., Reddy, C., Reddy, S., Mandal, S., Yadavalli, R. and Sarma, H. (2023). Valorization of agro-industrial biowaste to biomaterials: An innovative circular bioeconomy approach. *Circular Economy*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100050> [Accessed 12 Sep. 2023].
28. Moonsamy, T., Rajauria, G., Priyadarshini, A. and Jansen, M. (2024). Food waste: Analysis of the complex and variable composition of a promising feedstock for valorisation. *Food and Bioproducts Processing*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.08.012> [Accessed 11 Dec. 2024].
29. Nikolausz, M. and Kretzschmar, J. (2020). Anaerobic Digestion in the 21st Century. *Bioengineering (Basel, Switzerland)*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/bioengineering7040157> [Accessed 02 Dec. 2020].
30. Nirmal, N., Khanashyam, A., Mundanat, A., and Panthakumar, K. (2023). Valorization of fruit waste for bioactive compounds and their applications in the food industry. *Foods*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods12030556> [Accessed 27 Jan. 2023].
31. Nosova, A., Samuilova, E. and Olekhnovich, R. (2025). Food wastes as valuable resources producing agricultural fertilizers: A comprehensive review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00266-x> [Accessed 08 Sep. 2025].
32. Pal, P., Singh, A., Srivastava, R., Rathore, S., Sahoo, U., Subudhi, S., Sarangi, P. and Prus, P. (2024). Circular bioeconomy in action: Transforming food wastes into renewable food resources. *Foods*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods13183007> [Accessed 20 Sep. 2024].
33. Parra-Pacheco, B., Cruz-Moreno, B., Aguirre-Becerra, H., Garcia-Trejo, J. and Feregrino-Perez, A. (2024). Bioactive compounds from organic waste.

- Molecules*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules29102243> [Accessed 10 May 2024].
34. Philp, J. and Winickoff, D. (2018). Realising the circular bioeconomy. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1787/31bb2345-en> [Accessed 27 Nov. 2018].
35. Popielarz, D., Farkas, P. and Bzducha-Wrobel, A. (2025). Current directions of selected plant-origin wastes' valorization in biotechnology of food additives and other important chemicals. *Foods*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods14060954> [Accessed 07 Mar. 2025].
36. Precedence Research (2025). *Waste to Energy Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*, [online]. Available at: <https://www.precedenceresearch.com/waste-to-energy-market> [Accessed 14 Jan. 2025].
37. Rajaonison, A., Andriatsitohaina Rabesahala, I. and Rakotondramiarana, H. (2020). Recent advance in anaerobic co-digestion technology: a review. *Modern Applied Science*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.5539/mas.v14n6p90> [Accessed 10 Apr. 2020].
38. Rajendran, N., Gurunathan, B., Han, J., Krishna, S., Ananth, A., Venugopal, K. and Sherly Priyanka, R. (2021). Recent advances in valorization of organic municipal waste into energy using biorefinery approach, environment and economic analysis. *Bioresource Technology*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125498> [Accessed 29 Oct. 2021].
39. ReFED. (2022). *Producers: Solutions for food waste on farms*, [online]. Available at: <https://refed.org/stakeholders/producers/> [Accessed 30 Jan. 2022].
40. Rene, E., Sarangi, P., Sanchez I Nogue, V., Schnurer, A. and Salvachua, D. (2023). Current trends in waste valorization. *Microbial biotechnology*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14198> [Accessed 21 Dec. 2023].
41. Sabater, C., Ruiz, L., Delgado, S., Ruas-Madiedo, P. and Margolles, A. (2020). Valorization of vegetable food waste and by-products through fermentation

- processes. *Frontiers in Microbiology*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.581997> [Accessed 20 Oct. 2020].
42. Sahay, S. (2022). Chapter 10 – Deconstruction of lignocelluloses: Potential biological approaches. *Handbook of Biofuels*, [online] pp. 207–232. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822810-4.00010-5> [Accessed 05 Nov. 2022].
43. Sajid, M., Akram, A., Sajjad, S., Siddique, T. and Arshad, M. (2023). Biological waste management. *Advances and challenges in hazardous waste management*, [online] pp. 100–326. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1003266> [Accessed 18 Sep. 2023].
44. Sarkar, A., Banerjee, S. and Mondal, P. (2025). A comprehensive review of food waste: Composition, current management and valorization into bioproducts. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10163-024-02153-9> [Accessed 28 Dec. 2025].
45. Sarker, A., Ahmmed, R., Ahsan, S., Rana, J., Ghosh, M. and Nandi, R. (2024). A comprehensive review of food waste valorization for the sustainable management of global food waste. *Sustainable Food Technology*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1039/D3FB00156C> [Accessed 13 Nov. 2024].
46. Sharma, M., Usmani, Z., Gupta, V. and Bhat, R. (2021). Valorization of fruits and vegetable wastes and by-products to produce natural pigments. *Critical reviews in biotechnology*, [online] pp. 535–563. Available at: <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1873240> [Accessed 12 Jun. 2021].
47. *Sigma-Aldrich*. Available at: <https://www.sigmaaldrich.com> [Accessed: 10 March 2025].
48. Singh, R., Jain, R., Soni, P., de los Santos-Villalobos, S., Chattaraj, S., Roy, D., Mitra, D. and Gaur, A. (2024). Graphing the Green Route: Enzymatic Hydrolysis in Sustainable Decomposition. *Current Research in Microbial Sciences*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100281> [Accessed 18 Nov. 2024].
49. Sokac, T., Valinger, D., Benkovic, M., Jurina, T., Gajdos Kljusuric, J., Radojicic Redovnikovic, I. and Jurinjak Tusek, A. (2022). Application of optimization and

- modeling for the composting process enhancement. *Processes*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr10020229> [Accessed 24 Jan. 2022].
50. *Thermo Fisher Scientific*. Available at: <https://www.thermofisher.com> [Accessed: 10 March 2025].
51. Tsegaye, B., Jaiswal, S. and Jaiswal, A. (2021). Food waste biorefinery: Pathway towards circular bioeconomy. *Foods*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods10061174> [Accessed 21 May 2021].
52. Urbanite, T. (2024). Future trends in waste management for urban development. *Theo Urbanite*, [online]. Available at: <https://urbanvibe-solutions.museglove.com/articles/future-trends-waste-management-urban-development/> [Accessed 12 Dec. 2025].
53. USDA. (2022). *Food waste FAQs*, [online]. Available at: <https://www.usda.gov/foodwaste/faqs> [Accessed 30 Jun. 2022].
54. Veluru, S. and Seeram, R. (2024). Biotechnological approaches: Degradation and valorization of waste plastic to promote the circular economy. *Circular Economy*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cec.2024.100077> [Accessed 01 Mar. 2024].
55. Yang, Y., Xu, J., Guo, Y., Wang, X., Xiao, L. and Zhou, J. (2022). Biodegradation of lignin into low-molecular-weight oligomers by multicopper laccase-mimicking nanozymes of the Cu/GMP complex at room temperature. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, [online]. Available at: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08679> [Accessed 19 Apr. 2022].