

Аналіз виробництва біогазу та перспективи розвитку біогазових технологій в Україні

Анотація. Актуальність цього дослідження зумовлена тим, що з роками тенденція пошуку нових видів сировини і технологій для їх переробки в біогаз стрімко зростає. До переваг у його виробництві схиляються не лише в європейських країнах, а й у всесвітніх масштабах. Для України розвиток інфраструктури та детальне дослідження цієї галузі згодом стане необхідним стимулом для відбудови економіки в післявоєнний час. Метою роботи є проведення аналізу потенціалу біомаси опалого листя для виробництва біогазу, враховуючи можливості технологічного розвитку даної сфери в Україні. Для досягнення поставленої мети застосовано кілька методів та підходів. Зокрема, було вивчено фізико-хімічні основи процесу анаеробного бродіння органіки для отримання біогазу. Також здійснювалась розробка математичної моделі процесу отримання біогазу в реакторі з опалого листя. І на сам кінець, проведено розрахунок економічної ефективності застосування біогазової установки для утилізації опалого листя в біореакторі. Підсумовуючи основні результати, можна виділити розробку патентно-захисної конструкції біореактора, інженерної методики та математичної моделі розрахунку метантанку для виробництва біогазу з опалого листя. Передусім було проаналізовано потенціал біомаси рослинного походження для виробництва біогазу і це привело до висновку, що застосування опалого листя є перспективним напрямком, проте значні переваги використання сировинної бази ігноруються. Однією з основних екологічних проблем української держави залишається утилізація опалого листя та іншої органіки рослинного походження. В той же час, проведене дослідження продукує не лише ряд вирішень цього питання, а й перетворює проблему на економічно вигідне рішення і нівелює всі екологічно не виправдані методи переробки

Ключові слова: газгольдер; анаеробне бродіння; органічні відходи; сировина; біореактор

Вступ

Вивчення біогазових технологій створить потужний поштовх для всього цивілізованого світу у переході на відновлювальні джерела енергії, оскільки виготовлення біогазу полягає в переробці відходів органічного походження. При цьому вся сировинна база є досить різноманітною і за звичайних умов є абсолютно не задіяною, а при розкладанні у звичному середовищі здійснює негативний екологічний вплив. На відміну від вичерпних джерел, таких як нафта або вугілля, застосування сільськогосподарських залишків, харчових відходів та стічних вод, сприятиме переходу до більш стійкого енергетичного сектора.

Утилізація органічних відходів і їх вдала переробка дозволить вирішити цілий ряд екологічних питань, тісно пов'язаних з глобальним потеплінням, прояви якого все з більшою частотою прослідковуються на планеті. В першу чергу, активне використання і встановлення біогазових установок сприятиме зниженню викидів парникових газів, а саме – метану. Це злякмісне утворення спостерігається при природному розкладі органічних матеріалів. Застосування біогазових технологій, які захоплюють та використовують метан, може значно скоротити його викиди в атмосферу, сприяючи зменшенню парникового ефекту. З іншого боку, розвиток таких технологій дозволяє ефективно використовувати органічні відходи, які раніше б просто викидалися або підлягали довгому процесу природного розкладу. Замість цього, органіку можна перетворити на цінний ресурс – біогаз і органічні добрива. Це сприяє зменшенню відходів, покращенню управління залишками сільськогосподарської діяльності та забезпеченню сталого розвитку.

Аналіз останніх публікацій, що вже займались дослідженнями схожих аспектів у цій галузі, допоміг краще розібратись у темі, а також знайти проблеми які потребують додаткового та більш ретельного вивчення. У публікації N. Pryshliak (2019) зазначається, що

Індія посідає важливе місце серед досліджень, розробок та поширення технологій відновлюваної енергетики. Виробництво біогазу виявилось перспективною технологією для переробки в енергію відходів сільськогосподарського походження, включно з тваринницькими, промисловими і комунальними. У 2017 році споживання газу населенням України становило 11.2 млрд м³, тоді як потенційна цінність виробництва біогазу з відходів тваринництва становить 1.5 млрд м³ (13% від усього спожитого населенням).

За словами Y. Gontaruk (2022), враховуючи від'ємне торговельне сальдо України та великий потенціал країни в аграрному секторі, ситуацію можна покращити, зосередившись на виробництві біогазу з сільськогосподарських відходів. Одним з основних виробників біогазу можуть бути цукрові заводи, виробництво яких можна реструктурувати шляхом будівництва біогазових установок. Якщо побічні продукти цукрових заводів будуть повністю перероблені, вони могли б виробляти близько 790 млн м³ на основі їхньої потужності у 2020 році, тобто в результаті 473.7 млн м³ біометану. Це дозволило б скоротити імпорт природного газу та забезпечити цукрові заводи власним джерелом енергії.

На думку L. Sakun *et al.* (2020) найбільш продуктивними видами сировини для біогазових електростанцій є відходи фермерських господарств та сільськогосподарських підприємств (силос, жом, гній, підстилка тощо), стічні води та побутові відходи зі звалищ та полігонів. Україна має великий потенціал завдяки високим темпам розвитку та низькій насиченості ринку сільського господарства, яке є основним джерелом біоенергетичної сировини.

Як зазначають D. Tokarchuk *et al.* (2020), застосування біогазових установок в Україні є дієвим для вирішення проблем утилізації відходів, у тому числі рослинництва, покращення екологічної ситуації, підвищення родючості ґрунтів, зниження енергозалежності та розвитку економіки локально. Окрім того, існує значна група сировини в перспективі застосування для видобутку біогазу, що складається з свіжотрав'я, листви з буряку, трав'яного силосу, кукурудзи та зернових, вихідна частка метану з яких складає від 270 до 330 л/кг.

Публікація M.K. Devi *et al.* (2022) присвячена огляду останніх досягнень у виробництві біогазу з використанням агропромислових відходів. У роботі розглядаються техніко-економічні аспекти даного процесу. Біогаз, вироблений з агропромислових відходів, може зменшити викиди парникових газів, кумулятивний енергетичний попит та проблеми навколишнього середовища. Під час виробництва біогазу до реактора додаються деякі добавки для покращення процесу виробництва біогазу.

Європейські науковці A. Sobczak *et al.* (2022) розглянули економічні умови для виробництва біогазу на прикладі Польщі та Німеччини. Сільськогосподарські біогазові установки, які були побудовані в Західній Європі, зокрема в Німеччині, протягом понад 20 років, були розроблені для використання субстратів, отриманих з цільових культур, головним чином кукурудзи. На сьогоднішній день тенденції змінилися — ціна на технології, що дозволяють виробляти газ переважно з відходів агрохарчової промисловості, є високою. Загалом, нові установки будуть сучаснішими і краще відповідатимуть цілям екологічної політики Європейського Союзу.

Метою цієї роботи було дослідження особливостей утилізації опалого листя дерев та виробництва з нього біогазу, як альтернативного джерела енергії, а також розробка необхідних технологій для успішного поширення індивідуального біогазового устаткування в межах України.

Матеріали та методи

Методологічною основою досліджуваної теми було застосування теоретичних та експериментальних закономірностей в біохімічних процесах анаеробного бродіння. Під час багатоступеневого процесу бродіння органічних сполук відбувається поступове руйнування вуглецевих зв'язків за рахунок взаємодії з різними групами мікроорганізмів.

В процесі дослідження біогазового виробництва важливим аспектом є вивчення матеріалів, що залучені у досліджуваний об'єкт. Саме тому для глибшого аналізу було проведено порівняння складових різних видів органічних відходів, що врешті стануть

необхідною сировинною базою для виготовлення альтернативного джерела енергії, а саме, біогазу. Зокрема, розглядалась сировина зібрана на основі відходів господарства, залишків рослинності, тваринного перегною, а також інші органічні продукти у вигляді опалого листя, трави, тирси. Як об'єкт дослідження для повного технологічного огляду, було описано біогазову установку. Тип установки базується на анаеробному процесі бродіння, який відбувається в спеціальному реакторі. Анаеробний реактор виглядає як закритий контейнер, в якому створюються оптимальні умови для розкладу органічних речовин мікроорганізмами без доступу повітря. Після процесу ферментації біогаз, що складається переважно з метану та вуглекислого газу, збирається у реакторі та подається до системи збору, де зберігається у спеціальних контейнерах, газгольдерах, де він може бути використаний пізніше для виробництва енергії або інших цілей.

У даному дослідженні біогазу було використано такі теоретичні методи наукового пізнання: аналіз теоретичних моделей, системний аналіз, оптимізаційні методи, кінетичне моделювання, геномна секвенція, газохроматографія та термодинамічне моделювання. Аналізуючи різні теоретичні моделі, вдалось отримати уявлення про процеси, що відбуваються у біогазових установках. При цьому, для більш точних результатів, було застосовано математичні моделі, фізико-хімічні розрахунки та аналітичні методи. Системний аналіз дозволив дослідити виробничі процеси з точки зору енергетичного та масового балансу, а також оцінити ефективність системи та взаємозв'язки між компонентами. Його застосування включало в себе аналіз енергетичного і масового балансу, а також оцінювання щодо ефективності системи та взаємозв'язки між різними її компонентами. Метод оптимізації щодо параметрів процесу, застосовано у виведенні оптимального режиму роботи та максимізації виробництва біогазу. Кінетичне моделювання допомагає прогнозувати швидкість та ефективність біологічних процесів залежно від досліджуваних параметрів. В цьому дослідженні, воно залучалось при розробці математичних моделей, що в своїй суті описували кінетику біологічних процесів, а саме ферментацію та метаногенез у біогазових установках. Геномна секвенція дозволяє вивчати мікроорганізми, що беруть участь у біогазовому процесі. Завдяки цьому методу вдалось ідентифікувати та категоризувати мікробні спільноти та досліджувати їх функціональну роль у процесі біогазу. Газохроматографію (ГХ) використано для аналізу складу біогазу і контролю якості виробництва. У цій роботі було досліджено вміст таких газів: метан, вуглекислий газ, водень. Термодинамічне моделювання з використанням термодинамічних моделей допомогло вивчати теплові параметри та енергетичну ефективність біогазових установок, а також умови оптимального теплового балансу у біогазових установках.

Результати

Ключовим моментом, що впливає на швидкість анаеробної ферментації, є перетворення оцтової кислоти в метан під час розкладання полімервмісних відходів, обмежується все стадією гідролізу. На Рисунку 1 наведено схему метаногенезу, на якій відображено розкладання органічних речовин.

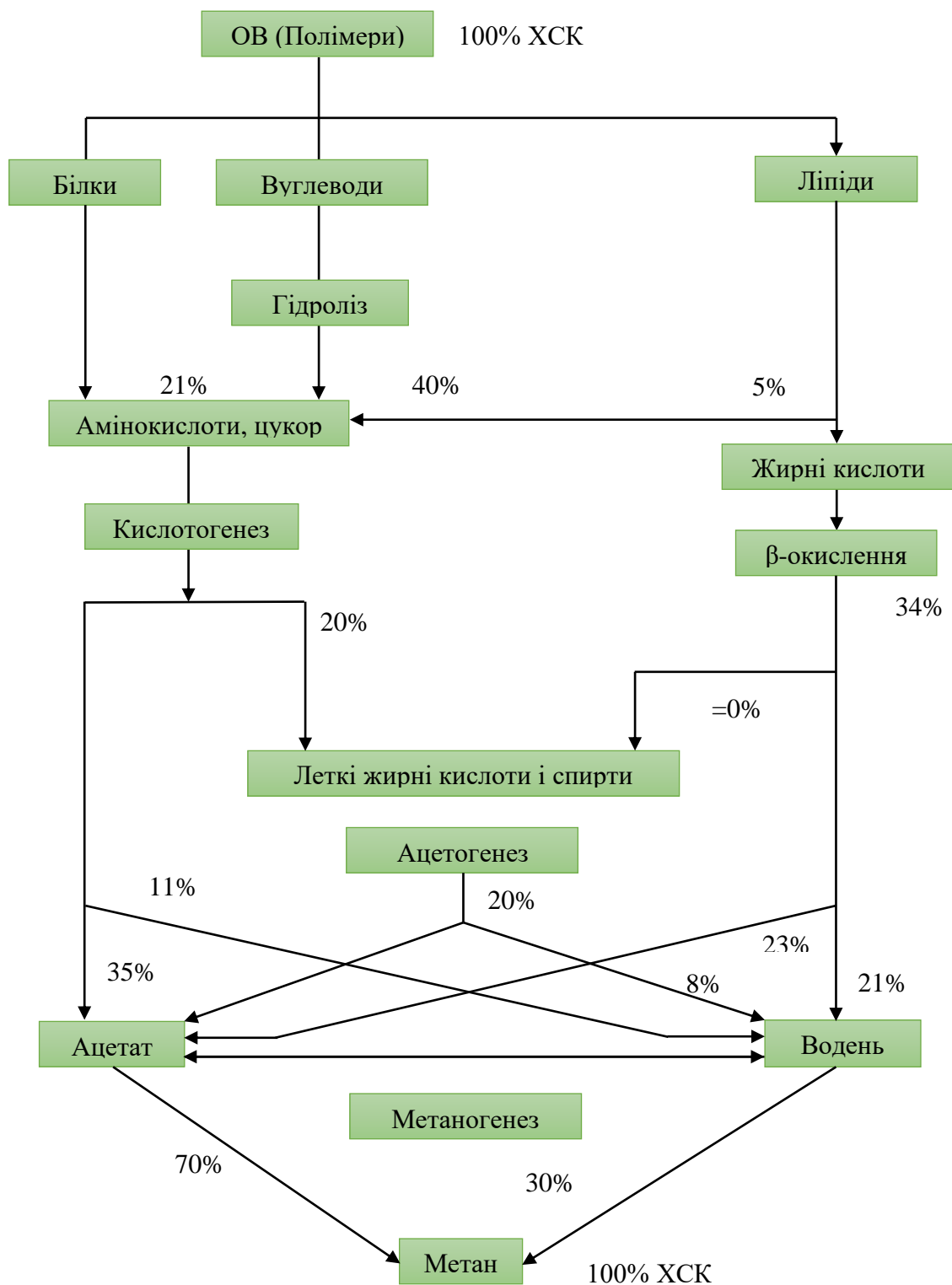


Рисунок 1. Повна схема метаногенезу

Джерело: XCK – хімічне споживання кисню

Джерело: розроблено авторами

Для здійснення усього складного процесу перетворень залучаються цілі сотні видів мікроорганізмів, при цьому головна роль залишається за бактеріями. Кількісний та якісний склад мікрофлори значною мірою залежить від складу зброженої органічної речовини та умов навколишнього середовища. Однак, переважають гідролітична, бродильна, синтетична та метаногенна мікрофлори, які послідовно здійснюють вищезазначені стадії анаеробного бродіння. В ході досліджень цього процесу і проектувань моделей установок,

використовуються емпіричні моделі процесу, що засновані на мікробній кінетиці та рівняннях теорії гомеостату.

Модель Моно вважається однією з найвідоміших. Вона відображає питому швидкість росту мікроорганізмів і період напіврозпаду органічної речовини, які залежать від багатьох умов процесу ферментації (1):

$$\frac{dx}{dl} = \frac{P_{max} \cdot X \cdot L}{K_1 + L}; \frac{dl}{dt} = \frac{-P_{max} \cdot X \cdot L}{y(K_d + L)}, \quad (1)$$

де $y = dx/dt$ – коефіцієнт перетворення маси в біоматеріал; dx/dl – приріст мікроорганізмів, доба⁻¹; X – щільність мікробної популяції, кг/м³; L – насиченість субстрату, кг/м; dl/dt – зміна щільності біомаси, доба⁻¹; P_{max} – найвища швидкість розмноження мікроорганізмів, доба⁻¹; K_1 – поріг напівнасичення концентрації субстрату, при якому швидкість процесу досягає половини максимального рівня; K_d – показник розкладу біоматеріалу.

Наведена модель має обмеження в роботі з різними типами субстратів. Ще однією спробою математичного опису процесу метанового бродіння є модель, представлена Муянгом (2):

$$P = \frac{L}{1 + 10^{(pK-pH)}} \cdot \left(\alpha - \beta \frac{K_\tau}{1 + K_\tau} \right) \cdot \frac{\text{Нм}^3}{\text{м}^3}, \quad (2)$$

де P – питомий показник виведення біогазу; L – перелік початкових органічних сполук, кг; K_τ – період повного взаємообміну початкового матеріалу, доба; α, β – коефіцієнти, які залежать від характеру вуглеводної складової, типу субстратів і вмісту органічного азоту у відходах; pK і pH – сталі, залежні від температурного режиму, доба⁻¹

Наведена вище модель Муянга демонструє вплив органічного складу вихідного субстрату на інтенсивність процесу ферментації шляхом розрізнення вуглеводневої фракції та вмісту органічних сполук азоту. Для ширшого класу вхідних субстратів, з врахуванням об'ємної швидкості біогазу та суттєвих параметрів процесу метанової ферментації, застосовується модель Канто (3):

$$V = \frac{B_0 \cdot S}{T} \left(1 - \frac{K}{\mu \cdot T - 1 + K} \right) \cdot \frac{\text{Нм}^3}{\text{м}^3}, \quad (3)$$

де V – швидкість вихідного об'єму біогазу, м³/(м³·доба); B_0 – максимальна кількість випуску біогазу з одиниці органічної речовини встановленого складу після нескінченної тривалості експозиції, м³/кг; S – концентрація органіки у вихідному матеріалі, кг/м; T – час експозиції, доба; μ – найбільший приріст мікроорганізмів при процесі зброджування, доба⁻¹; K – кінетичність.

Найвищий приріст мікроорганізмів (μ) описується лінійною залежністю температурних значень від 30 до 60 °С. У своїх дослідженнях Хасімото вивів емпіричну формулу, яка описує залежність температури процесу від кінетичного параметра K та часу витримки при режимах, що передбачають толерантний (T=45 °С) і термофільний (T=60 °С) режими (4):

$$K = [-0.95 - 0.51 + 0.01(T) + 0.0004(T^2)]. \quad (4)$$

Розрахунок виходу біогазу по моделі Хасімото можна визначити по формулі (5):

$$\gamma \cdot V_{max} = \frac{B_0 \cdot S_0 \cdot M_n}{(1 + \sqrt{K})^2}, \quad (5)$$

де K – кінетичний параметр; B_0 – максимальний вихід біогазу з одиночно заданої органічної речовини за умови нескінченного показника експозиції, м³/кг; S_0 – початковий вміст органіки в біомасі, кг/м; M_n – швидкість росту мікроорганізмів у заданому процесі ферментації, доба⁻¹.

Тоді в початковому субстраті залежності величин кінетичного параметра від концентрацій органіки, описано так (6):

$$K = 0.5 + 0.03 \exp(0.058). \quad (6)$$

Баланс бактерій в забродженому субстраті (7):

$$\frac{dx}{dt} = \mu \cdot x - D \cdot x, \quad (7)$$

де x – бактеріальна щільність, кг /м³; D – темп відмирання, доба⁻¹; μ – швидкісне зростання, доба⁻¹.

В своїй роботі Хілл розширив модель Канто, додавши коефіцієнт K , що враховує втрати мікроорганізмів в процесі бродіння (8):

$$\gamma \cdot V = \frac{B_0 \cdot S_0}{\theta} \left[1 - \frac{K(1 + K_d \cdot \theta)}{\theta \cdot \mu - (1 - K\Delta\theta) - (1 - K)} \right], \quad (8)$$

де θ – час витримки субстрату в метантенку; $\theta = \frac{V}{V_S}$. Швидкість навантаження метантенку органікою позначається $\frac{V_S}{V}$, де V_S – період отримання з ферми летючих твердих речовин, що залежить від кількості тварин і їхнього раціону; V – місткість метантенку.

У наведених вище математичних моделях анаеробного бродіння зустрічається математичний параметр S , яким позначено концентрацію органіки у початковому матеріалі і наводяться значення емпіричних коефіцієнтів, що враховують окремі випадки виведення біогазу від складових початкової речовини.

У виробництві біогазу найчастіше застосовують саме емпіричні інженерні та математичні моделі, за умови виведення регресійних залежностей, виведених з врахуванням особливостей певного виду біомаси. Тому при використанні цих моделей доцільним є проведення експериментів з метою визначення емпіричних коефіцієнтів.

Для реалізації процесу переробки відходів на газ усередині біогазової установки необхідно попередньо вжити кілька важливих заходів. По-перше, потрібно забезпечити доступ поживних речовин до бактерій, сталий безкисневий та температурний режим, правильне співвідношення твердих часток у речовині та якісне перемішування. По-друге, слідкувати за співвідношенням вуглецю та азоту в масі, за часом ферментації та вчасним завантаженням і розвантаження сировини, а також за відсутністю у вмісті речовин інгібіторів.

Під час багатоступеневого процесу ферментації метаногенезу відбувається руйнування вуглецевих зв'язків. Цьому сприяють різноманітні групи мікроорганізмів, тож процес добування біогазу здійснюється в чотири етапи:

- стадія, на якій складні молекули біополімерів (білки, ліпіди, полісахариди) гідролізуються до простіших мономерів (амінокислот, вуглеводів, жирних кислот);
- стадія, на якій отримані мономери піддаються ферментації (бродінню) до більш простих речовин, таких як нижчі кислоти і спирти, з утворенням вуглекислого газу і водню;
- стадія виробництва оцтової кислоти: виробляється кислота, водень і вуглекислий газ, які в свою чергу є прямими попередниками метану;
- стадія метаногенезу: розкладання складних органічних речовин з утворенням метану як кінцевого продукту (Abbas *et al.*, 2012).

Анаеробне бродіння з отримання біогазу є складним біотехнологічним процесом, який для ефективного перебігу метанової ферментації органічних речовин потребує взаємодії та

виконання таких умов: відповідного температурного режиму процесу; слабколужної реакції середовища; присутності метаноутворювальних бактерій; безкисневого середовища.

Одним з важливих факторів ефективного процесу ферментації є температурний режим біомаси, що зброджується. Природне виведення біогазу проходить при температурі від 0 °С до 98 °С, враховуючи процес оптимізованого перероблення органічних речовин з метою виведення біогазу та біодобрива при підтримці трьох температурних режимів: психофільний (20-25 °С); мезофільний температурний режим (25-40 °С); термофільний температурний режим (більше 40 °С) (Мао *et al.*, 2015).

В залежності від вибраного режиму, для якісного процесу бродіння в біореакторі слід підтримувати однаковий температурний рівень та забезпечити регулярне перемішування біомаси. Також при виборі термофільного режиму варто зважати на його вагомні переваги у порівнянні з іншими – при пришвидшеному розкладанні сировини цілковите знищення хвороботворчих бактерій, а також отримання на виході більшої кількості біогазу. До недоліків належить висока енергозатратність, вихідне біодобриво низької якості та суттєва чутливість до мінімальних температурних змін. У зв'язку з цими негативними факторами для європейських бродильних камер застосовують мезофільний діапазон температур.

Ще одним важливим чинником щодо метанового бродіння, є залежність вмісту сировини між азотом та вуглецем. Нестача азоту та надмірний показник відношення C/N призведуть до обмежень у процесі метаноутворення (Табл. 1). Водночас, невеликий показник згаданого відношення, в свою чергу призведе до утворення великої кількості, токсичного для бактерій, аміаку. Експерименти показали, що рівень співвідношення вуглецю та азоту від 10 до 20 (залежно від походження сировини), стимулює досягати найбільший ступінь газотворення (Kougias *et al.*, 2014).

Таблиця 1. Співвідношення C/N органічних відходів, які можуть бути сировиною для отримання біогазу

Сировина для біогазу	Азот, %	Відношення вуглецю до азоту, C/N
Тваринний гній		
Крупна рогата худоба	1.7; 1.8	16-25
Курячий	4-6	7-10
Кінський	2	25
Свинячий	4	6-12
Овечий	4	33
Відходи господарства		
Фекалії	6-7	6-10
Кухонні відходи	2	29
Шкірки картоплі	1.5	25
Капуста	4	13
Помідори	3	13
Відходи рослинності		
Кукурудзяні качани	1	57
Солома зернових	1.0	50
Пшенична солома	0.5	100-150
Кукурудзяна солома	0.7	51
Вівсяна солома	ІД	50
Соя	1.3	33
Люцерна	2.8	16-17
Буряковий жом	0.3-0.4	140-150
Інші		
Трава	4	13
Тирса	0.1	200-500
Опале листя	1.0	50

Джерело: розроблено авторами на основі P.G. Kougias *et al.* (2014)

Процес переробки органічних речовин в біогаз називають метановим бродінням. Заснований на анаеробному бродінні шляхом розщеплення біомаси бактеріями (метаногенами). Розрізняють 4 види бактерій, що беруть участь в утворенні біогазу (Рис. 2).

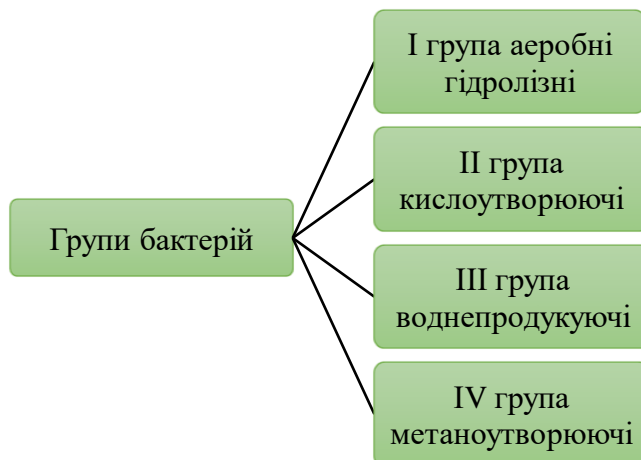


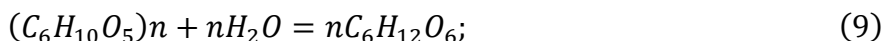
Рисунок 2. Бактерії, що беруть участь в процесі утворення біогазу

Джерело: розроблено авторами

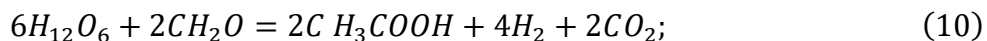
Метаболіти з усіх груп бактерій забезпечують поживними речовинами кожен наступну групу. Зокрема, перша група бактерій використовує ферменти для перетворення органічних сполук (білків, вуглеводів і жирів) на низькомолекулярні з'єднання (воду, жирні кислоти й амінокислоти). Кислотоутворювальні бактерії перетворюють ці низькомолекулярні сполуки на нестабільні жирні кислоти (оцтову, мурашину, пропіонову), етанол, вуглець і гази (вуглекислий, водень, сірководень, аміак). Воднепродукуючі бактерії відповідають за перетворення вищих жирних кислот на оцтову і мурашину кислоти, вуглекислий газ, водень. Четверта група бактерій (метаногенні) переробляють оцтову та мурашину кислоти в метан (Vindis *et al.*, 2009).

Процес анаеробного бродіння супроводжується рядом біохімічних реакцій, а сам процес утворення біогазу складається з трьох послідовностей:

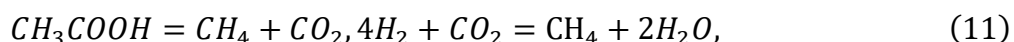
I етап – гідроліз – це розкладання органічних речовин (9):



II етап – ацетогенез – це розмноження кислотоутворювальних бактерій (10):



III етап – метаногенез – це розмноження метаноутворюючих бактерій (11):



На початковому етапі анаеробного бродіння гідролізни бактерії ферментовано розщеплюють полімерні на низькомолекулярних утворення. Полімери (багатомолекулярні сполуки) перетворюються на мономерні (одномолекулярні). Особливістю описаного процесу гідролізу є часозатратність і залежність від позаклітинних ферментів, а саме протеаз, амілаз і ліпаз. В біореакторі на гідроліз також має вплив потенціал водневих іонів.

На етапі ацетогенезу, розщепленням займаються кислотоутворювальні бактерії. Цей етап метанового бродіння називають окисненням, при якому знижується потенціал водневих іонів. Окремі молекули проникають у бактеріальну клітину і продовжують там розщеплюватися. Аеробні бактерії частково беруть участь у цьому процесі, споживаючи залишки кисню для

створення анаеробних умов, необхідних для метаногенних бактерій, деякі з яких стають анаеробними. На цьому етапі і утворюються такі гази, як нестабільні жирні кислоти (оцтова, мурашина, масляна, пропіонова), низькомолекулярні спирти (етанол, метанол), вуглець, вуглекислий газ, водень, сірководень та аміак. Крім того, бактерії, що виробляють водень, утилізують органічні жирні кислоти, утворюючи оцтову, мурашину кислоти, вуглекислий газ і водень для метаногенезу. Такі бактерії дуже чутливі до температури, оскільки зменшують кількість вуглецю (у складі органічних кислот) (Vaschetti *et al.*, 2013).

Останній етап виготовлення метану метаногенними бактеріями передбачає розподіл на вуглекислий газ і воду з мурашиної та оцтової кислот, водню та вуглецю. На цій стадії формується 90 відсотків від усього метану, при цьому лише з оцтової кислоти виробляється 70%. Варто зауважити, що метаноутворюючі бактерії є винятково анаеробними. Таким чином, на процес анаеробного зброджування впливає чотири фактори:

- біологічний (склад зброджу вальної маси, склад мікрофлори, умови життєдіяльності організмів);

- фізичний (температура зброджування, тиск біогазової установки, гідравліка);

- хімічний (концентрація, кислотність середовища, об'єм і склад утвореного біогазу);

- організаційно-технологічний (об'єм завантажувальної біомаси, залишкові речовини).

Сучасні біогазові установки складаються з таких основних елементів:

- система підготовки та подачі сировини в біореактор;

- біореактор з системами перемішування та підігріву сировини;

- система вивантаження та транспортування зброджених відходів;

- система зберігання та використання біогазу (Meyer *et al.*, 2018).

Основним вузлом біоенергетичної установки для виробництва біогазу є метантенк (біореактор). До основних вимог метантенків можна віднести: технологічні, гідравлічні, теплотехнічні та економічні. Головними критеріями при виборі конструкції біореактора є можливість застосування його на практиці, економічна доцільність та зручність його обслуговування і експлуатації. Станом на 2023 рік, ринок пропонує різноманітні біореактори за конструкцією. Класифікація метантенків приведена на Рисунку 3.



Рисунок 3. Класифікація біогазових реакторів за конструктивними ознаками

Джерело: розроблено авторами

Біогазова установка – комплекс побудов і технічного забезпечення, об'єднаних в автономний процес анаеробного зброджування для виробництва біогазу. Дану конструкцію можна встановлювати як у приміщеннях, так і ззовні, закріпивши фундаментом чи землею. Суттєвими вимогами до її будови є дотримання герметичності та корозійної стійкості, передбачене встановлення люку в моделі.

Біогазові комплекси можна розділити на одно- та двостадійні. Перші є більш поширеними та базовими, адже підходять для багатьох субстратів. Другі – більш ускладнені за рахунок додаткового реактора гідролізу. Застосовуються для швидкорозкладного робочого матеріалу, що легко окислюється (Tabatabaei & Ghanavati, 2018). Базова комплектація біогазової установки зображена на Рисунку 4, а детальний опис зображуваних вузлів споруд наведений нижче.

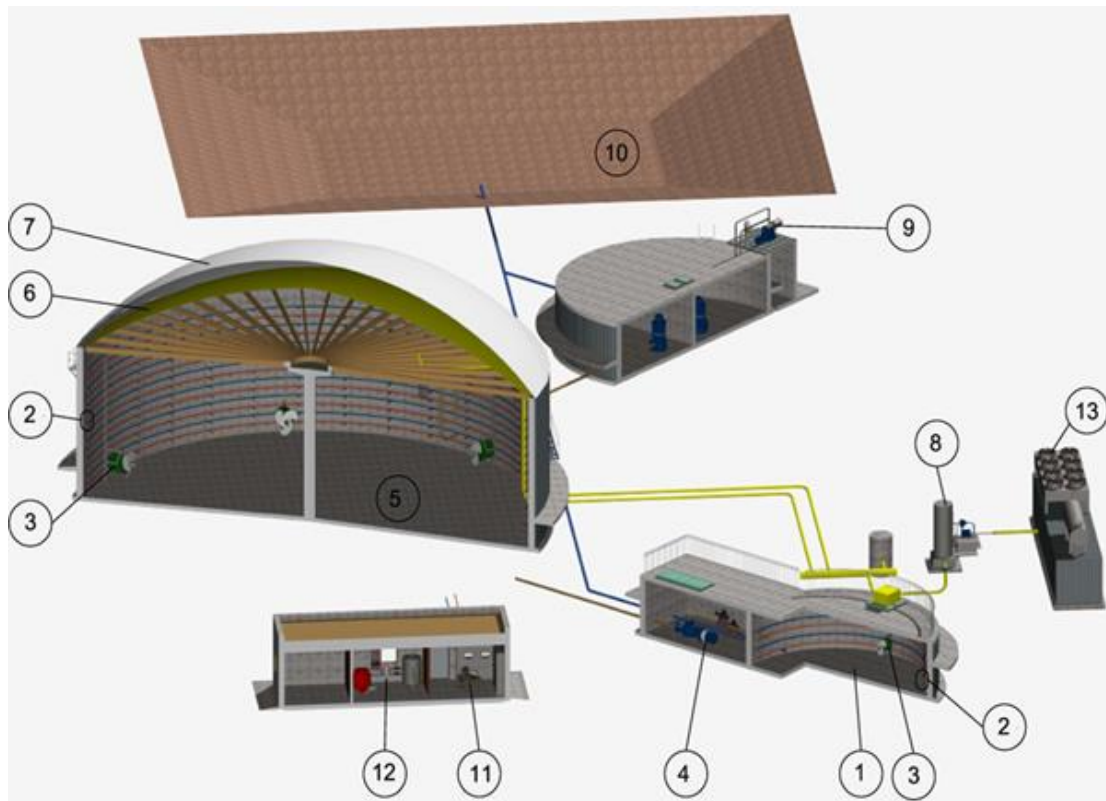


Рисунок 4. Будова біогазової установки

Примітки: 1 – приймальний резервуар; 2 – система обігріву; 3 – механічні мішалки; 4 – система подачі біомаси; 5 – ферментатор; 6 – газгольдер; 7 – купол; 8 – система газовідведення і газоподачі з системою відведення конденсату і сірко очистки; 9 – сепаратор; 10 – резервуар для зберігання рідких добрив; 11 – система автоматики, візуалізації процесів і управління; 12 – тепловпункт; 13 – генератор

Джерело: розроблено авторами

Максимальна автоматизація та мінімальна ручна робота – це основний принцип роботи цієї установки. Матеріал для зменшення об'єму, що підлягає переробці, надходить у приймальну ємність (1). Цей резервуар використовується для попереднього осадження, нагрівання (2) та ретельного перемішування (3). Сировина подається у ферментатор (5) кілька разів на день. Ферментатор (5) – це герметичний, газонепроникний резервуар. Для підтримки стабільної температури, всередині метантанк оснащують системою обігріву (2). У холодну пору року біореактор ізолюють ззовні, щоб запобігти втраті тепла. Безперервне перемішування субстратів за допомогою низькошвидкісної механічної мішалки (3) забезпечує повне та ретельне перемішування сировини. Фізико-механічні методи застосовані до субстратів використовують різні типи змішувальних систем, такі як механічні, гідравлічні чи пневматичні.

Зброджений субстрат автоматично вивантажується так часто, як і подається. Процес роботи біогазової установки загалом контролюється системою автоматизації (11). Вироблений біогаз збирається і зберігається в газгольдері (6). Їх застосовують як газонепроникний елемент для ферментатора, який слугує резервуаром для зберігання газу. Зовнішнє куполоподібне перекриття (7) стійке до ультрафіолетового випромінювання, вогнестійке і легко масштабується. Конструкція біогазової установки забезпечує високу гнучкість цього елемента і надійну фіксацію установки. Транспортування біогазу відбувається через трубопровід (8), який обладнано автоматичним відводом конденсату і запобіжним пристроєм, який захищає газгольдер (6) від перевищення допустимого тиску. Газгольдер (6) безперервно подає біогаз до когенераційної установки або установки підготовки біогазу. Потім оброблений субстрат подається на сепараційної установки (9). Механічний сепаратор працює 4-6 разів на день, щоб розділити залишки ферментації на тверді та рідкі добрива. Все обладнання контролюється системою автоматизації (11). Конструкція біогазового заводу мінімізує потребу в робочій силі

під час експлуатації. Котельня (12) в біогазовій установці допомагає забезпечити енергоефективне використання біогазу, який є відновлювальним джерелом енергії. Вона дозволяє максимально використовувати потенціал біогазу шляхом перетворення його на теплоенергію. Генератор (13) призначений для перетворення механічної енергії, отриманої від руху двигуна, на електричну енергію. В біогазовій установці генератор використовує біогаз як паливо для приведення в рух двигуна, який забезпечує обертання генератора і виробництво електричної енергії (Misak *et al.*, 2014).

Сигнали, що регулюють роботу всієї установки, надходять на центральний програмований логічний контролер. Контролер регулярно опитує всі елементи об'єданого технологічного ланцюга і виводить інформацію на екран монітора. На екрані монітора відображаються всі конструкції і компоненти, а також приводи і датчики параметрів. Всі робочі параметри біогазової установки відображаються на моніторі в центральній диспетчерській. Диспетчерська має центральний пульт управління, з якого всі частини біогазової установки можна перемикає між автоматичним і ручним режимами роботи, а також керувати ними локально або дистанційно (Geletukha *et al.*, 2013).

Аналіз результатів отриманих у вищеописаному експерименті, привів до ряду висновків щодо технологічних аспектів вироблення біогазу. Зокрема, першочергова і надважлива правильна підготовка субстрату. Цей етап передбачає підготовку сировини, яка використовується для вироблення біогазу. Це може включати розчинення, розмелювання або ферментативну обробку сировини, щоб полегшити процес біогазової ферментації. Далі Субстрат, який був підготовлений, піддається процесу ферментації. У цьому етапі мікроорганізми, такі як бактерії або анаеробні гриби, розкладають органічні речовини в субстраті і виділяють біогаз. Біогаз, який утворюється під час ферментації, збирається і зберігається у спеціальних контейнерах або резервуарах. Це може бути газгольдер або балони зі згущеним газом. Варто також враховувати, що часто біогаз потребує обробки і очищення перед використанням. Це включає видалення забруднень, таких як волога, сірководень або інші домішки, що можуть негативно вплинути на якість газу або обладнання. Ну і на сам кінець йде ефективне використання кінцевого продукту. Очищений біогаз може бути використаний для виробництва тепла, електроенергії або в процесах, які вимагають газу як палива. Це може включати використання біогазу в котельні для опалення, установку спалювання для виробництва електричної енергії або використання в процесах виробництва.

Загальний огляд сфери біогазового виробництва в Україні спонукає до наступних висновків. Розвиток технологій з переробки біомаси для біогазового виробництва постійно вдосконалюється. Використання вискоєфективних біогазових установок, оптимізація процесів бродіння та очищення біогазу дозволяють підвищити ефективність виробництва та зменшити екологічний вплив. Виробництво біогазу з біомаси опалого листя може мати значні економічні переваги. Це може створити нові робочі місця, залучити інвестиції та сприяти розвитку сільських та лісових районів. Використання біомаси для біогазового виробництва в Україні може сприяти досягненню енергетичної незалежності, зниженню викидів парникових газів та розвитку сталого енергетичного сектору.

Обговорення

Дослідженням анаеробного бродіння та встановленням закономірностей для розрахунку біогазових установок займалися багато вчених. Однак, зважаючи на хімічну складність реалізації взаємодії між групами і видами бактерій та урізноманітнення складових субстрату, закономірності процесу метанового бродіння є надзвичайно складними і значною мірою недослідженими. На практиці досліджень розробка технологій анаеробного зброджування базується на емпіричних моделях процесу, що в свою чергу базуються на рівняннях мікробіологічної кінетики та теорії гомеостату.

Прикладом для обговорення цієї тези послугує дослідження авторів S. Ma *et al.* (2021), в якому вони, використовуючи детальне секвенування зразків травного соку з 56 повномасштабних біогазових установок (БГУ), що переробляють різну сировину, представили

каталог мікробних генів анаеробного бродіння (АБ), що містить понад 22.8 мільйона генів з прикріпленою інформацією про їх роль в клітинних процесах. Результати підтверджують наявність ядра мікробіому в АБ та показують, що вид сировини (гній великої рогатої худоби, пташиний гній, свинячий гній) має значний вплив на розщеплення вуглеводів гідролізом, окислення летких жирних кислот і виробництво метану. Крім того, було також надано 2426 геномів, зібраних з метагеномних даних з повномасштабних БГУ. Порівняно з раніше опублікованими каталогами мікробних генів з різних екосистем, включаючи ґрунт, морські середовища, кишечник і рубець тварин, БГУ є штучною високо анаеробною екосистемою, де АБ здійснюється складною спільнотою анаеробних мікроорганізмів. Тому наведений ними перелік генів не тільки послугує цінною довідковою базою для швидкого аналізу даних мікробіом у АБ, але й надасть багате джерело мікробних генів для вивчення та використання анаеробної мікробіоти.

Дослідження, опубліковане К. Pilarski *et al.* (2020), описує процес виходу метану отриманого з кукурудзяного силосу, свинячого гною, картопляних відходів та жому цукрових буряків. Також представлено оригінальну методологію визначення поправочного коефіцієнту біохімічного потенціалу метану (ВМРСС) на основі розрахунків конверсії біомаси в промислових і лабораторних масштабах. ВМРСС є інструментом, який може бути використаний для підвищення ефективності біогазових установок та уникнення непотрібних втрат. Розраховані значення ВМРСС показали, що кількість метану, виробленого в лабораторії, була завищена порівняно з кількістю метану відповідно до специфікацій. Відмінності спостерігалися для кожного субстрату.

У дослідженні М. Fugol *et al.* (2023), автори вивчали використання ферментних добавок при анаеробному бродінні і дійшло висновку, що у випадку кукурудзяного силосу використання добавок підвищило ефективність процесу адсорбції порівняно з контролем в межах від 17 до 62%, залежно від використовуваної добавки. У випадку з силосом, з ігніскуму було вироблено більше біогазу, а з трав'яного силосу спостерігалось зниження ефективності виробництва біогазу порівняно з контрольним зразком (без добавок), але це збільшило виробництво метану в кукурудзяному та трав'яному силосі. Зазначається, що біодобавки призводять до покращення енергетичних показників, але це залежить від використовуваних сільськогосподарських субстратів та добавок.

Доробок опублікований вченими S. O'Connor *et al.* (2021) підтверджує, що маломасштабне анаеробне зброджування перспективна технологія відновлюваної енергетики для сільського господарства. Біоенергетика вигідна завдяки можливості виробляти біодобрива та зменшувати викиди в атмосферу. Були обговорені питання, пов'язані з проектуванням установок, використанням енергії, політичними наслідками та бар'єрами. Це дослідження вивчає поточний стан технології маломасштабного анаеробного зброджування в Європі, визначаючи хід процесу та характеристики продуктивності, вплив політики Європейського Союзу, останні розробки та виклики, з якими вони стикаються.

У той же час, S. Cinar *et al.* (2022) у ході своїх досліджень прийшли до висновків, що оптимізація процесів – це вже передумова ринкової життєздатності в усіх секторах. Це твердження також має відношення до анаеробного зброджування в біоустановках. Користь від використання установок для відновлюваної енергетики можна розширити за рахунок більш технологічних і менш затратних систем, з загальною метою мінімізації затратності та максимальній ефективності процесу. За допомогою науки про дані та прогнозної аналітики, традиційних методів оптимізації процесів та операційної досконалості, статистичне управління процесом може бути виведене на новий рівень. Чим досконаліша оптимізація процесу, тим прозорішою і більш чутливою стає система. У дослідженні лабораторні результати порівнювалися з кількома окремими процедурами машинної теорії (логістична та лінійна регресія, K-NN, дерева рішень, випадкові ліси, машини прямих векторів (SVM і XGBoost) для виявлення і прогнозування широкого спектру можливих температурних коливань на стабільність процесу. Згідно з виміряною точністю моделей, обчислених за принципом матриці помилок, SVM забезпечила найкращу точність – 0.93.

На основі висновків, зроблених в результаті досліджень, можна сказати, що проблема виведення біогазу з вторинного матеріалу для енергозабезпечення є актуальною, саме тому їй присвячені доробки світових та українських науковців. Водночас, запровадження інновацій для зниження негативного впливу на довкілля реалізовано недостатньо. Методи переробки відходів з виробленням електроенергії потребують оптимізації в першу чергу саме на регіональних рівнях. Мається на увазі яскраво виражена потреба у проведенні додаткових досліджень у цій галузі та здійснення конкретних розрахунків економічних та екологічних вигод від переробки відходів для виготовлення біогазу в Україні та її регіонах.

Висновки

Основними джерелами отримання біогазу є продукція, відходи рослинництва і тваринництва. В результаті літогляду встановлено, що проблеми раціонального використання відходів тваринного походження розглянуто в багатьох наукових працях, але разом з цим не приділено належної уваги переробці відходів рослинного походження, зокрема утилізації опалого листя та сухої трави. Це підтверджує перспективність у використанні біологічних листових відходів і гіпотезу про те, що сама сировинна база задіяна не достатньо.

В осінню пору року екологічною проблемою в містах України є утилізація опалого листя. Найбільш поширеними методами утилізації опалого листя в Україні є: в кращому випадку – це вивантаження на замські полігони твердих побутових відходів; в гіршому – спалювання, що веде до забруднення атмосфери (заборонено законодавчо). Вивезення листя на сміттєзвалища вимагає значних затрат, а при спалюванні виділяються шкідливі речовини (оксид азоту, чадний газ, бензопірен, формальдегіди та інші). Саме тому доцільно вважати, що найбільш прийнятним вирішенням проблем з утилізацією опалих листових залишків є біодеструкція за анаеробних умов. Такий засіб переробки листви є не тільки екологічно безпечним, але й економічно виправданим, адже утворений в процесі метанового бродіння біогаз, цілком можливо відносити до альтернативного джерела енергії, а ферментаційні відходи – до цінного біодобрива.

Аналіз науково-технічної літератури дозволив визначити основні фактори, що впливають на процес анаеробного бродіння при виробництві біогазу з опалого листя, який потребує технологічного удосконалення обладнання, щоб забезпечити максимальні показники кінцевого продукту та обґрунтування економічно ефективною утилізації органічних відходів з отриманням біогазу та органічних добрив.

Розглянувши сучасні конструкції газових біореакторів, можна зробити висновок, що головними критеріями при виборі метантенка для утилізації опалого листя є можливість застосування його на практиці, економічна доцільність та зручність його обслуговування при експлуатації. Для отримання біогазу з опалого листя найоптимальнішим за своєю конструкцією є яйцеподібний біореактор. Його форма призводить до зменшення гідравлічного опору при змішуванні сировини та дозволяє уникати застійних ділянок завдяки аеродинамічному проектуванню. Оптимізація технічних параметрів біореакторів спонукатиме до максимізації кількості біогазу з одиничного об'єму біомаси (листки) та збільшить показники продуктивності. На їх утворення впливає система перемішування та підігрівання субстрату. При виборі системи перемішування необхідно врахувати її вплив на швидкість утворення метану та час бродіння біомаси в метантенку. Для зменшення впливу коливань температури навколишнього середовища і досягнення термостабільності в метантенках, можна вдатися до теплоізоляції стінок біореактора одночасно з нагріванням біомаси.

Розвиток біогазових установок в Україні є важливим кроком на шляху до сталого розвитку та використання відновлюваних джерел енергії. Необхідно працювати над вдосконаленням процесів ферментації та газифікації, щоб виробляти більше біогазу з різних типів органічних речовин. Подальші експерименти можуть бути спрямовані на оптимізацію умов ферментації, підвищення ефективності реакторів і скорочення часу переробки. Ще одним важливим аспектом досліджень є використання нових видів сировини. В досліджах можна розробляти методи утилізації різних видів сировини, таких як сільськогосподарські відходи,

муніципальні відходи та інші органічні матеріали. Для кожної сировини необхідно визначити оптимальні умови для її перетворення на біогаз та дослідити ефективність цього процесу. Також можна зосередитись на розробці ефективних систем управління відходами та моніторингу газових викидів з біогазових установок, зокрема методів видалення небезпечних речовин. Важливо провести оцінювальний аналіз витрат на виробництво біогазу та розробити бізнес-моделі і стратегії фінансування. Крім того, подібні дослідження можуть сприяти політичній підтримці та регулюванню розвитку біогазових установок. Зосередження на розробці ефективних механізмів стимулюватиме розвиток у біогазовій галузі, зокрема матиме вплив на податкові пільги, підтримку державних програм і стратегій розвитку. Очікується, що ці напрямки досліджень сприятимуть подальшому розвитку біогазових установок в Україні, забезпечуючи стале джерело енергії, скорочення викидів парникових газів та сприяння економічного розвитку країни.

Подяки

Немає.

Конфлікт інтересів

Немає.

References

- [1] Abbasi, T., Tauseef, S.M., & Abbasi, S.A. (2012). A brief history of anaerobic digestion and “biogas”. In *Biogas energy* (pp. 11-23). New York: Springer.
- [2] Bacenetti, J., Negri, M., Fiala, M., & González-García, S. (2013). Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process. *Science of the Total Environment*, 463-464, 541-551. [doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.058](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.058).
- [3] Cinar, S.Ö., Cinar, S., & Kuchta, K. (2022). Machine learning algorithms for temperature management in the anaerobic digestion process. *Fermentation*, 8(2), 65. [doi: 10.3390/fermentation8020065](https://doi.org/10.3390/fermentation8020065).
- [4] Devi, M.K., Manikandan, S., Oviyapriya, M., Selvaraj, M., Assiri, M.A., Vickram, S., Subbiya, R., Karmegam, N., Ravindran, B., Chang, S.W., & Awasthi, M.K. (2022). Recent advances in biogas production using agro-industrial waste: A comprehensive review outlook of techno-economic analysis. *Bioresource Technology*, 363, 127871. [doi: 10.1016/j.biortech.2022.127871](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127871).
- [5] Fugol, M., Prask, H., Szlachta, J., Dyjakon, A., Paśławska, M., & Szufa, S. (2023). Improving the energetic efficiency of biogas plants using enzymatic additives to anaerobic digestion. *Energies*, 16(4), 1845. [doi: 10.3390/en16041845](https://doi.org/10.3390/en16041845).
- [6] Geletukha, G.G., Kucheruk, P.P., & Matveev, Y.B. (2013). *The prospects of biogas production and use in Ukraine*. Kyiv: Bioenergy Association of Ukraine.
- [7] Gontaruk, Y. (2022). Prospects of biogas production at sugar plants in Ukraine. *Eastern Europe: Economics, Business and Management*, 34(1), 69-75. [doi: 10.32782/easterneurope.34-12](https://doi.org/10.32782/easterneurope.34-12).
- [8] Kougiyas, P.G., Boe, K., O-Thong, S., Kristensen, L.A., & Angelidaki, I. (2014). Anaerobic digestion foaming in full-scale biogas plants: A survey on causes and solutions. *Water Science and Technology*, 69(4), 889-895. [doi: 10.2166/wst.2013.792](https://doi.org/10.2166/wst.2013.792).
- [9] Ma, S., Jiang, F., Huang, Y., Zhang, Y., Wang, S., Fan, H., Liu, B., Yin, L., Wang, H., Liu, H., Ren, Y., Li, S., Cheng, L., Fan, W., & Deng, Y. (2021). A microbial gene catalog of anaerobic digestion from full-scale biogas plants. *GigaScience*, 10(1), g1aa164. [doi: 10.1093/gigascience/g1aa164](https://doi.org/10.1093/gigascience/g1aa164).
- [10] Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555. [doi: 10.1016/j.rser.2015.02.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032).
- [11] Meyer, A.K.P., Ehimen, E.A., & Holm-Nielsen, J.B. (2018). Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 111, 154-164. [doi: 10.1016/j.biombioe.2017.05.013](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.013).

- [12] Misak, Y.S., Ivasyk, Y.F., & Kovalenko, T.P. (2014). *Application of biogas technologies in Ukraine for resource conservation*. Retrieved from <http://eprints.kname.edu.ua/38215/1/136-139.Pdf>.
- [13] O'Connor, S., Ehimen, E., Pillai, S.C., Black, A., Tormey, D., & Bartlett, J. (2021). Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110580. doi: [10.1016/j.rser.2020.110580](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110580).
- [14] Pilarski, K., Pilarska, A.A., Boniecki, P., Niedbała, G., Durczak, K., Witaszek, K., Mioduszevska, N., & Kowalik, I. (2020). The efficiency of industrial and laboratory anaerobic digesters of organic substrates: The use of the biochemical methane potential correction coefficient. *Energies*, 13(5), 1280. doi: [10.3390/en13051280](https://doi.org/10.3390/en13051280).
- [15] Pryshliak, N. (2019). Biogas production in individual biogas digesters: Experience of India and prospects for Ukraine. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 5(1), 122-136. doi: [10.51599/are.2019.05.01.08](https://doi.org/10.51599/are.2019.05.01.08).
- [16] Sakun, L., Riznichenko, L., & Vielkin, B. (2020). Prospects of biogas market development in Ukraine and abroad. *Economics and Management*, 37(1), 160-170. doi: [10.31558/2307-2318.2020.1.16](https://doi.org/10.31558/2307-2318.2020.1.16).
- [17] Sobczak, A., Chomać-Pierzecka, E., Kokieli, A., Różycka, M., Stasiak, J., & Soboń, D. (2022). Economic conditions of using biodegradable waste for biogas production, using the example of Poland and Germany. *Energies*, 15(14), 5239. doi: [10.3390/en15145239](https://doi.org/10.3390/en15145239).
- [18] Tabatabaei, M., & Ghanavati, H. (2018). *Biogas: Fundamentals, process, and operation*. Cham: Springer.
- [19] Tokarchuk, D., Prishlyak, N., & Palamarenko, Y. (2020). Prospects for use of crop waste for biogas production in Ukraine. *Agrosvit*, 22, 51-57. doi: [10.32702/2306-6792.2020.22.51](https://doi.org/10.32702/2306-6792.2020.22.51).
- [20] Vindis, P., Mursec, B., Janzekovic, M., & Cus, F. (2009). The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 36(2), 192-198. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=05b6450b15729d6a0d5c5031aae9c3bcc0606c0b>.