

УДК 636.085.52

DOI: <https://doi.org/10.31073/abg.70.12>**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАКВАСОК ДЛЯ СИЛОСУВАННЯ****А. С. ЛУК'ЯНЕЦЬ, Д. С. ГОЛУБЧИК, С. Г. ДАНИЛЕНКО***Інститут продовольчих ресурсів НААН (Київ, Україна)**<https://orcid.org/0000-0002-2120-9909> – А. С. Лук'янець**<https://orcid.org/0000-0002-5129-6150> – Д. С. Голубчик**<https://orcid.org/0000-0003-4470-4643> – С. Г. Даниленко**svet1973@gmail.com*

Процес силосування є складною мікробіологічною та ферментативною системою, що залежить від багатьох факторів: властивостей рослинної сировини, умов зберігання, герметизації та використання заквасок. Недотримання технологічних умов може призвести до розвитку патогенних мікроорганізмів, утворення токсичних сполук та зниження якості корму й біогазового потенціалу. Застосування заквасок із молочнокислих бактерій, ферментів та інших мікроорганізмів дає змогу оптимізувати процес силосування, покращити стабільність продукту та підвищити ефективність подальшої біогазової ферментації.

Метою цієї роботи є аналіз особливостей процесів силосування та біогазової ферментації, з акцентом на роль заквасок для силосування як одного з ключових факторів впливу на вихід біометану. Розглянуто сучасні підходи до використання мікроорганізмів у технології силосування для покращення перетравності субстратів і підвищення ефективності анаеробної деградації. Особливу увагу приділено науковим дослідженням щодо застосування різних штампів молочнокислих бактерій, а також ферментативних добавок, що сприяють руйнуванню структурних компонентів рослинної маси, зокрема лігноцелюлози.

Проаналізовано недоліки сучасних досліджень, зокрема відсутність у багатьох публікаціях поправок на втрати сухої речовини або летких твердих речовин при силосуванні, що ускладнює порівняння ефективності різних заквасок та формує суперечливі висновки навіть у добре досліджених аспектах. Підкреслено потребу в експериментальних роботах, які б давали змогу коректно оцінити біогазовий потенціал силосованої сировини з урахуванням усіх критичних параметрів.

Ключові слова: силос, закваска, молочнокислі бактерії, метан, анаеробне зброджування, попередня обробка, аеробна стабільність

PROSPECTS OF USING SOURDOUGHTS FOR SILAGE MAKING**A. S. Lukianets, D. S. Holubchyk, S. G. Danylenko***Institute of Food Resources of the NAAS, Kyiv, Ukraine*

The ensiling process is a complex microbiological and enzymatic system that depends on many factors: the properties of plant raw materials, storage conditions, sealing and the use of starter cultures. Failure to comply with technological conditions can lead to the development of pathogenic microorganisms, the formation of toxic compounds and a decrease in the quality of feed and biogas potential. The use of starter cultures from lactic acid bacteria, enzymes and other microorganisms allows you to optimize the ensiling process, improve product stability and increase the efficiency of subsequent biogas fermentation.

The aim of this work is to analyze the features of the ensiling and biogas fermentation processes, with an emphasis on the role of starter cultures for ensiling as one of the key factors influencing biomethane yield. Modern approaches to the use of microorganisms in ensiling technology to improve substrate digestibility and increase the efficiency of anaerobic degradation

are considered. Special attention is paid to scientific research on the use of various strains of lactic acid bacteria, as well as enzymatic additives that contribute to the destruction of structural components of plant mass, in particular lignocellulose.

The shortcomings of modern research are analyzed, in particular, the lack of corrections for dry matter or volatile solids losses during ensiling in many publications, which complicates the comparison of the effectiveness of different starter cultures and generates contradictory conclusions even in well-studied aspects. The need for experimental work that would allow for a correct assessment of the biogas potential of ensiled raw materials, taking into account all critical parameters, is emphasized.

Keywords: silage, starter culture, lactic acid bacteria, anaerobic fermentation, pretreatment, aerobic stability

Вступ. Унаслідок зміни клімату, нестачі води, високої кількості або збільшення поголів'я тварин у багатьох регіонах планети люди стикаються з нестачею кормів для годування худоби, особливо фуражу, який має вагому роль у м'ясо-молочному тваринництві й забезпечує стабільну продуктивність та виробництво в галузі (Iqbal et al., 2015). Приклади включають країни Африки (Alimi et al., 2024), Азії, Північної Америки (Cordeiro et al., 2022) тощо. Для вирішення цієї проблеми усе більше розглядається виробництво силосу з харчових та сільськогосподарських відходів (Mohammadi et al., 2024), адже тільки в Канаді за рік виробляється близько 11,2 млн тонн відходів харчової промисловості, які можуть бути перероблені у силос високої якості (Rodriguez et al., 2024).

Силосування – це процес анаеробної ферментації вологого рослинного матеріалу, який завдяки розвитку специфічної мікробіоти та зниженню рН набуває характерних смакових якостей, забезпечує збереження поживних речовин та уникає псування протягом тривалого часу, що вигідно вирізняє його на фоні інших вологих кормів для худоби. Отриманий у результаті цього процесу продукт називається силосом.

Історія силосування почалася понад 3000 років тому, коли жителі древнього Єгипту та Греції зберігали цільнозернові культури шляхом завантаження їх у невеликі кам'яні будівлі, які обмежували доступ повітря – прототипи сучасних силосних бункерів. Попри той факт, що дана технологія відома людям із давніх часів, вона не зажила широкого використання аж до кінця XIX ст. Збільшення кількості та доступності подорожжя і прискорення обміну інформації призвело до зростання зацікавленості людей до виготовлення силосу. Техніка отримання вологого корму, яка заново розквітла на теренах Північної Європи, Німеччини та Балканського півострова, стрімко поширилася до Франції, а звідти – до решти Європи, США й Канади Wilkinson (Et al., 2015).

Великою перевагою силосування є його універсальність та можливість багатогалузевого застосування, як і будь-якої рослинної сировини (Du et al., 2023). Яскравим прикладом слугує той факт, що, хоча сам силос із самого початку використовувався в сільськогосподарській промисловості, люди також знайшли можливість використовувати його для виробництва біогазу, який застосовується у зовсім інших напрямках (Sun et al., 2021). Біогаз набув поширеного вжитку при генерації електроенергії та виробництві палива (забезпечує роботу бензинових та дизельних двигунів, турбін та мікротурбін, використовується в паливних елементах тощо), подається в газові мережі побутових споживачів, виступає вихідною сполукою при синтезі метанолу та його похідних. Із широкого кола можливих застосувань впливають і практичні наслідки – глобальне виробництво електроенергії на основі біогазу зросло з 2010 по 2019 рік на більш ніж 90%, досягаючи значень у 120 ГВт (Kabeyi et al., 2022). Викиди парникових газів унаслідок роботи електростанцій, які працюють на біогазі, є незначними у порівнянні з вугільними електростанціями, що показує великий потенціал для збереження навколишнього середовища та пом'якшення наслідків змін клімату за умови збільшення кількості біогазових електростанцій (Kumawat et al., 2024). Понад те, при вдумливому та організованому підході до застосування біогазу можна досягнути зменшення викидів парникових

газів на 97–107% (біогаз у паливі) та на 67–74% (біогаз у комбінованому виробництві тепла та електроенергії) (Lehtoranta et al., 2024).

Уперше добавки для силосування були застосовані на початку XX століття у вигляді меляси, призначенням якої було сприяти розвитку молочнокислих бактерій (МКБ) та перебігу ферментаційних процесів у рослинній сировині. Із тих пір цей напрямок зазнав багатостороннього вивчення і нині велика кількість різноманітних добавок, як біологічного, так і хімічного походження, доступна до використання. Їх можна поділити на 4 групи: стимулятори ферментації (закваски на основі бактерій, цукри, ферменти), інгібітори ферментації (мінеральні кислоти), абсорбенти (солома), інгібітори аеробного псування (закваски, пропіонова кислота) (Franco et al., 2016). Особливо складним питанням є використання заквасок для силосування при отриманні біогазу, оскільки інформація з різних джерел є суперечливою. Можливою перевагою є те, що деякі бактерії викликають деградацію біополімерів, які зазвичай не розкладаються під час силосування, наприклад, лігноцелюлози (Sun et al., 2021), однак робота в цьому напрямку означає необхідність ще більшої уваги до співвідношення кінцевий вихід біомаси-біогазу та ретельної систематизації усіх відомих фактів, які можуть вплинути на результат. Наявність такого аналізу дозволить встановити мікроорганізми та закваски, використання яких буде найбільш ефективним для отримання максимального виходу біогазу при силосуванні, а також дасть змогу визначити найперспективніші напрямки майбутніх досліджень.

Метою даної роботи є огляд особливостей проведення силосування та біогазової ферментації, а також ролі заквасок для силосування у цих процесах. Крім того, важливим завданням є вивчення досліджень, які стосуються використання різних мікроорганізмів у технології силосування у контексті оптимізації виробництва біогазу, порівняння їх ефективності та окреслення потенціалу для подальших експериментів.

Силосування: основи та роль заквасок. Характерні особливості проходження процесу силосування залежать від багатьох змінних: типу рослинної сировини, стадії її дозрівання та часу збору, довжини волокон після подрібнення, щільності запаковки та надійності герметизації тощо. Уся інформація, яка збиралася на протязі десятиріч, за правильної оцінки та застосування впливає на якість фінального продукту. Відомо, що підхід до підготовки та просушування рослин відбивається на вологості та втратах СР силосу, а відхилення від температурного оптимуму призводять до зміни швидкості ферментації й мікробного складу рослинного матеріалу під час її проходження, крім того – до зниження поживної цінності корму. При цьому температурний оптимум для мікроорганізмів становить 27–38°C, хоча ефективний процес може відбуватися навіть при 40°C. Проте важливо зазначити, що використання біологічних добавок на початку ферментації зазвичай знижує толерантність мікробіоти до високих температур на кілька градусів. Неправильно виконана або пошкоджена герметизація призводить до псування як готового, так і неготового продукту унаслідок розвитку дріжджів, цвілевих грибів, бацил та інших аеробних мікроорганізмів (наприклад, різниця у втраті СР між герметично упакованою і відкритою люцерною може досягати 71,6%) (Borreani et al., 2018; Mohd-Setapar et al., 2012), що у свою чергу зменшує вихід метану при отриманні біогазу (Surra et al., 2019).

Погано продумані або невдало реалізовані умови силосування можуть призводити до розвитку патогенів, синтезу токсинів та появи небезпечних хімічних речовин. При недотриманні правильної практики виготовлення силосу в рослинній сировині можуть розвиватися такі інфекційні агенти як *Clostridium botulinum* (спричиняє ботулізм великої рогатої худоби), *Listeria monocytogenes* (спричиняє лістеріоз), *Mycobacterium bovis* (спричиняє туберкульоз великої рогатої худоби) тощо. Прикладами токсинів можуть слугувати різні групи мікотоксинів, які мають негативний вплив на фізіологічні функції тварин та викликають гарячку, діарею, втрату ваги тощо, або рослинні токсини: фітоестрогени (призводять до зменшення або втрати фертильності), тропанові алкалоїди (спричиняють тахікардію, втрату координації, конвульсії, впадання в кому), піролізидинові алкалоїди (спричиняють цироз печінки, отруєн-

ня легень і можуть призводити до смерті), синільна кислота (викликають утворення піни з рота, дихальний параліч та смерть) і багато інших. Небезпечні хімічні речовини можуть бути як продуктом життєдіяльності мікроорганізмів (масляна кислота переважно синтезується клостридіями у погано ферментованому силосі й призводить до кетоацидозу), так і сполуками, які були присутні в рослинному матеріалі до силосування (нітрати (NO_3^-) накопичуються в рослинних тканинах і призводять до отруєння тварин нітритами (NO_2^-), що спричиняє дихальну недостатність, кому й смерть) (Driehuis et al., 2018; Kolečkář et al., 2024). Уникнення розвитку патогенів, накопичення токсинів та загалом отримання якісного продукту є важливим не тільки при використанні силосу в якості їжі для тварин – існують свідчення, що мікотоксини (афлатоксин, фумонізін) суттєво знижують утворення біогазу з контамінованої сировини (Kintl et al., 2023).

Спалах бичачого ботулізму на фермі у Західній Франції у 2015 році призвів до смерті майже 73% поголів'я великої рогатої худоби, а ймовірною його причиною був неналежний контроль за чистотою корму та недостатньо ретельний підхід до силосування (Relun et al., 2017). Натомість використання силосу вищого гатунку із якомога більшим вмістом СР підвищує продуктивність тварин та сприяє виробленню якісної молочної продукції (Craig et al., 2020).

Особливості підготовки та проходження силосування можуть напряму впливати на подальше отримання біогазу. Наприклад, зменшення розміру частинок рослинної сировини із 2,0 до 0,2 мм підвищує вихід біометану на 26% (Gallegos et al., 2017), а збільшення тривалості силосування із 44 до 119 днів – на 42% (Neureiter et al., 2005).

За умови правильної організації процесу, силосування поділяється на 4 фази (рис. 1) (Weinberg, 2023; Weinberg, 2008; Pahlow et al., 2003; Penagos-Tabares et al., 2022).

I фаза – початкова (аеробна) фаза. На даній фазі повітря все ще присутнє між частинками рослинної сировини, яка перебуває фактично в тому ж стані, у якому була завантажена до силосного сховища. рН має нейтральні значення близько 6,0–6,5, тому широкий спектр аеробних мікроорганізмів (дріжджі, цвілеві гриби, ентеробактерії) та ферментів зберігають свою активність. Тривалість фази може варіювати від 24 до 48 годин.

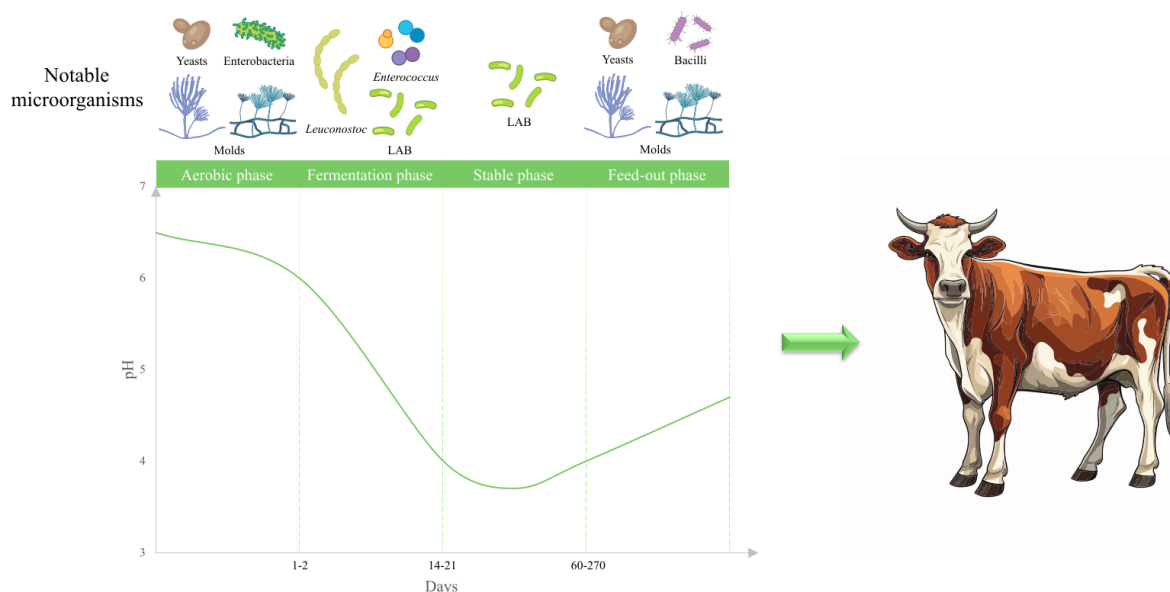


Рис. 1. Фази силосування

II фаза – ферментаційна фаза. Вона розпочинається, коли в рослинній сировині закінчується повітря, відповідно, починають активну діяльність анаеробні бактерії. Оскільки силосування по своїй суті є молочнокислим бродінням, то головну роль на цій фазі відіграють різні роди МКБ. Доки рН лишається порівняно високим, бактерії родів *Enterococcus* та *Leuconostoc* споживають цукри та сприяють його зниженню. При рН менше 5,0 бактерії ро-

дів *Lactobacillus*, *Lacticaseibacillus*, *Lactiplantibacillus*, *Latilactobacillus*, *Loigolactobacillus*, *Fructilactobacillus*, *Pediococcus* та інших починають переважати, а при рН менше 4,5 уже не можуть розмножуватися та призводити до псування продукту анаеробні патогенні бактерії на кшталт *Clostridium* spp. (Goldsztejn et al., 2020). МКБ продовжують знижувати рН до 3,7–4,0, коли процес активної ферментації припиняється.

Залежно від характеристик рослинної сировини, яка була використана для отримання силосу (вологість, вміст СР, вміст водорозчинних вуглеводів тощо) та від особливостей підходу до самого процесу силосування (впливають типи силосних сховищ, адже можуть використовуватися силосні бункери, силосні башти, силосні тюки і не тільки (Rafiuddin et al., 2017); матеріали, використані для герметизації, оскільки вони включають плівки різної товщини з поліетилену, поліаміду, етилен-вінілового спирту тощо (Neumann et al., 2021; Parra et al., 2021); інтервал часу між заповненням силосного сховища та його герметизацією (de Melo et al., 2023) і т. д.) тривалість фази становить 2–7 днів, а інколи може сягати кількох тижнів.

III фаза – стабільна фаза. Протягом кількох тижнів після завершення ферментаційних процесів у силосі не відбувається практично ніяких змін, оскільки рН уже знаходиться на досить низькому рівні, а вміст легкодоступних поживних речовин виснажений. Однак присутність певної кількості кислотостійких ферментів забезпечує постійне поповнення запасів водорозчинних вуглеводів унаслідок перебігу кислотного гідролізу запасних та структурних вуглеводів рослинної сировини, а протеази сприяють перетворенню комплексних нітрогенвмісних сполук у аміак. За рахунок цих процесів, а також логарифмічного скорочення кількості МКБ, тривалість стабільної фази може тривати достатньо довго.

Приблизно за 60 днів від початку силосування у силосі набуває активність інший вид МКБ, який до того переважно перебував у стані спокою – *Lentilactobacillus buchneri*. Особливістю цих бактерій є те, що вони належать до облігатних гетероферментативних МКБ і можуть переробляти молочну кислоту, яка до цього була головним фактором зниження рН, у оцтову кислоту та вуглекислий газ. Це призводить до зниження кислотності середовища, але також збільшує стійкість та довготривалість силосу на наступній фазі, оскільки оцтова кислота проявляє інгібуючий вплив на цвілеві гриби та дріжджі, які будуть розвиватися, коли до них почне надходити повітря.

IV фаза – фаза годування. Після розгерметизації силосного сховища, повітря потрапляє в силос на глибину до 2 м, що сприяє розвитку різних бацил, призводить до реактивації дріжджів, які виробляють етанол та CO₂, та спор цвілевих грибів (наприклад, *Aspergillus*, *Penicillium*), деякі види яких можуть виробляти мікотоксини, про що вже згадувалося раніше. Розмноження цих мікроорганізмів призводить до псування силосу, карамелізації його вуглеводів, потемніння поверхні та інших небажаних ефектів зі швидкістю, яка перевищує швидкість зниження поживної цінності загерметизованого корму більш ніж у 60 разів. За тиждень впливу кисню рН силосу може піднятися до значень вищих від 4,5, за 2 тижні – вищих від 6,5 (Dolci et al., 2011). Бажано уникати тривалого контакту рослинної маси з повітрям, оскільки це призводить до втрати СР, перешкоджає розвитку мікроорганізмів, які відповідають за утворення біогазу, та зумовлює суттєве зниження виходу метану (були зафіксовані значення у 40,7% за 9 днів) (Zhang et al., 2018).

Процес силосування фактично перебігає у замкненій системі й залежить від багатьох факторів, тому одним із найбільш надійних способів впливу на нього є використання добавок, серед яких великим інтересом як дослідників, так і представників сільськогосподарської промисловості користуються різні типи заквасок. При цьому варто зважати, що при внесенні бактеріальних культур можна добитися суттєвого зростання якості хорошого силосу або зміни його хімічних/поживних показників, але не можна уникнути псування погано підготовленого рослинного матеріалу або досягти значного поліпшення його характеристик (Yitbarek et al., 2014).

Закваски для силосування можна поділити на 4 групи (Muck et al., 2018; Arriola et al., 2011; Tang et al., 2023):

– Закваски з гомоферментативними МКБ. Є найдавнішою групою заквасок для силосування, яка активно використовується для досягнення швидкого зниження рН рослинного матеріалу й підвищення кількості МКБ у силосі, що обмежує можливості розвитку патогенних мікроорганізмів. Відбувається це за рахунок особливостей метаболізму гомоферментативних МКБ, які перетворюють гексози шляхом Ембдена-Меєргофа-Парнаса майже виключно в молочну кислоту. Варто зазначити, що в цій групі також використовуються закваски з факультативними гетероферментативними МКБ, які при відсутності гексоз можуть метаболізувати й пентози. Загалом, використання заквасок цього типу призводить до більшого вмісту СР в силосі (хоча присутні варіації залежно від виду рослини), більшого вмісту молочної та меншого вмісту оцтової кислот порівняно з необробленим силосом. Метааналіз, проведений (Adesogan et al., 2020), вказує на те, що використання заквасок цієї групи призводить до збільшення виробництва молока худобою, яка вживає отриманий силос.

– Закваски з облигатними гетероферментативними МКБ. Як уже згадувалося, ці бактерії метаболізують гексози та пентози до молочної та оцтової кислот і вуглекислого газу. Найбільшого поширення у практичній та науковій сферах набули штами *Ln. buchneri*, використання яких дозволяє досягти суттєвого зростання аеробної стабільності силосу при порівняно незначних (іноді до 1%) втратах СР.

– Комбіновані закваски з облигатними гетероферментативними МКБ і гомоферментативними або факультативними гетероферментативними МКБ. Дана група заквасок поєднує переваги двох попередніх: із одного боку, швидке вироблення молочної кислоти й відповідна антимікробна дія, із іншого – перетворення молочної кислоти до оцтової, що забезпечує захист від розвитку дріжджів та цвілевих грибів і підвищує аеробну стабільність. Прикладами таких заквасок є поєднання *Ln. buchneri* з *Lactiplantibacillus plantarum*, *Pediococcus pentosaceus*, *Pediococcus acidilactici*, *Lacticaseibacillus casei*, *Lactococcus lactis*, *Enterococcus faecium* тощо. Метааналіз (Bernardi et al., 2019) показує, що використання комбінованих заквасок для отримання силосу з кукурудзи призводить до зниження виробництва молока худобою, однак це дослідження не стосується інших видів рослинної сировини і деякі його результати суперечать результатам, отриманим у інших роботах, наприклад, (Oliveira et al., 2017), тому дане питання потребує додаткового розгляду.

– Закваски з іншими бактеріями. На даний момент існують промислові закваски для силосування з *Acidipropionibacterium acidipropionici*, *Propionibacterium freudenreichii* та *Bacillus subtilis*, оскільки ці види здатні підвищувати аеробну стабільність силосу за рахунок виділення пропіонової кислоти та бактеріюцинів відповідно. Також дослідниками розглядаються *Streptococcus equinus*, який здатен до швидкого зниження рН рослинного матеріалу, і навіть деякі дріжджі, які пригнічують розвиток шкідливої мікрофлори. Окрім цього, деякі роботи вивчають застосування грибів, наприклад, *Aspergillus oryzae*, оскільки їх присутність у заквасці підвищує мікробну активність і, як наслідок, – використання клітковини кормів худобою.

Після розгляду усіх груп заквасок стає очевидним той факт, що жодна з них не надає широкого переліку переваг, позбавленого недоліків, а також не є універсальним рішенням для будь-якого типу сировини або умов силосування. У кожному конкретному випадку рішення про використання заквасок варто приймати на основі системи врахування головних побажань до готового продукту та компромісів стосовно його характеристик. Варто враховувати, що використання заквасок матиме суттєвий вплив на мікробний склад силосу і призводитиме до зниження різноманіття його мікробіоти (Keshri et al., 2019), при цьому внесення бактерій певного виду не гарантує розвитку саме цих бактерій у рослинній сировині, якщо протилежне вже не було підтверджене експериментальним шляхом (Cui et al., 2022).

Закваски для силосу як спосіб оптимізації біогазового процесу. Використання різних заквасок для силосування може мати значний вплив на розвиток та взаємозв'язки у мікробіоті рослинної сировини, а також на метаболізм основних метаболічних компонентів, таких як вуглеводи, амінокислоти, нуклеотиди, вітаміни тощо (Bai et al., 2021). Мікроорганізми сило-

су, у свою чергу, впливатимуть на мікробний склад біогазового реактора (Satpathy et al., 2016). У деяких дослідженнях, де силос отримували без застосування заквасок, узагалі не було виявлено статистично значущої різниці в кількості метану, одержаного з несилосованої та силосованої біомаси (Wu et al., 2021). Важливим є формування активної мікробної популяції, яка дозволить уникнути великих втрат СР силосу, адже це призводитиме до низького виробництва біогазу (Cui et al., 2021). Особливо корисними з цієї точки зору є МКБ – наприклад, процеси силосування, у яких домінували бактерії цієї групи (*Atopostipes*, *Lactobacillus*), дозволяли отримати силос із виробництвом метану на 7,1–9,6% вищим від контролю, у якому не було виявлено чітко сформованих домінуючих груп бактерій. Цей вихід також компенсував втрати при зберіганні (5,0–7,3%), що робило весь процес сам по собі енергетично доцільним (Sun et al., 2020). У таблиці підсумовано наявні в літературі закваски для силосування, ефективність яких щодо виробництва біогазу була досліджена.

Вплив заквасок на вихід біогазу

Закваска	Рослинна сировина	Ефект (порівняно з контролем)	Посилання
<i>Lpb. plantarum</i>	Кукурудза	Біогаз: без змін CH ₄ : без змін Інтенсивність газовиділення: без змін	(Sun et al., 2022)
<i>Lacticaseibacillus paracasei</i>		Біогаз: + 4,3% CH ₄ : + 17,1% Інтенсивність газовиділення: +7%	
<i>Lactiplantibacillus paraplantarum</i>		Біогаз: – 12,7%	
Bonsilage Mais® (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>Ln. buchneri</i>)			(Vervaeren et al., 2010)
Sil-all 4 × 4® (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>Ligilactobacillus salivarius</i> , <i>P. acidilactici</i> , <i>E. faecium</i> , α-амілаза, целюлаза, геміцелюлаза, пентозаназа)		Біогаз: + 10,1%	
Silo-King® GS (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>E. faecium</i>)		Біогаз: без змін CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін Інтенсивність газовиділення: + 11,5% на початку процесу; – 11,6% наприкінці процесу	(Menardo et al., 2015)*
BIO-SIL® (<i>Lpb. plantarum</i>)		CH ₄ : без змін	(Herrmann et al., 2015)*
BioCool® (<i>Ln. buchneri</i> , β-глюканаза, ксиланаза)		CH ₄ : без змін	
PIONEER® 11CH4 (<i>Ln. buchneri</i>)		CH ₄ : без змін	
PIONEER® 11CFT (<i>Lcb. casei</i> , <i>Ln. buchneri</i>)		CH ₄ : без змін	
SILASIL ENERGY® (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>Ln. buchneri</i>)		CH ₄ : без змін	
<i>Lpb. plantarum</i> , <i>Lacticaseibacillus rhamnosus</i> , <i>Ln. buchneri</i>	Біогаз: без змін CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін	(Haag et al., 2015)*	
<i>Lpb. plantarum</i> , <i>Lcb. paracasei</i>	Щириця (амарант)	Біогаз: без змін CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін	
<i>Ln. buchneri</i>		Біогаз: без змін CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін	
	Кукурудза	Біогаз: без змін CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін	
	Спартіна гребінчаста	Біогаз: + 10% Вміст CH ₄ : без змін Ефективність: 99,8% (теор.)	

Продовження таблиці

PIONEER® 11CH4 (<i>Ln. buchneri</i>)	Спартіна гребінчаста	CH ₄ : 23% Вміст CH ₄ : без змін Інтенсивність газовиділення: без змін	(Kupryś-Caruk et al. 2023)
	Міскант гігантський	CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін Інтенсивність газовиділення: + 60,6%	
	Андропогон Жерара	CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін Інтенсивність газовиділення: + 34,1%	
	Просо протоподібне	CH ₄ : без змін Вміст CH ₄ : без змін Інтенсивність газовиділення: + 31,1 %	
<i>Levilactobacillus brevis</i>		CH ₄ : +13,1 % Інтенсивність газовиділення: + 30,3 %	(Zhao et al. 2017)
<i>Lv. brevis</i> + ксиланаза		CH ₄ : +17,4 % Інтенсивність газовиділення: + 51,2 %	
SILASIL ENERGY® (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>Ln. buchneri</i>)	Кукурудза	CH ₄ : без змін	(Herrmann et al. 2011)*
	Гібрид сорго (<i>Sorghum bicolor</i> × <i>sudanense</i>)	CH ₄ : без змін	
	Жито посівне	CH ₄ : без змін	
	Тритикале	CH ₄ : без змін	
BONSILAGE PLUS (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>Ln. buchneri</i>)	Кукурудза	CH ₄ : без змін	
BIO-SIL® (<i>Lpb. plantarum</i>)		CH ₄ : без змін	
<i>Lpb. plantarum</i> , <i>P. acidilactici</i> , <i>Lcb. paracasei</i>	Міскант гігантський	CH ₄ : без змін	(Whittaker et al. 2016)
<i>Lv. brevis</i> , <i>Limosilactobacillus fermentum</i>		CH ₄ : без змін	
<i>Lpb. plantarum</i> , <i>Lcb. rhamnosus</i> , <i>Ln. buchneri</i>	Кава аравійська	Біогаз: + 158 % Вміст CH ₄ : +34 %	(Getachew et al. 2023)
Trilac® HC (<i>Lpb. plantarum</i> , <i>P. pentosaceus</i> , ксиланаза, β-глюканаза, галактомананаза) + меляса	Цукрова тростина	CH ₄ : +51,4 %	(Janke et al. 2019)*

*Роботи, які прямо зазначають, що при розрахунку виходу метану вносили поправку на зміну вмісту СР/летких твердих речовин (ЛТР) у біомасі при силосуванні.

Як видно з таблиці, інформація, отримана в різних дослідженнях, може бути суперечлива. Одним із важливих критеріїв, які важливо враховувати при оцінці наведених даних, є наявність коригування вмісту СР/ЛТР через їх втрати під час зберігання, що було показано у кількох незалежних роботах (Kreuger et al., 2011; Herrmann et al., 2011). Відсутність відповідних поправок може призводити до переоцінки кількості виробленого метану, через що видаватиметься, що певний мікроорганізм/закваска є перспективнішими, ніж насправді. Наприклад, у дослідженні (Getachew et al., 2023) не зазначено, що опубліковані дані були скориговані, і наведений вихід біогазу кратно перевищує усі інші літературні дані. Це може бути пов'язано з особливостями субстрату – кави аравійської, – подібних досліджень якого знайти не вдалося, але може бути й похибкою через відсутність поправки на зміну вмісту СР/ЛТР. Із метою забезпечення об'єктивності подальших висновків, для аналізу використовуватимуться переважно скориговані дані, а в разі зворотного – це буде прямо зазначено й уточнено.

Переважно внесення заквасок для силосування, які містять виключно МКБ, до свіжої або зів'ялої рослинної сировини не призводить до підвищення вироблення біогазу, виходу метану або вмісту метану в біогазі. Лише окремі роботи (Kupryś-Caruk et al., 2021) повідомляють про певні успіхи в цьому напрямку. Натомість більше свідчень є на користь того, що силосування прискорює вихід біогазу на початку АЗ і зменшує його вихід наприкінці процесу (Menardo et al., 2015). На це звертали увагу й автори ряду інших робіт, хоча невідомо, чи

вносили вони поправки на втрати СР/ЛТР у силосі: (Zhao et al., 2017) наголошували, що використання заквасок для силосування здатне суттєво підвищити швидкість біометанізації, а (Kupryś-Caruk et al., 2023) дійшли до висновку, що при їх застосуванні 90% усього біогазу виробляється за короткий період часу, – тобто внаслідок перебігу метаболічних та біохімічних процесів під час силосування більше речовин стають легко доступними для мікроорганізмів перших фаз АЗ (гідроліз, ацидогенез, ацетогенез), що й прискорює перетворення цих сполук і початок власне метаногенезу.

У своїй роботі (Herrmann et al., 2015) обґрунтовують, що, хоча закваски для силосування не змогли статистично значущо підвищити вихід метану, вони суттєво підвищили аеробну стабільність силосу при впливі на нього кисню у період від кількох годин до кількох діб – обов’язковий етап при завантаженні готового продукту у біогазові реактори. Відсутність такої стійкості призводить до втрати СР, деградації молочної та оцтової кислот, зменшення вмісту спиртів. Їх дослідження показало, що після 49 днів силосування найменш стійким до аеробної деградації є силос, у який додавали закваски виключно із факультативними гетероферментативними (іноді за основним типом метаболізму класифікуються як гомоферментативні) МКБ (*Lpb. plantarum*), і лише на другому місці йде контроль без жодних добавок. Найвищу ж аеробну стабільність показав силос, інокульований заквасками із *Ln. buchneri*, *Ln. buchneri* + ферменти, *Ln. buchneri* + *Lcb. casei*, *Ln. buchneri* + *Lpb. plantarum* (статистична значущість між ними не виявлена).

Також доведено, що силосування не збільшує фактичний вихід біогазу, але є хорошим методом для збереження сировини. У якості пояснення швидкого виділення метану на початку АЗ, отриманого в дослідженні, вони запропонували посилене виділення спиртів завдяки внесенню заквасок. Подібні результати пропонують і інші автори (Menardo et al., 2015). У огляді (Herrmann et al., 2016), який розглядав характеристики 405 силосів, 43 видів рослин, було виявлено, що, по-перше, чим більше в рослині лігніну, тим меншим буде вихід метану, а по-друге, накопичення масляної кислоти та спиртів мають позитивний вплив на утворення біогазу. Дослідження (Herrmann et al., 2011) узагалі показало, що 75–96% змін у кількості отриманого з силосу метану припадає на оцтову й масляну кислоти та етанол. У окремих роботах, де було зафіксовано збільшення виходу біогазу після застосування заквасок, було також виявлено підвищене накопичення оцтової та пропіонової кислот (Kupryś-Caruk et al., 2021). Наявні дані показують, що головними факторами, які відіграють роль у швидкому накопиченні біометану, є леткі жирні кислоти та етанол. Робота (Kupryś-Caruk et al., 2023), у якій відбувалося зростання виходу метану зі збільшенням накопичення ацетату, але не лактату, вказує на те, що акумуляція попередника оцтової кислоти (молочна кислота для метаболічних шляхів деяких МКБ (Oude Elferink et al. 2001) не є стимулятором біометанізації.

За утворення летких жирних кислот у силосі відповідають переважно облигатні гетероферментативні МКБ (Sun et al., 2023; Eikmeyer et al., 2013), тоді як факультативні гетероферментативні виробляють їх у невеликих кількостях (Liu et al., 2022; Rahman et al., 2017). Закваски з обома типами МКБ можуть зменшувати втрати СР та збільшувати накопичення молочної й оцтової кислот (Whittaker et al., 2016), що, відповідно, матиме позитивний вплив як на аеробну стійкість, так і на швидкість продукування біометану. Як уже згадувалося, внесення заквасок до рослинної сировини має значний вплив на подальшу мікробну популяцію силосу і на перебіг біохімічних реакцій (Bai et al., 2021). Наслідком цього є те, що використання факультативних гетероферментативних МКБ може все одно призводити до накопичення оцтової кислоти. Наприклад, у дослідженні (коригування на зміну вмісту СР/ЛТР не зазначене, але наявні інші закваски, які показали відсутність результатів) (Sun et al., 2022) внесення *Lpb. paraplantarum* привело до зменшення вмісту масляної кислоти на 38% і збільшення вмісту оцтової кислоти на 40%. Окрім того, здатність до накопичення летких жирних кислот у певних межах залежить від характеристик штаму – виділені (Leite et al., 2025) штами *Lpb. plantarum* накопичували від 9,93 до 40,41 г/кг ацетату при силосуванні сорго за однакових умов.

Хоча з наведених даних переважно складається враження, що варто зосереджувати увагу на заквасках на основі облигатних гетероферментативних МКБ, особливо *Ln. buchneri*, яка зустрічається у багатьох роботах, у такого підходу можуть бути свої недоліки. Як вважають автори статті (McEniry et al., 2014), використання цього типу МКБ може призводити до втрат СР та енергії, що не буде компенсовано позитивними факторами такого підходу до процесу. Зазначають (Herrmann et al., 2015), що на 0,3–2,5% більше втрат СР при силосуванні порівняно з контролем є типовим явищем при використанні облигатних гетероферментативних МКБ. Натомість автори статей (Vervaeke et al., 2010; Menardo et al., 2015) вказують, що втрати СР у силосі, який був оброблений гомоферментативними і факультативними гетероферментативними МКБ, а також ентерококами, у їхніх дослідженнях знаходяться в межах норми, хоча різниця втрат із необробленими силосами в одному випадку склала 2,8% (Menardo et al., 2015).

Перспективи розвитку та невирішені питання. Незалежно від обсягу та режиму виробництва біогазу, завжди актуальним лишається питання збільшення вмісту в ньому метану задля підвищення його ефективності. Наприклад, неоптимізований АЗ на основі кукурудзяного силосу може продукувати біогаз, який містить усього 50% метану (Vítězová et al., 2021), а ретельно відпрацьований і налагоджений процес даватиме біогаз із вмістом метану 76,7% у найкращому випадку (Li et al., 2020), що все ще менше від вмісту метану в природному газі (Aravani et al., 2022). Найбільшу популярність в науковому середовищі на даний момент має захоплення вуглекислого газу різними способами (технології мембранного розділення (Xu et al., 2024; Tomczak et al., 2024; Guerrero Piña et al., 2024), біоконверсія CO₂ за допомогою мікроорганізмів (Chaikitkaew et al., 2024), водне промивання (water scrubbing), амінове промивання, адсорбція при зміні тиску (pressure swing adsorption) (Khan et al., 2021), серед яких значну перспективність мають електрохімічні системи (Mohammadpour et al., 2025). Останнім часом серед них особливо набувають поширення системи мікробного електросинтезу, які поєднують мікробний метаболізм із електрохімічними реакціями, що дозволяє отримувати високоефективні та перспективні технології захоплення Карбону (Chung et al., 2024). Іноді такі технології можуть застосовуватися для одночасного синтезу речовин на основі Карбону, що дозволяє поєднати кілька процесів та досягти суттєво вищого рівня економічності процесу. Наприклад, (Das et al. 2024) завдяки мікробному електросинтезу змогли отримувати 70,55 г/(м²·день) оцтової кислоти з CO₂, виділеного з біогазу, за допомогою однієї електросинтетичної комірки. Важливим також є видалення H₂S з газової суміші, оскільки його високий вміст може призводити до швидкого зношення та пошкодження двигунів внутрішнього згоряння. Для цього процесу також активно розробляються різні фільтраційні технології, у тому числі з використанням мікроорганізмів (Ibrahim et al., 2022; Muñoz et al., 2023). Впровадження цих технологій та їх поєднання з отриманням біогазу з силосу із заквасками дозволить розкрити повний потенціал рослинної сировини, що особливо важливо в умовах постійного скорочення доступних земельних угідь для вирощування сільськогосподарських та енергетичних культур (Arumugam, 2025).

Іншою проблемою при промисловому виробництві біогазу є контроль та моніторинг АЗ у великих об'ємах, де невеликі відхилення означають значні втрати продукту. Із усе більшим поширенням штучних нейронних мереж, широкого кола застосувань набувають методи машинного навчання – і їх активно впроваджують для передбачення перебігу та оптимізації процесів біометанізації, у тому числі лігноцелюлозовмісних субстратів на кшталт силосу, що відповідно означатиме збільшення обсягів та якості отриманого біогазу (Salamattalab et al., 2024; Sonwai et al., 2023; Ling et al., 2024).

Розглядаючи перспективи саме у сфері заквасок для силосування, варто відзначити, що на фоні постійного зростання потреби в екологічно прийнятному та доступному біопаливі, включно з біогазом, одним із найбільш актуальних на даний момент є питання отримання генно-модифікованих штамів мікроорганізмів, особливо зі здатністю виробляти лігноцелюлозоруйні ферменти (Banu et al., 2021). Такий підхід дозволить суттєво зменшити витрати

у подальшій перспективі, при цьому досягаючи максимальних показників ефективності та обсягів виробництва біогазу. Іншою його перевагою є уникнення зниженої продуктивності, яка іноді супроводжує поєднання МКБ зі сторонніми ферментами (Liu et al., 2019). Уже є природні штами МКБ, які виробляють ферменти, здатні розкласти складні рослинні біополімери. Наприклад (Kurgús-Caruk et al., 2021), описали *Ln. buchneri* M B/00077, який має гени, що кодуєть ендо-1,4-ксилазазу та β -ксилозидазу, і, відповідно, виробляє їх.

Прикладом успішного впровадження такої технології може бути робота (Liu et al., 2019), які перенесли гени целюлази із *Trichoderma reesei* до *L. lactis*, унаслідок чого генномодифіковані штами були здатні продукувати ендоглюконазу, целобіогідролазу та β -глюкозидазу. Силос, отриманий із використанням нових штамів, мав меншу кількість лігноцелюлози, геміцелюлози та целюлози, а також клітковини, і вирізнявся нижчим рН та кількістю спор клостридій.

Окрім того, великою точністю та ефективністю редагування генома характеризується система CRISPR/Cas9, яка вже знайшла застосування у багатьох роботах для підвищення продуктивності мікроорганізмів і отримання збільшених обсягів біопалива (Banu et al., 2021). При цьому досліджень, у яких би вона використовувалася для отримання заквасок для силосування із поліпшеною лігноцелюлозоруйнівною здатністю, знайти не вдалося, що підкреслює необхідність розгляду цього напрямку в майбутньому.

Значним невирішеним питанням, пов'язаним із заквасками для силосування для отримання біогазу і з отриманням біогазу з силосу загалом є відсутність внесення поправок на зміну кількості СР/ЛТР під час силосування, попри те, що багато робіт вказують на потребу її урахування й існують різні підходи та формули для здійснення цього (Kreuger et al., 2011; Pakarinen et al., 2011; Weibbach et al., 2008; Plöchl et al., 2009; Li et al., 2017; Hillion et al., 2018). Важливим етапом досліджень є обробка експериментальних даних із необхідними корекціями, щоб отриману інформацію можна було обробляти, порівнювати зі свідченнями інших авторів і використовувати на практиці.

Висновки. Відсутність поправок виходу біометану на втрати СР/ЛТР під час силосування у багатьох роботах ускладнює оцінку ефективності різних заквасок і може призводити до суперечливих висновків навіть у добре вивчених аспектах теми. Унаслідок цього, необхідним є проведення експериментальних досліджень у цьому напрямку для розв'язання численних питань та вибору найкращих стратегій подальшого розвитку.

На даний момент, найбільш ефективними заквасками для силосування з метою отримання біогазу видаються комбіновані закваски, які містять МКБ з різних груп та ферменти. Перспективними мікроорганізмами є *Ln. buchneri*, *Lpb. plantarum*, *P. pentosaceus*, а з інших бактерій також використовувалася *E. faecium*. Ферменти мають добиратися за здатністю розкласти лігноцелюлозу, а також за їхньою продуктивністю у складі закваски. Підтверджену на практиці ефективність мають β -глюканаза, ксилаза та галактомананаза.

Окремі елементи рисунків були отримані з <https://www.vecteezy.com/> та <https://scidraw.io/>.

REFERENCES

- Adesogan, A. T., & Arriola, K. G. (2020). Bacterial inoculants for improving silage quality and animal performance. Department of Animal Science.
- Alimi, N., Assani, A. S., Worogo, H. S., Baco, N. M., & Traoré, I. A. (2024). Livestock feed resources used as alternatives during feed shortages and their impact on the environment and ruminant performance in West Africa: a systematic review. *Front. Vet. Sci.*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1352235>
- Aravani, V. P., Sun, H., Yang, Z., Liu G., Wang, W., Anagnostopoulos, G., Syriopoulos, G., Charisiou, N. D., Goula, M. A., Kornaros, M., & Papadakis, V. G. (2022). Agricultural and livestock sector's residues in Greece & China: Comparative qualitative and quantitative characterization for assessing their potential for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111821>

- Arriola, K. G., Kim, S. C., Staples, C. R., & Adesogan, A. T. (2011). Effect of applying bacterial inoculants containing different types of bacteria to corn silage on the performance of dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 94(8), 3973–9. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4070>
- Arumugam, R. (2025). Assessing the Impact of Agricultural Land Reduction on Future Global Food Security: Challenges and Sustainable Solutions. *Indian Journal of Natural Sciences*, 15(88), 89066–89083
- Bai, B. J., Ding, Z., Ke, W., Xu, D., Wang, M., Huang, W., Zhang, Y., Liu, F., & Guo, X. (2021). Different lactic acid bacteria and their combinations regulated the fermentation process of ensiled alfalfa: ensiling characteristics, dynamics of bacterial community and their functional shifts. *Microb. Biotechnol.*, 14(3), 1171–1182. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13785>
- Banu, J. R., Kumar, G., & Chattopadhyay, I. (2021). Management of microbial enzymes for biofuels and biogas production by using metagenomic and genome editing approaches. *3 Bio-tech.*, 11(10), 429. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02962-x>
- Bernardi, A., Haster, C. J., Silva, A. W. L., Reis, R. A., & Rabelo, C. H. S. (2019). A meta-analysis examining lactic acid bacteria inoculants for maize silage: Effects on fermentation, aerobic stability, nutritive value and livestock production. *Grass Forage Sci.*, 74(4), 596–612. <https://doi.org/10.1111/gfs.12452>
- Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., & Muck, R. E. (2018). Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5). <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
- Chaikitkaew, S., Wongfaed, N., Mamimin, C. S., O-Thong, & Reungsang, A. (2024). Conversion of carbon dioxide in biogas into acetic acid by *Clostridium thailandense* immobilized on porous support materials. *Heliyon*, 10(4), e26378, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26378>
- Charles, Obinwanne Okoye, Yanfang, Wu, Yongli, Wang, Lu, Gao, Xia, Li, & Jianxiong, Jiang (2023). Fermentation profile, aerobic stability, and microbial community dynamics of corn straw ensiled with *Lactobacillus buchneri* PC-C1 and *Lactobacillus plantarum* PC1-1. *Microbiological Research*, 270, 127329. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127329>
- Chung, T. H., Dhillon, S. K., Shin, C., Pant, D., & Dhar, B. R. (2024). Microbial electrosynthesis technology for CO₂ mitigation, biomethane production, and ex-situ biogas upgrading. *Biotechnology Advances*, 77, 108474. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108474>
- Cordeiro, M. R. C., Mengistu, G., Pogue, S. J., Legesse, G., Gunte, K. E., Taylor, A. M., Ominski, K. H., Beauchemin, K. A., McGeough, E. J., Faramarzi, M., & McAllister, T. A. (2022). Assessing feed security for beef production within livestock-intensive regions. *Agric. Syst.*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103348>
- Craig, A., Gordon, A. W., Stewart, S., & Ferrisa, C. P. (2020). Supplementation strategies for lactating dairy cows offered very high quality grass silages: Starch-based or fibre-based concentrates offered with or without straw. *Livest. Sci.*, 234, 103973 <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.103973>
- Cui, X., Sun, H., Wen, X., Sobhi, M., Guo, J., & Dong, R. (2021). Urea-assisted ensiling process of wilted maize stover for profitable biomethane production. *Sci. Total Environ.* 757, (25), 143751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143751>
- Cui, X., Yang, Y., Zhang, M., Jiao, F., Gan, T., Lin, Z., Huang, Y., Wang, H., Liu, S., Bao, L., Su, C., & Qian, Y. (2022). Optimized Ensiling Conditions and Microbial Community in Mulberry Leaves Silage With Inoculants. *Front. Microbiol.*, 2(13), 813363. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.813363>
- Das, S., Cheela, V. R. S., Dubey, B. K., & Ghangrekar, M. M. (2024). Design and operation of pilot-scale microbial electrosynthesis for the production of acetic acid from biogas with economic and environmental assessment. *Heliyon*, 29, 10(21), e39950. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39950>
- Dolci, P., Tabacco, E., Cocolin, L., & Borreani, G. (2011). Microbial dynamics during aerobic exposure of corn silage stored under oxygen barrier or polyethylene films. *Appl. Environ. Microbi-*

- ol., 77(21), 7499–507. <https://doi.org/10.1128/AEM.05050-11>
- Driehuis, F., Wilkinson, J. M., Jiang, Y., Ogunade, I., & Adesogan, A. T. (2018). Silage review: Animal and human health risks from silage. *Journal of Dairy Science*, 101(5). <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13836>
- Du, Z., Yamasaki, S., Oya, T., & Cai, Y. (2023). Cellulase-lactic acid bacteria synergy action regulates silage fermentation of woody plant. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1), 125. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02368-2>
- Eikmeyer, F. G., Köfinger, P., Poschenel, A., Jünemann, S., Zakrzewski, M., Heintz, S., Mayrhofer, E., Grabherr, R., Pühler, A., Schwab, H., & Schlüter, A. (2013). Metagenome analyses reveal the influence of the inoculant *Lactobacillus buchneri* CD034 on the microbial community involved in grass ensiling. *J. Biotechnol.*, 10, 167(3), 334–43. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.07.021>
- Franco, T. R., Buffière, P., & Bayard, R. (2016). Ensiling for biogas production: Critical parameters. A review. *Biomass and Bioenergy*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.014>
- Gallegos, D., Wedwitschka, H., Moeller, L., Zehnsdorf, A., & Stinner, W. (2017). Effect of particle size reduction and ensiling fermentation on biogas formation and silage quality of wheat straw. *Bioresour. Technol.*, 245(Pt A), 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.137>
- Getachew, M. T., Hiruy, A. M., Mazharuddin, M. M., Mamo, T. T., Feseha, T. A., & Mekonnen, Y. S. (2023). Effect of chemical and biological additives on production of biogas from coffee pulp silage. *Sci Rep.*, 27, 13(1), 12199. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39163-w>
- Goldsztejn, M., Grenda, T., Kozieł, N., Sapała, M., Mazur, M., Sieradzki, Z., Król, B., & Kwiatek, K. (2020). Potential determinants of *Clostridium* spp. occurrence in Polish silage. *J. Vet. Res.*, 6, 64(4), 549–555. <https://doi.org/10.2478/jvetres-2020-0075>
- Guerrero Piña, J. C., Alpízar, D., Murillo, P., Carpio-Chaves, M., Pereira-Reyes, R., Vega-Baudrit, J., & Villarreal, C. (2024). Advances in mixed-matrix membranes for biorefining of biogas from anaerobic digestion. *Front Chem.*, 3, 12, 1393696. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1393696>
- Haag, N. L., Nägele, H. J., Fritz, T., & Oechsner, H. (2015). Effects of ensiling treatments on lactic acid production and supplementary methane formation of maize and amaranth--an advanced green biorefining approach. *Bioresour. Technol.*, 178, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.048>
- Herrmann, C., Heiermann, M., & Idler, C. (2011). Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresour. Technol.*, 102(8), 5153–5161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.012>
- Herrmann, C., Idler, C., & Heiermann, M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresour. Technol.*, 206, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.058>
- Herrmann, C., Idler, C., & Heiermann, M. (2015). Improving aerobic stability and biogas production of maize silage using silage additives. *Bioresour. Technol.*, 197, 393–403. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.114>
- Hillion, Marie-Lou, Moscoviz, R., Trably, E., Leblanc, Y., Bernet, N., Torrijos, M., & Escudi, R. (2018). Co-ensiling as a new technique for long-term storage of agro-industrial waste with low sugar content prior to anaerobic digestion. *Waste Manag.*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.024>
- Ibrahim, R., El Hassni, A., Navaee-Ardeh, S., & Cabana, H. (2022). Biological elimination of a high concentration of hydrogen sulfide from landfill biogas. *Environ Sci Pollut Res Int. Jan*, 29(1), 431–443. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15525-7>
- Iqbal, M. A., & Iqbal, A. (2015). Overviewing forage shortage for dairy animals and suitability of forage sorghum for ensiling. *Glob. Vet.*, 14(2). 10.5829/idosi.gv.2015.14.02.92128

- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *J. Energy*, 1–43. <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>
- Keshri, J., Chen, Y., Pinto, R., Kroupitski, Y., Weinberg, Z. G., & Sela Saldinger, S. (2019). Bacterial Dynamics of Wheat Silage. *Front Microbiol.*, 9(10), 1532. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01532>
- Kintl, A., Vítěz, T., Huňady, I., Sobotková, J., Hammerschmiedt, T., Vítězová, M., Brtnický, M., Holátko, J., & Elbl, J. (2023). Effect of Mycotoxins in Silage on Biogas Production. *Bioengineering*, 10(12), 1387. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121387>
- Khan, M. U., En Lee, J. T., Bashir, M. A., Dissanayake, P. D., Yong, Ok S., Tong, Y. W., Shariati, M. A., Wu, S., & Ahring, B. K. (2021). Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111343, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>
- Kolečkář, J., Mrkvicová, E., & Šťastník, O. (2024). Effect of Silage Quality on the Health and Performance of High-Producing Dairy Cows: A review. *Acta fytotechn Zootech*, 27(4), 266–276.
- Kreuger, E, Nges, I.A., & Björnsson, L. (2011). Ensiling of crops for biogas production: effects on methane yield and total solids determination. *Biotechnol Biofuels*, 27(4), 44. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-44>
- Kumawat, R., Gidwani, L., & Rana, K. B. (2024). Comparative analysis of life cycle assessment of biogas-powered and coal-powered power plant for optimized environmental operation. *Heliyon. Elsevier Ltd*, 10(20), e39155. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39155>
- Kupryś-Caruk, M., Chońska, R., Dekowska, A., & Piasecka-Jóźwiak, K. (2021). Silage quality and biogas production from *Spartina pectinata* L. fermented with a novel xylan-degrading strain of *Lactobacillus buchneri* M B/00077. *Sci. Rep.*, 23, 11(1), 13175. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92686-y>
- Kupryś-Caruk, M., Lisowski, A., & Chomontowski, C. (2023). The effect of silage additive on the kinetics of biogas production from lignocellulosic perennial crops. *J. Water L. Dev.*, 56, 58–66 <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143745>
- Lehtoranta, S., Tampio, E., Rasi, S., Laakso, J., Vikki, K., & Luostarinen, S. (2024). The implications of management practices on life cycle greenhouse gas emissions in biogas production. *J. Environ. Manage. Elsevier Ltd*, 366, 121884. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121884>
- Leite, G. M., Santos, E. M., de Oliveira, J. S., Pereira, D. M., de Oliveira, C. J. B., Cavalcanti, J. V. F. L., de Lima, V. M. R., de Lima, J. P. V. d. M. F., Gomes, P. G. B., & Edvan, R. L. (2025). Isolation of Acetic Acid-Producing Bacterial Strains and Utilization as Microbial Inoculants in Sorghum Silages. *Agriculture*, 15, 241. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030241>
- Li, Y., Hua, D., Xu, H., Jin, F., Mu, H., Zhao, Y., & Fang, X. (2020). Acidogenic and methanogenic properties of corn straw silage: Regulation and microbial analysis of two-phase anaerobic digestion. *Bioresour Technol*, 307, 123180. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123180>
- Li, L., Yuan, Z., Sun, Y., Kong, X., Dong, P., & Zhang, J. (2017). A reused method for molasses-processed wastewater: Effect on silage quality and anaerobic digestion performance of *Pennisetum purpureum*. *Bioresour Technol.*, 241, 1003–1011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.117>
- Ling, J. Y. X., Chan, Y. J., Chen, J. W., Chong, D. J. S., Tan, A. L. L., Arumugasamy, S. K., & Lau, P. L. (2024). Machine learning methods for the modelling and optimisation of biogas production from anaerobic digestion: a review. *Environ Sci Pollut Res Int.*, 31(13), 19085–19104. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32435-6>
- Liu, J., Zuo, X., Peng, K., He, R., Yang, L., & Liu, R. (2022). Biogas and Volatile Fatty Acid Production During Anaerobic Digestion of Straw, Cellulose, and Hemicellulose with Analysis of Microbial Communities and Functions. *Appl Biochem Biotechnol.*, 194(2), 762–782. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03675-w>

- Liu, Q., Li, J., Zhao, J., Wu, J., & Shao, T. (2019). Enhancement of lignocellulosic degradation in high-moisture alfalfa via anaerobic bioprocess of engineered *Lactococcus lactis* with the function of secreting cellulase. *Biotechnol. Biofuels.*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1429-4>
- McEniry, J., Allen, E., Murphy, J.D., & O'Kiely, P. (2014). Grass for biogas production: The impact of silage fermentation characteristics on methane yield in two contrasting biomethane potential test systems, *Renewable Energy*, 63, 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.052>
- de Melo, N. N., Carvalho-Estrada, P. d. A., Tavares, Q. G., Pereira, L. d. M., Delai Vigne, G. L., Camargo Rezende, D. M. L., & Schmidt, P. (2023). The Effects of Short-Time Delayed Sealing on Fermentation, Aerobic Stability and Chemical Composition on Maize Silages. *Agronomy*, 13(1), 223. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010223>
- Menardo, S., Balsari, P., Tabacco, E., & Borreani, G. (2015). Effect of Conservation Time and the Addition of Lactic Acid Bacteria on the Biogas and Methane Production of Corn Stalk Silage. *Bioenerg. Res.*, 8, 1810–1823. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9637-7>
- Mohammadi, B., Heydari, M., Abdolkhani, D., & Cheshmeh, S. E. J. S. (2024). Producing Silage from Food and Agricultural Waste and Fodder Using Microorganisms: A Review. *Asian J. Res. Rev. Agric.*, 6(1), 49–57. <https://prh.globalpresshub.com/review-history/1539>
- Mohammadpour, H., Cheng, K. Y., Pivrikas, A., & Ho, G. (2025). A review of biogas upgrading technologies: key emphasis on electrochemical systems. *Water Sci Technol.*, 91(2), 93–116. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.394>
- Mohd-Setapar, S. H., Abd-Talib, N., & Aziz, R. (2012). Review on Crucial Parameters of Silage Quality. *APCBEE Procedia*, 3, 99–103. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.06.053>
- Muck, R. E., Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., & Kung, L. Jr. (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *J. Dairy Sci.*, 101(5), 3980–4000. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13839>
- Muñoz, C. C., Korshin, R., Naddeo, G., Belgiorio, V., Zarra, V., & Tiziano. (2023). Biological desulfurization of biogas: A comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies. *Science of The Total Environment.*, 893, 164689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164689>
- Neumann, M., Cristo, F. B., Pontarolo, G. B., Silva, M. R. H. da, Heker Junior, J. C., Sidor, F. de S., & Machado, M. P. (2021). Effects of the types of sealing on chemical-fermentation characteristics of corn silage from the feed out face of trench silos. *Semina: Ciências Agrárias*, 42(3Supl1), 1891–1908. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n3Supl1p1891>
- Neureiter, M., Teixeira Pereira dos Santos, J., Perez Lopez, C., Pichler, H., Kirchmayr, R., & Braun, R. (2005). Effect of silage preparation on methane yields from whole crop maize silages. *Proc. 4th Int. 89 Symp. Anaerob. Dig. Solid Waste*, 1, 109–115.
- Oliveira, A. S., Weinberg, Z. G., Ogunade, I. M., Cervantes, A. A. P., Arriola, K. G., Jiang, Y., Kim, D., Li, X., Gonçalves, M. C. M., Vyas, D., & Adesogan, A. T. (2017). Meta-analysis of effects of inoculation with homofermentative and facultative heterofermentative lactic acid bacteria on silage fermentation, aerobic stability, and the performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 100(6), 4587–4603. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11815>
- Oude Elferink, S. J., Krooneman, J., Gottschal, J. C., Spoelstra, S. F., Faber, F., & Driehuis, F. (2001). Anaerobic conversion of lactic acid to acetic acid and 1, 2-propanediol by *Lactobacillus buchneri*. *Appl Environ Microbiol.*, 67(1), 125–32. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.1.125-132.2001>
- Pahlow, G. (2003). Microbiology of ensiling. *Silage Science and Technology* / ed. DR B., RE M., JH H. *American Society of Agronomy*, 31–93.
- Parra, C. S., Bragatto, J. M., Piran Filho, F. A., Silva, S. M. S., Tuzzi, B. F., Jobim, C. C., & Daniel, J. L. P. (2021). Effect of sealing strategy on the feeding value of corn silage for growing dairy heifers. *J. Dairy Sci.*, 04(6), 6792–6802. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19895>
- Penagos-Tabares, F., Khiaosa-Ard, R., Schmidt, M., Pacífico, C., Faas, J., Jenkins, T., Nagl, V.,

- Sulyok, M., Labuda, R., & Zebeli, Q. (2022). Fungal species and mycotoxins in mouldy spots of grass and maize silages in Austria. *Mycotoxin Res.*, 38(2), 117–136. <https://doi.org/10.1007/s12550-022-00453-3>
- Plöchl, M., Zacharias, H., Herrmann, C., Heiermann, M., & Prochnow, A. (2009). Influence of silage additives on methane yield and economic performance of selected feedstock. *CIGR Ejournal*, XI.
- Rafiuddin, Abdullah Muhammad, Javed, Khalid, Jabbar, Murtadha, Shahid, Muhammad, Jan P. S., Ramzan, M., Ayaz Khan, Muhammad, & Ahmad, M. (2017). Comparison of silo types on chemical composition and physical quality of silage made from maize, sorghum and oats fodders. *J. Anim. Plant. Sci.*, 27(3), 771–775
- Rahman, N. A., Abd Halim, M.R., Mahawi, N., Hasnudin, H., Al-Obaidi, J. R., & Abdullah, N. (2017). Determination of the use of lactobacillus plantarum and propionibacterium freudenreichii application on fermentation profile and chemical composition of corn silage. *Biomed. Res. Int.* 2017, 2038062. <https://doi.org/10.1155/2017/2038062>
- Relun, A., Dorso, L., Douart, A., Chartier, C., Guatteo, R., Mazuet, C., Popoff, M.R., & Assié, S. (2017). A large outbreak of bovine botulism possibly linked to a massive contamination of grass silage by type D/C Clostridium botulinum spores on a farm with dairy and poultry operations. *Epidemiol. Infect.*, 145(16), 3477–3485. <https://doi.org/10.1017/S0950268817002382>
- Rodriguez, G. V., Vandestroet, L., Abeysekara, V. C., Ominski, K., Bumunang, E. W., McAllister, T., Terry, S., Miranda-Romero, L. A., & Stanford, K. (2024). Optimizing Silage Strategies for Sustainable Livestock Feed: Preserving Retail Food Waste. *Agriculture*, 14(1), 122. <https://doi.org/10.3390/agriculture1401012>
- Salamattalab, M. M., Hasani Zonoozi, M., Molavi-Arabshahi, M. (2024). Innovative approach for predicting biogas production from large-scale anaerobic digester using long-short term memory (LSTM) coupled with genetic algorithm (GA). *Waste Manag.*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.046>
- Satpathy, P., Steinigeweg, S., Cypionka, H., & Engelen, B. (2016). Different substrates and starter inocula govern microbial community structures in biogas reactors. *Environ. Technol.*, 37(11), 1441–50. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1118559>
- Sonwai, A., Pholchan, P., & Tippayawong, N. (2023). Machine learning approach for determining and optimizing influential factors of biogas production from lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.*, 383. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129235>
- Sun, Y., Sun, Q., Tang, Y., Li, Q., Tian, C., & Sun, H. (2023). Integrated microbiology and metabolomic analysis reveal the improvement of rice straw silage quality by inoculation of Lactobacillus brevis. *Biotechnol. Biofuels Bioprod*, 28, 16(1), 184. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02431-y>
- Sun, H., Cui, X., Stinner, W., Zhang, L., Ju, X., Guo, J., & Dong, R. (2020). Ensiling excessively wilted maize stover with biogas slurry: Effects on storage performance and subsequent biogas potential. *Bioresour. Technol.*, 305, 123042. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123042>
- Sun, H., Liao, C., Lu, G., Zheng, Y., Cheng, Q., Xie, Y., Wang, C., Chen, C., & Li, P. (2022). Role of Lactiplantibacillus paraplantarum during anaerobic storage of ear-removed corn on biogas production. *Bioresour. Technol.*, 364, 128061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128061>
- Surra, E., Bernardo, M., Lapa, N., Esteves, I A. A. C., Fonseca, I., & Mota, J. P. B. (2019). Biomethane production through anaerobic co-digestion with Maize Cob Waste based on a biorefinery concept: A review. *Journal of Environmental Management*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109351>
- Tang Q., He, R., Huang, F., Liang, Q., Zhou, Z., Zhou, J., Wang, Q., Zou, C., & Gu, Q. (2023). Effects of ensiling sugarcane tops with bacteria-enzyme inoculants on growth performance, nutrient digestibility, and the associated rumen microbiome in beef cattle. *J. Anim Sci.*, 3, 101:skad326. <https://doi.org/10.1093/jas/skad326>
- Tomczak, W., Gryta, M., Daniluk, M., & Żak, S. (2024). Biogas Upgrading Using a Single-

- Membrane System: A Review. *Membranes (Basel)*. 27, 14(4), 80. <https://doi.org/10.3390/membranes14040080>.
- Vítězová, M., Lochman, J., Zapletalová, M., Ratering, S., Schnell, S., & Vítěz, T. (2021). Archaeal community dynamics in biogas fermentation at various temperatures assessed by mcrA amplicon sequencing using different primer pairs. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 6, 37(11), 188. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03152-w>
- Weinberg, Z. G. (2023). The ensiling fermentation of forage crops. *Microbial Fermentations in Nature and as Designed Processes*. <https://doi.org/10.1002/9781119850007.ch14>
- Weinberg, Z. G. (2008) Preservation of forage crops by solid-state lactic acid fermentation-ensiling. *Current Developments in Solid-state Fermentation*.
- Weibbach, F., & Strubelt, C. (2008). Correcting the Dry Matter Content of Grass Silages as a Substrate for Biogas Production. 63 *Landtechnik*, 2, 82–83.
- Wilkinson, J. M., Bolsen, K. K., & Lin, C. J. History of silage (2015). *Silage Science and Technology*, 927. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr42.c1>
- Whittaker, C., Hunt, J., Misselbrook, T., & Shield, I. (2016). How well does Miscanthus ensile for use in an anaerobic digestion plant? *Biomass and Bioenergy*, 88, 24–34 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.018>
- Wu, P., Kang, X., Wang, W., Yang, G., He, L., Fan, Y., Cheng, X., Sun, Y., & Li, L. (2021). Evaluation of ethanol and methane co-production from Pennisetum purpureum: Effects of pretreatment, process performance, and mass balance. *ACS Sustain Chem Eng.*, 9(32), 10771–10784. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02010>
- Xiaoling, Zhao, Zehui, Zheng, Yafan, Cai, Yubin, Zhao, & Yue, Zhang (2020). Accelerated biomethane production from lignocellulosic biomass: Pretreated by mixed enzymes secreted by *Trichoderma viride* and *Aspergillus* sp. *Bioresour. Technol.*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123378>
- Xu, J., Zhao, W., Xu, S., Cao, Q., Zhang, M., Qu, Y., Geng, C., Jia, H., & Wang, X. (2024). Development of cost-effective cellulose-based bilayer hybrid composite membranes for CO₂ separation in biogas purification. *Int J. Biol. Macromol*, 281(Pt 2), 135704. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135704>
- Yitbarek, M. B., & Tamir, B. (2014). Silage Additives: Review. *Open J. Appl. Sci.*, 4(5), 258–274. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2014.45026>
- Yu-Teng Chang, Yuh-Shuen, Chen, Ke-Ting, Lin, I-Fan, Lin, Yi-Fang, Chen, Yue-Horng, Yen, Bing-Lan, Liu, & Yaw-Nan, Chang. (2006). Characteristics of galactomannanase for degrading konjac gel. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 43(1–4), 153–157. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2006.07.012>
- Zhang, H., Wu, J., Gao, L., Yu, J., & Yuan, X. (2018). Aerobic deterioration of corn stalk silage and its effect on methane production and microbial community dynamics in anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.*, 250
- Zhao, X., Liu, J., Liu, J., Yang, F., Zhu, W., Yuan, X., Hu, Y., Cui, Z., & Wang, X. (2017). Effect of ensiling and silage additives on biogas production and microbial community dynamics during anaerobic digestion of switchgrass. *Bioresour. Technol.* 241, 349–359, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.183>

Одержано редколегією 21.07.2025 р.

Прийнято до друку 21.08.2025 р.