

Науковий вісник Львівського національного університету  
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.  
Серія: Сільськогосподарські науки

Scientific Messenger of Lviv National University  
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.  
Series: Agricultural sciences

ISSN 2519–2698 print  
ISSN 2707-5834 online

doi: 10.32718/nvlvet-a10240  
<https://nvlvet.com.ua/index.php/agriculture>

UDC 662.756:620.9: 581.1./2

## Biotechnological potential of biofuels in the context of global energy challenges

O. Shtapenko<sup>1</sup>✉, O. Svarchievska<sup>1</sup>, V. Butsyak<sup>1</sup>, S. Slobodian<sup>1</sup>, Ye. Dzen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Animal Biology NAAS, Lviv, Ukraine

### Article info

Received 19.03.2025

Received in revised form  
21.04.2025

Accepted 22.04.2025

**Shtapenko, O., Svarchievska, O., Butsyak, V., Slobodian, S., & Dzen, Ye. (2025). Biotechnological potential of biofuels in the context of global energy challenges. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences, 27(102), 277–285. doi: 10.32718/nvlvet-a10240**

Stepan Gzhytskyi National  
University of Veterinary Medicine  
and Biotechnologies Lviv,  
Pekarska Str., 50, Lviv,  
79010, Ukraine.  
Tel.: +38-067-135-62-74  
E-mail: shtapenko31@gmail.com

Institute of Animal Biology NAAS,  
Stusa Str., 38, Lviv, 79034, Ukraine.

The modern world needs to decarbonize the energy sector, where biofuels are a key alternative to fossil fuels to improve energy security. The purpose of the article is to systematically review and analyze the current state and prospects of biological conversion of biomass into biofuels, highlighting its evolution from the first to the fourth generation, assessment of technological advances, economic aspects and environmental impact. The study is based on a systematic analysis of relevant scientific literature from leading international databases. The methodology included a critical assessment of existing bioconversion technologies, an analysis of the advantages and disadvantages of each generation of biofuels, and a study of the economic, environmental and social factors affecting their production and implementation. The analysis showed that the evolution of biofuels (from the first to the fourth generation, including genetically modified organisms) demonstrates a constant desire to minimize competition with the food sector and increase the efficiency of biological conversion. Biofuels have a significantly lower carbon footprint compared to fossil fuels and growing economic competitiveness, contributing to the transition to a low-carbon economy and creating new opportunities. Scaling up biofuels production, especially third- and fourth-generation biofuels, is crucial to achieving global sustainable development goals. The development of the industry contributes not only to environmental benefits, but also to energy security and new socioeconomic opportunities. Prospects for further research include further optimization of bioprocesses, expansion of a sustainable feedstock base, improvement of economic efficiency of production, and implementation of comprehensive environmental monitoring to ensure the long-term sustainability of the biofuel industry.

**Key words:** biofuels, bioenergy, bioconversion, bioethanol, energy security, sustainable development.

## Біотехнологічний потенціал біопалива в умовах глобальних енергетичних викликів

О. В. Штапенко<sup>1</sup>✉, О. З. Сварчеська<sup>1</sup>, В. І. Буцяк<sup>1</sup>, С. О. Слободян<sup>1</sup>, Є. О. Дзень<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна

<sup>2</sup>Інститут біології тварин НААН, м. Львів, Україна

Сучасний світ потребує декарбонізації енергетичного сектору, де біопаливо виступає ключовою альтернативою викопним джерелам для підвищення енергетичної безпеки. Метою статті є систематичний огляд та аналіз сучасного стану й перспектив біологічної конверсії біомаси у біопаливо, висвітлюючи його еволюцію від першого до четвертого покоління, оцінку технологічних досягнень, економічних аспектів та екологічного впливу. Дослідження базується на системному аналізі актуальної наукової літератури з провідних міжнародних баз даних. Методологія включала критичну оцінку існуючих технологій біоконверсії, аналіз переваг та недоліків кожного покоління біопалива, а також вивчення економічних, екологічних та соціальних факторів, що впливають на їхнє виробництво та впровадження. Проведений аналіз показав, що еволюція біопалива (від першого до четвертого покоління, що включає генетично модифіковані організми) демонструє постійне прагнення до мінімізації конкуренції з

продовольчим сектором та підвищення ефективності біологічної конверсії. Біопаливо має значно нижчий вуглецевий слід порівняно з викопними паливами та зростаючу економічну конкурентоспроможність, сприяючи переходу до низьковуглецевої економіки та створюючи нові можливості. Масштабування виробництва біопалива, особливо третього та четвертого поколінь, є вирішальним для досягнення глобальних цілей сталого розвитку. Розвиток галузі сприяє не лише екологічним перевагам, але й підвищує енергетичну безпеку та створює нові соціально-економічні можливості. Перспективи подальших досліджень включають подальшу оптимізацію біопроектів, розширення сталої сировинної бази, підвищення економічної ефективності виробництва та впровадження комплексного екологічного моніторингу для забезпечення довгострокової стійкості біопаливної галузі.

**Ключові слова:** біопаливо, біоенергетика, біологічна конверсія, біоетанол, енергетична безпека, сталий розвиток.

## Вступ

Зростання світової економіки зумовлює постійне збільшення споживання енергії, що створює значне навантаження на викопні ресурси та посилює глобальне занепокоєння щодо накопичення парникових газів в атмосфері та їхнього негативного впливу на клімат. У цьому контексті активний розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема виробництво біопалива, набуває стратегічної важливості.

Біопаливо, що отримується з біомаси, розглядається як екологічно прийнятніша альтернатива традиційним викопним паливам, з потенціалом значного зменшення вуглецевого сліду (Joyia et al., 2024). Серед різних видів біопалива особливе значення мають біоетанол та біобутанол. Біоетанол широко застосовується як добавка до бензину, покращуючи його експлуатаційні властивості та екологічні показники (Macedo et al., 2008; Jain & Kumar, 2024). Його використання не обмежується лише наземним транспортом; біоетанол також є перспективним для виробництва сталої авіаційної палива (SAF), що є ключовим рішенням для декарбонізації авіаційної галузі (Zhao et al., 2021; Becken et al., 2023). Окрім енергетичного застосування, біоетанол слугує важливою хімічною платформою для синтезу цінних промислових сполук, таких як етилен та етиленгліколь (Cho et al., 2020; Tong et al., 2022; Xie et al., 2024).

Біобутанол, своєю чергою, демонструє переваги у сумісності з існуючими двигунами внутрішнього згоряння та має високі експлуатаційні характеристики, включаючи низьку летючість, високу енергетичну цінність, меншу корозійну активність та гігроскопічність (Tsai et al., 2020). Він також є цінною хімічною сировиною для багатьох промислових процесів (Liu et al., 2022).

Виробництво біопалива з біомаси біогенного походження забезпечує значне скорочення вуглецевого сліду порівняно з паливами з викопних ресурсів (Mignogna et al., 2024). Хоча виробничий цикл біопалива може включати певні етапи, що генерують викиди (наприклад, сільськогосподарська техніка, транспортування), його загальний вплив на клімат є значно нижчим, ніж у традиційного палива (Sher et al., 2020; Kaviani, 2022).

Світове виробництво біоетанолу демонструє стабільне зростання. Сполучені Штати Америки та Бразилія є лідерами в цій галузі, забезпечуючи більшу частину світового обсягу та продовжуючи збільшувати експорт (Whistance et al., 2024; U.S. Department of Energy, 2024). Ця тенденція підтверджується прогнозами щодо подальшого зростання світового виробни-

цтва та споживання біоетанолу в найближчі роки (Wu et al., 2021; EPE, 2021; Grandis et al., 2024).

У зв'язку з цим, для повного розкриття потенціалу біопалива як ключового компонента сталої енергетичної системи, необхідний глибокий аналіз біологічних процесів конверсії біомаси, технологічних інновацій, включаючи генетичну інженерію та синтетичну біологію, а також їх економічної доцільності та екологічної стійкості.

## Мета дослідження

Метою даного дослідження є комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку біологічної конверсії біомаси у біопаливо, що охоплює висвітлення ключових біохімічних процесів, таких як ферментація та анаеробне збродження, а також розглядає вплив новітніх технологій, зокрема генетичної інженерії та синтетичної біології, на оптимізацію цього виробництва та його економічну доцільність і екологічну стійкість у контексті глобальних енергетичних викликів.

## Матеріал і методи досліджень

Дане дослідження виконано у форматі систематичного огляду наукової літератури. Пошук релевантних публікацій проводився у провідних наукових базах даних (Web of Science, Scopus, PubMed, Google Scholar) за ключовими словами, що стосуються біологічної конверсії біомаси у біопаливо, включаючи біохімічні процеси, генетичну інженерію та економіко-екологічні аспекти. Відбір джерел здійснювався за критеріями відповідності темі та наукової цінності. Проведений аналіз та якісний синтез отриманих даних дозволив висвітлити сучасний стан, існуючі виклики та окреслити перспективи розвитку галузі.

## Результати та їх обговорення

Для задоволення зростаючого світового попиту на енергію та досягнення цілей сталого розвитку, біомаса відіграє ключову роль у сучасному та майбутньому енергетичному ландшафті. Будучи невикопним органічним матеріалом, що містить власну хімічну енергію, біомаса є життєздатною альтернативою викопному паливу, сприяючи зниженню викидів парникових газів. Її світовий потенціал оцінюється в 200–500 EJ енергії на рік (Sun, 2024), забезпечуючи 14 % світового енергоспоживання (Singh et al., 2023). Енергія біомаси надходить з різноманітних джерел, включаючи

сільськогосподарські, лісові, тваринницькі відходи, агробізнес та деревообробку. Різноманітність хімічного складу відходів біомаси зумовлює необхідність вибору оптимальних процесів її утилізації.

**Біологічна конверсія біомаси у біопаливо.** Серед різноманітних підходів до перетворення біомаси особливе місце займає біологічна конверсія – комплекс процесів, що використовують живі організми або їхні ферменти для трансформації органічної речовини в енергетично цінні сполуки. Сучасний стан цієї галузі характеризується значним науково-технічним прогресом, розширенням спектру використовуваної сировини та розробкою інноваційних технологій, що відкривають нові перспективи.

На сьогоднішній день біологічна конверсія біомаси включає широкий спектр процесів. Фундаментальну роль у цьому відіграють мікроорганізми та їхні ферментні системи, здатні розщеплювати складні целюлозні матеріали до простіших сполук (Azeez & Al-Zuhairi, 2020), які потім можуть бути перетворені на рідке (на основі спиртів) та газоподібне біопаливо (рис. 1).

До основних біологічних механізмів належить ферментація, наеробне збродження та гідроліз. Ферментація здійснюється різними видами мікроорганізмів (бактеріями, дріжджами) і є ключовим процесом у виробництві біоспиртів, таких як біоетанол та біобутанол, з цукровмісної або крохмалевмісної сировини, а також з лігноцелюлози після гідролізу. В анаеробних умовах відбувається перетворення цукрів (гексоз та пентоз) на етанол та вуглекислий газ.

Анаеробне збродження відбувається за відсутності кисню за участю консорціумів мікроорганізмів і використовується для перетворення різноманітної органічної сировини, включаючи відходи сільського господарства та харчової промисловості, на біогаз, основною складовою якого є метан.

Гідроліз може бути ферментативним або хімічним (Ashokkumar et al., 2024), є важливим етапом у переробці лігноцелюлозної біомаси, оскільки він забезпечує розщеплення складних полісахаридів на простіші цукри, які потім можуть бути використані для подальшої ферментації.

Ефективна ферментація лігноцелюлозної біомаси, що складається з целюлози (35–60 %), геміцелюлози (25–41 %) та лігніну (15–20 %) (Dutta et al., 2023), вимагає попередньої обробки. Її метою є руйнування складної структури лігноцелюлози для забезпечення доступу ферментів та подальшого перетворення полісахаридів шляхом ферментативного гідролізу на моно- та дисахариди (Sai Bharadwaj et al., 2023). Оскільки лігнін не піддається гідролізу або ферментації, застосовуються різноманітні стратегії попередньої обробки, включаючи фізичні, хімічні, фізико-хімічні та біологічні методи (рис. 2).

Сучасні дослідження активно спрямовані на розробку нових, більш ефективних ферментних препаратів та мікроорганізмів-продуцентів, зокрема із застосуванням методів генетичної інженерії та синтетичної біології. Перспективним напрямком є

консолідована біопереробка, яка об'єднує виробництво ферментів, гідроліз та ферментацію в єдиному технологічному процесі, що може значно знизити собівартість та підвищити загальну ефективність виробництва біопалива. Ідеальний процес попередньої обробки повинен бути економічно вигідним, простим у реалізації, екологічно безпечним, мінімізувати утворення інгібіторних сполук та забезпечувати повне використання лігноцелюлозної біомаси для досягнення високого виходу кінцевого продукту та ефективного управління лігніновими відходами.

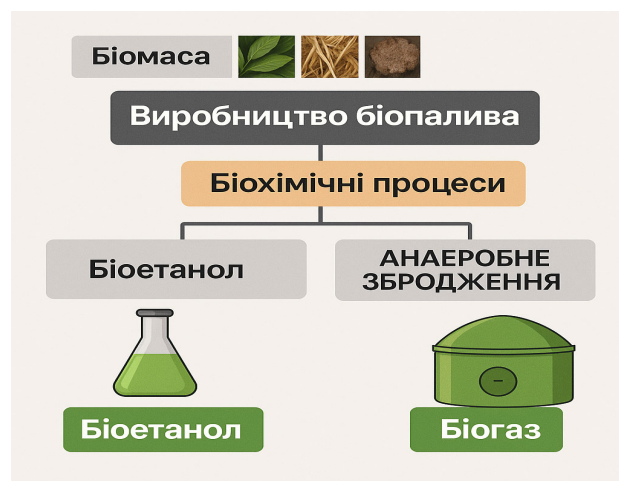


Рис. 1. Біохімічні процеси перетворення біомаси на біопаливо



Рис. 2. Структура різних типів попередньої обробки біомаси

Подальше розкладання попередньо оброблених лігноцелюлозних компонентів відбувається шляхом ферментативного гідролізу (оцукрювання), в результаті чого утворюються простіші цукри (пентози та гексози) (Rezania et al., 2020). Отримані багаті на цукор гідролізати можуть бути піддані ферментації для виробництва різноманітних біопалив, таких як етанол, метанол, бутанол, а також інших біохімічних речовин. У промисловості зазвичай використовуються безпечні, стійкі та толерантні до етанолу мікроорганізми, такі як *Saccharomyces cerevisiae* та *Zymomonas mobilis* (Białas et al., 2010; Afedzi &

Parakulsuksatid, 2023). Для ефективного метаболізму п'ятиглицеринних цукрів можуть застосовуватися генетично модифіковані мікроорганізми або ко-культивування різних штамів дріжджів. Головною метою генетичної модифікації є оптимізація метаболічних шляхів мікроорганізмів для повної ферментації всіх доступних цукрів, а також підвищення їх стійкості до інгібіторів та стресових умов (Kumar et al., 2020; Vučurović et al., 2025). Після завершення ферментації біоетанол можна дистилювати та зневоднювати для отримання високоякісного безводного етанолу (Tse et al., 2021).

**Біопаливо першого покоління: технології, сировина та виклики.** Біопаливо першого покоління є одним із перших комерційно успішних видів, що отримується безпосередньо з сільськогосподарських культур, багатих на цукри, крохмаль або рослинні олії. До цієї категорії належать біоетанол та біодизель.

Біодизель першого покоління виробляється шляхом переестерифікації рослинних олій, що вилучаються з олійних культур, таких як ріпак, соя та пальма (Moodley, 2021). Процес переестерифікації передбачає хімічну реакцію між ліпідами рослинних олій та спиртами (переважно метанолом або етанолом) у присутності каталізатора, що призводить до утворення метилових або етилових ефірів – власне біодизеля (Salaheldeen et al., 2021). Цей вид палива вважається екологічно чистішим за традиційне дизельне паливо завдяки меншим викидам шкідливих речовин при спалюванні. Побічним продуктом є гліцерин, який знаходить широке застосування в хімічній та косметичній промисловості, підвищуючи економічну привабливість виробництва.

Біоетанол першого покоління отримують шляхом ферментації сировини, що містить значну кількість крохмалю (кукурудза, пшениця, ячмінь, картопля, маніок) або цукрів (цукрова тростина, цукровий буряк, цукрове сорго) (Ayodele et al., 2020). Процес включає вилучення цукрів з рослинної сировини та їх подальшу ферментацію за допомогою дріжджів з наступною дистилляцією для отримання етанолу. Біоетанол є найбільш поширеним рідким біопаливом у транспортному секторі, лідерами виробництва якого є Сполучені Штати (переважно з кукурудзи) та Бразилія (традиційно з цукрової тростини). В інших регіонах, таких як Канада та Європа, для виробництва біоетанолу також використовуються кукурудза, пшениця, картопля та цукровий буряк (Bautista-Herrera et al., 2021).

Незважаючи на комерційний успіх, виробництво біопалива першого покоління викликає дискусії щодо його впливу на продовольчу безпеку та землекористування (Moodley, 2021). Основною проблемою є пряма конкуренція між сільськогосподарськими культурами для виробництва харчових продуктів та енергетичними культурами, що може призводити до скорочення площ для продовольства та зростання цін. Крім того, вирощування цих культур потребує значних витрат водних, енергетичних та земельних ресурсів. Водночас, виробництво біоетанолу може запропонувати рішення для переробки некондиційної

сільськогосподарської продукції, наприклад, зерна, ураженого фузаріозом, з можливістю отримання цінних білкових кормових добавок.

Таким чином, біопаливо першого покоління є важливим кроком до відновлюваної енергетики, але потребує збалансованого підходу з урахуванням соціально-економічних та екологічних наслідків. Майбутні стратегії мають бути спрямовані на використання ресурсів, що не створюють конфлікту між виробництвом харчових продуктів та палива (Rial, 2024).

**Біопаливо другого покоління: використання нехарчової сировини.** Біопаливо другого покоління є перспективним напрямком, оскільки його отримують з неїстівної сировини, що не конкурує з продовольчим сільським господарством (Mat Aron et al., 2020). Основним джерелом є лігноцелюозна біомаса, яка включає сільськогосподарські та лісові залишки (солома, полова, деревна тріска, тирса), відходи харчової промисловості та зелені відходи. Ці джерела є відносно дешевими, легкодоступними та наявними у значних обсягах, що робить їх привабливими для сталого виробництва біопалива (Ganguly et al., 2021).

На відміну від біоетанолу першого покоління, біоетанол другого покоління використовує лігноцелюозні матеріали. Перевагою є відсутність прямої конкуренції з виробництвом харчових продуктів, проте переробка лігноцелюозної біомаси є складнішим процесом. Лігноцелюозна біомаса має складну структуру, що складається переважно з целюлози, геміцелюлози та лігніну. Міцні зв'язки між цими компонентами зумовлюють її стійкість до розпаду (Dutta et al., 2023).

Для ефективного перетворення лігноцелюози необхідне застосування попередньої обробки, метою якої є руйнування її структури та полегшення доступу ферментів. Використовуються різні методи попередньої обробки, включаючи фізичні (подрібнення, температурна обробка, ультразвук), хімічні (обробка кислотою, лугом, органічними розчинниками), фізико-хімічні (парова або CO<sub>2</sub> обробка вибухом) та біологічні (ферментативний гідроліз) процеси (Sai Bharadwaj et al., 2023). Вибір оптимального методу залежить від складу біомаси. Ефективна попередня обробка є ключовим фактором для забезпечення високого виходу ферментованих цукрів та підвищення рентабельності, хоча вона може збільшувати витрати та тривалість виробництва (Liang et al., 2020). Активні дослідження спрямовані на розробку вдосконалених та економічно ефективних методів попередньої обробки, а також на оптимізацію процесів гідролізу целюлози та геміцелюлози до цукрів та їх подальшого бродіння в біоетанол (Ayodele et al., 2020). Вихід етанолу з сировини другого покоління є мінливим і залежить від типу сировини та застосованих технологій (Saravanan et al., 2022).

Таким чином, біоетанол другого покоління є важливим кроком до сталого розвитку відновлюваної енергетики, дозволяючи використовувати нехарчову біомасу. Проте, для його широкого впровадження необхідні подальші дослідження та розробки в галузі

ефективних та економічно вигідних технологій попередньої обробки та біоконверсії.

**Біопаливо третього покоління: використання водоростей.** Біопаливо третього покоління відкриває нові горизонти у виробництві відновлюваного палива, використовуючи як сировину фотоавтотрофні мікроорганізми, зокрема мікроводорості, макроводорості та ціанобактерії (Chiriví-Salomón et al., 2021). Цей підхід має значний потенціал завдяки унікальним біологічним характеристикам водоростей.

Однією з ключових переваг водоростей є їхня висока швидкість поглинання вуглекислого газу в процесі фотосинтезу, що робить їх важливим інструментом у боротьбі зі зміною клімату. Крім того, водорості здатні накопичувати значні обсяги ліпідів та вуглеводів, які є цінними ресурсами для виробництва як біодизеля, так і біоетанолу. Мікроводорості, зокрема, демонструють вищі темпи фотосинтезу та значно швидший ріст порівняно з наземними рослинами, а їхня олійна продуктивність може бути в 20-300 разів вищою, ніж у традиційних біомасових культур (Shokravi et al., 2021). Важливою перевагою є також можливість культивування водоростей на маргінальних землях або у стічних водах, що знижує конкуренцію за орні землі та прісну воду. Здатність водоростей виживати в несприятливих умовах також робить їх стійким ресурсом. Ліпідний вміст у водоростях може бути оптимізований шляхом вирощування в умовах абіотичного стресу (дефіцит азоту, інтенсивність світла, температура) (Bibi et al., 2022).

Процес перетворення ліпідів водоростей на біодизель відбувається шляхом переестерифікації, подібно до біодизеля першого покоління. Для отримання біоетанолу з водоростей необхідна попередня обробка біомаси для руйнування клітинних стінок та забезпечення доступу до внутрішньоклітинних компонентів, таких як крохмаль, целюлоза та інші вуглеводи. Відсутність лігніну та низький вміст геміцелюлози в клітинних стінках водоростей полегшують процеси гідролізу та ферментації, потенційно збільшуючи вихід цільових продуктів (Zhang et al., 2021).

Для руйнування клітинних стінок водоростей можуть застосовуватися різні методи попередньої обробки, включаючи хімічні (наприклад, обробка кислотою) та фізичні (наприклад, механічне руйнування). Після цього складні вуглеводи піддаються ферментативному гідролізу (оцукрюванню) для отримання зброджуваних цукрів, які потім перетворюються на біоетанол у процесі бродіння (Mat Aron et al., 2020). Якість попередньої обробки та оцукрювання є критично важливими, оскільки неоптимальні умови можуть призвести до утворення небажаних побічних продуктів.

Склад різних видів водоростей також варіюється за вмістом нейтральних цукрів, аміноцукрів та уронових кислот, що вимагає індивідуального підходу до вибору методів попередньої обробки. Макроводорості, що ростуть на морському дні, містять значну кількість волокнистого матеріалу, що ускладнює вивільнення крохмалю та цукрів і потребує інтенсивної фізико-хімічної обробки. На противагу цьому, мікроводорості, часто одноклітинні, можуть мати вищий

вміст цукрів, проте їх вилучення з водного середовища та зневоднення біомаси може бути енергоємним процесом. Вихід етанолу з сухої біомаси водоростей може бути нижчим порівняно з сировиною першого та другого покоління.

Незважаючи на те, що виробництво біоетанолу третього покоління на сьогоднішній день є менш розвиненим, воно має значний потенціал для майбутнього зростання. Активні дослідження спрямовані на селекцію та генетичну модифікацію високопродуктивних видів водоростей, а також на оптимізацію існуючих технологій та інтеграцію виробництва біопалива з іншими процесами, такими як очищення стічних вод (Bharathiraja et al., 2022). Розвиток біоетанолу з водоростей може стати важливим елементом сталого енергетичного майбутнього, забезпечуючи екологічно чисте паливо та сприяючи вирішенню екологічних проблем.

**Біопаливо четвертого покоління: ера генетично модифікованих організмів.** Біопаливо четвертого покоління є новітнім етапом у розвитку відновлюваної енергетики, що базується на застосуванні методів генної інженерії для цілеспрямованого покращення характеристик мікроорганізмів, які використовуються у виробництві біопалива (Sun, 2024). Цей підхід відкриває значні можливості для підвищення ефективності, продуктивності та екологічної стійкості процесів біоконверсії.

Одним із ключових напрямків біопалива четвертого покоління є оптимізація метаболічних шляхів мікроорганізмів, таких як мікроводорості, дріжджі, гриби та ціанобактерії, шляхом генетичних маніпуляцій. При цьому особлива увага приділяється генетичній інженерії водоростей для підвищення продуктивності біомаси, зниження вартості та покращення якості біопалива. Застосування передових біотехнологічних методів дозволяє збільшити врожайність біомаси, підвищити концентрацію цільових продуктів (ліпідів, вуглеводів), розширити спектр використовуваної сировини та покращити загальну здатність організмів продукувати паливо (Singh et al., 2023).

Стратегії генетичної інженерії в цьому напрямку включають кілька ключових аспектів:

- *Розширення спектру використовуваних субстратів:* модифікація мікроорганізмів дозволяє їм ефективно засвоювати різноманітні цукри (пентози та гексози), що відкриває можливість використання ширшого діапазону сировини, зокрема складних вуглеводів з відходів.
- *Посилення синтезу цільових молекул:* інженерія метаболічних шляхів для збільшення виробництва ліпідів (для біодизеля) або вуглеводів (для біоетанолу та інших біопалив) через оптимізацію ферментних систем та усунення конкуруючих метаболічних процесів (Zhu et al., 2022).
- *Підвищення ефективності фотосинтезу та фіксації вуглецю:* у фотосинтезуючих мікроорганізмів (водоростей та ціанобактерій) для покращення їхньої здатності поглинати CO<sub>2</sub> та ефективніше перетворювати його на біомасу з високим вмістом енергетичних сполук (Srinivas et al., 2023).

- *Розробка нових видів біопалива:* використання метаболічної універсальності мікроорганізмів для виробництва не лише традиційних біопалив (етанол), але й більш перспективних сполук, включаючи бутанол, ізобутанол та модифіковані жирні кислоти, що можуть мати покращені експлуатаційні характеристики.

- *Підвищення стійкості мікроорганізмів:* до стресових умов навколишнього середовища (висока солоність, екстремальні температури або наявність токсичних речовин) шляхом генетичної інженерії.

Біопаливо четвертого покоління є значним прогресом порівняно з попередніми поколіннями, оскільки точний генетичний контроль над біологічними системами відкриває шлях до отримання чистих та стійких форм енергії, які можуть ефективно відповідати технічним та економічним вимогам. Синтетична біологія відіграє ключову роль у реалізації потенціалу цього покоління біопалива, дозволяючи проектувати та створювати нові метаболічні шляхи та оптимізувати існуючі для досягнення максимальної продуктивності.

Подальший розвиток виробництва біопалива четвертого покоління пов'язаний з розробкою нових генетично модифікованих штамів мікроорганізмів та інтеграцією різноманітних підходів генної інженерії, включаючи використання новітніх інструментів редагування геному, таких як CRISPR-Cas9, та розробку складних генетичних конструктів для контролю експресії генів та оптимізації метаболічних потоків. Важливим напрямком є також інтеграція виробництва біопалива четвертого покоління з іншими біотехнологічними процесами, наприклад, з уловлюванням та утилізацією вуглекислого газу, що може підвищити його екологічну привабливість.

Незважаючи на значний потенціал, виробництво біопалива четвертого покоління все ще знаходиться на етапі активних досліджень та розробок. Проте, успіхи в галузі генетичної інженерії та синтетичної біології дають підстави сподіватися, що в майбутньому цей підхід відіграватиме ключову роль у забезпеченні людства стійкими та екологічно чистими джерелами енергії.

**Економічні аспекти та сталий розвиток біопалива: перспективи майбутнього.** Економічна доцільність біопалива є ключовим фактором, що визначає його здатність конкурувати з традиційними викопними видами палива та сприяти сталому розвитку енергетичного сектору. Оцінка економічної привабливості біопалива вимагає комплексного аналізу витрат на виробництво (як прямих, так і непрямих), технологічного прогресу, державної політики, динаміки ринку та впливу на навколишнє середовище (Ambaye et al., 2021).

Найбільшими прямими витратами при виробництві біопалива першого покоління є сировина, її постачання, комунальні послуги та оплата праці. До непрямих витрат належать екологічні наслідки та їхній вплив на здоров'я людини. Крім того, для довгострокової стійкості вирішальне значення мають енергети-

чна рентабельність інвестицій та ефективність використання ресурсів.

Досягнення як економічної доцільності, так і довгострокової стійкості стикається з низкою обмежень. Зокрема, неефективне виробництво біомаси може нівелювати переваги виробництва біопалива, а низька ефективність фотосинтезу може обмежувати загальну продуктивність (Rodrigues et al., 2024). Важливо також враховувати екологічні проблеми, пов'язані з виробництвом біопалива, такі як викиди парникових газів, забруднення повітря, ґрунтових та водних ресурсів (Wu et al., 2023), а також вплив на біорізноманіття. Для комплексної оцінки впливу на навколишнє середовище та розробки стратегій мінімізації викидів протягом усього життєвого циклу біопалива застосовується підхід оцінки життєвого циклу (LCA) (Baral et al., 2019).

Очікується подальше зниження витрат на виробництво біопалива завдяки технологічному прогресу, оптимізації ланцюгів постачання сировини та розвитку більш високоврожайних енергетичних культур та мікроорганізмів. Розвиток біопалива четвертого покоління, що базується на генетично модифікованих організмах, має потенціал для значного підвищення продуктивності та зниження собівартості виробництва.

Крім того, інтеграція виробництва біопалива в концепцію циркулярної економіки, де відходи одних процесів стають сировиною для інших, може значно підвищити його економічну та екологічну ефективність (Stegmann et al., 2020). Використання побічних продуктів виробництва біопалива для отримання цінних хімічних речовин або енергії може створити додаткові джерела доходу та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Попри це, кількість досліджень, які оцінюють довгострокову економічну життєздатність біопалива, залишається обмеженою. Прогнозні моделі, такі як оцінка довгострокової нормалізованої вартості енергії, вказують, що технології біопалива можуть досягти економічної доцільності та конкурентоздатності на енергетичному ринку орієнтовно в період 2025-2030 років (Bedoic et al., 2019). Очікується значне зростання загального попиту на біопаливо, зокрема на відновлюване дизельне паливо та етанол. Основними драйверами цього зростання стануть країни, що розвиваються, такі як Бразилія, Індонезія та Індія. У розвинених країнах зростання може бути стримане тенденцією до електрифікації транспорту, вищою вартістю біопалива та технічними обмеженнями. Прогнозується також скорочення попиту на нафту в транспортно-му секторі.

Соціально-економічні аспекти біопалива пов'язані зі створенням попиту на паливо, що сприяє соціальним та економічним вигодам, а також забезпечує екологічні переваги за умови належного управління. Розвиток галузі біопалива створює численні можливості працевлаштування у сільському господарстві (вирощування та заготівля біомаси), логістиці (транспортування та обробка), промисловості (управління обладнанням, виробництво та технічне обслуговування), а також у науково-дослідній сфері. Інновації в

галузі біопалива сприяють підвищенню ефективності виробництва, сталому розвитку технологій та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Біопаливо також сприяє диверсифікації джерел енергії та підвищенню енергетичної безпеки, зменшуючи залежність від викопного палива (Migo-Sumagang et al., 2023).

Збалансування економічних, соціальних та екологічних аспектів є критично важливим для забезпечення сталого енергетичного майбутнього. Використання наявних можливостей та пошук стійких рішень екологічних проблем є необхідними умовами для сприяння соціально-економічному прогресу. Подальший розвиток біопалива вимагає комплексного підходу, що враховує всі ці фактори для реалізації його повного потенціалу як економічно вигідного та екологічно відповідального джерела енергії.

### Висновки

Здійснений систематичний аналіз наукової літератури засвідчив, що біопаливо є перспективною та екологічно відповідальною альтернативою традиційним викопним паливам, відіграючи ключову роль у декарбонізації енергетичного сектору та досягненні цілей сталого розвитку. Еволюція технологій від першого до четвертого покоління відображає постійне прагнення до мінімізації конкуренції з продовольчим сектором та підвищення ефективності біологічної конверсії біомаси.

Виробництво біопалива базується на оптимізації біологічних процесів (ферментація, гідроліз, анаеробне збродження), яка досягається завдяки вдосконаленню попередньої обробки біомаси та генетичній модифікації мікроорганізмів. Особливі перспективи відкривають технології четвертого покоління, що використовують генетичну інженерію та синтетичну біологію для цілеспрямованого підвищення продуктивності, розширення спектру сировини та покращення цільових властивостей біопалива, включаючи потенціал для виробництва біопродуктів та хімічних платформ.

Економічна конкурентоспроможність біопалива зростає, зокрема завдяки розробкам другого, третього та четвертого покоління, які дозволяють використовувати нехарчову сировину та мінімізувати конфлікт з продовольчим сектором. Подальше зниження собівартості та підвищення загальної привабливості очікується за рахунок технологічного прогресу та інтеграції виробництва в принципи циркулярної економіки, де побічні продукти стають цінними ресурсами.

Біопаливо демонструє значно нижчий вуглецевий слід порівняно з викопними паливами, попри певні викиди на етапах виробництва. Окрім екологічних переваг, розвиток галузі біопалива сприяє диверсифікації джерел енергії, підвищенню енергетичної безпеки та створенню нових можливостей працевлаштування, особливо в сільськогосподарських та промислових секторах, що має позитивний соціально-економічний ефект.

*Перспективи подальших досліджень.* Перспективною є пропозиція зосередити зусилля на оптимізації біологічних процесів конверсії біомаси, включаючи вдосконалення попередньої обробки та генетичну інженерію мікроорганізмів, а також на пошуку нових, сталих джерел сировини. Важливим є також підвищення економічної ефективності виробництва та комплексний екологічний моніторинг для забезпечення довгострокової стійкості галузі.

### Відомості про конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

### References

- Afedzi, A. E. K., & Parakulsuksatid, P. (2023). Recent Advances in Process Modifications of Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol Production. *Biocatal Agric Biotechnol*, 54, 102961. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102961.
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., Bonilla-Petriciolet, A., Prasad, S., van Hullebusch, E. D., & Rtimi, S. (2021). Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. *Journal of environmental management*, 290, 112627. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112627.
- Ashokkumar, V., Chandramughi, V. P., Kumar, G., Ngamcharussrivichai, C., Piechota, G., Igliński, B., et al. (2024). Advancements in Lignocellulosic Biomass: A Critical Appraisal of Fourth-Generation Biofuels and Value-Added Bioproduct. *Fuel*, 365, 130751. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130751.
- Ayodele, B. V., Alsaffar, M. A., & Mustapa, S. I. (2020). An Overview of Integration Opportunities for Sustainable Bioethanol Production from First- and Second-Generation Sugar-Based Feedstocks. *J Clean Prod*, 245, 118857. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118857.
- Azeez, R. A., & Al-Zuhairi, F. K. (2020). Biofuels (Bioethanol, Biodiesel, and Biogas) from Lignocellulosic Biomass: A Review. *J Univ Babylon Eng Sci*, 28, 202–215.
- Baral, N. R., Kavvada, O., Mendez-Perez, D., Mukhopadhyay, A., Lee, T. S., Simmons, B. A., et al. (2019). Techno-economic analysis and life-cycle greenhouse gas mitigation cost of five routes to bio-jet fuel blendstocks. *Energy Environ Sci*, 12(3), 807–824. DOI: 10.1039/C8EE03266A.
- Bautista-Herrera, A., Ortiz-Arango, F., & Álvarez-García, J. (2021). Profitability Using Second-Generation Bioethanol in Gasoline Produced in Mexico. *Energies*, 14, 2294. DOI: 10.3390/en14082294.
- Becken, S., Mackey, B., & Lee, D. S. (2023). Implications of preferential access to land and clean energy for Sustainable Aviation Fuels. *Science of The Total Environment*, 886, 163883. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163883.
- Bedoić, R., Čosić, B., & Duić, N. (2019). Technical potential and geographic distribution of agricultural residues, co-products and by-products in the European Union. *The Science of the total environment*, 686, 568–579. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.219.

- Bharathiraja, B., Iyyappan, J., Gopinath, M., Jayamuthunagai, J., & PraveenKumar, R. (2022). Transgenicism in Algae: Challenges in Compatibility, Global Scenario and Future Prospects for next Generation Biofuel Production. *Renew Sustain Energy Rev*, 154, 111829. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111829.
- Białas, W., Szymanowska, D., & Grajek, W. (2010). Fuel ethanol production from granular corn starch using *Saccharomyces cerevisiae* in a long term repeated SSF process with full stillage recycling. *Bioresource technology*, 101(9), 3126–3131. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.12.090.
- Bibi, F., Jamal, A., Huang, Z., Urynowicz, M., & Ali, I. M. (2022). Advancement and Role of Abiotic Stresses in Microalgae Biorefinery with a Focus on Lipid Production. *Fuel*, 316, 123192. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123192.
- Chiriví-Salomón, J. S., García-Huérffano, S., & Giraldo, I. A. (2024). Bioprospecting Microalgae: A Systematic Review of Current Trends. *Phycology*, 4(3), 508–532. DOI: 10.3390/phycolgy4030028.
- Cho, E. J., Trinh, L. T. P., Song, Y., Lee, Y. G., & Bae, H. J. (2020). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource technology*, 298, 122386. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122386.
- Dutta, N., Usman, M., Ashraf, M. A., Luo, G., El-Din, M. G., & Zhang, S. (2023). Methods to Convert Lignocellulosic Waste into Biohydrogen, Biogas, Bioethanol, Biodiesel and Value-Added Chemicals: A Review. *Environ Chem Lett*, 21, 803–820. DOI: 10.1007/s10311-022-01511-z.
- EPE (2021). 2031-Ten-year energy expansion plan. Federal Government Ministry of Mines and Energy and Empresa de Pesquisa Energética (EPE). URL: [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decena-de-expansao-de-energia/pde-2031/english-version/relatorio\\_pde2031\\_introducao\\_eus.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decena-de-expansao-de-energia/pde-2031/english-version/relatorio_pde2031_introducao_eus.pdf).
- Ganguly, P., Sarkhel, R., & Das, P. (2021). The Second- and Third-Generation Biofuel Technologies: Comparative Perspectives. In: Dutta S, Hussain CM, editors. *Sustainable Fuel Technologies Handbook*. Cambridge, MA, USA: Academic Press; p. 29–50.
- Grandis, A., Fortirer, J. d. S., Pagliuso, D., & Buckeridge, M. S. (2024). Scientific Research on Bioethanol in Brazil: History and Prospects for Sustainable Biofuel. *Sustainability*, 16(10), 4167. DOI: 10.3390/su16104167.
- Jain, S., & Kumar, S. (2024). A comprehensive review of bioethanol production from diverse feedstocks: Current advancements and economic perspectives. *Energy*, 296, 131130. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131130.
- Joyia, M. A. K., Ahmad, M., Chen, Y.-F., Mustaqeem, M., Ali, A., Abbas, A., et al. (2024). Trends and advances in sustainable bioethanol production technologies from first to fourth generation: A critical review. *Energy Convers Manag*, 321, 119037. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119037.
- Kaviani, R. (2022). Use Bioethanol as a Clean and Cost-Effective Fuel. *J Eng Ind Res*, 3(2), 147–152. DOI: 10.22034/JEIRES.2022.3.5.
- Kumar, G., Shekh, A., Jakhu, S., Sharma, Y., Kapoor, R., & Sharma, T. R. (2020). Bioengineering of Microalgae: Recent Advances, Perspectives, and Regulatory Challenges for Industrial Application. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 914. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00914.
- Liang, G., Li, Y., Yang, C., Zi, C., Zhang, Y., Zhang, D., et al. (2020). Ash Properties Correlated with Diverse Types of Biomass Derived from Power Plants: An Overview. *Energy Sources Part A Recovery Util Environ Eff*, 1–12. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.110927.
- Liu, Y., Yuan, Y., Ramya, G., Singh, S. M., Chi, N. T. L., Pugazhendhi, A., et al. (2022). A Review on the Promising Fuel of the Future—Biobutanol; the Hindrances and Future Perspectives. *Fuel*, 327, 125166. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125166.
- Macedo, I. C., Seabra, J. E. A., & Silva, J. E. A. R. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass Bioenergy*, 32(7), 582–595. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.12.006.
- Mat Aron, N. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Show, P. L., Chen, W.-H., & Nguyen, T. H. P. (2020). Sustainability of the Four Generations of Biofuels—A Review. *Int J Energy Res*, 44, 9266–9282. DOI: 10.1002/er.5557.
- Mignogna, D., Szabó, M., Ceci, P., & Avino, P. (2024). Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition. *Sustainability*, 16, 7036. DOI: 10.3390/su16167036.
- Migo-Sumagang, M. V., Tan, R. R., & Aviso, K. B. (2023). A multi-period model for optimizing negative emission technology portfolios with economic and carbon value discount rates. *Energy*, 275, 127445. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223008393>.
- Moodley, P. (2021). Sustainable Biofuels: Opportunities and Challenges. *Sustain Biofuels*, 2021, 1–20. DOI: 10.1016/B978-0-12-820297-5.00003-7.
- Rezania, S., Oryani, B., Cho, J., Talaiekhosani, A., Sabbagh, F., Hashemi, B., et al. (2020). Different Pretreatment Technologies of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol Production: An Overview. *Energy*, 199, 117457. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117457.
- Rial, R. C. (2024). Biofuels versus Climate Change: Exploring Potentials and Challenges in the Energy Transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196, 114369. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114369.
- Rodrigues, B. F. F., Amaral, A. R., Assunção, F. P. d. C., Bernar, L. P., Santos, M. C., Mendonça, N. M., Pereira, J. A. R., Castro, D. A. R. d., Duvoisin, S., Jr., Oliveira, P. H. A., Borges, L. E. P., & Machado, N. T. (2024). Economic Feasibility Study of the Production of Biogas, Coke and Biofuels from the Organic Fraction of Municipal Waste Using Pyrolysis. *Energies*, 17(1), 269. DOI: 10.3390/en17010269.
- Sai Bharadwaj, A. V. S. L., Dev, S., Zhuang, J., Wang, Y., Yoo, C. G., Jeon, B. H., Aggarwal, S., Park, S. H., & Kim, T. H. (2023). Review of chemical pretreatment of lignocellulosic biomass using low-liquid and low-chemical catalysts for effective bioconversion. *Bioresource technology*, 368, 128339. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128339.
- Salaheldeen, M., Mariod, A. A., Aroua, M. K., Rahman, S. M. A., Soudagar, M. E. M., & Fattah, I. M. R.

- (2021). Current State and Perspectives on Transesterification of Triglycerides for Biodiesel Production. *Catalysts*, 11(9), 1121. DOI: 10.3390/catal11091121.
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., & Vo, D. N. (2022). Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 344(Pt B), 126203. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126203.
- Sher, F., Yaqoob, A., Saeed, F., Zhang, S., Jahan Z., & Klemeš. J. J. (2020). Torrefied biomass fuels as a renewable alternative to coal in co-firing for power generation. *Energy*, 209, 118444. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118444.
- Shokravi, H., Shokravi, Z., Heidarrezaei, M., Ong, H. C., Rahimian Koloor, S. S., Petru, M., Lau, W. J., & Ismail, A. F. (2021). Fourth generation biofuel from genetically modified algal biomass: Challenges and future directions. *Chemosphere*, 285, 131535. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131535.
- Singh, P., FNU, K., & Encarnaçao, T. (2023). Genetic Modification: A Gateway to Stimulate the Industrial Production of Biofuels. In: Encarnaçao T, Pais AC, editors. *Marine Organisms: A Solution to Environmental Pollution? Uses in Bioremediation and in Biorefinery*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing; 2023. p. 237–260. DOI: 10.1007/978-3-031-17226-7\_11.
- Srinivas, G. L. K., Singh, D., & Kumar, S. (2023). Transition of Biofuels from the First to the Fourth Generation: The Journey So Far. In: *Biofuels*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Stegmann, P., Londo, M., & Junginger, M. (2020). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resour Conserv Recycl X*, 6, 100029. DOI: 10.1016/j.rcrx.2019.100029.
- Sun, Y. (2024). Technology Research and Development Prospects of Biofuels. *Journal of Education and Educational Research*, 7(1), 11–15. DOI: 10.54097/ks2m1h72.
- Tong, K. T. X., Tan, I. S., Foo, H. C. Y., Lam, M. K., Lim, S., & Lee, K. T. (2022). Advancement of biorefinery-derived platform chemicals from macroalgae: a perspective for bioethanol and lactic acid. *Biomass conversion and biorefinery*, 1–37. DOI: 10.1007/s13399-022-02561-7.
- Tsai, T.-Y., Lo, Y.-C., Dong, C.-D., Nagarajan, D., Chang, J.-S., & Lee, D.-J. (2020). Biobutanol Production from Lignocellulosic Biomass Using Immobilized *Clostridium acetobutylicum*. *Applied Energy*, 277, 115531. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115531.
- Tse, T. J., Wiens, D. J., Chicilo, F., Purdy, S. K., & Reaney, M. J. T. (2021). Value-Added Products from Ethanol Fermentation—A Review. *Fermentation*, 7(4), 267. DOI: 10.3390/fermentation7040267.
- U.S. Department of Energy (2024). 2023 Billion-Ton Report: An Assessment of U.S. Renewable Carbon Resources. Langholtz MH, lead. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. DOI: 10.23720/BT2023/2316165.
- Vučurović, V., Katanski, A., Vućurović, D., Bajić, B., & Dodić, S. (2025). Simultaneous Saccharification and Fermentation of Wheat Starch for Bioethanol Production. *Fermentation*, 11(2), 80. DOI: 10.3390/fermentation11020080.
- Whistance, J., Debnath, D., & Thompson, W. (2024). A biofuels outlook for the U.S. and Brazil and what it might mean for sustainable development goal 7. *Frontiers in Chemical Engineering*, 5, 1290763. DOI: 10.3389/fceng.2023.1290763.
- Wu, B., Lin, R., Bose, A., Huerta, J. D., Kang, X., Deng, C., et al. (2023). Economic and environmental viability of biofuel production from organic wastes: A pathway towards competitive carbon neutrality. *Energy*, 285, 129322. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111079.
- Wu, B., Wang, Y.-W., Dai, Y.-H., Song, C., Zhu, Q.-L., Qin, H., et al. (2021). Current status and future perspective of bio-ethanol industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 11079. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111079.
- Xie, S., Li, Z., Luo, S., & Zhang, W. (2024). Bioethanol to jet fuel: Current status, challenges, and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114240. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114240.
- Zhang, J., Zhang, X., Yang, M., Singh, S., & Cheng, G. (2021). Transforming lignocellulosic biomass into biofuels enabled by ionic liquid pretreatment. *Bioresource technology*, 322, 124522. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124522.
- Zhao, X., Taheripour, F., Malina, R., Staples, M. D., & Tyner, W. E. (2021). Estimating induced land use change emissions for sustainable aviation biofuel pathways. *The Science of the total environment*, 779, 146238. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146238.
- Zhu, Z., Sun, J., Fa, Y., Liu, X., & Lindblad, P. (2022). Enhancing microalgal lipid accumulation for biofuel production. *Frontiers in microbiology*, 13, 1024441. DOI: 10.3389/fmicb.2022.1024441.