

СУЧАСНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ НА ДОПОМОГУ ВИРОБНИЦТВУ БІОГАЗУ

Козловець М.В.

ТОВ «Про-Енерджі», malvina.schinkarchuk@pro-energy.com.ua

Abstract

This article contains information about the most modern and interesting practical research that scientists in the field of bioenergy are currently solving in terms of biogas and biomethane production: TeCH4BiogasUp, Power-to-X, auto-generative high pressure digestion, improving biogas membrane purification technology, using nanoparticles to improve anaerobic digestion, modeling complex anaerobic digestion models and gradient optimization.

Keywords: biomethane, biogas, CO₂, SCO₂, biotechnology

Виробництво біогазу та біометану в Україні активно розвивається, а з початком експорту біометану до ЄС з лютого 2025 року передбачається активізація усіх біогазових заводів, які планували перейти на виробництво біометану після урегулювання проблем з його експортом. Не дивлячись на те, що всі технології уже відомі та активно використовуються у виробництві, вчені не зупиняються на пошуку оптимізаційних рішень та покращених технологій зброджування сировини для отримання біогазу та біометану.

Темою доповіді є освітлення нових біотехнологічних напрямів досліджень у сфері біоенергетики, що покращують процес виробництва біогазу та біометану.

При виробництві біометану основним побічним продуктом є газоподібний CO₂, який окремим потоком може подаватися на зрідження для використання в харчовій промисловості або для теплиць. Однак з урахуванням сировини тваринного походження, яка застосовується на українських біогазових заводах, виробництво зрідженого CO₂ для харчових потреб є недоцільним, а CO₂ для теплиць цікаве тільки у випадку близького розташування до біогазового заводу. Тому актуальним є питання використання CO₂ після виробництва біометану.

Польські вчені знайшли рішення з використанням твердого CO₂ (SCO₂) після виробництва біометану, що дозволяє зробити процес безвідходним та створити замкнутий цикл виробництва біометану. Це інноваційна технологія, в якій очікується використання SCO₂ після криогенного збагачення біогазу до біометану [1]. Процес криогенного виробництва біометану (Biofrigas Sweden AB, Гетеборг, Швеція) відбувається за дуже низьких температур (до -100 °C) та високого тиску (приблизно 40 бар): сирий біогаз охолоджується до температури, при якій CO₂ конденсується або сублімується і може бути відокремлений від біогазу у рідкому або твердому стані, тоді як CH₄ залишається в газовій фазі [2]. Оскільки SCO₂ стабільний в атмосферних умовах і має багато різних застосувань, його виробництво стає кращим методом уловлювання та відновлення CO₂ з біогазу [3].

Технологія TeCH4BiogasUp використовує твердий CO₂ (SCO₂), отриманий під час збагачення біогазу до біометану, для попередньої обробки органічних субстратів [4] шляхом термічної дезінтеграції, яка включає швидке заморожування та поступове розморожування, сприяє руйнуванню флокул активного мулу, фрагментації біомаси та розчиненню молекулярних зв'язків. Це призводить до морфологічних змін у клітинах та денатурації макромолекул, що

ефективно ініціює лізис мікробних клітин та збільшує кількість органічних речовин у розчиненій фазі [5]. Обробка SCO_2 виявилася ефективною альтернативою традиційним методам кондиціонування осаду та збільшила біодеградацію органічної речовини на 48% порівняно з необробленою біомасою [6]. TeCH4BiogasUp інтегрує три раніше окремі процеси: дезінтеграцію органічних субстратів, переробку біогазу, а також секвестрацію та утилізацію CO_2 у замкнутому циклі.

Ще одним перспективним напрямком дослідження у виробництві біогазу та біометану є автогенеративне високотискове зброджування (АНРД) [7]. Автогенеративне бродіння під високим тиском (*auto-generative high pressure digestion* – АНРД) – це технологія виробництва біогазу під підвищеним тиском газу у реакторі до 58-90 бар, який створюють метаногенні мікроорганізми, що призводить до підвищення вмісту метану в біогазі до 90-96%. Завдяки високому тиску CO_2 та H_2S розчиняються в рідині, зменшуючи потребу в подальшій очистці біогазу.

При АНРД різниця вищої розчинності (CO_2 при 0,031 моль/л/бар порівняно з CH_4 при 0,0016 моль/л/бар) дозволяє розчинити більше CO_2 у дигестаті, тоді як сірководень (H_2S) також ефективніше розчиняється під тиском. Результатом є біогаз з вищим вмістом метану, який потребує меншого очищення для відповідності стандартам природного газу, що зрештою знижує витрати на виробництво біометану з біогазу [8].

Особливість технології полягає у застосуванні п'єзофільних мікроорганізмів, які мають оптимальний стан росту при тиску, що дорівнює або перевищує 99 атм та додавання газоподібного водню [7, 8]. Деякі бактерії та археї адаптувалися до життя в глибоких океанах, де гідростатичний тиск набагато вищий, ніж на рівні моря. Серед метаногенних архей в гідротермальних джерелах на океанічному дні були знайдені *Methanocaldococcus*, *Methanothermococcus*, *Methanopyrus* та *Methanotorris* [9]. Водень, як і CO_2 і CH_4 , також більше розчиняється при підвищеному тиску [7] і поглинається бактеріями та археями, які в свою чергу перетворюють газоподібний водень з розчиненим вуглекислим газом на додатковий метан – цей процес називається біологічним метануванням [10]. На сьогодні вже відома реалізація даного процесу для анаеробного очищення стічних вод у Південній Кореї [11]. UASB реактор при тиску 8 бар виробляє біогаз із вмістом метану 96,7%).

Іншим напрямком утилізації CO_2 , отриманого від виробництва біометану з біогазу є інтеграція Power-to-X у біогазові установки для виробництва водню та електрометанолу [12]. Концепція Power-to-X хабу передбачає використання CO_2 з біогазових установок для синтезу водню та метанолу на місці. Ця концепція створює внутрішній ринок енергії та матеріалів, взаємодіючи із зовнішньою енергетичною системою. Така оптимізація процесу виробництва біогазу показала, що виробництво метанолу може коштувати менше 650 євро за тону, а водню – менше 3 євро за кг [12, 13]. Це підкреслює потенціал інтеграції біогазових установок з іншими відновлюваними джерелами енергії.

Найбільш поширеним способом збагачення біогазу до біометану, в тому числі і в Україні, є мембранна технологія. Тому покращення технології мембранної очистки біогазу є одним із перспективним напрямків досліджень. Останні рішення [14] в області біогазових мембранних технологій, включають:

багатоступеневі мембранні системи з рекуперацією енергії, що зменшує втрати метану при збагаченні та підвищує енергоефективність процесу за рахунок рекуперації теплової енергії, що додатково знижує експлуатаційні витрати [14];

- інтеграцію мембранної очистки з біологічною метанацією: таке поєднання дозволяє перетворювати потік CO_2 на додатковий метан за допомогою водню, виробленого з надлишкової електричної енергії з відновлюваних джерел [15];

- новітні полімерні мембрани з високою селективністю на основі полімерів з високою проникністю для CO_2 , дозволяють досягати концентрації метану в біометані до 97-98% при одночасному збереженні понад 98% метану [16];

- використання мембран з покращеною термостійкістю та стійкістю до забруднень (наприклад, за допомогою плазми, графену або фторованих сполук), що зменшує забруднення, покращує селективність та гідрофобність мембран, чим дозволяє працювати з сирим біогазом, що містить H_2S , водяну пару та ксилоксани [17];

- застосування штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу даних в реальному часі, що дозволяє оптимізувати параметри мембранної установки в робочому режимі: тиск, температура, швидкість потоку, - все, що мінімізує споживання енергії та подовжує термін служби мембран [18].

Стабільність виробництва біогазу може забезпечитися за допомогою детального моделювання процесу виробництва. Тому оптимізація виробництва біогазу за допомогою складних моделей та градієнтної оптимізації є актуальним та поширеним напрямком діяльності в біоенергетиці [19]. Було розроблено біомодель [20] з процесом оптимізації та закодовано мовою програмування C#, систему диференціальних рівнянь інтегровано методом Рунге-Кутти. Придатність та ефективність поєднання складної біомоделі та методу градієнтної оптимізації апроксимаційного типу в процедуру числової оптимізації під час процесу зброджування показало, що запропонований підхід забезпечує надійну та стабільну числову процедуру, здатну досить ефективно оптимізувати процес аеробного зброджування. Для максимізації кількості та якості виробленого біогазу, описано приклад оптимізації процесу анаеробного розщеплення у біореакторі CSTR повномасштабної біогазової установки за наступними параметри процесу: біологічні добавки (початкові концентрації груп бактерій та дозування ферментів), неорганічні добавки, які беруть участь у фізико-хімічних процесах та впливають на значення рН; та температура в біореакторі [21]. Найкраща якість біогазу була отримана за допомогою багатоцільової оптимізації, де цільова функція включає дві суперечливі цілі: максимізацію виробництва біогазу та мінімізацію необхідної енергії на нагрівання.

Після обмеження значення рН, максимальної загальної початкової концентрації бактерій, мінімально допустимого вмісту CH_4 та максимально

допустимого вмісту H_2 , H_2S та NH_3 у виробленому біогазі за допомогою моделювання та оптимізації вміст CH_4 у біогазі збільшився на 11%, тоді як вміст H_2 , H_2S та NH_3 зменшився на 30%, 20% та 81% відповідно; в оптимізованій системі температура біореактора становила 25 °C, а значення pH – 7,7.

Не менш цікавим методом збільшення виходу біогазу є застосування наночастинок (1–100 нм) оксидів заліза, що збільшує деградацію біомаси шляхом прямого або непрямого міжвидового переносу електронів [22]. Лабораторні дослідження [23] з використанням наночастинок Fe_2O_3 в біореакторах робочим об'ємом 800 мл при температурі 35°C та гідравлічному часі утримування 30 днів показали, що деградація субстрату в контрольній системі з додаванням наночастинок заліза збільшила потенціал метану з 63% до 100%. Це демонструє ефективність використання провідних матеріалів для стимуляції мікробної активності [24].

Отже, незважаючи на високий рівень технологічності процесів виробництва біогазу та біометану на сьогодні, вчені не зупиняються у пошуку та розробці способів оптимізації, інтеграції до удосконалення процесів виробництва біогазу та його кінцевих продуктів (біометану та CO_2), використовуючи при цьому різні способи та напрямки діяльності: від моделювання процесів до інтеграції з іншими системами.

Список використаної літератури:

- 1.Kazimierowicz, J., Dębowski, M., Zieliński, M., Bartkowska, I. Wasilewski, A., Łapiński, D., Ofman, P. The Use of Solidified Carbon Dioxide in the Aerobic Granular Sludge Pre-Treatment before Thermophilic Anaerobic Digestion. *Applied Sciences*. 2023. 13. 7864. 10.3390/app13137864
- 2.Qian, W., Kang, Z., Luo, L., Zheng, Z., Xiao, X., Qin, W. Miniaturization of Biogas Upgrading Via High Pressure Water Scrubbing to Enhance Economic Competitiveness of Distributed Biomethane. *J. Phys. Conf. Ser.* 2023. 2468. 012179.
- 3.Kazimierowicz, J., Dębowski, M., Zieliński, M. Innovative Method for Biomethane Production Based on a Closed Cycle of Biogas Upgrading and Organic Substrate Pretreatment. Technical, Economic, and Technological Fundamentals. *Energies*. 2025. 18. 1033. 10.3390/en18051033
- 4.Zawieja, I.E. The Course of the Methane Fermentation Process of Dry Ice Modified Excess Sludge. *Arch. Environ. Prot.* 2019. 45. 50–58.
- 5.Machnicka, A., Grübel, K., Waclawek, S., Sikora, K. Waste-Activated Sludge Disruption by Dry Ice: Bench Scale Study and Evaluation of Heat Phase Transformations. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. 26. 26488–26499.
- 6.Lindeboom, RE, Fermoso, FG, Weijma, J, Zagt, K, van Lier, JB. Autogenerative high pressure digestion: anaerobic digestion and biogas upgrading in a single step reactor system. *Water Sci Technol.* 2011. 64(3). 647-53. 10.2166/wst.2011.664. PMID: 22097043
- 7.Liang, Z., Wilkinson, D.W., Wang, C. Pressurised Anaerobic Digestion for Reducing the Costs of Biogas Upgrading. *Bioenerg. Res.* 2023. 16 (4). 2539–2548. 10.1007/s12155-023-10602-w
- 8.Kanekar, P.P., Kanekar, S.P. Piezophilic or Barophilic Microorganisms. In: Diversity and Biotechnology of Extremophilic Microorganisms from India. Microorganisms for Sustainability. *Springer, Singapore*. 2023. 269-280. 10.1007/978-981-19-1573-4_9
- 9.Zeng, X., Alain, K. & Shao, Z. Microorganisms from deep-sea hydrothermal vents. *Marine Life Science & Technology*. 2021. 3 (2). 204–230. 10.1007/s42995-020-00086-4
- 10.Sangmi, K., Alsayed, M., Seongwon, I., Mo-Kwon, L., Seoktae, K., Jeong-Geol, N., Dong-Hoon, K. Production of high-calorific biogas from food waste by integrating two approaches:

- Autogenerative high-pressure and hydrogen injection. *Water Research*. 2021. 194 10.1016/j.watres.2021.116920
- 11.Om, P., Alsayed, M., Seongwon, I., Seoktae, K., Xueqing, S., Dong-Hoon, K. Upflow anaerobic sludge blanket reactor operation under high pressure for energy-rich biogas production. *Bioresour Technol*. 2023. 376. 10.1016/j.biortech.2023.128897
 - 12.Alamia, A., Partoon, B., Rattigan, E., Andresen, G. B. Optimizing hydrogen and e-methanol production through Power-to-X integration in biogas plants. *Energy Conversion and Management*. 2024. 322. 119175. 10.1016/j.enconman.2024.119175
 - 13.Yang, Y.; Fan, J.; Zhang, L.; Gao, R.; Zhang, C. Techno-Economic Assessment of Biogas-to Methanol Processes Coupled with Low-Carbon H₂ Production Technologies. *Processes*. 2025. 13. 313. 10.3390/pr13020313
 - 14.Gkotsis, P., Kougias, P., Mitrakas, M., Zouboulis A. Biogas upgrading technologies – Recent advances in membrane-based processes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. 48. 10: 3965-3993, 10.1016/j.ijhydene.2022.10.228
 - 15.Glenk, G., Holler, P., Reichelstein, S. Advances in power-to-gas technologies: cost and conversion efficiency, *Energy Environ. Sci.*. 2023. 16. 6058-6070. 10.1039/D3EE01208E
 - 16.Aguilloso, G., Arpia, K., Khan, M., Sapico, Z.A., Lopez, E.C.R. Recent Advances in Membrane Technologies for Biogas Upgrading. *Eng. Proc*. 2024. 67. 57. 10.3390/engproc2024067057
 - 17.Vishwakarma, V., Kandasamy, J., Vigneswaran, S. Surface Treatment of Polymer Membranes for Effective Biofouling Control. *Membranes*. 2023. 13. 736. 10.3390/membranes13080736
 - 18.Heller, A., Pomares, H., Glösekötter, P. Optimizing Biogas Power Plants through Machine-Learning-Aided Rotor Configuration. *Eng. Proc*. 2024. 68. 46. 10.3390/engproc2024068046
 - 19.Kegl, T. Consideration of biological and inorganic additives in upgraded anaerobic digestion BioModel. *Bioresour Technol*. 2022. 355. 127252. 10.1016/j.biortech.2022.127252
 - 20.Kegl, T., Kegl, B., Kegl, M. Improvement of Biogas Production Utilizing a Complex Anaerobic Digestion Model and Gradient-Based Optimization. *Energies*. 2024. 17. 1279. 10.3390/en17061279
 - 21.Kegl, T., Kovač Kralj, A. An enhanced anaerobic digestion BioModel calibrated by parameters optimization based on measured biogas plant data. *Fuel*. 2022. 312. 122984. 10.1016/j.fuel.2021.122984
 - 22.Tsui, T.H., Zhang, L., Zhang, J., Dai, Y., Tong, Y.W. Methodological Framework for Wastewater Treatment Plants Delivering Expanded Service: Economic Tradeoffs and Technological Decisions. *Sci. Total Environ*. 2022. 823. 153616. 10.1016/j.scitotenv.2022.153616
 - 23.Kweiner Tetteh, E., Rathilal S. Application of biomagnetic nanoparticles for biostimulation of biogas production from wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*. 2021. 45. 6. 5214-5220. 10.1016/j.matpr.2021.01.720
 24. Paletta, R., Candamano, S., Filippelli, P., Lopresto, C.G. Influence of Fe₂O₃ Nanoparticles on the Anaerobic Digestion of Macroalgae *Sargassum* spp. *Processes*. 2023. 11. 1016. 10.3390/pr11041016