

УДК 628.47:575.1

ІНТЕГРАЦІЯ CHLORELLA VULGARIS В СИСТЕМУ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Домбровський О.Г.¹, Тракслер І.С.², Деркач Є.А.³, Бондар А.В.⁴¹ПрАТ «МХП Еко Енерджі», канд. екон. наук, директор, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua²Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, канд. техн. наук, старший науковий співробітник, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514³ПрАТ «МХП Еко Енерджі», канд. біол. наук, керівник відділу, e-mail: y.derkach@mhp.com.ua⁴ПрАТ «МХП Еко Енерджі», бакалавр.лаборант, e-mail: an.v.bondar@mhp.com.ua<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.10>

У роботі досліджено ефективність використання мікроводорості *Chlorella vulgaris* як сировини для біометанізації. Проведено порівняння енергетичного потенціалу рідкої та висушеної біомаси, вирощеної у фотобіореакторі. Умови анаеробного зброджування в мезофільному режимі показали, що висушена біомаса забезпечує вищий вихід біогазу (620 л/кг СОР) порівняно з рідкою (430 л/кг СОР), з вмістом метану до 60%. Отримані результати підтверджують доцільність застосування *Chlorella vulgaris* у біоенергетиці як високопродуктивного та стабільного джерела органічної сировини.

This study evaluates the efficiency of *Chlorella vulgaris* biomass as a substrate for biomethane production. Liquid and dried biomass cultivated in a photobioreactor were compared under mesophilic anaerobic digestion conditions. Results showed that dried biomass yielded 620 L/kg VS of biogas, while liquid biomass produced 430 L/kg VS, with methane content reaching up to 60%. These findings highlight the potential of *C. vulgaris* as a productive and stable feedstock for bioenergy applications.

Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: *Chlorella vulgaris*, мікроводорості, біометан, біогаз, анаеробне зброджування, фотобіореактор.

Актуальність. Сучасні екологічні виклики та зростаючий попит на чисту енергію вимагають розробки і впровадження енергоефективних технологій, а також пошуку альтернативних джерел палива. З метою виробництва біоенергії та біотрансформації органічних відходів, значного поширення набула технологія анаеробного зброджування – біохімічного процесу, під час якого органічна речовина розкладається з утворенням біогазу, основними складовими якого є метан (CH₄) і вуглекислий газ (CO₂). Зниження залежності від викопного палива та необхідність мінімізації викидів парникових газів роблять біометан одним із основних елементів сталого розвитку енергетичної галузі. Оскільки процес біометанізації є однією з найбільш ефективних технологій перетворення органічних відходів на чисту енергію, біомаса і біопаливо складають значну частину майбутнього ландшафту відновлюваних джерел енергії. В зв'язку з цим, в рамках реалізації плану REPowerEU, країнами Європейського Союзу поставлено за мету до 2030 року виробляти 35 млрд кубометрів біометану щорічно. Однак, для досягнення цього обсягу, виникає питання щодо забезпечення достатньою кількістю органічної сировини як відновлюваного ресурсу [1, 2, 3].

Одним із перспективних рішень є біометанізація мікроводоростей [4].

Завдяки високій продуктивності біомаси, здатності до інтенсивної фіксації CO₂ та відсутності конкуренції за сільськогосподарські угіддя, мікроводорості становлять значний інтерес і можуть стати ключовим компонентом у сфері відновлюваної енергетики [5, 6]. Їх інтеграція в систему біометанізації може сприяти не лише підвищенню виходу біометану, але й забезпечити ефективну утилізацію органічних відходів.

Крім того, виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування дозволяє уникнути енергоємних етапів, таких як сушіння та екстракція біомаси. Мікроводорості можуть бути також успішно інтегровані в процес біологічного очищення стічних вод і поєднувати в собі переваги видалення різноманітних хімічних сполук, виробництва енергії та утилізації CO₂ [7, 8].

Оцінка біохімічного метанового потенціалу мікроводоростей є важливим етапом у визначенні їхньої енергетичної цінності. Дослідження проводяться за допомогою спеціалізованих тестів, що імітують процес анаеробного зброджування. При цьому органічний субстрат у контрольованих умовах змішується з актив-

ним інокулятом. Вихід біометану обчислюється шляхом порівняння отриманих результатів із контрольними зразками, що містять лише інокулят [9, 10].

Таким чином, інтеграція мікробіодоростей у процес біометанізації відкриває нові можливості для розвитку сталої енергетики, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та зменшення екологічного навантаження.

Мета роботи Оцінити ефективність культивування мікробіодоростей *Chlorella vulgaris*, для біометанізації, порівнюючи різні типи біомаси – рідку та суху.

Методи дослідження. Для вирощування біомаси *Chlorella vulgaris* було використано трубчастий фотобіореактор компанії “Algoliner” (Germany) об’ємом 100 ± 3 л. Фотобіореактор оснащений світлодіодами трьох спектрів: червоного (660 нм), синього (450 нм) та білого (6500 К). Режим освітлення – 16:8 (год), потужність освітлення – 60%; щільність фотосинтетичного потоку фотонів становила $1020 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{с}$ [11].

Вирощування *Chlorella vulgaris* проводилося протягом 21 доби. Для культивування використано поживне середовище Bold Basal Medium [12].

Впродовж культивування вимірювалися такі показники як температура, значення pH та кількість сухої речовини. Показники фіксувалися щоденно, в один і той же час, після чого відбиралася проба культури водоростей об’ємом 100 мл для визначення вмісту сухої речовини. Для вимірювання температури та pH вико-

ристовували датчик pH/температури, який знаходиться на виході з сонячного колектора фотобіореактора (Hamilton EASYFERM PLUS PHI ARC 120). Їх значення підтримувались в діапазоні 6-7 та 25–28 °C, відповідно. Регуляція pH проводилася шляхом впорскування чистого CO₂ за вимогою із заданим значенням 7,5. Подача CO₂ відбувалася через компресор з клапаном (FESTO VEMD-L-6-14-20-D21-M5-1-R1-V4: макс. витрата 20 л/хв) у світловій фазі. Коли значення pH перевищувало встановлений поріг 7,5, система контролю автоматично активувала клапан для подачі CO₂ з барботажем (0,5 л/хв). Така система регуляції забезпечувала стабільне підтримання оптимальних умов для росту мікробіодоростей.

Визначення вмісту сухої речовини проводили ваговим методом. Після центрифугування одержану біомасу висушували в аналізаторі вологи (Precisa XM10 SE) при 105 °C.

В умовах фотобіореактора було проведено культивування *Chlorella vulgaris* за сталих параметрів освітлення та температури. Одержано два типи біомаси:

- Рідка фракція – біомаса, отримана в процесі безперервного вирощування в фотобіореакторі за оптимальних умов для росту водоростей.
- Суха біомаса – біомаса, висушена після збирання з фотобіореактора для подальшого використання в процесі біометанізації.

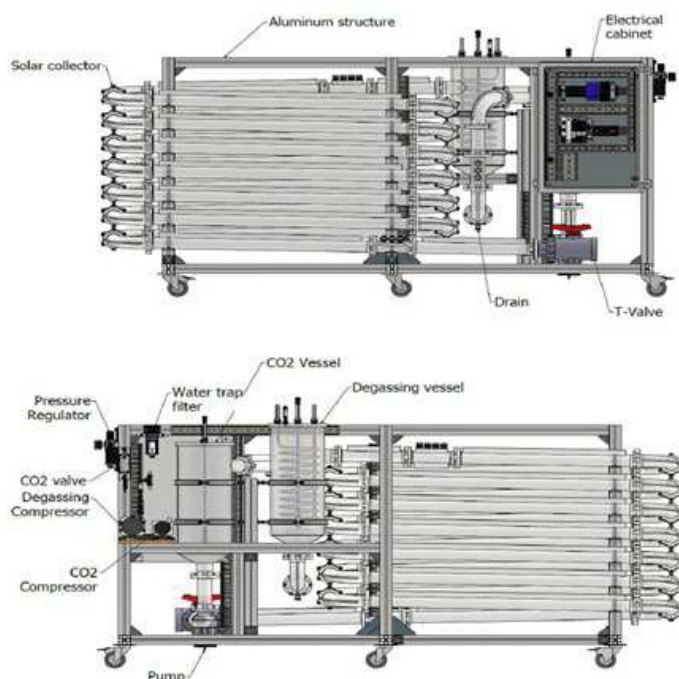


Рис.1 Конструкція фотобіореактора

Fig. 1 Photobioreactor design

Ріст культури в рідкому вигляді був стабільним при температурі 25°C та інтенсивності світла 200-300 мкмоль/м²•с. Після висушування біомаса зберігала свою високу питому енергетичну цінність, а її вологість при цьому знижувалась до 10-12%, що забезпечує довгострокове зберігання.

Для проведення біометанізації було використано батч-систему в мезофільному режимі (температура 37°C). Процес зброджування тривав 30 діб. Порівняння результатів показало:

- Рідка фракція демонструвала потенціал виробництва біогазу на рівні 430 л/кг•COP, що є хорошим результатом, з огляду на відносно високий вміст води.
- Суха біомаса мала вищий потенціал біогазу – 620 л/кг•COP, що вказує на підвищену ефективність зброджування після видалення води та, відповідно, підвищення концентрації органічної речовини.

Результати експерименту показують, що висушена біомаса *Chlorella vulgaris* має вищий потенціал для виробництва біогазу порівняно з рідкою фракцією. Це можна пояснити тим, що при висушуванні зменшується вміст води, що покращує співвідношення органічної речовини до води і сприяє більш ефективному зброджуванню. Крім того, висушена біомаса забезпечує менше втрат під час зберігання, що робить її більш зручною для подальшої обробки.

Chlorella vulgaris є високоякісним джерелом органічної біомаси, що має високу питому енергетичну цінність завдяки значному вмісту білка та ліпідів.

Це робить її перспективною для використання в процесах біометанізації, де основною метою є перетворення органічної біомаси в біогаз. Зазначені мікробіодорості мають здатність до швидкого росту, що забезпечує великі обсяги біомаси при невеликих витратах ресурсів.

Інтеграція біомаси *Chlorella vulgaris* у систему біометанізації може значно підвищити ефективність виробництва біогазу. Зважаючи на стабільну врожайність культури, її використання може стати важливим кроком у розвитку індустрії відновлювальних джерел енергії. Вдосконалення процесів культивування та збирання цієї біомаси може призвести до зниження собівартості біогазу, що робить цей процес більш доступним для широкого застосування в енергетичній галузі.

За результатами культивування побудовано графік, який представлено на рисунку 2.

Результати дослідження показали, що тип підготовки біомаси *Chlorella vulgaris* значною мірою впливає на продуктивність анаеробного зброджування:

- Рідка біомаса: 430 л/кг COP біогазу.
- Суха біомаса: 620 л/кг COP біогазу. (рис. 3).

Одним із ключових факторів, що обумовлює цю різницю, є значна концентрація органічної речовини у підготовленому субстраті. Рідка культура, попри свою технологічну зручність, містить значну кількість води, що розбавляє органічні компоненти й знижує щільність субстрату в реакторі.

Крім того, в рідкій формі біомаса має вищу доступність для гідролізу, однак швидке накопичення

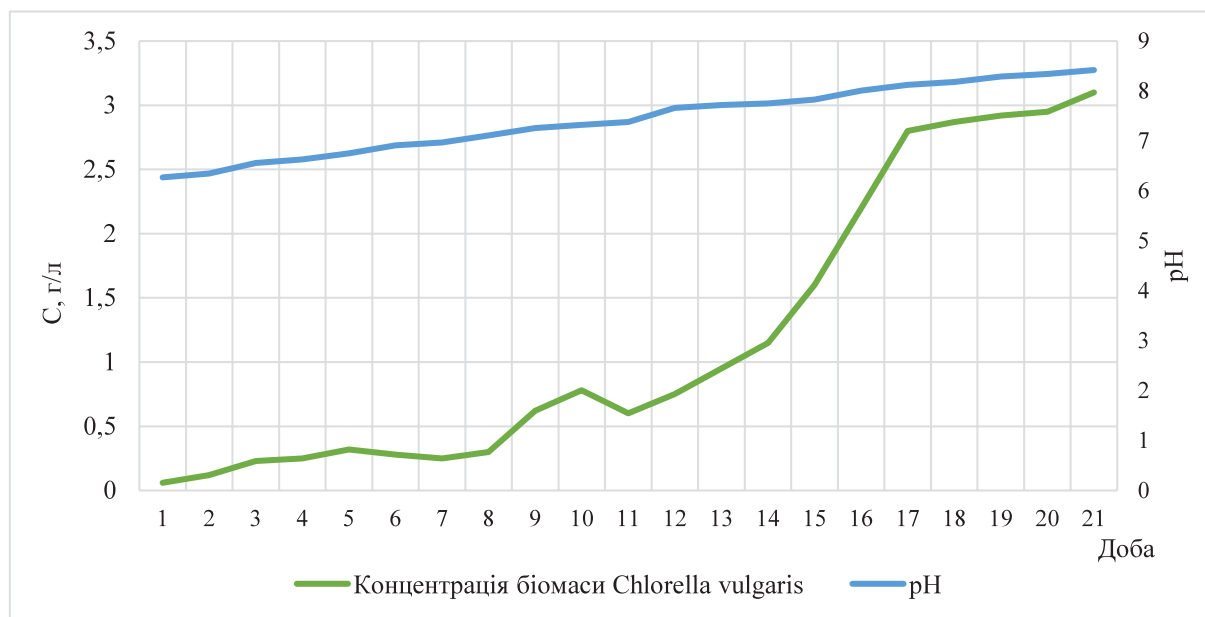


Рис. 2 Динаміка концентрації біомаси *Chlorella vulgaris* та pH протягом періоду культивування

Fig. 2 Dynamics of *Chlorella vulgaris* biomass concentration and pH during the cultivation period

летких жирних кислот, у свою чергу, може призводити до зниження величини рН, що потенційно пригнічує активність метаногенних мікроорганізмів. Це частково пояснює нижчий метановий вихід у разі використання рідкої суспензії. У висушеній біомасі відбувається стабілізація компонентів, що забезпечує рівномірніше навантаження на мікробіоценоз та знижує ризик кислотного шоку.

Аналіз складових частин біогазу показав, що метан становить основну частину біогазу – 55-60% за об'ємом,

що є типовим для процесу біометанування органічної біомаси [13]. Важливо, що для висушеної біомаси цей показник був вищим (до 60%), що підтверджує її вищу ефективність у процесі зброджування.

Chlorella vulgaris містить високий відсоток білків (до 50%), ліпідів (до 20–25%) і помірну кількість вуглеводів. Білкові фракції при зброджуванні можуть спричиняти надмірне накопичення аміаку, який при високих концентраціях є інгібітором для метаногенів [14, 15]. Проте дослідження показало, що вихід мета-



Рис. 3 Вихід біогазу із зразків біомаси *Chlorella vulgaris*

Fig. 3 Biogas yield from *Chlorella vulgaris* biomass samples

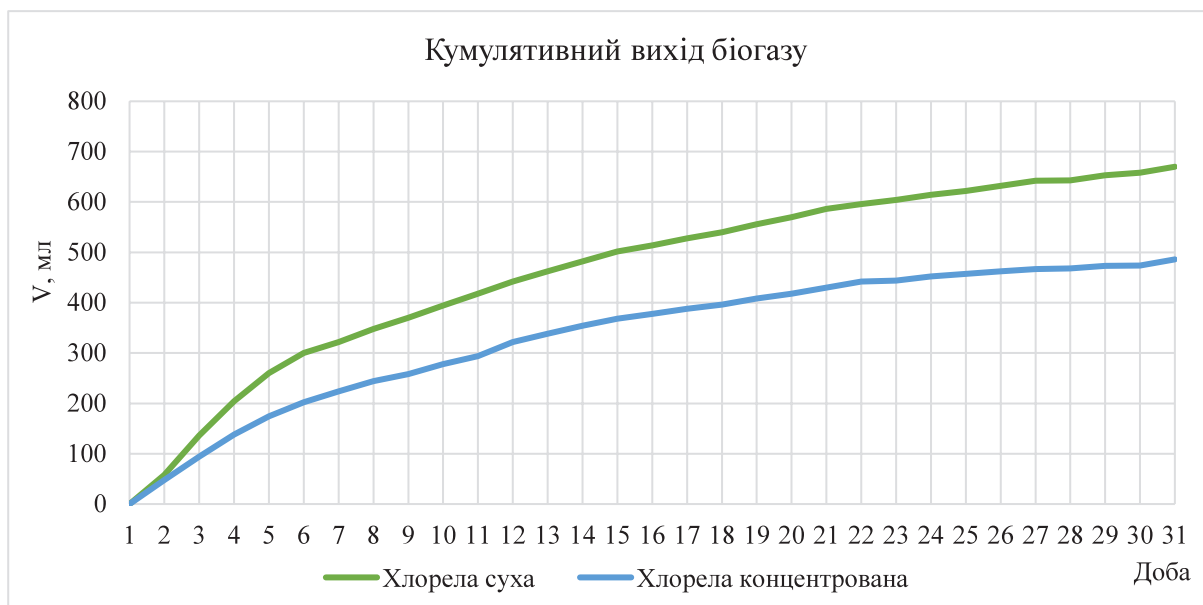


Рис. 4 Кумулятивний вихід біогазу із зразків біомаси *Chlorella vulgaris*

Fig. 4 Cumulative biogas yield from *Chlorella vulgaris* biomass samples

ну залишався в межах типової ефективності, що може свідчити про виражені буферні властивості середовища і відносно високий рівень адаптації мікробної консорції до високобілкового субстрату.

Також важливою є присутність в складі мікроводоростей каротиноїдів та хлорофілу, що проявляють виражений антиоксидантний ефект і позитивно впливають на мікробіологічну стабільність процесу. Ці сполуки можуть підтримувати активність гідролітичних бактерій на ранніх етапах ферментації, що в підсумку сприяє загальному підвищенню біогазового потенціалу.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в даному напрямку

Інтеграція мікроводоростей *Chlorella vulgaris* у процеси виробництва біометану демонструє високий потенціал як енергетично, так і екологічно ефективної стратегії. Мікроводорості здатні до активного фотосинтезу та утилізації CO₂, тому їх культивування може бути синергічно поєднана з поглинанням викидів CO₂ з ТЕЦ, біогазових станцій та інших промислових об'єктів.

У разі поєднання з системами очищення стічних вод, *Chlorella vulgaris* може поглинати надлишковий нітроген і фосфор, тим самим покращуючи якість води та зменшуючи навантаження на очисні споруди.

При цьому залишок дигестату може бути використано в якості цінного органічного добрива, що збагачене мікроелементами та залишками біомаси водоростей. В свою чергу, це створює можливості для замкненої циркуляції елементів у біотехнічній системі через етап енергетичної генерації.

На основі одержаних даних перспективними є такі напрямки досліджень:

- Термохімічна передобробка біомаси, зокрема гідроліз або парова обробка, може покращити біодоступність структурних компонентів клітинної стінки водоростей, що позитивно вплине на ефективність зброджування.
- Мікробна адаптація: попереднє пристосування інокуляту до високобілкової біомаси мікроводоростей може підвищити толерантність до NH₄⁺ та збільшити вихід біогазу.
- Доцільно порівняти *Chlorella vulgaris* з іншими видами мікроводоростей (*Scenedesmus spp.*, *Spirulina platensis*, *Nannochloropsis*) для виявлення видів з найвищим біоенергетичним потенціалом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Тракслер І.С. & Потапова М.В. (2024). Огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах України та Європи. Теплофізика та теплоенергетика, 46(40), 91-100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10>
2. Біоенергетична асоціація України. (2024). Прогноз розвитку біогазового сектору до 2035 року. Retrieved from <https://uabio.org/materials/15681/>
3. Гелетуша Г., Железна Т., Кучерук П. & Драгнєв С. (2023). Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України. Теплофізика та теплоенергетика, 49(2), 77-86 <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>
4. Гелетуша Г.Г., Гивель М.М. & Кучерук П.П. (2024). Можливості виробництва передового біометану з мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок. Частина 1. Теплофізика та теплоенергетика, 46(4), 60-73. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>
5. Hasan, M. M., Mofijur, M., Uddin, M. N., Kabir, Z., Badruddin, I. A., & Khan, T. M. Y. (2024). Insights into anaerobic digestion of microalgal biomass for enhanced energy recovery. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1355686>
6. Siddiki, S.Y.A., Mofijur, M., Kumar, P.S., Ahmed, S.F., Inayat, A., Kusumo et al. (2021). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel*, 307, 121782. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121782>
7. L. Mendez, A. Mahdy, M. Ballesteros, C. González-Fernández, *Chlorella vulgaris* vs cyanobacterial biomasses: Comparison in terms of biomass productivity and biogas yield, *Energy Conversion and Management*, Volume 92, 2015, P. 137-142. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.050>
8. Olguín, E. J. (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. *Biotechnology Advances*, 30(5), 1031–1046. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.05.001>
9. Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Wibberg, D., Winkler, A., Kalinowski, J., Posten, C., & Kruse, O. (2017). Highly efficient methane generation from untreated microalgae biomass. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0871-4>
10. Mendez, L., Mahdy, A., Ballesteros, M., & González-Fernández, C. (2015b). Biomethane production using fresh and thermally pretreated *Chlorella vulgaris* biomass: A comparison of batch and semi-continuous feeding mode. *Ecological Engineering*, 84, 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.056>

11. *Algoliner*. (2024, November 8). User Manual Algoliner PBR-100 Photobioreactor. Germany: Algoliner. 93 p.
12. *Algae*, U. C. C. O. (n.d.). Bold basal medium. UTEX Culture Collection of Algae. <https://utex.org/products/bold-basal-medium?variant=30991127609434>
13. *IEA Bioenergy*. State of Technology Review – Algae Bioenergy. Golden, CO, USA : IEA Bioenergy, 2017. 158 p.
14. *Grubišić, M., Peremin, I., Djedović, E., Šantek, B., & Šantek, M. I.* (2024). Cultivation of a Novel Strain of *Chlorella vulgaris* S2 under Phototrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic Conditions, and Effects on Biomass Growth and Composition. *Fermentation*, 10(6), 270. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060270>
15. *Magdalena, J. A., Ballesteros, M., & González-Fernandez, C.* (2018). Efficient anaerobic digestion of microalgae biomass: proteins as a key macromolecule. *Molecules*, 23(5), 1098. <https://doi.org/10.3390/molecules23051098>

INTEGRATION OF CHLORELLA VULGARIS INTO PRODUCTION SYSTEMS: ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

Dombrovskiy O.H.¹, Traksler I.S.², Derkach Ye.A.³, Bondar A.V.⁴

¹MHP Eco Energy LLC, PhD in Economics, Director, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua

²Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, PhD in Engineering, Senior Researcher, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514

³MHP Eco Energy LLC, PhD in Biology, Head of Department, e-mail: y.derkach@mhp.com.ua

⁴MHP Eco Energy LLC, Bachelor, Laboratory Technician, e-mail: an.v.bondar@mhp.com.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.10>

Objective: This study aims to explore the potential of *Chlorella vulgaris* as an efficient substrate for biomethanation, focusing on both liquid and dry biomass types. The research addresses the critical need for sustainable bioenergy sources and highlights the role of microalgae in bioenergy systems due to their high productivity, ability to capture CO₂, and compatibility with various bioprocesses.

Tasks:

1. Cultivate *Chlorella vulgaris* in a photobioreactor under controlled environmental conditions to obtain liquid and dry biomass samples.
2. Conduct detailed analysis of the physical and chemical properties of liquid and dry biomass, including moisture content, organic matter composition, and energy potential.
3. Perform batch anaerobic digestion experiments in a mesophilic regime to evaluate biogas and methane production from both biomass types.
4. Compare and analyze the differences in biogas yields, methane content, and overall energy efficiency between the liquid and dry biomass.
5. Assess the broader implications of integrating *Chlorella vulgaris* into biomethanation systems in terms of environmental sustainability and resource efficiency.

Research Methods: The study employed a tubular photobioreactor (Algoliner PBR-100, Germany) for cultivating *Chlorella vulgaris*. Controlled parameters such as light intensity, temperature, and pH were maintained

to ensure optimal growth conditions. Bold Basal Medium (BBM) was used as the cultivation medium. Biomass was harvested after a 21-day growth period and categorized into two types: liquid biomass (as-is) and dry biomass (dehydrated to a moisture content of 10-12%).

Batch anaerobic digestion tests were conducted at 37°C for 30 days, using a batch reactor system. Biogas production and methane content were measured daily, and cumulative biogas yields were calculated. Moisture content and volatile solids (VS) of the biomass were determined using standard gravimetric and biochemical methods.

Results:

1. Moisture content analysis revealed a significant difference between liquid and dry biomass, with the latter being more concentrated in organic matter.
2. Liquid biomass yielded approximately 430 L of biogas per kg of volatile solids, while dry biomass demonstrated a superior yield of 620 L per kg of volatile solids.
3. Methane content in the biogas from dry biomass was higher (up to 60%) compared to the liquid form (55-58%), underscoring the enhanced efficiency of the dry substrate.
4. The results highlight that *Chlorella vulgaris* biomass, especially in its dry form, is a viable and efficient substrate for biogas production.

Conclusion: The findings emphasize the potential of *Chlorella vulgaris* as a high-performance feedstock for biomethanation, capable of yielding substantial amounts of biogas and methane. The integration of microalgae into bioenergy systems offers multiple benefits, including the utilization of CO₂ emissions, waste valorization, and enhanced energy output. This study contributes to the broader adoption of algae-based bioenergy strategies and paves the way for further optimization of cultivation and digestion processes.

References 8, Figures: 4.

Key words: *Chlorella vulgaris*, microalgae, biomethane, biogas, anaerobic digestion, photobioreactor.

1. Traksler, I., & Potapova, M. (2024). Review of green hydrogen transformation technologies for increasing biomethane production at existing plants in Ukraine and Europe. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46(4), 91–100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10> (in ukr.)
2. Bioenergy Association of Ukraine. (2024). Forecast of the development of the biogas sector until 2035. Retrieved from <https://uabio.org/materials/15681/> (in ukr.)

3. Geletukha, G., Zheliezna, T., Kucheruk, P., & Drahnev, S. (2023). Analysis of prospective directions for using Ukraine's biomass potential for energy. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 49(2), 77–86. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.9> (in ukr.)
4. Geletukha, G., Hyvel, M., & Kucheruk, P. (2024). Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46(4), 60–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.7> (in ukr.)
5. Hasan, M. M., Mofijur, M., Uddin, M. N., Kabir, Z., Badruddin, I. A., & Khan, T. M. Y. (2024). Insights into anaerobic digestion of microalgal biomass for enhanced energy recovery. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1355686>
6. Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Kumar, P. S., Ahmed, S. F., Inayat, A., Kusumo et al. (2021). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel*, 307, 121782. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121782>
7. L. Mendez, A. Mahdy, M. Ballesteros, C. González-Fernández, *Chlorella vulgaris* vs cyanobacterial biomasses: Comparison in terms of biomass productivity and biogas yield, *Energy Conversion and Management*, Volume 92, 2015, P. 137–142. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.050>
8. Olguín, E. J. (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. *Biotechnology Advances*, 30(5), 1031–1046. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.05.001>
9. Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Wibberg, D., Winkler, A., Kalinowski, J., Posten, C., & Kruse, O. (2017). Highly efficient methane generation from untreated microalgae biomass. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0871-4>
10. Mendez, L., Mahdy, A., Ballesteros, M., & González-Fernández, C. (2015b). Biomethane production using fresh and thermally pretreated *Chlorella vulgaris* biomass: A comparison of batch and semi-continuous feeding mode. *Ecological Engineering*, 84, 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.056>
11. *Algoliner*. (2024, November 8). User Manual Algoliner PBR-100 Photobioreactor. Germany: Algoliner. 93 p.
12. *Algae*, U. C. C. O. (n.d.). Bold basal medium. UTEX Culture Collection of Algae. <https://utex.org/products/bold-basal-medium?variant=30991127609434>
13. *IEA Bioenergy*. State of Technology Review – Algae Bioenergy. Golden, CO, USA : IEA Bioenergy, 2017. 158 p.
14. Grubišić, M., Peremin, I., Djedović, E., Šantek, B., & Šantek, M. I. (2024). Cultivation of a Novel Strain of *Chlorella vulgaris* S2 under Phototrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic Conditions, and Effects on Biomass Growth and Composition. *Fermentation*, 10(6), 270. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060270>
15. Magdalena, J. A., Ballesteros, M., & González-Fernandez, C. (2018). Efficient anaerobic digestion of microalgae biomass: proteins as a key macromolecule. *Molecules*, 23(5), 1098. <https://doi.org/10.3390/molecules23051098>

Отримано 25.06.2025

Received 25.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025

Accepted for publication 05.08.2025