

Đánh giá khả năng tạo khí sinh học của sinh khối tảo *Spirulina* thô và tiền xử lý

Trần Công Khánh^{1*}, Phạm Văn Định¹, Trần Ngọc Minh¹, Bùi Ngọc Anh¹, Trần Lê Quân¹

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE)

TỪ KHOẢ

Spirulina
Phân hủy kỵ khí
Tiềm năng sinh methane
Tiền xử lý cơ học và vi sóng

TÓM TẮT

Phân hủy kỵ khí là công nghệ hiệu quả để chuyển hóa sinh khối thành khí sinh học giàu methane. Nghiên cứu này nhằm đánh giá tiềm năng sinh methane của sinh khối *Spirulina* thương mại thông qua thí nghiệm xác định tiềm năng methane (Biochemical Methane Potential - BMP) ở điều kiện mesophilic 35 °C, đồng thời khảo sát ảnh hưởng của hai phương pháp tiền xử lý gồm nghiền cơ học và xử lý vi sóng. Kết quả cho thấy sinh khối *Spirulina* thô đạt giá trị BMP là $0,335 \pm 0,018$ L CH₄/g VS. Khi áp dụng tiền xử lý nghiền cơ học, BMP tăng lên $0,341 \pm 0,005$ L CH₄/g VS (cải thiện 1,8%), trong khi tiền xử lý vi sóng cho kết quả BMP cao nhất là $0,364 \pm 0,002$ L CH₄/g VS (cải thiện 8,7%). So sánh với tiềm năng methane lý thuyết (TBMP = $0,5147$ L CH₄/g VS), sinh khối *Spirulina* đạt hiệu suất khai thác lần lượt là 65,1%, 66,2% và 70,7% cho các điều kiện thô, nghiền và vi sóng. Kết quả này cho thấy tiền xử lý vi sóng là phương pháp hiệu quả hơn trong việc cải thiện khả năng phân hủy sinh khối *Spirulina*, tuy nhiên mức cải thiện vẫn ở mức vừa phải, phản ánh hạn chế liên quan đến cấu trúc tế bào bền của sinh khối này và nguy cơ ức chế từ ammonia sinh ra trong quá trình phân hủy protein. Kết quả nghiên cứu này cung cấp thông tin khoa học ban đầu cho việc khai thác sinh khối *Spirulina* nội địa trong sản xuất khí sinh học, đồng thời nêu bật sự cần thiết của các phương pháp tiền xử lý và quản lý tối ưu các thông số vận hành trong ứng dụng thực tế.

KEYWORDS

Spirulina
Anaerobic digestion
Biochemical methane potential
Mechanical pretreatment
Microwave pretreatment

ABSTRACT

Anaerobic digestion is an efficient technology for converting biomass into methane-rich biogas. This study aimed to evaluate the methane potential of commercial *Spirulina* biomass through biochemical methane potential (BMP) assays under mesophilic conditions (35 °C), while also investigating the effects of mechanical grinding and microwave irradiation pretreatment. The results showed that raw *Spirulina* biomass achieved a BMP value of 0.335 ± 0.018 L CH₄/g VS. With mechanical grinding pretreatment, the BMP slightly increased to 0.341 ± 0.005 L CH₄/g VS (an improvement of 1.8%), whereas microwave pretreatment yielded the highest BMP of 0.364 ± 0.002 L CH₄/g VS (an improvement of 8.7%). Compared with the theoretical methane potential (TBMP = 0.5147 L CH₄/g VS), *Spirulina* biomass exhibited methane conversion efficiencies of 65.1%, 66.2%, and 70.7% for the raw, mechanically pretreated, and microwave-pretreated conditions, respectively. These findings indicate that microwave pretreatment is more effective in enhancing the anaerobic biodegradability of *Spirulina* biomass. However, the overall improvement remains moderate, reflecting inherent limitations associated with the rigid cellular structure of *Spirulina* and the potential risk of ammonia inhibition arising from protein degradation during anaerobic digestion. This study provides initial scientific insights into the utilization of domestically available *Spirulina* biomass for biogas production and highlights the necessity of appropriate pretreatment strategies and optimized operational parameter management for practical applications.

1. Đặt vấn đề

Phân hủy kỵ khí (Anaerobic Digestion – AD) là một trong những công nghệ sinh học cốt lõi trong lĩnh vực năng lượng sinh học, cho phép chuyển hóa các hợp chất hữu cơ thành khí sinh học chứa chủ yếu là methane và carbon dioxide [1], [2]. Công nghệ này đã được ứng dụng rộng rãi trong xử lý bùn thải đô thị, chất thải chăn nuôi và phụ phẩm

nông nghiệp, góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường và thu hồi năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, việc phụ thuộc vào các nguồn sinh khối truyền thống đang đặt ra nhiều thách thức liên quan đến biến động thành phần, tính mùa vụ và cạnh tranh sử dụng đất.

Trong bối cảnh đó, sinh khối vi tảo được xem là nguồn cơ chất thay thế đầy tiềm năng cho AD nhờ tốc độ sinh trưởng nhanh, hiệu suất cố định CO₂ cao và khả năng nuôi trồng không cạnh tranh với đất nông

*Liên hệ tác giả: khanhtc@huce.edu.vn

Nhận ngày 17/12/2025, sửa xong ngày 12/01/2026, chấp nhận đăng ngày 13/01/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1205>

nghiệp [2], [12], [16]. Đặc biệt, vi tảo có thể được nuôi trồng trên nước thải, góp phần xử lý dinh dưỡng đồng thời tạo ra sinh khối có giá trị năng lượng.

Trong số các loài vi tảo, *Spirulina* (chi *Arthrospira*) là đối tượng được quan tâm rộng rãi do hàm lượng protein rất cao (60–70 % khối lượng khô), giàu carbohydrate và đã được thương mại hóa ở nhiều quốc gia [3], [4]. Thành phần hóa sinh này mang lại tiềm năng sinh methane lý thuyết cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy hiệu suất sinh methane thực tế của *Spirulina* thường thấp hơn giá trị lý thuyết [6]–[8]. Nguyên nhân chính được cho là cấu trúc thành tế bào bền, hạn chế khả năng tiếp cận của vi sinh vật kỵ khí, cũng như sự phát sinh ammonia trong quá trình phân giải protein.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng ammonia, đặc biệt là ammonia tự do (NH_3), có thể gây ức chế mạnh quá trình tạo methane [11], [19]. Chen và cộng sự [11] cho thấy nồng độ NH_3 trong khoảng 150–1200 mg/L có thể làm suy giảm đáng kể hoạt tính của cổ khuẩn sinh methane. Rajagopal và cộng sự [19] cũng nhấn mạnh rằng các hệ thống AD xử lý sinh khối giàu nitrogen thường gặp rủi ro mất ổn định nếu không có các biện pháp kiểm soát phù hợp.

Để khắc phục các hạn chế trên, nhiều phương pháp tiền xử lý sinh khối vi tảo đã được đề xuất nhằm phá vỡ cấu trúc tế bào, gia tăng khả năng hòa tan chất hữu cơ và cải thiện hiệu suất sinh methane [4], [5], [17]. Trong đó, tiền xử lý cơ học và tiền xử lý vi sóng được đánh giá là các phương pháp khả thi nhờ tác động trực tiếp lên cấu trúc vật lý của sinh khối, thời gian xử lý ngắn và khả năng tích hợp vào hệ thống AD.

Tại Việt Nam, *Spirulina* đã được nuôi trồng ở quy mô thương mại trong những năm gần đây, chủ yếu phục vụ ngành thực phẩm và dược phẩm. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong nước về khả năng khai thác sinh khối *Spirulina* cho sản xuất khí sinh học còn rất hạn chế. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm (i) đánh giá tiềm năng sinh methane của sinh khối *Spirulina* thương mại thông qua thí nghiệm BMP và (ii) khảo sát ảnh hưởng của tiền xử lý nghiền cơ học và xử lý vi sóng đến hiệu quả phân hủy kỵ khí.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên liệu nghiên cứu

Sinh khối *Spirulina* được sử dụng trong nghiên cứu này là sản phẩm thương mại dạng bột khô, được sản xuất và phân phối trên thị trường. Sinh khối ở trạng thái ban đầu được xem là mẫu *Spirulina* thô và được sử dụng trực tiếp cho các thí nghiệm phân tích và xác định tiềm năng sinh methane. Trước khi tiến hành thí nghiệm, sinh khối được bảo quản trong điều kiện khô, kín và tránh ánh sáng nhằm hạn chế sự suy giảm chất lượng cũng như biến đổi thành phần hóa sinh.

Bùn cấy kỵ khí được thu thập từ một hệ thống phân hủy kỵ khí đang vận hành ổn định. Trước khi sử dụng cho thí nghiệm BMP, bùn cấy được ủ thích nghi trong điều kiện kỵ khí ở nhiệt độ mesophilic nhằm làm giảm lượng khí nền phát sinh từ chính bùn cấy, đảm bảo kết quả đo phản ánh chính xác đóng góp của sinh khối *Spirulina* [7].

2.2. Tiền xử lý sinh khối *Spirulina*

Để đánh giá ảnh hưởng của tiền xử lý đến khả năng phân hủy kỵ khí, sinh khối *Spirulina* được xử lý bằng hai phương pháp khác nhau, bao gồm nghiền cơ học và xử lý vi sóng.

Đối với tiền xử lý nghiền cơ học, sinh khối *Spirulina* được nghiền thủ công bằng chày và cối kim loại trong thời gian 5 phút. Quá trình nghiền nhằm phá vỡ một phần cấu trúc tế bào vi tảo, đồng thời làm giảm kích thước hạt và gia tăng diện tích bề mặt tiếp xúc giữa cơ chất và vi sinh vật kỵ khí trong giai đoạn thủy phân.

Đối với tiền xử lý vi sóng, sinh khối *Spirulina* được xử lý bằng lò vi sóng gia dụng với công suất danh định 800 W. Mẫu được chiếu vi sóng trong thời gian 3 phút, cho đến khi nhiệt độ đạt khoảng 80–90 °C. Phương pháp này tạo ra hiệu ứng gia nhiệt nhanh ở cấp độ vi mô, góp phần làm suy yếu cấu trúc thành tế bào và thúc đẩy sự giải phóng các hợp chất hữu cơ nội bào. Sau khi xử lý, các mẫu được làm nguội tự nhiên về nhiệt độ phòng trước khi đưa vào thí nghiệm BMP. Điều kiện này được lựa chọn dựa trên các nghiên cứu trước về tiền xử lý vi tảo [5], [17], [18].

2.3. Thành phần hóa sinh của sinh khối *Spirulina*

Thông tin về hàm lượng các thành phần hóa sinh chính của sinh khối *Spirulina*, bao gồm protein, lipid và carbohydrate, được cung cấp bởi nhà sản xuất. Các dữ liệu này được sử dụng để mô tả đặc tính cơ chất ban đầu và làm cơ sở cho việc tính toán tiềm năng methane lý thuyết của sinh khối *Spirulina* trong quá trình phân hủy kỵ khí. Theo thông tin từ nhà sản xuất, tính theo chất khô hàm lượng protein là 66,83 %, lipid là 7,56 % và carbohydrate là 25,68 %.

2.4. Thiết kế thí nghiệm BMP

Thí nghiệm xác định tiềm năng sinh methane (Biochemical Methane Potential - BMP) được thực hiện theo các khuyến nghị quốc tế do Angelidaki và cộng sự [13] và Raposo và cộng sự [14] đề xuất. Thí nghiệm BMP được thực hiện trong các chai serum 300 mL, với thể tích làm việc là 200 mL. Các chai thí nghiệm được nạp hỗn hợp gồm bùn cấy kỵ khí và sinh khối *Spirulina* (thô hoặc đã tiền xử lý) theo tỷ lệ giữa bùn cấy và cơ chất (I/S) bằng 4/1, tính theo hàm lượng chất rắn bay hơi (VS).

Mỗi điều kiện thí nghiệm được tiến hành với ba mẫu lặp nhằm đảm bảo độ tin cậy và khả năng đánh giá sai số của kết quả. Các chai mẫu trắng chỉ chứa bùn cấy được thiết lập song song để xác định lượng khí nền phát sinh từ bùn cấy. Sau khi nạp mẫu, các chai thí nghiệm được thổi khí trơ để tạo môi trường kỵ khí, sau đó được đậy kín bằng nút cao su. Toàn bộ hệ thống được ủ trong tủ ổn nhiệt ở nhiệt độ 35 ± 1 °C trong suốt thời gian thí nghiệm kéo dài 31 ngày.

2.5. Xác định lượng khí sinh ra và thành phần methane

Thể tích khí sinh học sinh ra trong quá trình phân hủy kỵ khí được xác định định kỳ bằng phương pháp dịch chuyển nước thông qua cột thu khí. Tổng lượng khí sinh ra được hiệu chỉnh về điều kiện tiêu chuẩn (0 °C, 1 atm) trước khi tiến hành các phân tích tiếp theo.

Thành phần methane trong khí sinh học được xác định bằng phương pháp sắc ký khí với đầu dò dẫn nhiệt (GC-TCD).

2.6. Tính toán tiềm năng methane lý thuyết và xử lý số liệu

Tiềm năng methane lý thuyết (Theoretical Biochemical Methane Potential - TBMP) của sinh khối *Spirulina* được tính toán dựa trên đóng góp methane lý thuyết của protein, lipid và carbohydrate theo phương pháp thường được áp dụng trong các nghiên cứu về AD vi tảo [4], [7], [14].

Theo đó, TBMP của sinh khối được xác định bằng công thức:

$$TBMP = f_{\text{protein}} \times Y_{\text{protein}} + f_{\text{lipid}} \times Y_{\text{lipid}} + f_{\text{CHO}} \times Y_{\text{CHO}}$$

Trong đó:

f_{protein} , f_{lipid} , f_{CHO} là phần trăm của protein, lipid và carbohydrate trong chất rắn tổng;

$$Y_{\text{protein}} = 0,496 \text{ L CH}_4/\text{g protein}, Y_{\text{lipid}} = 1,014 \text{ L CH}_4/\text{g lipid},$$

$$Y_{\text{CHO}} = 0,415 \text{ L CH}_4/\text{g carbohydrate}.$$

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc tính hóa lý của sinh khối *Spirulina* và bùn cấy

Đặc tính hóa lý của sinh khối *Spirulina* và bùn cấy được sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày trong Bảng 1. Sinh khối *Spirulina* thương mại dạng bột có hàm lượng chất rắn tổng (TS) rất cao, đạt 940,59 g/kg khối lượng ướt, phản ánh đặc trưng của vật liệu đã được làm khô gần như hoàn toàn trước khi đưa vào thí nghiệm. Hàm lượng chất rắn bay hơi (VS) của *Spirulina* đạt 744,29 g/kg khối lượng ướt, tương ứng với tỷ lệ VS/TS xấp xỉ 79 %, cho thấy phần lớn chất rắn của sinh khối là chất hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học. Kết quả này khẳng định *Spirulina* là sinh khối giàu chất hữu cơ và có tiềm năng sinh methane cao, phù hợp với các nghiên cứu trước về vi tảo giàu protein [2], [4].

Bảng 1. Đặc tính hoá lý của sinh khối *Spirulina* thô và bùn cấy.

Thông số	<i>Spirulina</i> thô	Bùn cấy kỵ khí
TS (g/kg)	940,59	37,72
VS (g/kg)	744,29	17,29
VS/TS (%)	79,0	45,8
pH	-	7,2

Tỷ lệ VS/TS cao là đặc trưng điển hình của sinh khối vi tảo, phản ánh hàm lượng lớn các hợp chất hữu cơ cấu thành tế bào như protein, carbohydrate và lipid. *Spirulina* thường được xếp vào nhóm vi tảo giàu

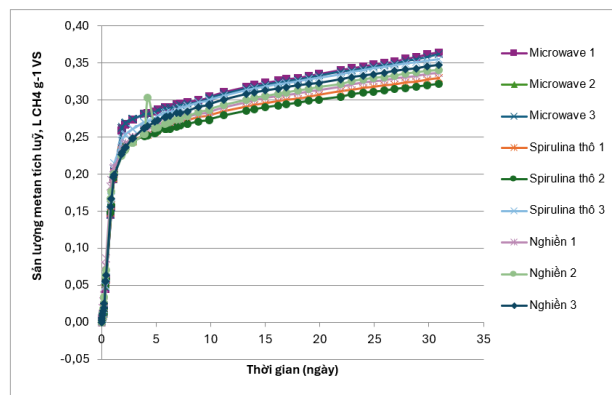
protein, với hàm lượng protein chiếm khoảng 60–70 % khối lượng khô, tùy thuộc vào điều kiện nuôi cấy và xử lý sau thu hoạch. Đặc điểm này mang lại tiềm năng sinh methane cao về mặt lý thuyết, đồng thời cũng làm gia tăng nguy cơ hình thành ammonia trong quá trình phân hủy kỵ khí, đòi hỏi kiểm soát phù hợp các điều kiện vận hành và tỷ lệ cơ chất/bùn cấy.

Ngược lại, bùn cấy kỵ khí có hàm lượng TS thấp (37,72 g/kg) và tỷ lệ VS/TS khoảng 45,8 %, đặc trưng cho bùn đã được ổn định một phần và chứa tỷ lệ đáng kể thành phần vô cơ. Giá trị pH của bùn cấy là 7,2, nằm trong khoảng tối ưu cho hoạt động của vi sinh vật kỵ khí, đặc biệt là vi khuẩn sinh methane.

Sự khác biệt rõ rệt về TS, VS và tỷ lệ VS/TS giữa *Spirulina* và bùn cấy phản ánh vai trò chức năng của từng thành phần trong thí nghiệm BMP: *Spirulina* đóng vai trò là cơ chất giàu chất hữu cơ, trong khi bùn cấy cung cấp hệ vi sinh vật và khả năng đệm cần thiết để đảm bảo quá trình phân hủy kỵ khí diễn ra ổn định.

3.2. Động học sinh methane và sản lượng methane tích lũy

Diễn biến sinh methane theo thời gian của sinh khối *Spirulina* thô và các mẫu *Spirulina* tiền xử lý được thể hiện trong Hình 1. Đối với tất cả các mẫu thí nghiệm, quá trình sinh methane diễn ra ổn định và thể hiện đầy đủ các giai đoạn đặc trưng của thí nghiệm BMP, bao gồm giai đoạn thích nghi ban đầu, giai đoạn sinh methane mạnh và giai đoạn tiệm cận ổn định.



Hình 1. Diễn biến sinh methane theo thời gian của sinh khối *Spirulina* thô và các mẫu *Spirulina* tiền xử lý.

Kết quả cho thấy *Spirulina* thô đạt sản lượng methane tích lũy trung bình là $0,335 \pm 0,018 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$. Khi áp dụng tiền xử lý nghiền cơ học, sản lượng methane tăng nhẹ lên $0,341 \pm 0,005 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$, tương ứng với mức cải thiện khoảng 1,8 % so với mẫu thô. Trong khi đó, mẫu *Spirulina* xử lý bằng vi sóng đạt sản lượng methane cao nhất, $0,364 \pm 0,002 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$, cao hơn khoảng 8,7 % so với *Spirulina* a thô và 6,7 % so với mẫu nghiền. Các giá trị này hoàn toàn tương đồng với kết quả nghiên cứu của Samson và cộng sự [8] và Nolla-Ardévol và cộng sự [6] về khả năng sinh methane của *Spirulina*.

Sự khác biệt về sản lượng methane tích lũy giữa các mẫu thí nghiệm phản ánh rõ vai trò của tiền xử lý trong việc cải thiện khả năng tiếp cận cơ chất của hệ vi sinh vật kỵ khí. Các mẫu tiền xử lý, đặc biệt là xử lý vi sóng, thể hiện tốc độ sinh methane cao hơn trong giai đoạn đầu của thí nghiệm, cho thấy quá trình thủy phân - bước thường được xem là hạn chế tốc độ trong phân hủy kỵ khí sinh khối vi tảo - đã được thúc đẩy. Điều này phù hợp với đặc điểm cấu trúc tế bào của *Spirulina*, vốn có thành tế bào bền và giàu protein, làm hạn chế sự xâm nhập của enzyme và vi sinh vật nếu không áp dụng các biện pháp tiền xử lý thích hợp.

3.3. So sánh BMP thực nghiệm và tiềm năng methane lý thuyết

Tiềm năng methane lý thuyết (TBMP) của sinh khối *Spirulina* được tính toán dựa trên thành phần hóa sinh cung cấp bởi nhà sản xuất. Với hàm lượng protein 66,83 %, lipid 7,56 % và carbohydrate 25,68 % (tính theo chất khô), và sử dụng các hệ số sản lượng methane chuẩn cho mỗi nhóm chất (protein: 0,496 L CH₄/g, lipid: 1,014 L CH₄/g, carbohydrate: 0,415 L CH₄/g), giá trị TBMP được tính là:

$$TBMP = 0,6683 \times 0,496 + 0,0756 \times 1,014 + 0,2568 \times 0,415 = 0,5147 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$$

Kết quả so sánh BMP thực nghiệm với BMP lý thuyết (TBMP) được trình bày trong Bảng 3. Hiệu suất khai thác tiềm năng được tính toán bằng tỷ lệ giữa BMP thực nghiệm và TBMP lý thuyết.

Hiệu suất khai thác tiềm năng methane của *Spirulina* thô là 65,1 %, cho thấy rằng khoảng hai phần ba tiềm năng methane lý thuyết đã được khai thác trong điều kiện thí nghiệm BMP. Khi áp dụng tiền xử lý, hiệu suất khai thác tăng lên 66,2 % (nghiên cơ học) và 70,7 % (xử lý vi sóng), tương ứng với mức cải thiện tuyệt đối lần lượt là 1,1 % và 5,6 %. Hiệu suất khai thác methane đạt 65,1–70,7 %, nằm trong khoảng thường gặp đối với sinh khối vi tảo giàu protein [4], [7], [14].

Khoảng cách giữa BMP thực nghiệm và TBMP lý thuyết phản ánh một số hạn chế tự nhiên của quá trình phân hủy kỵ khí. Trước hết, cấu trúc thành tế bào bền của *Spirulina* hạn chế khả năng tiếp cận của vi sinh vật đến các hợp chất hữu cơ nội bào. Thứ hai, trong quá trình phân giải protein, ammonia sinh ra có thể ức chế hoạt động của vi khuẩn sinh methane ở nồng độ cao. Thứ ba, không phải tất cả các hợp chất hữu cơ trong *Spirulina* đều có khả năng phân hủy sinh học hoàn toàn. Những giới hạn này được phản ánh qua giá trị hiệu suất khai thác 65,1-70,7 %, một mức độ khá phổ biến cho các sinh khối vi tảo giàu protein trong các thí nghiệm BMP.

3.4. Ảnh hưởng của tiền xử lý đến hiệu quả phân hủy kỵ khí

Phân tích chi tiết ảnh hưởng của các phương pháp tiền xử lý cho thấy những khác biệt rõ ràng giữa hai phương pháp được khảo sát. Tiền xử lý nghiền cơ học mang lại mức cải thiện khiêm tốn, chỉ 1,8 % so với mẫu thô. Mặc dù quá trình nghiền trong 5 phút giúp phá vỡ một phần cấu trúc tế bào và giảm kích thước hạt, hiệu quả của phương pháp này là tương đối hạn chế đối với cấu trúc tế bào của *Spirulina*. Tiền xử lý vi sóng, ngược lại, cho thấy mức cải thiện cao hơn, đạt 8,7 %. Hiệu

ứng gia nhiệt nhanh từ vi sóng có khả năng làm suy yếu các liên kết trong thành tế bào và giải phóng hiệu quả các hợp chất hữu cơ nội bào hơn so với tác động cơ học đơn thuần.

Tuy nhiên, mức cải thiện từ cả hai phương pháp tiền xử lý vẫn ở mức vừa phải, không vượt quá 10 %. Độ lệch chuẩn của các mẫu cũng cho thấy sự ổn định khác nhau: mẫu thô có độ lệch chuẩn cao nhất (0,018), trong khi các mẫu tiền xử lý có độ lệch chuẩn nhỏ hơn, đặc biệt là mẫu vi sóng (0,002). Điều này gợi ý rằng tiền xử lý không chỉ cải thiện sản lượng methane mà còn làm giảm biến động giữa các lần lặp, tạo ra kết quả thí nghiệm ổn định hơn.

3.5. Ảnh hưởng của ammonia và tỷ lệ C/N

Sinh khối *Spirulina* có hàm lượng protein cao, dẫn đến tỷ lệ C/N thấp, đây là yếu tố quan trọng hạn chế hiệu suất phân hủy kỵ khí và sinh methane. Trong quá trình AD, sự phân giải protein giải phóng nitrogen dưới dạng ammonium (NH₄⁺), một phần chuyển hóa thành ammonia tự do (NH₃) – tác nhân gây ức chế chính đối với vi sinh vật sinh methane. Nhiều nghiên cứu cho thấy NH₃ có thể làm suy giảm hoạt tính methanogenic và làm thay đổi con đường chuyển hóa acetate, dẫn đến giảm tốc độ và hiệu suất sinh methane [11], [19], [20]. Trong nghiên cứu này, mặc dù tiền xử lý vi sóng cải thiện khả năng tiếp cận cơ chất, hiệu suất khai thác methane của *Spirulina* vẫn chỉ đạt 65,1–70,7 % so với tiềm năng lý thuyết, cho thấy tác động ức chế của ammonia vẫn là yếu tố giới hạn. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước về phân hủy kỵ khí vi tảo giàu protein và nhấn mạnh sự cần thiết của các giải pháp như điều chỉnh tỷ lệ C/N hoặc đồng phân hủy nhằm nâng cao hiệu suất AD của *Spirulina* [4], [7], [14].

3.6. Đánh giá kết quả BMP trong bối cảnh nghiên cứu quốc tế

Kết quả nghiên cứu cho thấy sinh khối *Spirulina* thương mại có khả năng sinh methane ổn định trong điều kiện phân hủy kỵ khí mesophilic, với giá trị BMP của mẫu thô đạt 0,335 L CH₄/g VS, nằm trong phạm vi các giá trị đã được công bố đối với vi tảo giàu protein [2], [4], [7]. Một trong những nghiên cứu sớm về *Spirulina maxima* báo cáo BMP khoảng 0,35 L CH₄/g VS ở 35 °C, rất tương đồng với kết quả của nghiên cứu này, cho thấy tính nhất quán của *Spirulina* như một cơ chất cho AD qua nhiều thập kỷ [8]. Nolla-Ardèvol và cộng sự cũng chỉ ra rằng *Spirulina* vẫn là cơ chất phù hợp cho sản xuất biogas giàu methane ngay cả trong điều kiện haloalkaline, với hàm lượng CH₄ trong biogas lên tới 96 % [6]. Các nghiên cứu đồng phân hủy khác, ví dụ Varol và Ugurlu [9] và Alharbi et al. [10], cũng chứng minh sản lượng methane tăng đáng kể khi kết hợp vi tảo với bùn thải hoặc phân gia súc, nhấn mạnh vai trò của cân bằng tỷ lệ C/N và giảm thiểu ức chế ammonia [9]. Nhìn chung, kết quả của nghiên cứu này phù hợp với xu hướng quốc tế và cho thấy tiềm năng cải thiện thông qua tối ưu điều kiện vận hành hoặc đồng phân hủy [4], [16].

3.7. Ảnh hưởng của tiền xử lý: so sánh với tài liệu quốc tế

Mức cải thiện BMP đạt được từ tiền xử lý vi sóng (8,7 %) trong nghiên cứu này phù hợp với các báo cáo quốc tế, mặc dù thấp hơn so với một số nghiên cứu trên các loài vi tảo khác [5], [17], [18]. Gonzalez-Fernandez và cộng sự ghi nhận mức cải thiện 22–25 % đối với *Scenedesmus* khi xử lý vi sóng ở nhiệt độ cao hơn, cho thấy hiệu quả tiền xử lý phụ thuộc mạnh vào loài vi tảo và điều kiện xử lý [5]. Ngược lại, tiền xử lý nghiền cơ học chỉ mang lại mức cải thiện khiêm tốn (1,8 %), phù hợp với nhận định chung rằng xử lý cơ học là phương pháp tiền xử lý nhẹ, ít hiệu quả đối với sinh khối vi tảo có cấu trúc tế bào bền [4], [21]. Ngoài ra, các yếu tố khác như đặc tính sinh khối, tỷ lệ VS/TS và điều kiện tiền xử lý cũng ảnh hưởng đáng kể đến BMP, như đã được Ehimen và cộng sự [15] nêu trong nghiên cứu về AD vi tảo của họ. Nghiên cứu của Alharbi và cộng sự [10] cũng chỉ ra rằng đồng phân hủy vi tảo với các cơ chất giàu carbon làm tăng hiệu quả tiền xử lý và khả năng sinh methane. Các nghiên cứu tổng quan cũng cho thấy việc kết hợp nhiều phương pháp tiền xử lý có thể mang lại hiệu quả cao hơn, tuy nhiên cần cân nhắc chi phí năng lượng và tính khả thi kinh tế [4], [22]. Kết quả của nghiên cứu này củng cố nhận định rằng tiền xử lý vi sóng hiệu quả hơn nghiền cơ học đối với *Spirulina*, nhưng mức cải thiện vẫn ở mức trung bình [17], [18].

3.8. Phân tích hiệu suất khai thác tiềm năng

Hiệu suất khai thác methane đạt 65,1–70,7 % so với tiềm năng lý thuyết phản ánh những hạn chế vốn có của quá trình phân hủy kỵ khí sinh khối *Spirulina*, tương tự các báo cáo đối với vi tảo giàu protein

Bảng 2. Sản lượng methane tích lũy của *Spirulina* thô và tiền xử lý.

Mẫu	BMP (L CH ₄ /g VS)	Độ lệch chuẩn	Cải thiện so với mẫu thô (%)
<i>Spirulina</i> thô	0,335	± 0,018	0,0
<i>Spirulina</i> nghiền	0,341	± 0,005	+ 1,8
<i>Spirulina</i> microwave	0,364	± 0,002	+ 8,7

Bảng 3. So sánh BMP thực nghiệm và BMP lý thuyết.

Mẫu	BMP thực nghiệm (L CH ₄ /g VS)	TBMP lý thuyết (L CH ₄ /g VS)	Hiệu suất khai thác (%)
<i>Spirulina</i> thô	0,335	0,5147	65,1
<i>Spirulina</i> nghiền	0,341	0,5147	66,2
<i>Spirulina</i> microwave	0,364	0,5147	70,7

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá một cách hệ thống tiềm năng sinh methane của sinh khối *Spirulina* thương mại thông qua thí nghiệm BMP trong điều kiện mesophilic, đồng thời phân tích ảnh hưởng của hai phương pháp tiền xử lý là nghiền cơ học và xử lý vi sóng. Kết quả cho thấy sinh khối *Spirulina* thô đạt giá trị BMP trung bình 0,335 ± 0,018 L CH₄/g VS, phù hợp với khoảng giá trị đã được công bố trong các

[4], [7], [14]. Trước hết, cấu trúc thành tế bào chứa peptidoglycan và polysaccharide liên kết chặt chẽ tạo ra rào cản đáng kể đối với quá trình thủy phân, làm giảm khả năng tiếp cận của vi sinh vật kỵ khí [2], [4]. Bên cạnh đó, hàm lượng protein cao dẫn đến phát sinh ammonia trong quá trình AD, có thể gây ức chế methanogenesis ngay cả khi tỷ lệ bùn cấy/cơ chất được thiết kế ở mức an toàn [11], [19], [20]. Ngoài ra, không phải tất cả các hợp chất hữu cơ trong *Spirulina* đều có khả năng phân hủy sinh học như nhau, dẫn đến việc một phần tiềm năng methane lý thuyết không được khai thác hoàn toàn [14], [16]. Các yếu tố này giải thích sự chênh lệch giữa BMP thực nghiệm và TBMP, phù hợp với các quan sát chung trong nghiên cứu AD vi tảo [4], [7].

3.9. Tiềm năng ứng dụng tại Việt Nam

Kết quả nghiên cứu cho thấy sinh khối *Spirulina* thương mại tại Việt Nam có tiềm năng ứng dụng cho sản xuất khí sinh học thông qua phân hủy kỵ khí, tương tự các mô hình được đề xuất trong các nghiên cứu quốc tế về vi tảo và biorefinery [2], [12], [22]. Giá trị BMP thu được có thể được sử dụng làm cơ sở cho các tính toán thiết kế sơ bộ hệ thống biogas, mặc dù sản lượng thực tế trong vận hành liên tục thường thấp hơn BMP do ảnh hưởng của thời gian lưu, tải trọng hữu cơ và động học vi sinh vật [13], [14]. Việc tận dụng phụ phẩm hoặc phế phẩm từ các trang trại nuôi trồng *Spirulina* có thể góp phần cải thiện hiệu quả kinh tế của chuỗi sản xuất và giảm thiểu chất thải [9], [22]. Về lâu dài, tích hợp phân hủy kỵ khí vào mô hình nuôi trồng *Spirulina* được xem là hướng đi phù hợp với chiến lược kinh tế tuần hoàn và phát triển năng lượng tái tạo tại Việt Nam [1], [16].

nghiên cứu quốc tế, qua đó khẳng định *Spirulina* là một cơ chất có tiềm năng đáng kể cho quá trình phân hủy kỵ khí.

Việc áp dụng tiền xử lý đã cải thiện khả năng sinh methane của sinh khối, trong đó xử lý vi sóng cho hiệu quả rõ rệt hơn so với nghiền cơ học, với mức tăng BMP lần lượt là 8,7 % và 1,8 % so với mẫu thô. Hiệu suất khai thác tiềm năng methane đạt trong khoảng 65,1–70,7 %, phản ánh những giới hạn nội tại của quá trình phân hủy kỵ khí *Spirulina*, liên quan đến cấu trúc tế bào bền vững, nguy cơ ức chế do

ammonia phát sinh từ quá trình phân giải protein và việc không phải toàn bộ các hợp chất hữu cơ đều được phân hủy hoàn toàn. Ngoài việc gia tăng sản lượng methane, tiền xử lý còn góp phần làm giảm độ biến động giữa các mẫu lặp, cho thấy khả năng tạo ra kết quả thí nghiệm ổn định hơn.

Mặc dù mức cải thiện từ các phương pháp tiền xử lý trong nghiên cứu này vẫn ở mức vừa phải, các kết quả thu được cho thấy xử lý vi sóng là một hướng tiếp cận khả thi để nâng cao hiệu quả sinh methane từ sinh khối *Spirulina*. Để đạt được hiệu suất cao hơn và tiệm cận tiềm năng lý thuyết, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc tối ưu hóa điều kiện tiền xử lý, kết hợp nhiều phương pháp tiền xử lý khác nhau, kiểm soát hiệu quả nồng độ ammonia cũng như lựa chọn bùn cấy và cấu hình vận hành phù hợp.

Trên cơ sở đó, sinh khối *Spirulina* được đánh giá có tiềm năng ứng dụng trong sản xuất khí sinh học tại Việt Nam, đặc biệt trong các mô hình tích hợp với hệ thống nuôi trồng *Spirulina* hiện có. Tuy nhiên, để chuyển hóa các kết quả BMP thu được trong điều kiện thí nghiệm mở sang các hệ thống phân hủy kỵ khí liên tục ở quy mô lớn, cần có thêm các nghiên cứu chuyên sâu về động học phân hủy, quản lý ức chế ammonia, thiết kế và vận hành bioreactor, tối ưu hóa các thông số kỹ thuật như HRT, OLR và tỷ lệ C/N, cũng như đánh giá tính khả thi về mặt kinh tế – kỹ thuật của toàn bộ hệ thống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài “Nghiên cứu cải thiện khả năng phân hủy tạo khí sinh học đối với sinh khối vi tảo *Spirulina*” mã số 07-2025/KHXD.

Tài liệu tham khảo

[1]. J. Mata-Alvarez, J. Dosta, M. S. Romero-Güiza, X. Fonoll, M. Peces, and S. Astals, “A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 412–427, 2014.

[2]. D. Sialve, N. Bernet, and O. Bernard, “Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable,” *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 4, pp. 409–416, 2009.

[3]. P. Lopes da Silva, A. P. M. Batista, A. Marques, I. Gouveia, and L. Raymundo, “*Spirulina*,” in *Encyclopedia of Ecology*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, pp. 3370–3376, 2008.

[4]. A. J. Ward, D. M. Lewis, and S. J. Green, “Anaerobic digestion of algae biomass: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7927–7940, 2008.

[5]. C. Gonzalez-Fernandez, B. Sialve, N. Bernet, and J.-P. Steyer, “Thermal pretreatment to improve methane production of *Scenedesmus* biomass,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 175–182, 2011.

[6]. V. Nolla-Ardèvol, M. Strous, and J. P. Tegetmeyer, “Stable and productive anaerobic digestion of microalgae in haloalkaline conditions,” *mBio*, vol. 6, no. 2, pp. e00236–15, 2015.

[7]. K. Koch, M. Lübken, T. Gehring, and H. Horn, “Biogas from grass silage—Measurements and modeling with ADM1,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, Art. no. 41, 2020.

[8]. R. Samson and A. Leduy, “Biogas production from anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass,” *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 24, no. 8, pp. 1919–1924, 1982.

[9]. S. Varol and A. Ugurlu, “Biogas production from microalgae (*Spirulina platensis*) in a two-stage anaerobic system,” *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 32, Art. no. 124, 2016.

[10]. R. M. Alharbi, M. J. I. Hossain, and S. A. Elshikh, “Co-digestion of different microalgae species with cattle manure for enhanced methane production,” *Journal of King Saud University – Science*, vol. 36, no. 1, Art. no. 102742, 2024.

[11]. Y. Chen, J. J. Cheng, and K. S. Creamer, “Inhibition of anaerobic digestion process: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4044–4064, 2008.

[12]. I. Mussnug, V. Klassen, A. Schluter, and O. Kruse, “Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept,” *Journal of Biotechnology*, vol. 150, no. 1, pp. 51–56, 2010.

[13]. I. Angelidaki, M. Alves, D. Bolzonella, et al., “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol,” *Water Science and Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 927–934, 2009.

[14]. F. Raposo, C. J. Banks, I. Siegart, S. Heaven, and R. Borja, “Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of substrates,” *Waste Management*, vol. 31, no. 5, pp. 112–124, 2011.

[15]. A. E. Ehimen, Z. F. Sun, and C. G. Carrington, “Variables affecting the anaerobic digestion of microalgae for biofuel production,” *International Journal of Bioenergy*, Art. no. 406853, 2011.

[16]. J. Zhong, R. Magnússon, M. S. Gislason, and T. Sigurjónsson, “Anaerobic digestion of microalgae for biogas production: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 134–141, 2015.

[17]. M. Passos, J. Ferrer, and I. Ferrer, “Influence of pretreatment on biogas production from microalgae,” *Bioresour. Technol.*, vol. 128, pp. 561–566, 2013.

[18]. S. Cho, S. Park, J. Seon, J. Yu, and S. Park, “Enhancement of methane production from anaerobic digestion of microalgae by thermal pretreatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 330–336, 2013.

[19]. R. Rajagopal, D. I. Massé, and G. Singh, “A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia,” *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 632–641, 2013.

[20]. A. Schnürer and Å. Nordberg, “Ammonia, a selective agent for methane production by syntrophic acetate oxidation at mesophilic temperature,” *Water Science and Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 735–740, 2008.

[21]. S. Astals, V. Nolla-Ardèvol, and J. Mata-Alvarez, “Thermal pretreatment of microalgae for anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 14, pp. 7331–7337, 2011.

[22]. M. Passos and I. Ferrer, “Microalgae conversion to biogas: Thermal pretreatment contribution on net energy production,” *Applied Energy*, vol. 129, pp. 41–48, 2014.