

ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ TUYỂN NỔI ĐỂ THU HỒI SINH KHỐI TẢO TRONG NƯỚC Ở MỘT SỐ HỒ TRÊN ĐỊA BÀN THÀNH PHỐ HÀ NỘI

Nguyễn Thị Thu Hà^{1*}, Đinh Tiến Dũng², Trần Thị Hạnh¹,
Nguyễn Ngọc Tú¹, Trịnh Quang Huy¹

¹Khoa Tài nguyên và Môi trường, Học viện Nông nghiệp Việt Nam

²Trung tâm Phân tích và Chuyển giao Công nghệ Môi trường, Viện Môi trường Nông nghiệp

* Email: ha170086@gmail.com

Ngày nhận bài: 02/08/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 06/09/2022

Ngày chấp nhận đăng: 15/09/2022

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện với 03 mẫu nước hồ có các mức độ phú dưỡng khác nhau trên địa bàn thành phố Hà Nội bằng công nghệ tuyển nổi không khí phân tán nhằm thu hồi sinh khối tảo, kiểm soát phú dưỡng và tận thu cacbon hữu cơ. Với các hồ ô nhiễm hữu cơ, suy giảm oxy hòa tan, phú dưỡng đến phú dưỡng cao, hiệu quả tuyển nổi ở quy mô phòng thí nghiệm đạt 28,5 – 77,3%, tỷ lệ nghịch với kích thước bọt khí 0,1 – 1 mm, tỷ lệ thuận với độ sâu cột nước 5 – 20 cm; hiệu quả tốt nhất thu được tại chế độ tuyển nổi với lưu lượng cấp khí là 1,0 L/phút. Công nghệ tuyển nổi đạt hiệu quả cao nhất đối với vi khuẩn lam dạng sợi (Lyngbya và Oscillatoria), thấp hơn đối với vi khuẩn lam dạng tập đoàn, tảo lục và không thích hợp với các đối tượng khác như tảo cát, tảo giáp. Sinh khối tảo sau khi thu hồi có hàm lượng hữu cơ chiếm từ 49 – 82% trong đó chủ yếu là protein và glucit, tỷ lệ C:N là 15 – 20, có thể tận thu làm nguyên liệu phân bón, biogas, xăng sinh học hoặc vật liệu hấp phụ.

Từ khóa: hồ phú dưỡng, tảo nổi, thu hồi sinh khối, tuyển nổi không khí phân tán

HARVESTING OF ALGAE BIOMASS IN HANOI EUTROPHICATED LAKES BY FLOTATION

ABSTRACT

This study examined water samples from three lakes in Hanoi with varying levels of eutrophication in order to recover microalgae biomass using distributed air flotation technology. The results show that the efficiency of dispersion air flotation ranged from 28,5% to 77,3%, inversely proportional to the bubble size in the range of 0.1 – 1 mm, proportional to the water column depth in the range of 5 – 20 cm and gives the maximum efficiency at 1.0 liter per minute. Flotation technology is appropriate for filamentous cyanobacteria (Lyngbya and Oscillatoria), colony cyanobacteria, and green algae, but not for other algae phyla such as diatoms. The recovered biomass an organic content of 49 – 82%, primarily protein and carbohydrates, with a C: N ratio of 15 – 20. The research opens the orientation of applying flotation technology to harvest algae biomass, reducing the risk of aquatic eutrophication and using algae biomass as fertilizer, biogas and biofuel or adsorbent material.

Keywords: biomass harvesting, dispersion air flotation, eutrophicated lakes, phytoplankton

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Do ảnh hưởng bởi các nguồn thải, các hồ nước ngọt dễ bị phú dưỡng ở các mức độ khác nhau, gây suy giảm chất lượng nước và giá trị sử dụng của hồ, giảm mức độ oxy hòa tan, suy giảm đa dạng sinh học và đặc biệt là sự bùng nổ vi tảo và vi khuẩn lam độc (Daniel & nnk., 1998; Scholten & nnk., 2005). Ở nhiều hồ nội đô Hà Nội, mật độ tảo có thể lên đến 1.000.000 tế bào/mL nước tương ứng với sinh khối có thể lên đến 1,2 g/L (Tạ Đăng Thuận, 2019). Bên cạnh đó, tảo là loài thực vật có tốc độ phát triển nhanh nhất thế giới, có khả năng tăng gấp đôi sinh khối sau 24 giờ (Milledge & Heaven, 2013), tốc độ sinh sản của tảo trong ao, hồ phú dưỡng có thể lên đến 0,75 g/L/ngày tương đương với hệ thống ao nuôi thâm canh tảo là 0,2 – 2,7 g/L/ngày (Dębowski & nkk., 2013).

Trong khi tảo cố định cacbon trong sinh khối và sản xuất ra một số hợp chất sinh học đặc thù nên có thể sử dụng làm nguyên liệu cho sản xuất dược phẩm, thực phẩm chức năng, thức ăn chăn nuôi, nhiên liệu sinh học, phân bón... (Milledge & Heaven, 2013). Sinh khối vi tảo chứa khoảng 50% cacbon tính theo trọng lượng khô và hầu hết lượng cacbon này có nguồn gốc từ cacbon dioxit, vì vậy nếu thu hồi được 100 tấn sinh khối tảo sẽ giảm thiểu phát thải tương đương khoảng 183 tấn cacbon dioxit (Demirbas & Demirbas, 2010). Đây có thể được xem là một trong các giải pháp hạn chế phát thải khí nhà kính và biến đổi khí hậu.

Quá trình thu hồi tảo trong nước tự nhiên hoặc môi trường nuôi cấy nhân tạo đã được thử nghiệm với nhiều phương pháp khác nhau như: lọc, ly tâm, đông keo tụ, tuyển nổi (Milledge & Heaven, 2013) trong đó công nghệ tuyển nổi được sử dụng phổ biến hơn cả do những ưu điểm về kinh tế và hiệu quả kỹ thuật. Tuyển nổi không khí phân tán tạo ra các bọt khí có kích thước trên 0,1 mm, tiêu tốn ít năng lượng hơn so với tuyển nổi không khí hòa tan, tuyển nổi phân tán ozon hóa hoặc tuyển nổi điện hóa (Barros & nnk., 2015). Việc áp dụng một số chất tạo bọt (chất hoạt động bề mặt như hexadecyltrimethyl ammonium bromide – C16TAB và saponin trong lá chè) cũng góp phần gia tăng đáng kể

hiệu quả tuyển nổi (Shen & nnk., 2018). Phương pháp này có ưu điểm là dễ dàng thực hiện ở quy mô lớn, hiệu quả cao khi kết hợp với chất tạo bọt (hiệu quả đạt 45 – 98,2%), không yêu cầu về không gian, thời gian, thiết bị linh hoạt và chi phí ở mức trung bình (Milledge & Heaven, 2013). Ngoài ra, các loài tảo có khối lượng riêng nhỏ ví dụ có tỷ lệ lipit cao, có không bào, dạng sống tập đoàn, sinh trưởng mạnh sản sinh O₂ tạo thành bọt khí trên thành tế bào hoặc ở môi trường nuôi cấy nhân tạo có sục khí là cơ sở tốt để thực hiện tuyển nổi (Shelef & nnk., 1984). Do đó, phương pháp thu hồi tảo bằng tuyển nổi không khí phân tán dễ dàng áp dụng trong các hệ thống xử lý nước mặt, nước thải ở quy mô công nghiệp.

Nghiên cứu được thực hiện với mục tiêu đánh giá được hiệu quả của việc áp dụng công nghệ tuyển nổi ở quy mô phòng thí nghiệm để thu hồi sinh khối tảo; ảnh hưởng của các thông số vận hành và đặc điểm vốn có của quần xã đến hiệu quả tuyển nổi. Sau khi thu hồi, đặc điểm hóa học của sản phẩm sinh khối tảo sẽ được đánh giá nhằm định hướng tái sử dụng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp lấy mẫu và phân tích

Đối tượng cần thu mẫu: Quần xã vi tảo được thu hồi từ 03 hồ trên địa bàn thành phố Hà Nội. Trong đó, thử nghiệm thu hồi được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm với dung dịch hỗn hợp nước và tảo thực tế thu thập từ các hồ phú dưỡng trên địa bàn Hà Nội.

Mẫu nước và tảo tại 03 hồ trên địa bàn Hà Nội được thu hồi bằng phương pháp lấy mẫu nước tầng mặt các ao, hồ tự nhiên và nhân tạo (theo TCVN 6663-4: 2016 – chọn lấy mẫu tại độ sâu 15 – 20cm) và phương pháp lấy mẫu phiêu sinh WWSEM 10300 (APHA, AWWA & WEF, 2017) tại 04 thời điểm trong năm 2020 (tháng 3, 5, 7, 9) là các thời điểm có nguy cơ bùng phát mật độ của các loài tảo khác nhau (Nguyễn Văn Tuyên, 2003). Sau đó, lựa chọn thời điểm có mật độ và thành phần đại diện các mức độ phú dưỡng khác nhau tại các hồ đô thị trên địa bàn Hà Nội làm nguyên liệu thí nghiệm.

Bảng 1. Đặc điểm thủy văn và áp lực của các hồ nghiên cứu

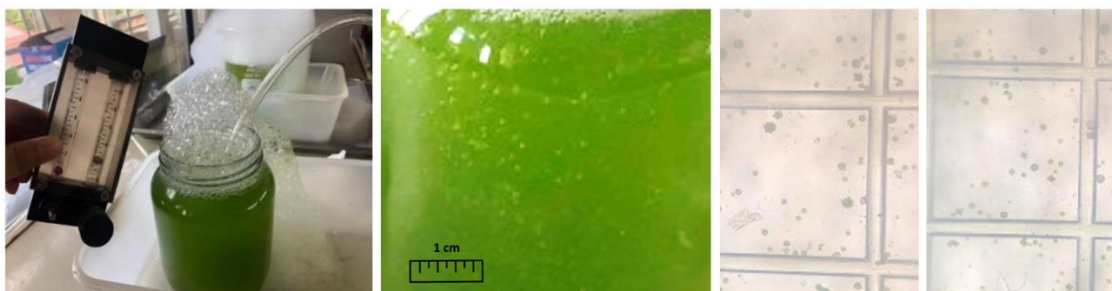
TT	Thông số	Đơn vị	Đối tượng		
			Hồ Linh Đàm	Hồ Tai Trâu	Hồ Công viên Gia Lâm
1	Diện tích	ha	73,0	4,0	3,5
2	Độ sâu	m	2 – 3	2	1,5 – 2,5
3	Trữ lượng	m ³	1.460.000	80.000	70.000
4	Lưu lượng thải trung bình*	m ³ /ngày	-	8,5	4,3
5	Nguồn nước thải		Chảy tràn	Nước thải sinh hoạt, chảy tràn	Nước thải sinh hoạt, chảy tràn
6	Chức năng		Hồ cảnh quan	Hồ nhận thải	Hồ nhận thải

(Nguồn: Tạ Đăng Thuận, 2019)

Bảng 2. Thang phân hạng mức độ phú dưỡng các hồ

Mức phú dưỡng		Chl-a* (µg/L)	Độ sâu Secchi* (m)	TP* (mg/L)	TN** (mg/L)	Mật độ tảo* (tế bào/mL)
Dinh dưỡng rất thấp	Oligotrophic	< 0,95	> 8	< 0,006	< 0,1	50
Dinh dưỡng thấp	Oligo-mesotrophic	0,95 – 2,6	4 – 8	0,006 – 0,012	0,1 – 0,3	50 – 100
Dinh dưỡng trung bình	Mesotrophic	2,6 – 7,3	2 – 4	0,012 – 0,024	0,3 – 0,5	100 – 1.000
Phú dưỡng	Eutrophic	7,3 – 20	1 – 2	0,024 – 0,048	0,5 – 1,2	1.000 – 10.000
Phú dưỡng cao	Polytrophic	20 – 56	0,5 – 1	0,048 – 0,096	1,2 – 2,3	10.000 – 50.000
Phú dưỡng rất cao	Hypertrophic	56 – 155	0,25 – 0,5	0,096 – 0,192	2,3 – 9,0	50.000 – 500.000
Siêu phú dưỡng	Extremetrophic	> 155	< 0,25	0,192 – 0,384	> 9,0	> 500.000

(Nguồn: * Carlson, 1977; ** Huo et al., 2013)



Hình 1. Sơ đồ nguyên tắc thí nghiệm, đo đặc kích thước bọt khí và ảnh hiển vi tảo sau thí nghiệm (lưu lượng cấp khí 0,5 và 1,5 L/phút)

Độ trong của nước (thể hiện thông qua độ sâu đĩa Secchi – gọi tắt là độ sâu Secchi), Oxy hòa tan (DO) và pH được đo trực tiếp ngoài hiện trường sử dụng máy đo đa chức năng Horiba HS-71T. Các thông số khác được phân tích theo TCVN hiện hành: TSS (TCVN 6625:2000), Tổng photpho - TP (TCVN 6202:2008), Tổng nitơ - TN (TCVN 6638:2000), nhu cầu oxy hóa học - COD (TCVB 6491:1999), nhu cầu oxy sinh hóa; Chỉ số chất lượng nước (WQI) được đánh giá theo hướng dẫn tại Quyết định 1640/2019/QĐ-TCMT ngày 12/11/2019 của Tổng cục Môi trường.

Thành phần theo chi và mật độ tảo được xác định bằng phương pháp soi đếm tươi bằng khóa định loại tảo nước ngọt (Dương Đức Tiến & Võ Hành, 1997; Nguyễn Văn Tuyên, 2003) trên buồng đếm plankton (NHBS – xuất xứ Nhật Bản) phù hợp với phương pháp WWSEM 10300 (Federation & Association, 2017). Mức độ phú dưỡng tại các hồ nghiên cứu được đánh giá bằng cách sử dụng các chỉ số độ sâu secchi, TN, TP, chlorophyll-a (Carlson, 1977; Huo & nnk., 2013) theo thang phân hạng Bảng 2.

2.2. Phương pháp bố trí thí nghiệm

Bố trí thí nghiệm với 02 nhân tố thí nghiệm trên theo dạng ma trận với các nhân tố thí nghiệm: thành phần tảo ban đầu (từ 03 hồ), kích thước bọt khí (0,1 – 0,2 mm; 0,2 – 0,5 mm; 0,5 – 1,0 mm), lưu lượng cấp khí (0,5; 1,0 và 1,5 L/phút), độ cao cột nước (5, 10, 15 và 20 cm).

Thí nghiệm 1 (đánh giá ảnh hưởng của lưu lượng khí và kích thước bọt khí đến hiệu quả tuyển nổi): Lấy mẫu nước chứa tảo vào cốc thủy tinh 1.000 mL có chứa các sục khí khác nhau (nguồn: ASW-3040 có kích thước bọt khí từ 0,1 – 1,0 mm, tương đối ổn định theo thời gian và lưu lượng sục khí – trước đó thử nghiệm ở các lưu lượng cấp khí khác nhau, chụp ảnh mẫu trên máy ảnh kỹ thuật số và phóng to (zoom in) trên màn hình hoặc trên máy tính để đo kích thước bọt khí tạo thành – Hình 1, sai số kích thước vào

khoảng $\pm 10\%$), bổ sung 0,1 ml/L dung dịch chất tạo bọt Natri lauryl ether sunfonat (SLES) với nồng độ 0,01M (có trong nước rửa bát – nồng độ theo thông tin của nhà sản xuất) vào mẫu tảo. Điều chỉnh lưu lượng khí cấp trung bình lần lượt là 0,5; 1 và 1,5 L/phút bằng bơm cấp khí có thể điều chỉnh lưu lượng, thời gian cấp khí liên tục trong 60 phút. Mẫu sau thí nghiệm để ổn định 30 phút trong điều kiện nhiệt độ phòng trước khi được phân tích. Mỗi công thức thí nghiệm được lặp lại 3 lần. Mẫu đối chứng được thực hiện tương tự mẫu thí nghiệm nhưng không sục khí để đánh giá ảnh hưởng quá trình lắng trọng lực.

Thí nghiệm 2 (đánh giá ảnh hưởng của lưu lượng cấp khí và chiều cao cột nước đến quá trình tuyển nổi): Lấy mẫu nước chứa tảo vào ống thí nghiệm có dung tích 1.000 mL với độ cao cột nước thay đổi lần lượt là 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm. Sử dụng loại quả sục phân tán khí có hiệu quả cao nhất trong thí nghiệm 1, tiến hành tương tự thí nghiệm 1.

Thí nghiệm tuyển nổi được thực hiện độc lập trên 03 mẫu nước hồ, mỗi công thức thí nghiệm được lặp lại 3 lần trên cùng một mẫu nước hồ theo thời gian.

2.3. Đánh giá thí nghiệm

Toàn bộ các thí nghiệm đều là thí nghiệm theo mẻ, do đó chỉ tiến hành đo đạc kết quả trước và sau khi thí nghiệm ở mỗi công thức thí nghiệm. Các thông số đánh giá:

- Độ đục của dung dịch thí nghiệm: được đo trực tiếp trên máy so màu UV/VIS

- Mật độ tảo (tế bào/mL): được xác định bằng phương pháp soi đếm tươi trên kính hiển vi độ phóng đại vật kính 10 – 40x:

$$\text{Mật độ tảo (M)} = \frac{T \times 10^6}{A \times N} \quad (\text{tế bào/mL})$$

Trong đó:

T: số cá thể đếm được (tế bào)

A: thể tích một ô buồng đếm (mm^3) = 0,5 x 0,5 x 0,5 (mm^3)

N: số ô thực hiện đếm ($N = 3 - 10$ tùy thuộc mật độ, sao cho $T > 100$ tế bào)

- Thành phần tảo (phân loại đến chi): được xác định bằng khóa định loại.

- Hiệu quả thu hồi tảo được tính toán trên mật độ trước và sau thu hồi:

$$\text{Hiệu quả thu hồi (\%)} = \frac{M_{\text{trước}} - M_{\text{sau}}}{M_{\text{trước}}} \times 100 \%$$

- Sinh khối khô sau thu hồi được xác định bằng phương pháp khối lượng trên giấy lọc thường (kích thước 0,45 μm) – chỉ áp dụng với một số công thức đạt mật độ và thành phần tảo phù hợp sử dụng để đánh giá các thông số:

+ Thành phần hữu cơ lơ lửng dễ bay hơi (Volatile Suspended Solids - VSS ở 550°C – thể hiện cho chất hữu cơ)

+ Thành phần vô cơ lơ lửng (Fixed Suspended Solids - FSS ở 550°C – thể hiện cho chất vô cơ)

+ Thành phần protein, lipid, glucit tổng số (theo TCVN 8125:2015; TCVN 4592:1988; TCVN 4594:1988)

+ Thành phần cacbon hữu cơ (OC), TN, TP của sản phẩm

- Sai khác giữa các công thức thí nghiệm được xử lý bằng kiểm định Student theo cặp (paired t-test) trong đồng về mật độ tảo ban đầu và các nhân tố thí nghiệm khác.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thành phần cấu trúc quần xã tảo nổi và mật độ phú dưỡng

Căn cứ các kết quả trước đó (Tạ Đăng Thuận, 2019; Nguyễn Thị Thu Hà và nnk., 2021) và kết quả khảo sát thực địa, chọn ra 03 hồ (tại thời điểm khảo sát có nước màu xanh và độ sâu Secchi dưới 0,5 m) nội đô Hà Nội làm đối tượng nghiên cứu.

Kết quả phân tích sau 04 lần lấy mẫu nước tại 03 hồ được lựa chọn cho thấy hầu hết các hồ trong phạm vi nghiên cứu đều bị ô nhiễm bởi một hoặc một số thông số môi trường (Bảng 3). Trong đó, hồ Linh Đàm chỉ bị ô nhiễm hữu cơ (thể hiện thông qua BOD). Hồ Tai Trâu bị ô nhiễm dinh dưỡng (thể hiện thông qua TP và photphat), hữu cơ và vi sinh

vật (thể hiện thông qua tổng Coliform); hồ Công viên Gia Lâm bị ô nhiễm dinh dưỡng (N và P), hữu cơ (thể hiện thông qua BOD và COD), vi sinh vật và chất rắn lơ lửng (TSS). Tất cả các hồ nghiên cứu đều có hiện tượng suy giảm hàm lượng oxy hòa tan và có pH có tính kiềm nhẹ. Tỷ lệ hàm lượng dinh dưỡng N:P thích hợp cho sự phát triển của tảo là 16:1 (Daniel & nnk., 1998; Scholten & nnk., 2005), do đó P là yếu tố giới hạn sinh trưởng của tảo trong hồ Linh Đàm, còn yếu tố giới hạn trong 2 hồ Tai Trâu và Công viên Gia Lâm là hàm lượng N trong nước. Căn cứ vào loại thông số giới hạn (N hay P) và thang phân hạng mức độ phú dưỡng (Bảng 2), các hồ nghiên cứu được đánh giá ở mức phú dưỡng rất cao đến siêu phú dưỡng.

Trong 04 lần lấy mẫu, nghiên cứu phát hiện tổng số 39 chi tảo với mật độ là 2.300 – 56.000 tế bào/mL, nằm trong khoảng phú dưỡng đến siêu phú dưỡng cao. Như vậy, mức độ phú dưỡng đánh giá theo mật độ tảo tỷ lệ thuận nhưng không cùng cấp với đánh giá mức độ phú dưỡng bằng nồng độ các chất dinh dưỡng. Trong khi đó, một số tác giả cho rằng, việc đánh giá phú dưỡng cần xem xét dựa trên khả năng bùng nổ về thực vật nói chung trong đó có tảo và tảo độc (Daniel & nnk., 1998; Scholten & nnk., 2005). Vì vậy, dựa trên tiêu chí về mật độ tảo thì các hồ nghiên cứu có thể xếp ở mức phú dưỡng đến siêu phú dưỡng cao:

+ Hồ Linh Đàm đa dạng về thành phần tảo, có tảo lục chiếm ưu thế (đặc biệt là *Scenedesmus* chiếm 37,50 %; *Oscillatoria* chiếm 26,89 %, với mật độ tháng 3/2020 (mùa xuân) là 5.170 tế bào/mL (Bảng 4), nằm ở mức phú dưỡng.

+ Hồ Tai Trâu có mật độ tảo tháng 7/2020 là 10.600 tế bào/mL thuộc mức phú dưỡng cao, chỉ có 13 chi tảo với vi khuẩn lam chiếm ưu thế (chiếm 71,8 %) trong đó vi khuẩn lam dạng sợi *Lyngbya* và dạng tập đoàn *Gloeocapsa* chiếm ưu thế với lần lượt 39,31 và 23,58%.

+ Hồ Công viên Gia Lâm có mật độ tảo là 52.820 tế bào/mL (tháng 9/2020) với 21 chi

tảo trong đó tảo cát chiếm ưu thế (gần 60 %) gồm *Nitzschia*, *Cyclotella* và *Naviculla* lần lượt chiếm 36,33%; 14,56% và 7,13%.

Tại hồ Tai Trâu, tháng 3 và 5/2020, nghiên cứu phát hiện có xuất hiện *Anabaena* và *Microcystis* với mật độ tổng số lần lượt là 40 và 12 tế bào/mL. Tuy nhiên, trong các thời điểm lựa chọn làm thí

nghiệm, không có thời điểm nào xuất hiện *Microcystis* (liên quan đến *M. aeruginosa*), *Nostoc* (liên quan *N. Rivulare*) hoặc *Anabaena* (liên quan đến *A. flos-aquae*) là các đối tượng tảo độc nước ngọt đã được ghi nhận (Nguyễn Văn Tuyên, 2003).

Như vậy, tảo độc chưa phải là vấn đề đáng quan tâm tại các hồ nghiên cứu.

Bảng 3. Hiện trạng chất lượng nước các hồ nghiên cứu

Thông số	Đơn vị	Đối tượng nghiên cứu (hồ)			QCVN 08-MT: 2015/BTNMT
		Linh Đàm	Tai Trâu	Công viên Gia Lâm	
Độ sâu secchi	m	0,54±0,10	0,54±0,12	0,30±0,08	-
pH	-	7,34±1,04	7,42±0,46	7,36±0,83	5,5-9
DO		2,58±1,12	1,22±0,84	2,44±1,31	4
P-PO ₄ ³⁻		0,011±0,004	0,032±0,022	0,311±0,124	0,3
N-NH ₄ ⁺		0,412±0,117	0,508±0,324	0,721±0,219	0,9
N-NO ₃ ⁻		2,943±1,044	0,461±0,128	0,247±0,106	10
COD	mg/L	23,0±12,5	46,0±23,7	51,2±22,4	30
BOD		17,9±8,5	21,4±8,2	34,2±7,6	15
TSS		29,6±11,5	36,7±10,7	64,4±9,8	50
TN		3,993±1,221	4,050±1,328	5,259±1,742	-
TP		0,238±0,093	0,492±0,176	0,654±0,083	-
Tổng Coliform	MPN/100mL	4.800±1.200	5.100±800	8.200±254	7500
WQI	-	66,2±12,4	51,4±8,6	45,7±10,5	-

Ghi chú: Kết quả được biểu diễn bằng trung bình ± độ lệch chuẩn của 04 lần lấy mẫu QCVN 08-MT: 2015/BTNMT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (cột B1 – cấp tưới và các mục đích tương tự)

3.2. Hiệu quả thu hồi tảo bằng công nghệ tuyển nổi

Tất cả các công thức có sử dụng hóa chất tạo bọt và sục khí (bọt nổi được chạy tràn khỏi bề mặt hỗn hợp nước và tảo) đều cho hiệu quả cao hơn so với đối chứng không sục khí tương ứng từ 28,5 – 75,4 % so với 6,9 – 21,9 % (Hình 2, Hình 3). Điều này cho thấy liên kết giữa bọt khí với tế bào tảo giúp loại bỏ tảo ra khỏi môi trường nước tốt hơn so với chỉ lắng trọng lực. Kết quả nghiên cứu này tương đồng với kết quả nghiên cứu của một

số nghiên cứu khác đã được tổng hợp bởi Barros et al. (2015).

3.2.1. Ảnh hưởng của kích thước bọt khí đến hiệu quả tuyển nổi

Căn cứ vào phân loại sinh học trong Bảng 4, kích thước các tế bào/tập đoàn tảo cần thu hồi nằm trong khoảng 10 – 1000 µm (Nguyễn Văn Tuyên, 2003), trong khi đó, sử dụng các đĩa phân tán hiện tại, kích thước bọt khí nằm trong khoảng 0,1 – 1,0 mm tương ứng gồm 03 cấp: bọt mịn (0,1 – 0,2 mm), bọt trung

bình (0,2 – 0,5 mm) và bọt lớn (0,5 – 1,0 mm) được đánh giá là tương đối phù hợp để tuyển nổi tảo lơ lửng có kích thước như trên (Barros & nnk., 2015). Hiệu quả quá trình tuyển nổi thu hồi tảo được đánh giá như sau:

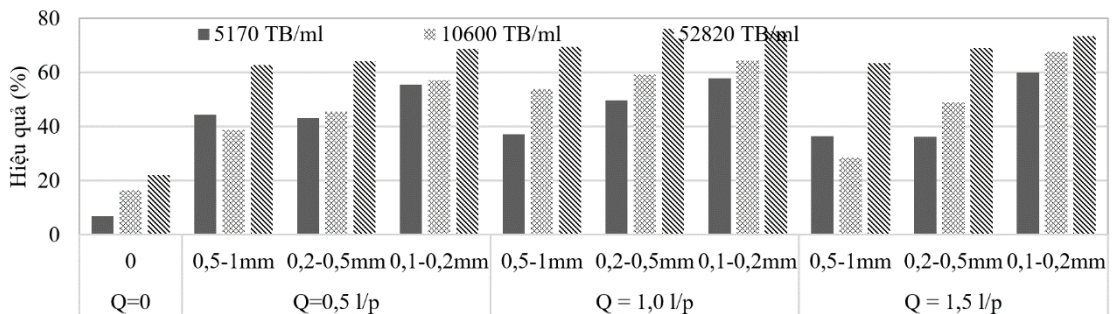
Kích thước bọt khí ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả tuyển nổi. Khi giảm kích thước bọt khí, hiệu quả tuyển nổi tăng lên rõ rệt: 28,5 – 63,5% ở kích thước bọt khí 0,5 – 1,0 mm, 36,2 – 72,5% ở kích thước bọt khí 0,2 – 0,5 mm lên đến 55,5 – 75,4% ở kích thước bọt khí 0,1 – 0,2 mm (Hình 2). Cụ thể, khi kích thước bọt khí vào khoảng 0,5 – 1 mm

giảm xuống 0,2 – 0,5 mm, hiệu quả tăng trung bình 2,4 – 8,5%; khi giảm xuống 0,1 – 0,2 mm, hiệu quả tăng trung bình 5,4 – 15,6%. Trong đó, sự khác biệt giữa hiệu quả của kích thước 0,1-0,2 mm với 0,2 – 0,5 với 0,5 – 1,0 mm có ý nghĩa ở $p < 0,05$. Như vậy, trong điều kiện nghiên cứu này, kích thước bọt khí tối ưu là 0,1 – 0,2 mm. Điều này phù hợp với các lý thuyết về quá trình tuyển nổi, với cùng một lưu lượng cấp khí thì kích thước bọt càng nhỏ, xác suất bắt gặp và kết dính giữa các tế bào tảo với bọt khí càng lớn do số lượng bọt khí trên một đơn vị thể tích dung dịch tăng (Barros & nnk., 2015).

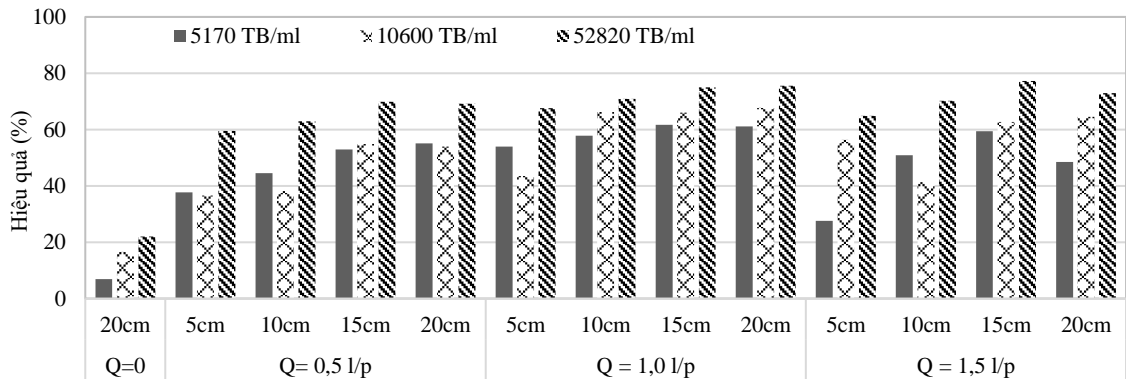
Bảng 4. Mật độ và thành phần tảo trước khi thu hồi

Đặc điểm	Hồ Linh Đàm	Hồ Tai Trâu	Hồ Công viên Gia Lâm	
Mật độ (tế bào/mL)	Tháng 3	5.170*	12.550	6.400
	Tháng 5	5.600	8.400	12.800
	Tháng 7	4.810	10.600*	56.000
	Tháng 9	2.300	5.700	52.820*
Số lượng (chi)	29	13	21	
Thành phần chi tảo (%)	<i>Chlorella</i> spp.	14,02	1,18	0,44
	<i>Scenedesmus</i> spp.	37,50	18,34	23,93
	<i>Gloeocapsa</i> spp.	10,61	23,58	0,87
	<i>Lyngbya</i> spp.	7,20	39,31	10,22
	<i>Oscillatoria</i> spp.	26,89	2,10	2,18
	<i>Cyclotella</i> spp.	0,38	1,74	14,56
	<i>Naviculla</i> spp.	0,76	3,47	7,13
	<i>Nitzschia</i> spp.	1,14	5,44	36,33
Khác	1,52	4,85	4,35	

Ghi chú: * Mẫu được lựa chọn để bố trí thí nghiệm thu hồi



Hình 2. Ảnh hưởng của lưu lượng và kích thước bọt khí đến hiệu quả thu hồi tảo bằng tuyển nổi



Hình 3. Ảnh hưởng của lưu lượng cấp khí và độ sâu tuyển nổi đến hiệu quả thu hồi bọt

Bảng 3. Mật độ tảo trong nước trước và sau khi tuyển nổi

Nhân tố thí nghiệm	Ban đầu	Sau TN1.			Sau TN2.				
		Kích thước bọt khí (mm)			Độ cao cột nước (cm)				
		0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	0,5 – 1,0	5	10	15	20	
Lưu lượng khí cấp (L/phút)	0,5	5.170	2.870	2.930	2.300	3.220	2.870	2.430	2.320
		10.600	6.490	5.770	4.550	6.720	6.550	4.780	4.880
		52.820	19.650	18.900	16.430	21.400	19.600	15.900	16.300
	1	5.170	3.250	2.600	2.180	2.380	2.180	1.980	2.010
		10.600	4.890	4.310	3.770	5.990	3.580	3.600	3.420
		52.820	16.090	14.500	12.980	17.100	15.400	13.200	12.900
	1,5	5.170	3.280	3.300	2.070	3.744	2.540	2.100	2.660
		10.600	7.580	5.400	3.440	4.630	6.220	3.950	3.760
		52.820	19.280	16.400	13.990	18.530	15.720	11.984	14.320

Ghi chú: Phân mức phú dưỡng theo mật độ tảo

< 100 tế bào/mL	Dinh dưỡng rất thấp	Oligotrophic	5.000 – 10.000	Phú dưỡng	Eutrophic
100 – 1.000	Dinh dưỡng thấp	Mesotrophic	10.000 – 50.000	Phú dưỡng cao	Polytrophic
1.000 – 5.000	Dinh dưỡng trung bình	Meso-Eutrophic	> 50.000	Phú dưỡng rất cao	Hypertrophic

3.2.2. Ảnh hưởng của lưu lượng cấp khí đến hiệu quả tuyển nổi

Vẫn trong kết quả của thí nghiệm 1, lưu lượng khí cấp ảnh hưởng đến hiệu quả tuyển nổi gián tiếp thông qua mật độ bọt khí trên một đơn vị thể tích nước, không cho thấy sự khác biệt rõ rệt như sự khác biệt về hiệu quả ở các kích thước bọt khí khác nhau. Theo đó, khi lưu lượng cấp khí từ 0,5 lên 1,0 L/phút, hiệu quả xử lý trung bình tăng từ 53,4% lên 59,9% (khác biệt có ý nghĩa thống kê tại $p < 0,05$). Trong khi đó khi lên đến lưu lượng 1,5 L/phút, hiệu quả xử lý trung bình chỉ còn lại 53,7% (khác biệt có ý nghĩa thống kê so với

lưu lượng 1,0 L/phút, nhưng không khác biệt so với công thức có lưu lượng 0,5 L/phút). Xem xét về mức độ ổn định của tuyển nổi, tương ứng với 03 lưu lượng sử dụng, chênh lệch hiệu quả (cao nhất – thấp nhất) lần lượt là: 30,1; 38,3; 45,0%. Kết quả cho thấy ở lưu lượng 0,5 L/phút, hiệu quả tuyển nổi ổn định nhất, lưu lượng 1,0 L/phút cho hiệu quả cao nhất trong khi lưu lượng 1,5 L/phút cho hiệu quả cao hơn 0,5 L/phút nhưng kém ổn định nhất (Hình 2 và Hình 3). Như vậy, với lưu lượng lớn hơn 1,0 L/phút, mật độ các bọt khí lớn, các bọt khí dễ va chạm vào nhau trong quá trình vận chuyển, làm phá vỡ liên kết giữa bọt khí và tế bào tảo (Vandamme &

nnk., 2013; Shen & nnk., 2018), là nguyên nhân giảm hiệu quả tuyển nổi.

Trong khi đó, tại thí nghiệm 2, với kích thước bọt khí 0,1 – 0,2 mm, lưu lượng cấp khí cho hiệu quả cao và ổn định nhất là 1,0 L/phút. Cụ thể: tại lưu lượng 0,5 L/phút, hiệu quả trung bình đạt 52,9% với độ chênh lệch giữa hiệu quả cao nhất và thấp nhất là 33,3%; Tại lưu lượng 1,0 L/phút, hiệu quả trung bình 63,9% với độ chênh lệch là 32,1%. Tại lưu lượng 1,5 L/phút, hiệu quả trung bình đạt 58,1% với độ chênh lệch 49,7% (Hình 3). Bên cạnh đó, sự khác biệt giữa công thức có lưu lượng 1,0 L/phút với các công thức còn lại có ý nghĩa thống kê tại $p < 0,05$, như vậy đây là công thức có hiệu quả trung bình cao nhất và ổn định nhất.

3.2.3. Ảnh hưởng của chiều cao cột nước đến hiệu quả tuyển nổi

Trong thí nghiệm 2 nêu trên, hiệu quả tuyển nổi với kích thước bọt khí 0,1 – 0,2 mm dao động trong khoảng 27,6 – 77,3 % khi thay đổi độ sâu tuyển nổi (từ 5 đến 20cm) và lưu lượng cấp khí (từ 0,5 đến 1,5 L/phút), cao hơn so với đối chứng 6,9 – 21,9%.

Trong đó, tại cùng một lưu lượng cấp khí, hiệu quả thu hồi tảo tăng dần khi độ sâu tuyển nổi tăng từ 5 – 20cm; nhưng mức độ tăng không đồng đều giữa các độ sâu. Theo đó, tại độ sâu 5cm, hiệu quả đạt 36,6 – 64,9%; tại độ sâu 10cm, hiệu quả đạt 38,2 – 70,8%; tại độ sâu 15cm, hiệu quả đạt 52,9 – 77,3%; tại độ sâu 20cm, hiệu quả đạt 48,5 – 75,5% (Hình 3). Ở độ tin cậy 95%, hiệu quả xử lý tăng khi độ sâu tuyển nổi tăng từ 5 đến 10 cm và tương đối đồng nhất khi độ sâu nằm trong khoảng 15 – 20 cm. Với kích thước tảo của các mẫu thí nghiệm, kết hợp với kích thước bọt khí đã lựa chọn, hiệu quả tuyển nổi cao nhất khi độ sâu khoảng 15 – 20 cm. Trường hợp quãng đường di chuyển quá ngắn, tế bào tảo không có cơ hội gắn với bọt khí; trường hợp ngược lại, tế bào tảo dễ bị rời ra khỏi bọt khí trên quãng đường di chuyển thường gặp ở khoảng cách trên 50cm (Vandamme & nnk., 2013; Shen & nnk., 2018). Tuy nhiên quy mô này không được thử nghiệm trong nghiên cứu.

3.2.4. Ảnh hưởng của mật độ tảo ban đầu đến hiệu quả tuyển nổi

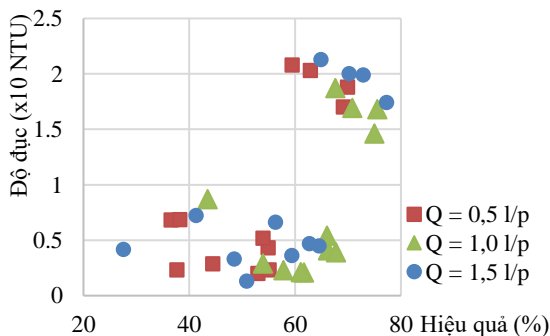
Hiệu quả tuyển nổi tăng khi mật độ tảo cao, tuy nhiên còn phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác. Tùy vào lưu lượng và kích thước bọt khí, hiệu quả thu hồi tảo từ mẫu nước hồ Linh Đàm nằm trong khoảng 36,56 – 59,96%, hồ Tai Trâu là 28,49 – 67,55%, hồ Công viên Gia Lâm là 62,80 – 75,43% (Hình 2). Tùy vào lưu lượng cấp khí và độ cao cột nước, hiệu quả thu hồi cho các đối tượng lần lượt là 27,56 – 61,11%; 36,60 – 67,74% và 59,49 – 77,31% (Hình 3). Giá trị tối đa và trung bình hiệu quả thu hồi của các hồ cho thấy sự khác biệt giữa các hồ với nhau đều có ý nghĩa thống kê với $p < 0,05$. Giá trị tối thiểu và khoảng biến động hiệu quả thu hồi mặc dù có chênh lệch giữa các hồ, nhưng không tuyến tính với mật độ tảo ban đầu. Trong đó, mật độ ban đầu chênh lệch nhau 2 – 5 lần trong khi chênh lệch giữa hiệu quả tuyển nổi chỉ vào khoảng 1,1 – 2 lần. Điều này có thể do ảnh hưởng của thành phần tảo cụ thể hơn là chi tảo nào chiếm ưu thế trong mẫu nước hồ.

Sau khi tuyển nổi, mật độ tảo là một nhân tố sử dụng để đánh giá hiệu quả của quá trình thu hồi. Kết quả cho thấy, ở mật độ 5.170 tế bào/mL, sau xử lý, mật độ tảo đều đạt từ 1.900 – 4.800 tế bào/mL nằm ở mức dinh dưỡng trung bình. Tại mật độ 10.600 tế bào/mL, sau xử lý mật độ vào khoảng 3.400 – 8.800 tế bào/mL nằm ở 02 mức phú dưỡng và dinh dưỡng trung bình. Tại mật độ 53.000 tế bào/mL, mật độ tảo sau xử lý đạt từ 12.000 – 41.000 tế bào/mL đều nằm ở mức phú dưỡng (Bảng 5). Hiệu quả kiểm soát phú dưỡng bằng công nghệ tuyển nổi thấp hơn so với công nghệ đông keo tụ ở cùng điều kiện mật độ tảo ban đầu (Nguyễn Thị Thu Hà & nnk., 2021). Như vậy, về hiệu quả kiểm soát phú dưỡng, công nghệ tuyển nổi (một lần) đảm bảo chất lượng nước sau tuyển khi mật độ tảo dưới 10.000 tế bào/mL. Để tăng hiệu quả, khi xử lý trong điều kiện thực tế có thể áp dụng tuyển nổi nhiều lần hoặc kết hợp tuyển nổi với các công nghệ khác (Barros & nnk., 2015).

3.3. Chất lượng môi trường và sinh khối tảo sau khi thu hồi

3.3.1. Chất lượng môi trường sau tuyển nổi

Chất lượng môi trường sau khi thu hồi được thể hiện bằng độ đục và thành phần tảo trong phần nước còn lại. Kết quả cho thấy: Độ đục của nước sau thu hồi tỷ lệ nghịch với hiệu quả thu hồi (Hình 4). Trong đó, phần lớn các mẫu nước sau tuyển nổi có độ đục cao hơn tại chế độ sục khí 1,5 L/phút so với các chế độ sục khí còn lại ở cùng một hiệu quả xử lý (hoặc mật độ ban đầu), điều này có khả năng do ảnh hưởng bởi quá trình phá vỡ cấu trúc tập đoàn của tảo trong nước (Vandamme & nnk., 2013; Shen & nnk., 2018). Phần lớn các tập đoàn của *Scenedesmus* chỉ còn 2 – 3 tế bào so với 4 – 8 tế bào ban đầu; phần lớn các tập đoàn của *Gloeocapsa* chỉ còn 4 – 8 tế bào so với 12 – 30 tế bào như ban đầu là những ví dụ chứng minh ảnh hưởng của tuyển nổi đến quá trình thu hồi tảo. Trong nghiên cứu chưa quan sát thấy sự đứt đoạn của vi khuẩn lam dạng sợi *Oscillatoria* hoặc *Lyngbya*, tuy nhiên không thể loại trừ ảnh hưởng của tác động cơ học do di chuyển các bọt khí đến các tập đoàn dạng sợi.



Hình 4. Mối quan hệ giữa độ đục và hiệu quả thu hồi tảo bằng tuyển nổi

Thành phần tảo còn lại cũng là tiêu chí quan trọng để đánh giá hiệu quả kiểm soát phú dưỡng do nó liên hệ mật thiết với tỷ lệ và khả năng nhóm tảo nào trở thành ưu thế trong hồ sau đó. Khi tăng lưu lượng cấp khí, độ sâu sục khí hoặc giảm kích thước bọt khí, ở hầu hết các quần xã tảo, mật độ của các chi tảo đều giảm tuy nhiên tỷ lệ của chúng có thể tăng hoặc giảm so với ban đầu. Trong phần lớn các công thức thí nghiệm, tỷ lệ của

Lyngbya, *Oscillatoria* giảm mạnh, tỷ lệ *Chlorella* và *Gloeocapsa* ổn định, tỷ lệ *Scenedesmus*, *Nitzschia*, *Cyclotella* và *Naviculla* tăng, so với đôi chúng và ban đầu (Hình 5). Như vậy, công nghệ này có thể áp dụng tốt trên các loài vi khuẩn lam dạng sợi và tập đoàn có màng nhày, không thích hợp với tảo cát, tảo giáp (do cản trở quá trình lắng trọng lực của chúng) và tảo lục (phá vỡ cấu trúc tập đoàn, giảm khả năng thu hồi). Như vậy, nếu xem xét ở ý nghĩa không chế thành phần tảo độc, mặc dù công nghệ tuyển nổi đạt hiệu quả chung thấp nhưng hiệu quả kiểm soát phú dưỡng lại khá tốt và ổn định do thu hồi tốt các tập đoàn vi khuẩn lam.

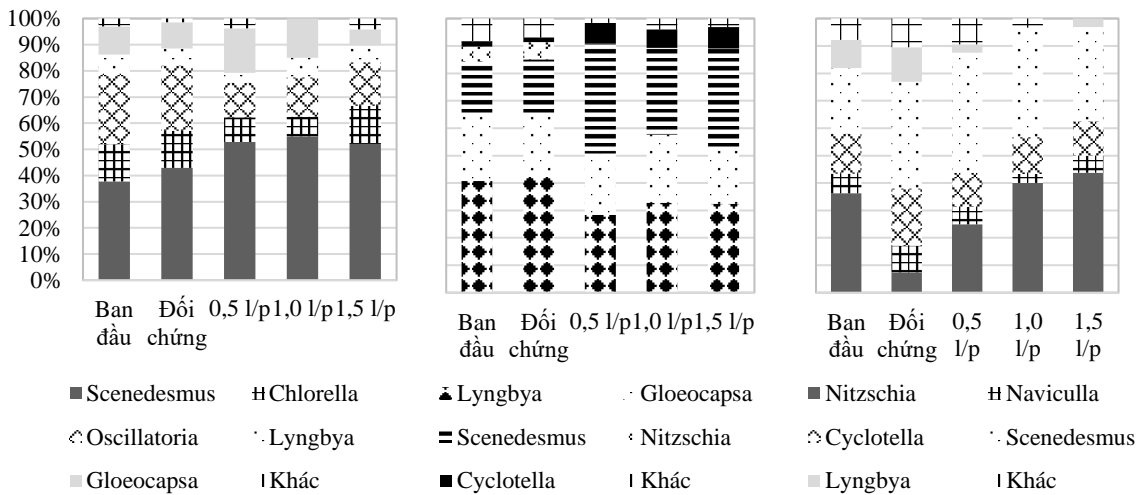
3.3.2. Đặc điểm của sinh khối tảo thu hồi được

Sinh khối thô của tảo thu hồi từ quá trình tuyển nổi được lọc qua giấy lọc thường, lượng vật chất (bao gồm tảo và chất rắn khác) thu được tại các hồ Linh Đàm, Tai Trâu và Công viên Gia Lâm lần lượt là 214; 388 và 579 mg/L. Độ ẩm của tảo sau quá trình tuyển nổi dao động từ 84 – 93% tương ứng với lượng vật chất khô vào khoảng 7 – 16%. Giá trị này tương đương với kết quả tách nước bằng công nghệ keo tụ sử dụng các hóa chất khác như $FeCl_3$ hay chitosan (Salim & nnk., 2011; Barros & nnk., 2015). Hàm lượng chất rắn thu được là 24,7; 38,2 và 74,8 mg/L tương quan với kết quả phân tích TSS trong nước (Bảng 3). Trong đó, thành phần chất rắn vô cơ vào khoảng 11,4 – 13,1 mg/L chiếm lần lượt 50,6; 29,8 và 17,5 %. Lượng chất rắn này có thể là các thành phần khoáng vật tồn tại ở dạng hạt trong nước và các thành phần tro khác. Bên cạnh các thành phần khoáng vật, khối lượng chất rắn lơ lửng vô cơ còn bao gồm cả thành phần tro trong sinh khối – khoáng chất trong tế bào tảo thường vào khoảng 5 – 10%. Kết quả có xu hướng tương đồng với một số hệ thống nuôi thâm canh tảo quy mô công nghiệp (Shen & nnk., 2018).

Lượng chất rắn hữu cơ đại diện cho sinh khối tảo và VSV khác trong các hồ Linh Đàm, Tai Trâu và Công viên Gia Lâm lần lượt là 12,8; 26,8 và 61,7 mg/L chiếm tương ứng 49; 70 và 82% khối lượng sản phẩm thu được. Giá trị này tương ứng với hàm lượng

Chất hữu cơ (OM) tồn tại ở dạng lơ lửng trong nước bao gồm cả sinh khối tảo, tế bào các VSV khác và các tàn dư hữu cơ không qua giấy lọc thường. Trong tổng số hữu cơ như trên, protein chiếm 28,6 – 33,5%, các mẫu có thành phần vi khuẩn lam chiếm ưu thế có hàm lượng protein cao hơn, hàm lượng glucit tổng số chiếm 34,1 – 39,4%, hàm lượng lipid tổng số từ 14,7 – 25,2%. Với hàm lượng protein và glucit cao, hàm lượng lipid thấp, sinh khối tảo thu được không

thích hợp sử dụng làm nguyên liệu biodiesel (Demirbas & Demirbas, 2010) nhưng tương đối phù hợp làm xăng sinh học, khí sinh học biogas (Dębowski & nnk., 2013), hay làm nguyên liệu phân bón, than sinh học (Mulbry & nnk., 2005). Thành phần tảo lục và tảo cát chiếm ưu thế, lượng sinh khối cấu thành từ glucit khá cao, sinh khối tảo có thể sử dụng làm vật liệu hấp phụ kim loại nặng và các cation khác trong xử lý nước (He & Chen, 2014).



Hình 5. Tỷ lệ trung bình các nhóm tảo trước và sau thí nghiệm

Bảng 4. Đặc điểm hóa học các mẫu tảo thu hồi được

Thông số	Đơn vị	Hồ Linh Đàm	Hồ Tai Trâu	Hồ Công viên Gia Lâm
Mật độ tảo ban đầu	Tế bào/mL	5.170	10.600	52.820
Sản lượng thu hồi	mg/L	214,3	388,4	579,7
Độ ẩm sản phẩm	%	87 – 93	85-93	84-90
Tổng chất rắn lơ lửng (TSS)	mg/L	24,7	38,2	74,8
Chất rắn lơ lửng bay hơi (VSS)	mg/L	12,2	26,8	61,7
Chất rắn lơ lửng vô cơ (FSS)	mg/L	12,5	11,4	13,1
Protein tổng số	%	29,42	33,51	28,65
Glucit tổng số	%	39,56	34,14	35,22
Lipid tổng số	%	14,73	16,29	18,71
C hữu cơ (OC)	%	9,841	12,531	10,432
N tổng số	%	0,669	0,749	0,539
P tổng số	%	0,105	0,118	0,091

Hàm lượng hữu cơ, thành phần hóa học của tảo phù hợp làm nguyên liệu phân bón, biogas. Cụ thể hàm lượng C hữu cơ vào khoảng 9,8 – 12,5%, hàm lượng N tổng số vào khoảng 0,5 – 0,7%, hàm lượng P tổng số vào khoảng 0,1% về khối lượng trong chất rắn thu được. Như vậy, chỉ số C:N:P của hồ Linh Đàm, hồ Tai Trâu và hồ công viên Gia Lâm lần lượt là 94:6:1; 106:6:1 và 114:6:1 đều nằm xung quanh khoảng phổ biến của giá trị giới hạn sinh trưởng của tảo (Daniel & nnk., 1998; Scholten & nnk., 2005). Tỷ lệ C:N trong sản phẩm vào khoảng 15 – 20, cao hơn trong đất, thấp hơn so với phân gia súc, gia cầm và thấp hơn rất nhiều so với than bùn, nhưng thích hợp với các loài vi khuẩn, xạ khuẩn sử dụng chủ yếu trong quá trình ủ phân (Mulbry & nnk., 2005). Do hàm lượng N cao, sinh khối tảo phù hợp để bổ sung vào các nguyên liệu thiếu N trong quá trình yếm khí với C:N tối ưu là 5:1 – 20:1 phù hợp với quá trình lên men, metan hóa (Dębowski & nnk., 2013). Bên cạnh đó, với thành phần hữu cơ chiếm từ 45 – 80% khối lượng đảm bảo QCVN 01-189:2019/BNNPTNT (trên 20%), sinh khối tảo sau thu hồi có thể sử dụng làm nguyên liệu phân bón.

4. KẾT LUẬN

Đối với các hồ Hà Nội ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng và suy giảm oxy hòa tan, phú dưỡng đến phú dưỡng cao, thí nghiệm tuyển nổi đạt hiệu quả 28,5 – 77,3% trong 60 phút, tỷ lệ nghịch với kích thước bọt khí nằm trong khoảng 0,1 – 1 mm, tỷ lệ thuận với độ sâu cột nước nằm trong khoảng 5 – 20 cm và cho hiệu quả cao và ổn định nhất tại lưu lượng cấp khí 1,0 L/phút. Công nghệ tuyển nổi đạt hiệu quả cao khi thành phần vi khuẩn lam dạng sợi (*Lyngbya* và *Oscillatoria*) hoặc dạng tập đoàn (*Gloeocapsa*), tảo lục chiếm ưu thế nhưng không thích hợp với các đối tượng khác như tảo cát, tảo giáp. Sinh khối sau khi thu hồi có hàm lượng hữu cơ chiếm từ 49 – 82 % trong đó chủ yếu là protein và glucit, tỷ lệ C:N là 15 – 20, phù hợp làm nguyên liệu phân bón, biogas, xăng sinh học hoặc vật liệu hấp phụ.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Học viện nông nghiệp Việt Nam đã cấp kinh phí thực hiện nghiên cứu này thông qua đề tài mã số T2020-04-22; Phòng thí nghiệm Môi trường (VLAT-10397) – Khoa Tài nguyên và Môi trường và Trung tâm Phân tích và Chuyển giao Công nghệ môi trường (VLAT-621) – Viện Môi trường Nông nghiệp đã cung cấp địa điểm, phương tiện thực hiện thí nghiệm và đánh giá các kết quả thu được

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* 23rd ed. Washington, DC, USA: APHA publisher.
- Barros, A. I., Gonçalves, A. L., Simões, M., & Pires, J. C. (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 1489-1500.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.
- Daniel, T., Sharpley, A. & Lemunyon, J. (1998). Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *Journal of environmental quality*, 27(2), 251-257.
- Dębowski, M., Zieliński, M., Grala, A. & Dudek, M. (2013). Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 596-604.
- Demirbas, A. & Demirbas, M. F. (2010). *Algae energy: algae as a new source of biodiesel*. London: Springer Science & Business Media.
- Dương Đức Tiến & Võ Hành. (1997). *Tảo nước ngọt Việt Nam - Phân loại bộ tảo*

- lục (*Chlorococcales*). Hà Nội: Nxb Nông nghiệp.
- He, J. & Chen, J.P. (2014). A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource technology*, 160, 67-78.
- Huo, S., Ma, C., Xi, B., Su, J., Zan, F., Ji, D. & He, Z. (2013). Establishing eutrophication assessment standards for four lake regions, China. *Journal of Environmental Sciences*, 25(10), 2014-2022.
- Milledge, J. J. & Heaven, S. (2013). A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 12(2), 165-178.
- Mulbry, W., Westhead, E. K., Pizarro, C. & Sikora, L. (2005). Recycling of manure nutrients: use of algal biomass from dairy manure treatment as a slow release fertilizer. *Bioresource technology*, 96(4), 451-458.
- Nguyễn Thị Thu Hà, Đinh Tiến Dũng, Lê Thị Hương, Đỗ Phương Chi. (2021). Thu hồi sinh khối tảo trong các hồ phú dưỡng trên địa bàn Hà Nội bằng công nghệ đông keo tụ. *Tạp chí môi trường Số chuyên đề tiếng Việt – Số II/2021*.
- Nguyễn Văn Tuyên. (2003). *Đa dạng sinh học tảo thủy vực nội địa Việt Nam – Triển vọng và Thách thức*. Hà Nội: Nxb Nông nghiệp.
- Salim, S., Bosma, R., Vermuë, M. H. & Wijffels, R. H. (2011). Harvesting of microalgae by bio-flocculation. *Journal of applied Phycology*, 23(5), 849-855.
- Scholten, M. C., Foekema, E. M., Dokkum, H. P., Jak, R. G. & Kaag, N. H. (2005). *Eutrophication management and ecotoxicology*. London: Springer Science & Business Media.
- Shelef, G., Sukenik, A. & Green, M. (1984). *Microalgae harvesting and processing: a literature review*. Haifa (Israel): Technion Research and Development Foundation Ltd.,
- Shen, Z., Li, Y., Wen, H., Ren, X., Liu, J. & Yang, L. (2018). Investigation on the role of surfactants in bubble-algae interaction in flotation harvesting of *Chlorella vulgaris*. *Scientific reports*, 8(1), 1-10.
- Tạ Đăng Thuận. (2019). Phân tích sự biến đổi theo mùa của các yếu tố ảnh hưởng tới sự sinh trưởng của tảo ở một số hồ nội đô Hà Nội sử dụng mô hình phú dưỡng. *Tạp chí Khoa học Thủy lợi và Môi trường*, 64, 60-68.
- Vandamme, D., Foubert, I. & Muylaert, K. (2013). Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in biotechnology*, 31(4), 233-239.