

Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ vi tảo *Chlorella* sp. và bùn hoạt tính loại bỏ chất dinh dưỡng và chất hữu cơ cho nước thải có nồng độ C/N thấp

Lý Thị Ái Duyên^{1,2}, Nguyễn Thị Bé Liên^{1,2}, Nguyễn Thị Thùy Dương^{1,2},
Nguyễn Phương Thảo^{1,2}, Trần Công Sắc¹, Đỗ Văn Tiên¹, Lê Linh Thy^{1,3}, Bùi Xuân Thành^{1,2*}

¹Phòng Thí nghiệm trọng điểm ĐHQG Xử lý chất thải bậc cao, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 268 Lý Thường Kiệt, phường 14, quận 10, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Khoa Môi trường và Tài nguyên, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 268 Lý Thường Kiệt, phường 14, quận 10, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Khoa Y tế Công cộng, Trường Đại học Y Dược TP Hồ Chí Minh, 159 Hưng Phú, phường 8, quận 8, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày nhận bài 19/7/2021; ngày chuyển phản biện 22/7/2021; ngày nhận phản biện 20/8/2021; ngày chấp nhận đăng 24/8/2021

Tóm tắt:

Hỗn hợp vi tảo và bùn hoạt tính được nuôi cấy trong hệ thống photobioreactor (PBR) với các tỷ lệ nuôi cấy khác nhau (1:0, 3:1, 1:1, 0:1 wt/wt) nhằm xác định một tỷ lệ tốt nhất cho việc loại bỏ chất hữu cơ, chất dinh dưỡng trong hệ thống đồng nuôi cấy. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ đồng nuôi cấy có tỷ lệ vi tảo cao hơn sẽ loại bỏ tổng nitơ (TN) tốt hơn. Hệ thống PBR với tỷ lệ nuôi cấy 1:0, 3:1 có tốc độ loại bỏ TN cao hơn so với các tỷ lệ 1:1 và 0:1, đạt tốc độ loại bỏ cao nhất ở tỷ lệ 1:0 với hiệu quả xử lý lên đến 96% và tỷ lệ 3:1 đạt 90% sau 6 ngày vận hành. Ngoài ra, bề phản ứng chỉ có vi tảo, bề phản ứng đồng nuôi cấy vi tảo và bùn hoạt tính có hiệu quả xử lý tổng photpho (TP) cao hơn so với hệ thống chỉ có bùn hoạt tính. Hiệu quả xử lý TP cao nhất ở môi trường nuôi cấy tảo đơn lẻ (tỷ lệ 1:0) đạt 98,8% TP chỉ sau 9 ngày. Tỷ lệ 3:1 và 1:1 cho thấy tốc độ loại bỏ nhu cầu oxy hóa học (COD) cao hơn đáng kể so với các tỷ lệ khác, lần lượt là 131 mg/l/ngày và 118 mg/l/ngày. Sau 4 ngày vận hành, tỷ lệ 3:1 xử lý tới 96% COD với tốc độ loại bỏ riêng cao nhất (132,7 mg/l/ngày). Đánh giá dựa trên hiệu quả xử lý chất dinh dưỡng và chất hữu cơ cho thấy, tỷ lệ 3:1 của hệ đồng nuôi cấy vi tảo và bùn hoạt tính trong hệ thống PBR là tốt nhất trong ứng dụng xử lý nước thải.

Từ khóa: bề phản ứng quang hoá (PBR), bùn hoạt tính, vi khuẩn, vi tảo, xử lý nước thải.

Chỉ số phân loại: 2.7

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, với quá trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước, sự xuất hiện của nhiều hoạt động công nghiệp đã tạo ra lượng lớn nước thải thải vào môi trường. Nước thải chứa nhiều thành phần ô nhiễm, trong đó nitơ và photpho gây ra hiện tượng phú dưỡng hóa nguồn nước, làm chết các loài thủy sinh, gây nên sự mất cân bằng của hệ sinh thái. Vì vậy, cần có giải pháp thích hợp để loại bỏ các chất dinh dưỡng có trong nước thải. Công nghệ bùn hoạt tính được ứng dụng rộng rãi trong quá trình xử lý nước thải, chủ yếu tập trung vào việc loại bỏ nhu cầu oxy sinh học (BOD) hoặc COD [1]. Việc xử lý nước thải bằng công nghệ này thường đòi hỏi nhu cầu năng lượng cao để cung cấp oxy cho quá trình hô hấp của vi khuẩn và tạo ra lượng bùn lớn nên cần tìm ra các phương pháp xử lý khác bền vững và tiết kiệm chi phí hơn. Năng lượng cho sục khí chiếm 60-80% tổng năng lượng được sử dụng trong toàn bộ quá trình xử lý nước thải áp dụng công nghệ bùn hoạt tính [2].

Ứng dụng vi tảo trong xử lý nước thải đang dần được chú trọng. Tảo là sinh vật tự dưỡng, trong điều kiện có ánh sáng sẽ tạo ra oxy nhờ quá trình quang hợp, giúp cung cấp oxy trong quá trình xử lý nước thải [3, 4]. Sinh khối tảo phát triển nhanh có thể tăng gấp đôi trong vòng 24 giờ [5]. Ngoài ra, vi tảo còn có khả năng đồng hóa nitơ và photpho trong

nước thải, chuyển đổi các chất dinh dưỡng này thành sinh khối ứng dụng trong sản xuất nhiên liệu sinh học và một số sản phẩm thương mại [6]. *Chlorella* được coi là loài vi tảo tiềm năng để xử lý nước thải vì hiệu quả quang hợp cao và khả năng loại bỏ chất dinh dưỡng từ nước thải lớn hơn so với các loài tảo khác [7]. Chúng có tốc độ phát triển nhanh, giàu chất dinh dưỡng, nhiều hoạt chất sinh học và có khả năng chống lại các điều kiện phát triển bất lợi [8]. Mặc dù vi tảo có thể hấp thụ chất dinh dưỡng với nồng độ cao [5, 9], nhưng khả năng loại bỏ chất hữu cơ tương đối thấp là một trở ngại cho việc ứng dụng vi tảo trong xử lý nước thải [1]. Vì vậy, để nâng cao hiệu quả loại bỏ cả chất hữu cơ và chất dinh dưỡng, phương pháp kết hợp vi tảo và bùn hoạt tính được đề xuất. Loài *Chlorella* tương thích với nhiều vi khuẩn dị dưỡng và có thể nuôi đồng cộng sinh. *Chlorella* sp. và bùn hoạt tính có thể được nuôi cấy lẫn nhau như một hệ đồng nuôi cộng sinh để xử lý nước thải đô thị [1].

Công nghệ kết hợp hệ vi tảo và bùn hoạt tính trong xử lý nước thải đô thị và công nghiệp đã được quan tâm nhiều hơn trong những năm gần đây. Trong điều kiện được chiếu sáng, tảo quang hợp tạo ra oxy, vi khuẩn sử dụng oxy để chuyển hóa chất hữu cơ [10]. Vì vậy, oxy do tảo tạo ra đóng vai trò như thiết bị sục khí, giúp giảm chi phí sục khí. Sau đó, cacbon dioxit (CO₂) do vi khuẩn thải ra sẽ được tiêu thụ

*Tác giả liên hệ: Email: bxthanh@hcmut.edu.vn

Study on the effect of ratio of microalgae *Chlorella* sp. and activated sludge to remove nutrients and organic matter for low C/N wastewater

Thi Ai Duyen Ly^{1,2}, Thi Be Lien Nguyen^{1,2},
Thi Thuy Duong Nguyen^{1,2}, Phuong Thao Nguyen^{1,2},
Cong Sac Tran¹, Van Tien Do¹,
Linh Thy Le^{1,3}, Xuan Thanh Bui^{1,2*}

¹Key Laboratory of Advanced Waste Treatment Technology,

Vietnam National University - Ho Chi Minh City (VNU-HCM),

268 Ly Thuong Kiet Street, Ward 14, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Faculty of Environment and Natural Resources, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT),

268 Ly Thuong Kiet Street, Ward 14, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Faculty of Public Health, University of Medicine and Pharmacy at Ho Chi Minh City (UMP),

159 Hung Phu Street, Ward 8, District 8, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received 19 July 2021; revised 20 August 2021; accepted 24 August 2021

Abstract:

Microalgae and activated sludge were co-cultured in photobioreactor (PBR) systems with different ratios (1:0, 3:1, 1:1, 0:1 wt/wt) to determine an optimal ratio for organic matter and nutrient removal. The results showed that the PBR systems at 1:0 and 3:1 ratios have higher total nitrogen (TN) removal rates than at two others. The highest TN removal at the ratio of 1:0 achieved 96% and at the ratio 3:1 achieved 90% after six days of operation. In addition, the single-microalgae culture and co-culture microalgae-activated sludge systems had higher TP removal than that in the single-activated sludge one. The highest TP removal of 98.8% was achieved at 1:0 ratio after nine days. The 3:1 and 1:1 ratios had significantly higher COD removal rates than the other ratios with 131 mg/l/d and 118 mg/l/d, respectively. After four days of operation, the 3:1 ratio reached the highest specific removal rate of 132.7 mg/l/d. This study showed that the 3:1 ratio of microalgae co-culture and activated sludge is an optimal ratio for wastewater treatment-based microalgae application.

Keywords: activated sludge, bacteria, microalgae, photobioreactor (PBR), wastewater treatment.

Classification number: 2.7

bởi quá trình quang hợp của tảo, làm giảm phát thải khí nhà kính [11-13]. Như vậy, có thể thấy rằng việc tạo ra oxy của vi tảo giúp tiết kiệm năng lượng cung cấp cho hệ thống. Tỷ lệ vi tảo và bùn hoạt tính ban đầu có thể ảnh hưởng đến mối quan hệ cộng sinh, dẫn đến hiệu quả xử lý khác nhau. Do đó, tỷ lệ vi tảo và bùn hoạt tính quyết định hiệu quả xử lý chất dinh dưỡng và chất hữu cơ trong nước thải. Việc loại bỏ chất dinh dưỡng và tăng trưởng sinh khối bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như tỷ lệ nuôi cấy, điều kiện vận hành, thành phần nước thải [14].

Theo S. Huo và cs (2020) [15], việc loại bỏ COD, TN và TP đã được cải thiện đáng kể bằng cách thêm 1% (v/v) và 10% (v/v) vi khuẩn (*Bacillus firmus* và *Beijerinckia*) kết hợp với vi tảo nuôi trong nước thải từ quá trình sản xuất giấm. So với nuôi vi tảo đơn lẻ, hiệu suất xử lý của COD, TN và TP của hệ thống đồng nuôi cấy vi tảo và bùn hoạt tính đã được cải thiện với mức tăng lần lượt là 22,1, 20 và 8,1% [15]. Theo Y. Su và cs (2012) [16], tỷ lệ tối ưu để loại bỏ nitơ và photpho (tương ứng là 91,0 và 93,5%) là 5:1. Ngoài ra, tỷ lệ nuôi cấy không ảnh hưởng đến việc loại bỏ COD. Trong nghiên cứu khác của G. Mujtaba và K. Lee (2017) [1], tỷ lệ 2:1 đã đạt được hiệu quả cao nhất trong việc xử lý nước thải đô thị. Mức độ loại bỏ COD (82,7%), TN (75,5%) và TP (100%) với tỷ lệ nuôi cấy là 1:1 được tìm thấy trong nghiên cứu của S. Zhu và cs (2019) [14]. Trong công trình này, chúng tôi sẽ tiếp tục nghiên cứu nhằm tìm ra tỷ lệ nuôi cấy vi tảo và bùn hoạt tính tốt nhất cho việc loại bỏ chất dinh dưỡng và chất hữu cơ cho nước thải tổng hợp.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vi tảo

Loại vi tảo được sử dụng trong nghiên cứu này là *Chlorella* sp. được cung cấp từ Viện Nghiên cứu Nuôi trồng Thủy sản 2 (Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn). *Chlorella* sp. được nuôi cấy và duy trì trong môi trường Bold's Basal Medium (BBM) đã được khử trùng. *Chlorella* sp. được nuôi cấy trong bể PBR (đường kính 20 cm, chiều cao 60 cm) ở cường độ ánh sáng 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ và sục khí [17, 18]. Vi tảo sau khi được nhân giống đến khối lượng cần thiết cho nghiên cứu sẽ để lắng trong 12 giờ nhằm loại bỏ phần môi trường còn lại trong quá trình nuôi tảo, sau đó được ly tâm với tốc độ 3600 vòng/phút trong 10 phút và rửa hai lần bằng nước khử ion trước khi được sử dụng làm thí nghiệm.

2.2. Bùn hoạt tính

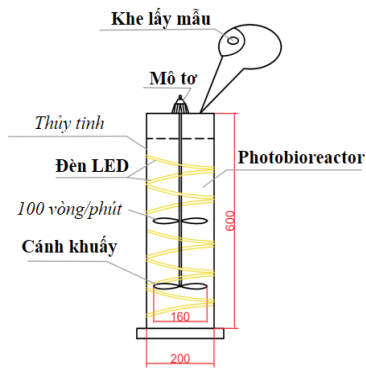
Bùn hoạt tính sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ bể sinh học hiếu khí của hệ thống xử lý nước thải siêu thị Coopmart Lý Thường Kiệt (497 Hòa Hảo, phường 7, Quận 10, TP Hồ Chí Minh). Nồng độ bùn hoạt tính (MLSS) khoảng 4000 mg/l. Trước khi thí nghiệm, bùn hoạt tính được để lắng trong 3 giờ, sau đó ly tâm với tốc độ 3600 vòng/phút trong 10 phút.

2.3. Nước thải tổng hợp

Nước thải tổng hợp với các thành phần như sau: acetate 741 mg/l, NH_4Cl 764 mg/l, KH_2PO_4 198 mg/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 10 mg/l, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 75 mg/l, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 36 mg/l, $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 mg/l và Na_2CO_3 20 mg/l. Thành phần các nguyên tố vi lượng: H_3BO_3 2,86 g/l, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1,81 g/l, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,22 g/l, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,079 g/l, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,05 g/l, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,39 g/l [14]. Đặc tính nước thải tổng hợp chứa COD 500 mg/l, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 200 mg/l, TP 45 mg/l và được duy trì ở pH 7,6, tỷ lệ N:P là 4,4. Tỷ lệ COD:N thấp duy trì khoảng 2,5, tạo điều kiện thuận lợi cho việc làm giàu sinh khối vi tảo và phục hồi chất dinh dưỡng.

2.4. Thiết kế thí nghiệm

Sơ đồ chi tiết của hệ thống PBR được minh họa ở hình 1.



Hình 1. Cấu tạo mô hình thí nghiệm.

Hỗn hợp vi tảo và bùn hoạt tính được sử dụng trong thí nghiệm có tổng chất rắn lơ lửng (TSS) của vi tảo là 1000 mg/l và TSS của bùn hoạt tính là 4000 mg/l. Tổng thể tích của chất lỏng trong bể là 14 l. Thể tích vi tảo và bùn hoạt tính trong 4 bể lần lượt là: 56, 4,2, 2,8, 0 l và 0, 0,35, 0,7, 1,4 l. Sau đó, các bể được làm đầy bằng nước thải tổng hợp để đạt được thể tích 14 l để có tỷ lệ vi tảo và bùn hoạt tính trong bể là 1:0, 3:1, 1:1 và 0:1 (tỷ lệ khối lượng). Nồng độ tổng ban đầu của vi tảo và bùn hoạt tính trong bể PBR là 400 mg/l.

Thí nghiệm được thực hiện trong bể phản ứng quang hoá PBR được làm bằng thủy tinh trong suốt (chiều cao 60 cm và đường kính 20 cm). Trong điều kiện nuôi cấy dạng mẻ, thể tích làm việc của bể là 14 l. Hệ thống PBR được lắp đặt trong một hộp gỗ để tránh thất thoát ánh sáng ra ngoài. Đèn LED cuộn xung quanh PBR cung cấp ánh sáng với cường độ khoảng 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Chu kỳ sáng - tối được vận hành là 12 giờ sáng - 12 giờ tối. Bể được lắp đặt thiết bị khuấy trộn với tốc độ 100 vòng/phút.

2.5. Phương pháp phân tích

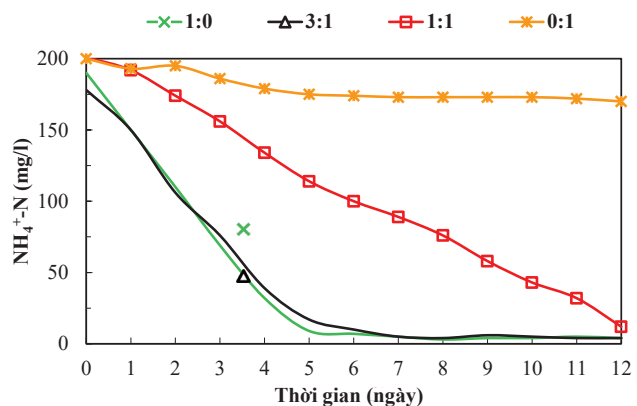
Trước khi phân tích, 200 ml mẫu được lọc qua giấy lọc có kích thước lỗ 0,45 μm (Fisher Whatman puradisc-25 mm) để loại bỏ các tế bào vi tảo và vi khuẩn trước khi phân tích.

Các thông số như COD, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ được phân tích theo phương pháp tiêu chuẩn [19]. Nồng độ DO được đo bằng máy đo DO (HI 76.407/4F, Hanna HI9146-04, Nhật Bản) và pH được đo bằng máy đo pH (Hanna HI9813-6, Nhật Bản), đo nhiệt độ hàng ngày. Cường độ ánh sáng được đo trực tiếp bằng cảm biến ánh sáng hình cầu chìm (US-SQS/L, ULM-500, FA Walz, Đức).

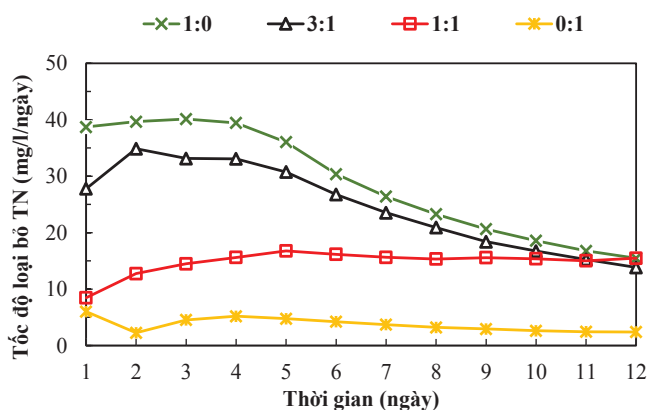
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Loại bỏ chất dinh dưỡng

Nghiên cứu này cho thấy, nồng độ các chất dinh dưỡng có sự thay đổi ở các tỷ lệ nuôi cấy vi tảo và bùn hoạt tính khác nhau. Với các bể có tỷ lệ nuôi cấy 1:0, 3:1 và 1:1 khả năng loại bỏ TN cao. Trong 6 ngày vận hành, tỷ lệ 1:0 có nồng độ TN giảm từ 190 mg/l xuống còn 8 mg/l, hiệu quả xử lý đạt 96%, cho đến ngày cuối cùng hiệu quả xử lý đạt tới 98%. Trong khi đó, hiệu suất xử lý TN của tỷ lệ 0:1 chỉ đạt 12,5% sau 6 ngày và 14,5% sau 12 ngày vận hành (hình 2). Theo kết quả thử nghiệm, nồng độ DO của tỷ lệ nuôi cấy 0:1 dưới 0,5 mg/l, không thể đáp ứng nhu cầu oxy để quá trình nitrat hóa xảy ra. Điều này dẫn đến nồng độ $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ trong tỷ lệ 0:1 thấp (0,84 và 0,66 mg/l). Sau 6 ngày vận hành, hiệu quả loại bỏ TN của các tỷ lệ đồng nuôi cấy 3:1 và 1:1 lần lượt là 90 và 48%, kết quả cho thấy hệ thống đồng nuôi cấy có tỷ lệ vi tảo cao hơn sẽ loại bỏ TN tốt hơn. Kết quả từ hình 3 cho thấy, hệ thống vi tảo và bùn hoạt tính với tỷ lệ nuôi cấy 1:0 và 3:1 có tốc độ loại bỏ TN cao hơn so với các tỷ lệ 1:1 và 0:1. Đáng chú ý, trong 3 ngày đầu vận hành, tốc độ loại bỏ TN là 40,1 mg/l/ngày đối với tỷ lệ 1:0 và 32,5 mg/l/ngày đối với tỷ lệ 3:1. Theo F. Gao và cs (2015) [20], trong trường hợp chỉ nuôi cấy *C. vulgaris* thì tốc độ loại bỏ TN là 4,87 mg/l/ngày với nồng độ COD và $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ban đầu là 40 và 5 mg/l (tương tự như tỷ lệ 1:0 trong nghiên cứu này). Tương tự, tỷ lệ 2:1 của hệ thống đồng nuôi cấy đã cải thiện tốc độ loại bỏ TN đến 19 mg/l/ngày [1].

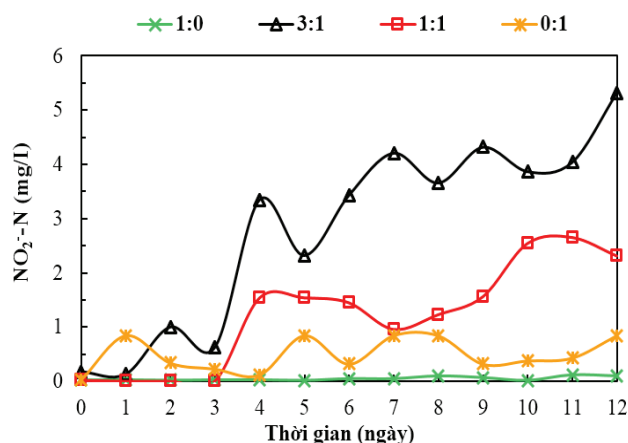


Hình 2. Nồng độ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ thay đổi theo thời gian ở các tỷ lệ khác nhau.

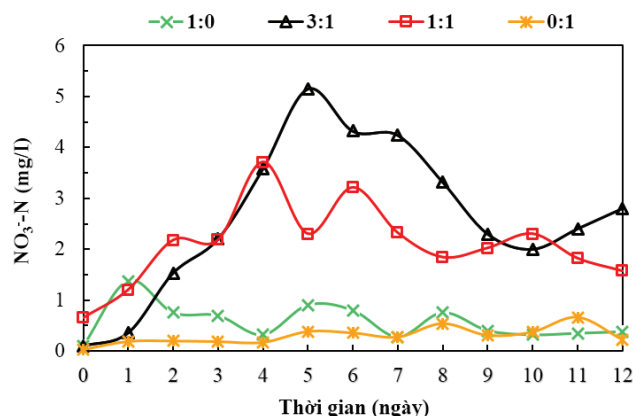


Hình 3. Tốc độ loại bỏ TN ở các tỷ lệ khác nhau.

Trong quá trình hoạt tính bùn thông thường, một phần ammonium sẽ chuyển thành nitrit hoặc nitrat bởi vì khuẩn nitrat hóa [21]. Kết quả nghiên cứu cho thấy, NO_2^- -N, NO_3^- -N xuất hiện qua các ngày tiếp theo do quá trình nitrat hóa xảy ra trong các bể chứa cả vi tảo và bùn hoạt tính (hình 4, 5). Nồng độ NO_2^- -N và NO_3^- -N rất thấp trong ngày đầu, ứng với các tỷ lệ 1:0, 3:1, 1:1, 0:1 lần lượt là 0,03, 0,18, 0,02, 0,02 mg/l; và 0,1, 0,1, 0,65, 0,03 mg/l. Sau đó, nồng độ bắt đầu tăng dần đối với tất cả hệ đồng nuôi cấy. Nồng độ lớn nhất của NO_2^- -N và NO_3^- -N đạt được lần lượt là 5,32 và 5,15 mg/l trong tỷ lệ 3:1. Ở tỷ lệ 0:1, khả năng đồng hóa NH_4^+ -N được biểu thị thấp cũng như nồng độ của NO_2^- -N và NO_3^- -N rất nhỏ do lượng oxy được cung cấp không đủ ($\text{DO} < 0,5$ mg/l). Điều này đúng với nghiên cứu của Nguyen và cs (2016) [17] khi cho rằng quá trình nitrat hóa đạt hiệu quả cao ở $\text{DO} > 0,5$ mg/l. Tương tự, nồng độ NH_4^+ -N ở tỷ lệ nuôi cấy 1:0 giảm từ 190 mg/l xuống 32 mg/l, đạt hiệu quả xử lý tới 84% sau 4 ngày vận hành, và ngày cuối cùng vận hành nồng độ NH_4^+ -N chỉ còn 4 mg/l (hình 2). Điều này chỉ ra rằng sự đồng hóa nitơ trong sinh khối là con đường chính để xử lý nitơ.



Hình 4. Nồng độ NO_2^- -N thay đổi theo thời gian ở các tỷ lệ khác nhau.



Hình 5. Nồng độ NO_3^- -N thay đổi theo thời gian ở các tỷ lệ khác nhau.

Cơ chế loại bỏ nitơ cũng được miêu tả qua bảng 1. Sự cộng sinh của vi tảo và vi khuẩn xảy ra trong hệ thống đồng nuôi cấy; do đó oxy được giải phóng từ quá trình quang hợp của vi tảo đã được vi khuẩn tiêu thụ cho quá trình nitrat hóa. Tuy nhiên, nồng độ NO_3^- -N không cao và thực tế này là do quá trình khử nitơ hoặc đồng hóa NO_3^- -N của vi tảo. Theo J. Kim và cs (2010) [22], vi tảo có thể sử dụng NO_3^- -N như một nguồn dinh dưỡng để tổng hợp tế bào khi nguồn NH_4^+ -N cạn kiệt. Nói chung, quá trình đồng hóa đã đóng góp chủ yếu cho việc loại bỏ nitơ. Tỷ lệ đồng hóa nitơ bởi vi tảo tỷ lệ thuận với lượng vi tảo có trong hệ nuôi cấy. Tỷ lệ vi tảo cao dẫn đến sự đồng hóa nitơ trong sinh khối cao hơn. So với bùn hoạt tính, vi tảo đóng vai trò chủ đạo trong quá trình đồng hóa nitơ. Thực vậy, khi xem xét tỷ lệ 0:1, quá trình khử nitơ và đồng hóa nitơ đạt 9,3 và 13,5%. Điều này cho thấy hiệu quả loại bỏ TN thấp.

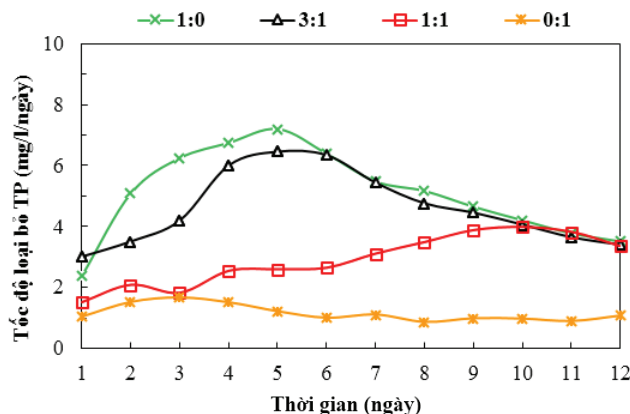
Bảng 1. Cơ chế loại bỏ nitơ của các tỷ lệ vi tảo và bùn hoạt tính khác nhau.

Cơ chế loại bỏ nitơ	1:0	3:1	1:1	0:1
TN còn lại (%)	4,8	12,7	15,2	77,2
N - khử nitơ (%)	0,6	8,6	20,3	9,3
N - đồng hóa bởi vi tảo (%)	94,6	66,8	54,0	0,0
N - đồng hóa bởi vi khuẩn (%)	0,0	11,9	10,5	13,5

Trong các hệ thống đồng nuôi cấy, tỷ lệ nuôi cấy có phần bùn hoạt tính cao hơn cung cấp cho quá trình khử nitơ tốt hơn. Nồng độ DO trong pha sáng đo được lớn hơn 4 mg/l gây cản trở quá trình khử nitơ. Quá trình khử nitơ có thể xảy ra trong pha tối vì $\text{DO} < 0,5$ mg/l. Tuy nhiên, điều này xảy ra kém ở tỷ lệ 3:1, do cấu trúc liên kết được hình thành giữa bùn và vi tảo. Cấu trúc như vậy giúp vi khuẩn thu đủ được O_2 thải ra từ vi tảo, nó cũng có thể cản trở vi khuẩn tiếp xúc với vùng thiếu khí và ức chế quá trình khử nitơ [23]. Theo nghiên cứu của M. Wang và cs (2015) [24], việc thêm cacbon hữu cơ để đạt tỷ lệ COD/N là 3,5:1 thu được việc loại

bỏ nitơ từ quá trình khử nitơ là 80%. Vì vậy, tỷ lệ COD/N thấp (2,5:1) từ nước thải được sử dụng trong nghiên cứu này cũng là nguyên nhân dẫn đến quá trình khử nitơ thấp. Nhìn chung, những kết quả này chỉ ra rằng, tỷ lệ COD/N và tỷ lệ bùn hoạt tính ảnh hưởng đến quá trình khử nitơ và tỷ lệ vi tảo ảnh hưởng đối với quá trình đồng hóa nitơ.

Ngoài nitơ, photpho cũng đóng vai trò quan trọng đối với sự phát triển của vi tảo bởi vì nó là nhân tố quan trọng cho sự trao đổi chất của tế bào. Vi sinh vật *Polyphosphat-accumulating* (PAOs) là một nhóm quan trọng trong bùn hoạt tính giữ chức năng loại bỏ photpho [15, 25, 26]. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ thống nuôi cấy chỉ có vi tảo và hệ thống đồng nuôi cấy đã loại bỏ được TP ở mức độ cao hơn so với hệ thống chỉ có bùn hoạt tính. Nhìn chung, TP được loại bỏ tăng dần tỷ lệ với lượng vi tảo có trong hệ thống đồng nuôi cấy. Đối với tỷ lệ 0:1, TP được loại bỏ không đáng kể, có thể là do thiếu sự có mặt của PAOs [27]. Trong nuôi cấy vi tảo, TP có thể được tích lũy trong sinh khối và đây là cơ chế chủ yếu [16]. Vì vậy, trong nghiên cứu này, việc loại bỏ TP cao nhất là đối với nuôi cấy tảo đơn lẻ (tỷ lệ 1:0) xử lý 98,8% TP sau 9 ngày. Trong khi đó, đối với các hệ đồng nuôi cấy, hiệu suất loại bỏ của tỷ lệ 3:1, 1:1 lần lượt là 97,5% và 77,2%. Kết quả này chỉ ra rằng, vi khuẩn không đóng góp nhiều trong việc loại bỏ photpho so với vi tảo.



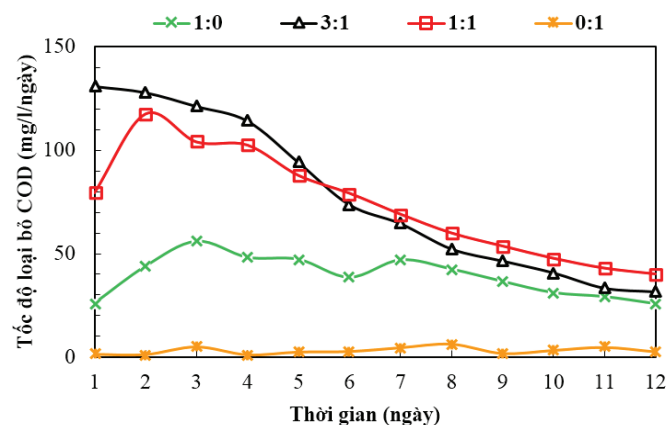
Hình 6. Tốc độ loại bỏ TP của các tỷ lệ khác nhau.

Nghiên cứu của I. De Godos và cs (2009) [9], cho thấy pH và DO cũng ảnh hưởng đến hiệu quả xử lý TP. Photpho có thể bị kết tủa ở pH>8 và mức DO cao. Trong nghiên cứu này, pH>8 và DO>4 mg/l đối với các tỷ lệ 1:0 và 3:1 trong suốt giai đoạn tăng trưởng. Điều này có nghĩa là việc kết tủa photphat đã góp phần làm giảm nồng độ photpho; tuy nhiên, cơ chế này xuất hiện rất thấp trong hệ thống đồng nuôi cấy [14]. Hình 6 cho thấy tốc độ loại bỏ TP trong khoảng từ 1,6 đến 7,2 mg/l/ngày, cao hơn kết quả của [1] (1,3 mg/l/ngày). Điều này có thể được giải thích là do nồng độ COD được

sử dụng trong nghiên cứu cao hơn (COD=500 mg/l, TP=45 mg/l), trong nghiên cứu của G. Mujtaba và cs (2017) [1] có nồng độ thấp hơn (COD=60 mg/l, TP=1,3 mg/l). Mặc dù nuôi cấy vi tảo đơn lẻ có tỷ lệ loại bỏ TP cao, kết quả thu được cho thấy tỷ lệ 3:1 của hệ đồng nuôi cấy cũng có tính khả thi cao trong việc loại bỏ photpho [28].

3.2. Loại bỏ chất hữu cơ

Chất hữu cơ cung cấp nguồn cacbon cho tế bào tổng hợp và dự trữ năng lượng. Đồng nuôi cấy có thể cũng tích lũy cacbon từ COD cho những mục đích này. Kết quả cho thấy, việc loại bỏ COD qua nuôi cấy vi tảo đơn lẻ và đồng nuôi cấy tốt hơn nuôi cấy bùn đơn lẻ. Điều này được cho là các bể PBR được vận hành dưới điều kiện quang dưỡng giúp vi tảo phát triển và hấp thu [29].



Hình 7. Tốc độ loại bỏ COD của các tỷ lệ khác nhau.

Đối với tỷ lệ 3:1 và 1:1, sau 4 ngày vận hành, nồng độ COD giảm 85-96% và nồng độ COD còn lại là 19 và 74 mg/l. Acetate được sử dụng trong nghiên cứu này là hợp chất dễ phân hủy sinh học, nó có thể là chất nền cho cả vi tảo và bùn hoạt tính trong hệ đồng nuôi cấy [14]. Nồng độ COD của tỷ lệ 3:1 tăng dần sau khi đường cong tăng trưởng sinh khối đạt đến giai đoạn chết vì hô hấp nội sinh của vi tảo và vi khuẩn. Tốc độ loại bỏ COD cao nhất ở tỷ lệ 3:1 với tốc độ loại bỏ riêng là 132,7 mg/l/ngày. Tỷ lệ này thích hợp để thúc đẩy sự cộng sinh giữa vi tảo và vi khuẩn. Vi khuẩn dị dưỡng có thể nhanh chóng chuyển hóa cacbon hữu cơ được sản xuất bởi vi tảo [26, 30, 31]. Tỷ lệ 3:1 và 1:1 cho thấy tốc độ loại bỏ COD cao hơn đáng kể so với các tỷ lệ khác, lần lượt là 131 và 118 mg/l/ngày (hình 7). Tuy nhiên, những giá trị này lại thấp hơn tốc độ loại bỏ COD của S. Zhu và cs (2019) [14] (930 mg/l/ngày). So sánh với nghiên cứu này, Zhu và cs đã sử dụng nước thải có tỷ lệ COD/N (4,3:1) cao hơn, sục khí CO₂ 2% và tỷ lệ nuôi cấy 1:1. Kết quả này chỉ ra tốc độ loại bỏ COD phụ thuộc vào các yếu tố như tải lượng COD, tỷ lệ vi tảo và bùn hoạt tính, và điều kiện tác động của hệ

đồng nuôi cấy. Mặc dù sục khí không được cung cấp trong các PBR, COD vẫn được loại bỏ tốt nhất ở tỷ lệ 3:1 và 1:1, giúp tiết kiệm chi phí vận hành. Tốc độ loại bỏ của tỷ lệ 1:1 thấp hơn tỷ lệ 3:1. DO của tỷ lệ 1:1 thấp (<1 mg/l) và rất có thể nó không đủ để vi khuẩn hô hấp nhằm khoáng hóa chất hữu cơ. Tương tự cho tỷ lệ 0:1, nồng độ $DO < 0,5$ mg/l do đó dẫn đến hiệu quả loại bỏ COD thấp. Nồng độ DO từ 2 đến 4 mg/l trong bể hiếu khí của quá trình hoạt tính bùn là yêu cầu quan trọng để loại bỏ hiệu quả COD [32]. Đối với tỷ lệ 1:0, COD giảm từ 496 đến 156 mg/l sau 8 ngày, hiệu suất loại bỏ COD tương đối thấp. Đó là do thiếu vi khuẩn và vi tảo tham gia vào loại bỏ COD. Nhìn chung các phát hiện này đã củng cố vai trò cộng sinh của vi tảo và bùn hoạt tính để tăng hiệu quả loại bỏ COD trong hệ đồng nuôi cấy.

4. Kết luận

Khi vận hành ở tỷ lệ vi tảo/vi khuẩn tốt nhất, việc xử lý nước thải sẽ được cải thiện đáng kể. Kết quả nghiên cứu cho thấy, tỷ lệ nuôi cấy vi tảo và bùn hoạt tính ảnh hưởng đến việc loại bỏ chất dinh dưỡng và chất hữu cơ. Tỷ lệ 3:1 được xác định là tỷ lệ tốt nhất trong xử lý các loại nước thải có chu kỳ sáng tối, thành phần COD/N tương tự trong nghiên cứu này. Trong đó, vi tảo đóng vai trò quan trọng trong việc loại bỏ chất dinh dưỡng thông qua quá trình đồng hoá trong hệ thống vi tảo-bùn hoạt tính hỗn hợp và hệ thống vi sinh vật đơn lẻ. Ngoài ra, bùn hoạt tính cũng góp phần vào quá trình cải thiện hiệu quả loại bỏ nitơ và chất hữu cơ. Tỷ lệ 3:1 cho thấy hiệu quả loại bỏ COD, TN và TP lần lượt là 96%, 90% và 97,5% tương ứng với thời gian vận hành là 6, 9 và 4 ngày.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển KH&CN Quốc gia (NAFOSTED) trong khuôn khổ đề tài mã số 105.99-2019.27. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] G. Mujtaba, K. Lee (2017), "Treatment of real wastewater using co-culture of immobilized *Chlorella vulgaris* and suspended activated sludge", *Water Res.*, **120**, pp.174-184, DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.078.

[2] A.F. Clarens, E.P. Resurreccion, M.A. White, et al. (2010), "Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks", *Environ. Sci. Technol.*, **44**(5), pp.1813-1819, DOI: 10.1021/es902838n.

[3] T.M. Mata, A.A. Martins, N.S. Caetano (2010), "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(1), pp.217-232, DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.020.

[4] H. Jia, Q. Yuan (2018), "Nitrogen removal in photo sequence batch reactor using algae-bacteria consortium", *J. Water Process Eng.*, **26**, pp.108-115, DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.003.

[5] Y. Zhang, B. Min, L. Huang, I. Angelidaki (2011), "Electricity generation and microbial community response to substrate changes in microbial fuel cell", *Bioresour. Technol.*, **102**(2), pp.1166-1173.

[6] A. Beuckels, E. Smolders, K. Muylaert (2015), "Nitrogen availability influences phosphorus removal in microalgae-based wastewater treatment", *Water Res.*, **77**, pp.98-106, DOI: 10.1016/j.watres.2015.03.018.

[7] K. Liu, J. Li, H. Qiao, et al. (2012), "Immobilization of *Chlorella sorokiniana* GXNN 01 in alginate for removal of N and P from synthetic wastewater", *Bioresour. Technol.*, **114**, pp.26-32, DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.003.

[8] Q. Yuan, H. Li, Z. Wei, et al. (2020), "Isolation, structures and biological activities of polysaccharides from *Chlorella*: A review", *International Journal of Biological Macromolecules*, **163**, pp.2199-2209, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.080.

[9] I. de Godos, S. Blanco, P.A. García-Encina, et al. (2009), "Longterm operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates", *Bioresour. Technol.*, **100**(19), pp.4332-4339, DOI: 10.1016/j.biortech.2009.04.016.

[10] B. Guieysse, X. Borde, R. Munoz, et al. (2002), "Influence of the initial composition of algal bacterial microcosms on the degradation of salicylate in fed batch culture", *Biotechnol. Lett.*, **24**, pp.531-538, DOI: 10.1023/A:1014847616212.

[11] W.J. Oswald (1988), "Micro-algae and waste-water treatment", *Micro-algal Biotechnology*, Cambridge University Press, pp.305-328.

[12] R. Munoz, C. Kollner, B. Guieysse, et al. (2003), "Salicylate biodegradation by various algal-bacterial consortia under photosynthetic oxygenation", *Biotechnol. Lett.*, **25**(22), pp.1905-1911, DOI: 10.1023/B:BILE.0000003980.96235.f0.

[13] R. Muñoz, B. Guieysse (2006), "Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review", *Water Res.*, **40**(15), pp.2799-2815, DOI: 10.1016/j.watres.2006.06.011.

[14] S. Zhu, L. Qin, P. Feng, et al. (2019), "Treatment of low C/N ratio wastewater and biomass production using co-culture of *Chlorella vulgaris* and activated sludge in a batch photobioreactor", *Bioresour. Technol.*, **274**, pp.313-320, DOI: 10.1016/j.biortech.2018.10.034.

[15] S. Huo, M. Kong, F. Zhu, et al. (2020), "Co-culture of *Chlorella* and wastewater-borne bacteria in vinegar production wastewater: Enhancement of nutrients removal and influence of algal biomass generation", *Algal Res.*, **45**, DOI: 10.1016/j.algal.2019.101744.

[16] Y. Su, A. Mennerich, B. Urban (2012), "Synergistic cooperation between wastewater-born algae and activated sludge for wastewater treatment: Influence of algae and sludge inoculation ratios", *Bioresour. Technol.*, **105**, pp.67-73, DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.113.

[17] T.T. Nguyen, X.T. Bui, M.D. Pham, et al. (2016), "Effect of Tris-(hydroxymethyl)-amino methane on microalgae biomass growth in a photobioreactor", *Bioresour. Technol.*, **208**, pp.1-6, DOI: 10.1016/j.biortech.2016.02.043.

- [18] H.N.P. Vo, X.T. Bui, T.T. Nguyen, et al. (2018), "Effects of nutrient ratios and carbon dioxide bio-sequestration on biomass growth of *Chlorella sp.* in bubble column photobioreactor", *J. Environ. Manage.*, **219**, pp.1-8, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.04.109.
- [19] American Public Health Association (1998), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- [20] F. Gao, Z.H. Yang, C. Li, et al. (2015), "A novel algal biofilm membrane photobioreactor attached microalgae growth and nutrients removal from secondary effluent", *Bioresour. Technol.*, **179**, pp.8-12, DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.108.
- [21] N.G.A.I. Karya, N.P. van der Steen, P.N.L. Lens (2013), "Photo-oxygenation to support nitrification in an algal-bacterial consortium treating artificial wastewater", *Bioresour. Technol.*, **134**, pp.244-250, DOI: 10.1016/j.biortech.2013.02.005.
- [22] J. Kim, B.P. Lingaraju, R. Rheume, et al. (2010), "Removal of ammonia from wastewater effluent by *Chlorella vulgaris*", *Tsinghua Sci. Technol.*, **15**(4), pp.391-396, DOI: 10.1016/S1007-0214(10)70078-X.
- [23] Z. Guo, Y.W. Tong (2014), "The interactions between *Chlorella vulgaris* and algal symbiotic bacteria under photoautotrophic and photoheterotrophic conditions", *J. Appl. Phycol.*, **26**, pp.1483-1492, DOI: 10.1007/s10811-013-0186-1.
- [24] M. Wang, H. Yang, S.J. Ergas, et al. (2015), "A novel shortcut nitrogen removal process using an algal-bacterial consortium in a photo-sequencing batch reactor (PSBR)", *Water Res.*, **87**, pp.38-48, DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.016.
- [25] G. Gutzeit, D. Lorch, A. Weber, et al. (2005), "Biofloculent algal-bacterial biomass improves low-cost wastewater treatment", *Water Sci. Technol.*, **52**(12), pp.9-18, DOI: 10.2166/wst.2005.0415.
- [26] X. Ji, M. Jiang, J. Zhang, et al. (2018), "The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater", *Bioresour. Technol.*, **247**, pp.44-50, DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.074.
- [27] J. Church, H. Ryu, W.H. Lee (2017), "An innovative symbiotic microalgae-IFAS process for nutrient removal and photo-oxygenation: Multiscale investigations using microelectrodes and next-generation molecular tools", *Proceedings of the Water Environment Federation 2017*, **16**, pp.161-169 DOI: 10.2175/193864717822155777.
- [28] L. Delgadillo-Mirquez, F. Lopes, B. Taidi, et al. (2016), "Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture", *Biotechnol. Reports*, **11**, pp.18-26, DOI: 10.1016/j.btre.2016.04.003.
- [29] E. Sforza, M. Pastore, A. Spagni, et al. (2018), "Microalgae-bacteria gas exchange in wastewater: How mixotrophy may reduce the oxygen supply for bacteria", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **25**, pp.28004-28014, DOI: 10.1007/s11356-018-2834-0.
- [30] G. Quijano, J.S. Arcila, G. Buitrón (2017), "Microalgalbacterial aggregates: Applications and perspectives for wastewater treatment", *Biotechnol. Adv.*, **35**(6), pp.772-781, DOI: 10.1016/j.biotechadv.2017.07.003.
- [31] B.T. Higgins, I. Gennity, P.S. Fitzgerald, et al. (2018), "Algal-bacterial synergy in treatment of winery wastewater", *NPJ Clean Water*, **6**, pp.1-10, DOI: 10.1038/s41545-018-0005-y.
- [32] W. Metcalf, C. Eddy (2003), *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw Hill, New York, 1819pp.