



## ẢNH HƯỞNG CỦA THỜI GIAN LƯU NƯỚC ĐẾN HIỆU QUẢ KHỬ CHẤT HỮU CƠ VÀ ĐẶC TÍNH BẮN MÀNG CỦA HỆ THỐNG SPONGE MEMBRANE BIOREACTOR XỬ LÝ NƯỚC THẢI AO NUÔI CÁ TRÁ

Lê Nguyễn Tuyết Nguyễn<sup>1</sup> và Bùi Xuân Thành<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Khoa Môi trường, Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh

### Thông tin chung:

Ngày nhận: 23/05/2013

Ngày chấp nhận: 24/12/2013

### Title:

Effects of hydraulic retention time on organic removal and membrane fouling in sponge membrane bioreactor treating catfish pond wastewater

### Từ khóa:

Bể sinh học màng có giá thể Sponge (Sponge MBR), thời gian lưu nước (HRT), áp suất chuyển màng (TMP), nước thải ao nuôi cá tra và sự bẩn màng

### Keywords:

Sponge membrane bioreactor (Sponge MBR), hydraulic retention time (HRT), Trans-membrane pressure (TMP), catfish pond wastewater and membrane fouling

### ABSTRACT

Performance of the sponge MBR with a moving-cube sponge medium (20% v/v) was evaluated at different HRT for removing organic from catfish pond wastewater and membrane fouling. The sponge MBR was operated at different HRT values of 8, 4 and 2 hours, corresponding to membrane fluxes of 5, 10 and 20 L/m<sup>2</sup>.h, respectively. The results showed that the COD removal efficiencies were maintained at 94%, 93% and 87% at a HRT of 8, 4 and 2 hours, respectively, indicating that HRT affected the permeate quality in an inversely proportion with HRT (h). This fouling rate was defined by the increase of the TMP according to operating time (kPa/day). The freely movement of sponges inside the reactor could reduce membrane fouling due to sweeping of sponge media on membrane surface and attaching of MLSS on the interior and surface of sponge media.

### TÓM TẮT

Hệ thống Sponge Membrane Bioreactor (Sponge MBR) sử dụng giá thể dạng bông xốp di động, giá thể chiếm 20% thể tích bể phản ứng, được vận hành ở các thời gian lưu nước (HRT) khác nhau nhằm đánh giá hiệu quả xử lý chất hữu cơ và đặc tính bẩn màng của hệ thống xử lý nước thải ao nuôi cá tra. Hệ thống sponge MBR được vận hành ở HRT 8, 4 và 2 giờ tương ứng với thông lượng 5, 10 và 20 L/m<sup>2</sup>.h. Hiệu quả xử lý COD đạt 94% ở HRT 8 và 4 giờ, còn ở HRT 2 giờ chỉ đạt 87%. Kết quả này cho thấy sự thay đổi HRT làm ảnh hưởng đến hiệu quả xử lý COD của hệ thống sponge MBR. Ngoài ra tốc độ bẩn màng càng tăng khi HRT càng giảm. Tốc độ bẩn màng được tính toán bằng biến thiên của áp suất chuyển màng (TMP) theo thời gian vận hành hệ thống (kPa/ngày). Các giá thể chuyển động tự do trong bể phản ứng giúp giảm bẩn màng do sự cọ sát làm sạch bề mặt màng và sự bám dính bùn hoạt tính trên bề mặt và bên trong giá thể.

## 1 GIỚI THIỆU

Áp dụng phương pháp xử lý sinh học các chất hữu cơ và dinh dưỡng trong nước thải ao nuôi cá tra được xem là phù hợp vì trong nước thải này thành phần ô nhiễm chủ yếu là các chất dễ phân hủy sinh học từ thức ăn thừa của cá, chất bài tiết

của cá... Phương pháp sinh học phổ biến là bùn hoạt tính, lọc sinh học, hồ sinh học và đất ngập nước nhân tạo. Tuy nhiên, các hệ thống trên đòi hỏi phải có diện tích xây dựng công trình rộng rãi, bị giới hạn bởi thời gian vận hành vì còn phụ thuộc vào thời gian xử lý nước ao nuôi cá sau khi thu

hoạch cá để tiếp tục vụ nuôi kế tiếp. Trước thực trạng đó thì hệ thống nhỏ gọn, hiệu quả, linh hoạt và có thể xử lý liên tục trong suốt vụ nuôi được đề xuất là hệ thống sinh học màng (Membrane Bioreactor - MBR). Công nghệ MBR có nhiều ưu điểm hơn so với bùn hoạt tính thông thường. Ưu điểm vượt trội của MBR là chất lượng nước thải sau xử lý rất cao có thể tái sử dụng nước thải, diện tích hệ thống xử lý nhỏ gọn, thời gian lưu bùn dài, lượng bùn sinh ra thấp và vận hành linh hoạt (Visvanathan *et al.*, 2000). Tuy nhiên, hạn chế của công nghệ MBR là vấn đề bản màng. Vì thế, đã có nhiều nghiên cứu nhằm phát triển các ưu điểm của công nghệ MBR vào lĩnh vực xử lý tái sử dụng nước thải để góp phần vào việc sử dụng hiệu quả và tiết kiệm tài nguyên nước. Một số nghiên cứu phát triển công nghệ MBR bằng cách kết hợp với các loại giá thể lơ lửng gọi là sponge MBR. Sombatsompop *et al.* (2006) đã nghiên cứu so sánh hiệu quả xử lý của các hệ thống MBR với các loại giá thể khác nhau và điều kiện vận hành khác nhau (HRT, MLSS). Kết quả thu được hiệu suất xử lý của hệ thống sponge MBR là cao hơn so với MBR thông thường và MBR với giá thể cố định, ở HRT 8, 6, 4 và 2 giờ, hiệu suất xử lý chất hữu cơ đạt 97-98%. Điều này cho thấy công nghệ MBR với giá thể sponge di động đã phát huy tác dụng tăng cường hiệu quả xử lý của hệ thống MBR thông thường. Nghiên cứu của Jamal Khan *và ctv.* (2011) cũng so sánh hiệu quả xử lý của MBR với sponge MBR. Kết quả cho thấy rằng hiệu quả loại bỏ các TN và TP trong sponge MBR là 89% và 58% cao hơn trong MBR thông thường. Từ kết quả trên suy ra rằng sự hiện diện của giá thể giúp sinh khối phát triển phức tạp bên trong các giá thể sponge trong bể MBR, giúp cải thiện khả năng xử lý TN và TP trong nước thải. Basu và Huck (2005) đã nghiên cứu ảnh hưởng của giá thể trong hệ thống MBR nhúng chìm. Trong nghiên cứu tập trung đánh giá tốc độ bản màng và chất lượng nước thải sau khi qua màng. Kết quả là tốc độ bản màng tăng gấp đôi khi không có các giá thể trong bể. Tác giả cũng cho rằng các giá thể này tăng cường cọ rửa bề mặt màng và giúp tăng trưởng các màng sinh học trên các giá thể, cải thiện hiệu quả xử lý của hệ thống MBR.

Hệ thống sponge MBR là một hệ thống MBR kết hợp giá thể sponge chuyển động lơ lửng trong hỗn hợp bùn hoạt tính, tạo điều kiện cho loại hình tăng trưởng bám dính của sinh khối phát triển song song với sinh khối tăng trưởng lơ lửng trong bể bùn hoạt tính, và khả năng phân tách chất lỏng/rắn của màng lọc. Ưu điểm của sponge MBR là nồng

độ sinh khối cao giúp hệ thống vận hành ở tải trọng cao giảm được diện tích bề phản ứng và tăng hiệu quả xử lý của hệ thống (Leiknes *et al.*, 2001, Thanh *và ctv.*, 2009). Các giá thể sponge còn giúp giảm bản màng do sự bám dính của các chất lơ lửng và chất keo lên sponge và do sự cọ sát giữa sponge với bề mặt màng làm giảm lớp bánh bùn trên bề mặt màng (Chae *et al.*, 2004; Ngo *và ctv.*, 2006; Guo *et al.*, 2009).

Mục tiêu của nghiên cứu này nhằm đánh giá sự ảnh hưởng của thời gian lưu nước đến hiệu quả xử lý chất hữu cơ và đặc tính bản màng của hệ thống sponge MBR xử lý nước thải ao nuôi cá tra.

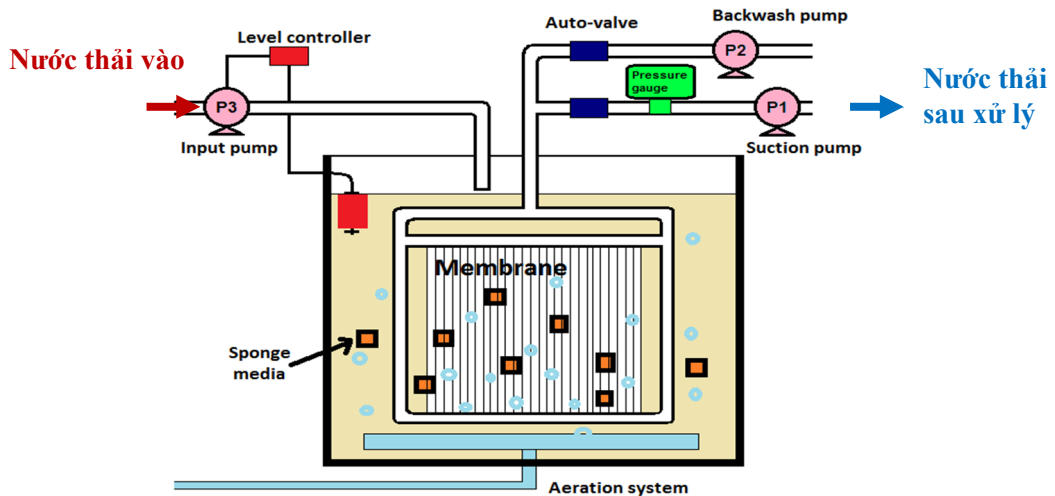
## 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1 Vật liệu nghiên cứu

Nước ao nuôi cá tra được lấy từ ao nuôi cá tra ở dọc bờ Nam rạch Tầm Bót thuộc địa bàn Thành phố Long Xuyên, tỉnh An Giang. Ao nuôi có diện tích 800 m<sup>2</sup>, độ sâu 1.5-2 m, mật độ thả cá là 30 con/m<sup>2</sup>, trọng lượng cá lúc bắt đầu lấy nước ao làm nghiên cứu là khoảng 200-500 g/con và lượng thức ăn là 30 kg/ngày. Nhưng sau khi hệ thống vận hành được một thời gian thì từ ngày thứ 88 trở đi do lũ lụt (cuối năm 2011) tràn vào ao nên hệ thống được vận hành với nước thải ao nuôi cá tra nhân tạo. Nước thải nhân tạo được pha chế từ nước cấp, thức ăn viên của cá tra và NH<sub>4</sub>Cl. Nồng độ ô nhiễm trung bình của nước thải ao nuôi cá tra và nước thải nhân tạo (có cùng tải lượng ô nhiễm) trong nghiên cứu: TSS 200±82 mg/L, COD 66±29 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 10±5 mg/L, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 0.65±0.81 mg/L, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0.25±0.45 mg/L và TP là 1.69±1.19 mg/L.

### 2.2 Mô hình hệ thống sponge MBR

Bể sponge MBR hoạt động với thể tích hữu dụng là 40 L và 1 module màng nhúng chìm loại micro-membrane (Motimo, China). Kích thước module màng 210 mm x 450 mm và lỗ lọc qua màng là 0.2 µm. Hệ thống màng hoạt động theo chu kỳ 8 phút lọc/2 phút nghỉ. Thời gian lưu bùn (SRT) được kiểm soát là 30 ngày ở các giai đoạn vận hành. Nồng độ oxy hòa tan (DO) được duy trì trong bể sponge MBR ở mức lớn hơn 4 mg/L bằng hệ thống phân phối khí và máy thổi khí có lưu lượng tối đa 75 L/phút (C0-Resun). Áp suất chuyên màng (TMP) của sponge MBR được ghi nhận bởi đồng hồ đo áp (Pressure gauge). Khi TMP đạt tới 0.4 bar thì bơm rửa ngược (Bluewhite C-660P, USA) sẽ hoạt động để loại bỏ các lớp bùn bám trên bề mặt màng. Bơm rửa ngược có lưu lượng Q<sub>RN</sub> = 2Q. Nước rửa ngược là nước sạch chứa sẵn trong thùng (Hình 1).



Hình 1: Sơ đồ nguyên lý hoạt động của hệ thống Sponge MBR

### 2.3 Giá thể sponge

Giá thể dạng xốp (sponge) được làm bằng chất liệu Polyurethane có sẵn ngoài thị trường với tỉ trọng  $18.2 \text{ kg/m}^3$  và được cắt thành hình lập phương  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ , được cho đi chuyển tự do trong bể MBR nhờ vào lực nâng của bọt khí. Giá thể dạng sponge di động làm bằng chất liệu Polyurethane đã được lựa chọn cho hiệu quả xử lý tối ưu theo nghiên cứu của Guo *et al.* (2010). Kích thước của giá thể sponge ở  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  cũng được Tien và *ctv.* (2010) nghiên cứu và đưa ra kết luận mang lại hiệu quả xử lý tốt nhất.

Bùn nuôi cấy ban đầu cho bể sponge MBR là bùn được lấy từ bể bùn hoạt tính thông thường (70% v/v) và bùn đáy ao cá tra (30% v/v). Nồng độ MLSS ban đầu của sponge MBR là xấp xỉ  $6000 \text{ mg/L}$ . Sau khi hệ thống MBR hoạt động thích nghi với điều kiện vận hành trên, hiệu quả xử lý COD của hệ thống ổn định, thì cho thêm giá thể sponge vào bể MBR với số lượng bằng 20% thể tích hữu dụng của bể MBR.

### 2.4 Điều kiện vận hành

Trước tiên, hệ thống MBR được vận hành thích nghi trong điều kiện thông thường (không có sponge) ở HRT 8 giờ, nước thải ao nuôi cá tra với nồng độ ô nhiễm như mục 2.1. Sau 26 ngày khi hệ thống MBR đã thích nghi tốt với điều kiện vận hành (thông qua sự ổn định của hiệu suất xử lý COD của hệ thống MBR).

Sau khi hệ thống hoạt động thích nghi ta thực hiện thí nghiệm chính. Bể MBR được thêm vào 20 % giá thể sponge so với thể tích bể để tiến hành nghiên cứu trải qua 3 giai đoạn vận hành với các

HRT 8, 4 và 2 giờ tương ứng thông lượng là 5, 10 và  $20 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ , và lưu lượng dòng ra là 120, 240 và  $480 \text{ L/ngày}$ , với thời gian lưu bùn (SRT) là 30 ngày. Hệ thống sponge MBR được vận hành với các HRT 8, 4 và 2 giờ.

### 2.5 Phương pháp phân tích

Phương pháp phân tích COD theo tiêu chuẩn APHA (1998).

Phương pháp phân tích MLSS trong sponge: Sấy khô cốc sứ ở  $105^\circ\text{C}$  đến khối lượng không đổi và sau đó đem cân ta được  $m_0$  (mg). Lấy ra 10 miếng sponge khỏi bể sponge MBR, rửa thật sạch bùn trong sponge vào 100 mL nước cất. Cho nước bùn này vào cốc sứ, đem nung ở  $105^\circ\text{C}$  đến khi khối lượng không đổi. Cân khối lượng sau khi nung ta được  $m_1$  (mg/10sponge), mà trong bể sponge MBR sử dụng 1000 miếng sponge và thể tích hữu dụng của bể là 40 L nên suy ra:  $\text{MLSS} = (m_1 - m_0) \times 100/40 = a$  (mg/L).

## 3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1 Hiệu quả xử lý COD

Nồng độ COD đầu ra trung bình tương ứng với các HRT ở 8, 4 và 2 giờ là 3, 5 và  $11 \text{ mg/L}$ . Hiệu suất xử lý COD của hệ thống sponge MBR duy trì mức trung bình 94%, 93% khi vận hành với HRT 8 và 4 giờ, nhưng chỉ đạt 87% ở HRT 2 giờ. Khi hệ thống vận hành với HRT 8 và 4 giờ có hiệu suất xử lý tương đương nhau nhưng HRT hơn kém nhau một nửa là vì trong bể MBR cơ chế phân hủy chất hữu cơ có trong nước thải phần lớn nhờ vào bùn hoạt tính, mà nồng độ MLSS ban đầu của sponge MBR là xấp xỉ  $6000 \text{ mg/L}$ . Do đó, khi vận hành hệ thống với HRT 4 giờ thì hiệu quả xử lý vẫn cao.

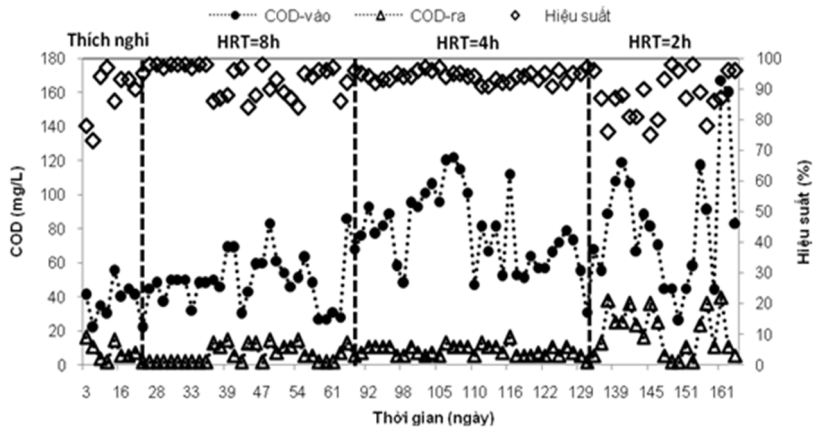
Nhưng khi vận hành hệ thống với HRT ở 2 giờ thì do HRT quá ngắn không đủ thời gian cho các vi sinh vật trong bùn hoạt tính và trong giá thể tiêu thụ và phân hủy các chất hữu cơ trong nước thải đầu vào hệ thống. Qua kết quả trên ta thấy nồng độ COD trong nước thải sau xử lý đạt QCVN 11:2008/BTNMT (COD = 50 mg/L), QCVN 08:2008/BTNMT (COD = 10 mg/L) và cả các tiêu chuẩn về tái sử dụng nước thải của US EPA (< 20 mg/L) [QCVN 08:2008/BTNMT, QCVN 11:2008/BTNMT, US.EPA (2004)].

Côté và ctv. (1997) cũng đã đưa ra kết quả nồng độ COD trong nước thải sau khi xử lý qua hệ thống

MBR sợi rỗng duy trì ở mức dưới 16 mg/L sau khi qua 5 giai đoạn vận hành hệ thống với HRT thay đổi từ 2 đến 24 giờ. Còn đối với nghiên cứu của Guo *et al.* (2008) thì tìm ra được hiệu suất xử lý COD đạt trên 97%.

Mặt khác, ta thấy được một ưu thế lớn của hệ thống sponge MBR là ít bị sốc tải. COD dòng vào có biên động (70±12 mg/L) nhưng COD dòng ra luôn ổn định (dòng ra của ba giai đoạn vận hành với HRT khác nhau có nồng độ trung bình 6.33±3 mg/L), hệ thống vẫn thích nghi tốt khi nồng độ COD đầu vào biến đổi (Hình 2).

**Hình 2: Hiệu suất xử lý COD ở các giai đoạn vận hành**



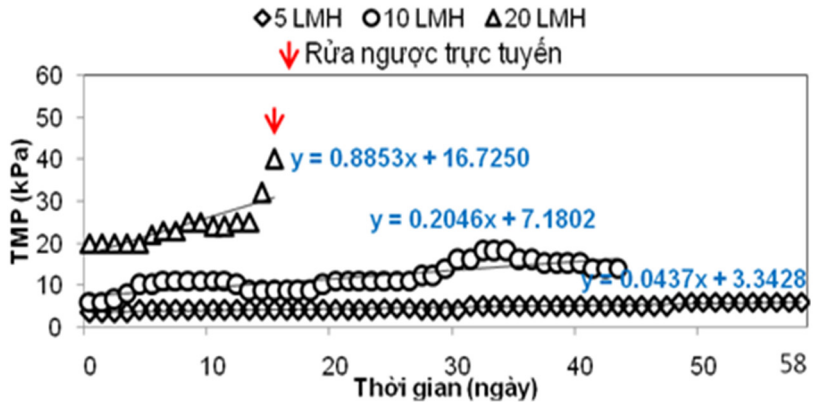
**3.2 Đặc tính bản màng của hệ thống sponge MBR**

Tốc độ bản màng được xác định bằng xu hướng sự gia tăng tổn thất áp lực qua màng theo thời gian (dΔP/dt). Hình 3 cho thấy tốc độ bản màng là 0.0437, 0.2046 và 0.8853 kPa/ngày tương ứng với các thông lượng là 5, 10 và 20 L/m<sup>2</sup>.h. Tốc độ bản màng thấp nhất ở thông lượng 5 L/m<sup>2</sup>.h (HRT 8 giờ) có giá trị là 0.0437 kPa/ngày. Kết quả này cho kết luận là thông lượng tăng tỉ lệ thuận với tốc độ bản màng của hệ thống sponge MBR, hay nói cách

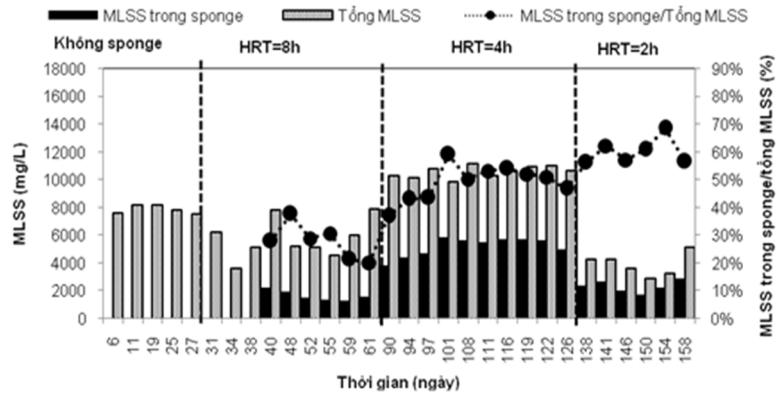
khác là tốc độ bản màng tăng khi HRT giảm, điều này giống với kết luận của một số nghiên cứu trước đây (Cho *et al.*, 2005; Kok-Kwang *et al.*, 2011).

Thông lượng càng tăng thì tốc độ bản màng càng tăng là do bùn sinh học trong bể MBR bám vào và bịt kín lỗ màng làm cho tổn thất áp lực qua màng càng lớn. Khi tốc độ bản màng chậm thì số lần rửa màng ít, giúp cho tuổi thọ của màng tăng cũng như giảm được chi phí đầu tư cho thay mới màng và hóa chất sử dụng cho việc rửa sạch màng.

**Hình 3: Xu hướng TMP theo thời gian của hệ thống sponge MBR**



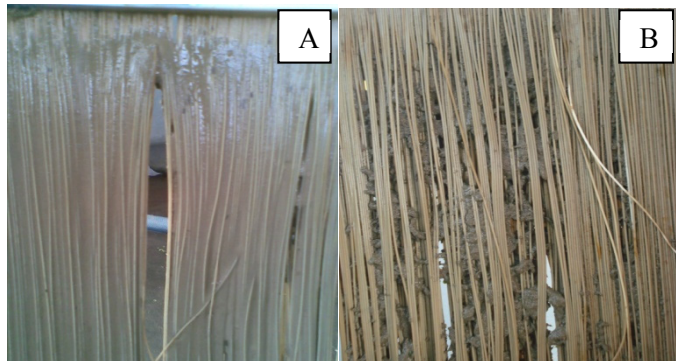
**Hình 4: Hàm lượng MLSS trong sponge so với tổng MLSS trong bể sponge MBR**



Hình 4 thể hiện hàm lượng MLSS trong sponge so với tổng MLSS trong bể sponge MBR chiếm từ 20-70%. Tỷ lệ MLSS trong sponge/Tổng MLSS có xu hướng tăng dần theo thời gian vận hành. Kết quả này cho thấy ưu điểm của sponge trong bể MBR là khi MLSS tập trung trong sponge càng nhiều làm cho MLSS trong bùn lơ lửng càng ít lại và sponge cọ sát với bề mặt màng tạo điều kiện giảm được bẩn màng (Hình 5). Basu và Huck

(2005) đã nghiên cứu ảnh hưởng của giá thể trong hệ thống MBR nhúng chìm. Trong nghiên cứu tập trung đánh giá tốc độ bẩn màng và chất lượng nước thải sau khi qua màng. Kết quả được tìm thấy là tốc độ tắc nghẽn màng tăng gấp đôi khi không có các giá thể trong bể. Các tác giả cũng cho rằng các giá thể này tăng cường cọ rửa bề mặt màng và giúp tăng trưởng các màng sinh học trên các giá thể, cải thiện hiệu quả xử lý của hệ thống MBR.

**Hình 5: Bùn trên bề mặt màng khi không có sponge (A) và khi có sponge (B)**



#### 4 KẾT LUẬN

Kết quả cho thấy hiệu quả xử lý COD của hệ thống sponge MBR ở HRT 8 và 4 giờ đạt 94% và 93%; còn ở HRT 2 giờ chỉ đạt 87%. Khả năng xử lý COD của hệ thống hiệu quả với thời gian lưu nước 4 và 8 giờ.

Thời gian lưu nước liên quan đến thông lượng của hệ thống sponge MBR và ảnh hưởng mạnh đến tốc độ bẩn màng. Tốc độ bẩn màng tỉ lệ nghịch với thời gian lưu nước.

Giá thể sponge thêm vào bể MBR giúp làm giảm được bẩn màng nhờ vào sự bám dính của sinh khối lên bề mặt sponge, đi vào trong sponge và việc chuyển động tự do trong hệ thống tạo điều kiện cọ sát giữa giá thể sponge và bề mặt màng dẫn đến loại bỏ lớp màng vi sinh vật trên bề mặt màng.

Nước thải ao nuôi cá sau khi xử lý có thể tuần hoàn trực tiếp cho ao nuôi cá tra hay một số mục đích sử dụng khác với yêu cầu chất lượng nước phù hợp. Hệ thống nhỏ gọn có khả năng di động (mobile system) để xử lý nước thải các ao nuôi khác nhau phục vụ mục đích tái sử dụng nước thải.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. APHA, AWWA, WEF (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> ed. American Public Health Association, Washington DC.
2. Basu, O. D. and Huck, P. M. (2005). Impact of support media in an integrated biofilter-submerged membrane system. *Water Research*, 39 (17), 4220-4228.
3. Chae, K.J., Yim, S.K., Choi, K.H. (2004). Application of a sponge media (BioCube) process for upgrading and expansion of

- existing caprolactam wastewater treatment plant for nitrogen removal. *Water Sci. Technol.* 50, 163–171.
4. Cho, J., Song, K.G., Lee, S.H., Anh, K.H. (2005). Sequencing anoxic/anaerobic membrane bioreactor (SAM) pilot plant for advanced wastewater treatment. *Desalination* 178 (1-30), 219-225.
  5. Côté, P., Buisson, H., Pound, C. and Arakaki, G. (1997). Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. *Desalination*, 113 (2-3), 189-196.
  6. Guo, W., Ngo, H.-H., Palmer, C.G., Xing, W., Hu, A.Y.-J., Listowski, A. (2009). Roles of sponge sizes and membrane types in a single stage sponge-submerged membrane bioreactor for improving nutrient removal from wastewater for reuse. *Desalination* 249, 672–676.
  7. Guo, W., Ngo, H.-Hao., Dharmawan, F., Palmer, C.G. (2010). Roles of polyurethane foam in aerobic moving and fixed bed bioreactors. *Bioresource Technology*. 101, 1435–1439.
  8. Guo, W.S., Vigneswaran, S., Ngo, H.H., Kandasamy, J. and Yoon, S. (2008). The role of a membrane performance enhancer in a membrane bioreactor: a comparison with other submerged membrane hybrid systems. *Desalination* 231, 305 – 313.
  9. Jamal Khan S., Shazia, I., Sadaf, J., Visvanathan C., Jegatheesan V. (2011). Performance of suspended and sponge MBR systems in treating high strength synthetic wastewater. *Bioresource Technology* 102, 5331–5336.
  10. Kok-Kwang, Ng, Cheng-Fang, L., Sri, C.P., Pui-Kwan, A.H. and Ping-Yi, Y. (2011). Reduced membrane fouling in a novel bio-entrapped membrane reactor for treatment of food and beverage processing wastewater. *Water research* 45, 4269-4278.
  11. Leiknes, T., Ødegaard, H. (2001). The development of a biofilm membrane bioreactor. *Desalination* 202, 135–143.
  12. Ngo, H.H., Nguyen, M.C., Sangvikar, N.G., Hoang, T.T.L., Guo, W.S. (2006). Simple approaches towards a design of an attached-growth sponge bioreactor (AGSB) for wastewater treatment and reuse. *Water Sci. Technol.* 54, 191–197.
  13. QCVN 08:2008/BTNMT. Vietnam national technical regulation for surface water quality.
  14. QCVN 11:2008/BTNMT. Vietnam national technical regulation on the effluent of aquatic products processing industry
  15. Sombatsompop, K., Visvanathan, C. and Aim, R. Ben (2006). Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems. *Desalination*. Volume 201, Issue 1-3, 138-149.
  16. Thanh, B.X., Visvanathana, C., Ben Aim, R. (2009). Characterization of aerobic granular sludge at various organic loadingrates, *Process Biochemistry*, 44(2), 242–245.
  17. Tien Nguyen, T., Ngo, H.H., Guo, W., Johnston, A., Listowski, A. (2010). Effects of sponge size and type on the performance of an up-flow sponge bioreactor in primary treated sewage effluent treatment. *Bioresource Technology* 101, 1416–1420.
  18. US.EPA (2004). Guidelines for Water Reuse, U.S. Environmental Protection Agency, Municipal Support Division, Office of Wastewater Management, Washington, DC. No. 625/R-04/108.
  19. Visvanathan, C., Ben, A., and Parameshwaran, K. (2000). Membrane separation bioreactor for wastewater treatment. *Critical Reviews in Environment Science and Technology* 30 (1), 1-48.