

# Phân lập và đánh giá hiệu suất của chủng vi sinh xử lý hơi phenol trong mô hình lọc sinh học nhỏ giọt

- Nguyễn Thị Kim Anh
- Lê Thị Trà Mi
- Nguyễn Lý Sỹ Phú
- Đặng Diệp Yên Nga
- Tô Thị Hiền

Trường Đại học Khoa học tự nhiên, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 20 tháng 03 năm 2013, nhận đăng ngày 13 tháng 1 năm 2014)

## TÓM TẮT

Đề tài tập trung nghiên cứu chủng vi sinh vật từ bùn hoạt tính có khả năng xử lý khí thải chứa hơi phenol bằng phương pháp lọc sinh học nhỏ giọt (Biotrickling filter). Bằng phương pháp nuôi cấy và phân lập, đề tài đã xác định được hai chủng vi sinh vật chiếm ưu thế trong xử lý hơi phenol là *Bacillus pumilus* và *Bacillus thuringiensis*. Thí nghiệm được tiến hành với nồng độ đầu vào từ 650 - 850 mg/Nm<sup>3</sup> và tốc độ dòng khí là 1.5 L/phút cho thấy hiệu suất xử lý hơi phenol trong dòng khí của hai chủng này khá cao (chủng *Bacillus pumilus* có hiệu suất xử lý khoảng

90% và 92% đối với chủng *Bacillus thuringiensis*). Đồng thời, thí nghiệm tương tự cũng được tiến hành với hỗn hợp chủng vi sinh vật thu được hiệu suất xử lý của thiết bị hơn 80%. Điều này cho thấy chủng vi sinh vật sau phân lập có hiệu suất xử lý cao hơn so với khi chưa phân lập. Trong đó, chủng *B. thuringiensis* có thể xử lý được dòng khí có chứa hơi phenol với nồng độ đầu vào lên đến 3600 mg/Nm<sup>3</sup>, tương ứng tải lượng đầu vào 184,3 g<sub>phenol</sub>.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup>, hiệu suất xử lý đạt 92%.

**Từ khóa:** phenol, lọc sinh học nhỏ giọt, nuôi cấy, phân lập, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus pumilus*...

## MỞ ĐẦU

Phương pháp lọc sinh học nhỏ giọt (Biotrickling filter) đã được nghiên cứu và ứng dụng tại nhiều nơi trên thế giới để xử lý các hợp chất ô nhiễm trong khí thải như: NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, toluene, benzene... [1, 2, 8, 9, 11]. Trong đó, người ta đặc biệt quan tâm đến khả năng xử lý các hợp chất hữu cơ bay hơi (Volatile Organic Compounds – VOCs), những hợp chất khí gây nguy hại nhiều nhất đến sức khỏe con người và môi trường, đặc biệt là phenol và các dẫn xuất của phenol. Phenol là chất khí ô nhiễm độc hại

theo tiêu chuẩn của cơ quan bảo vệ môi trường Hoa Kỳ Clean Air Act quy định ở mục 112 (b) [5-7] và nằm trong danh mục các hợp chất nguy hại (ATSDR, 2005). Đây là nhóm tương đối bền, có khả năng tích lũy trong cơ thể sinh vật và có khả năng gây nhiễm độc cấp tính, mãn tính cho con người [13-15]. Có rất nhiều phương pháp để loại bỏ phenol trong khí thải nhưng phương pháp lọc sinh học nhỏ giọt đang được quan tâm hơn cả vì cho thấy hiệu suất cao trong việc xử lý các hợp chất này và có khả năng oxi

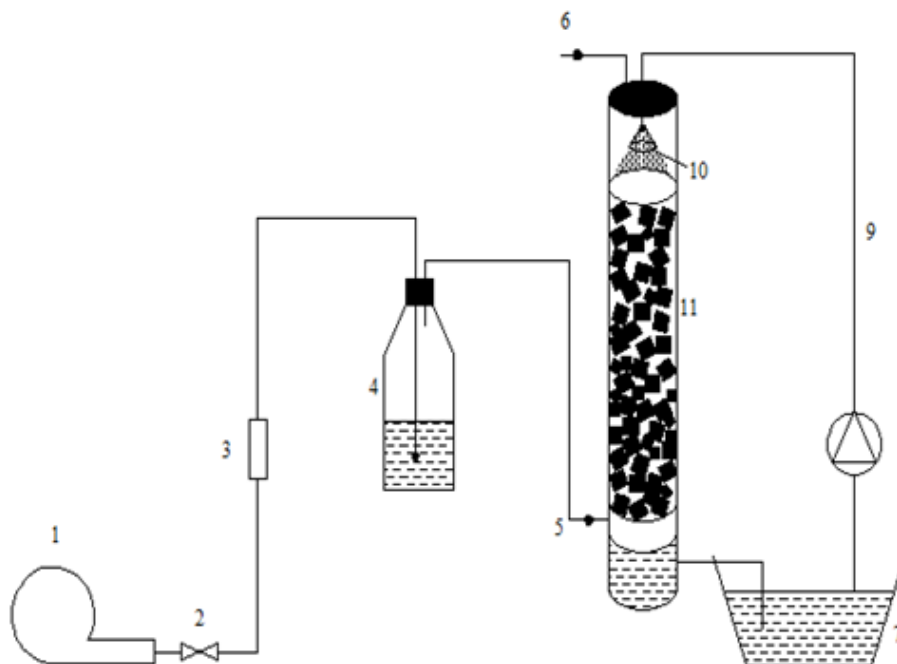
hoá hoàn toàn thành CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O; không tạo ra các chất ô nhiễm thứ cấp mà chi phí lắp đặt, vận hành và chi phí năng lượng thấp [3, 4, 10, 12]. Tuy nhiên, hiện nay phương pháp lọc sinh học nhỏ giọt chưa được ứng dụng nhiều tại Việt Nam do thiếu những cơ sở dữ liệu cần thiết cho việc thiết kế, vận hành, bảo dưỡng...

Trong thiết bị lọc sinh học nhỏ giọt, vi sinh vật giữ vai trò rất quan trọng, giúp phân huỷ các hợp chất ô nhiễm. Nhóm nghiên cứu tiến hành

phân lập, làm giàu chủng vi sinh vật trong bùn hoạt tính xử lý hơi phenol; so sánh khả năng hoạt động của từng chủng và với bùn hỗn hợp nhằm xác định chủng vi sinh vật từ bùn hoạt tính có khả năng xử lý khí thải chứa hơi phenol bằng phương pháp lọc sinh học nhỏ giọt (Biotrickling filter) trong điều kiện nuôi cấy, thích nghi tại Việt Nam.

## VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

### Thiết lập thực nghiệm



**Hình 1.** Sơ đồ tổng quát hệ thống thực nghiệm: (1) Quạt thổi khí, (2) Van lưu lượng, (3) Flow meter, (4) Impinger, (5) Đầu vào, (6) Đầu ra, (7) Bình chứa dung dịch tuần hoàn, (8) Bơm nhu động, (9) Dòng dung dịch tuần hoàn, (10) Đĩa phân phối chất lỏng, (11) Cột lọc sinh học nhỏ giọt (Biotrickling filter).

Cột lọc biotrickling filter (11) là một ống nhựa trong suốt (acrylic glass) với tổng chiều cao 65 cm và đường kính ngoài 5 cm. Một đĩa nhựa đục lỗ (đường kính lỗ 5 mm) được đặt phía trên cách đáy 10 cm để đỡ lớp vật liệu đệm và phân bố không khí đều qua từng lớp. Cửa vào của khí (Φ 10 mm) (5) được đặt phía dưới cách tấm đục lỗ 3 cm.

Thể tích của lớp đệm là 1,23 L. Vật liệu đệm có kích thước 10 mm x 10 mm x 10 mm được xếp ngẫu nhiên vào cột và được duy trì độ ẩm là 70%.

Cột lọc có một khoảng bên trên 5 cm, cho phép bố trí đĩa phân phối chất lỏng (10) (Φ 3 cm, đường kính lỗ 2 mm). Đầu ra của khí (6) cách bề mặt của lớp vật liệu đệm 5 cm. Chất lỏng được tuần hoàn từ trên xuống bởi một bơm nhu động

tuần hoàn (8) (Chem-Feed/1100) do đó màng sinh học luôn được giữ ở một độ ẩm nhất định, cung cấp chất dinh dưỡng, kiểm soát độ pH và loại bỏ các chất là sản phẩm chuyển hóa do phân hủy sinh học trong cột. Van lấy mẫu khí được đặt ở đầu vào và đầu ra của cột.

Dung dịch dinh dưỡng (DDDD) được chuẩn bị bằng cách pha các loại muối chứa các thành phần đa lượng và vi lượng gồm: 1,3 g  $K_2PO_4$ , 0,5 g  $KH_2PO_4$ , 0,4 g  $NH_4Cl$ ,... được hòa tan trong 1 L nước cất [16, 17]. DDDD được định kỳ thêm vào dung dịch tuần hoàn nhằm bổ sung chất dinh dưỡng cho quá trình nuôi cấy vi sinh vật (50 mL/ngày).

#### Quy trình thực nghiệm

Dòng khí có chứa hơi phenol được tạo ra bằng cách sục không khí sạch tốc độ chậm vào một impinger (1) chứa dung dịch phenol đã biết nồng độ, hơi thoát ra được dẫn trực tiếp vào thiết bị lọc sinh học nhỏ giọt sao cho dòng khí đi vào từ dưới lên (5). Nồng độ hơi phenol trong khí đầu vào được hiệu chỉnh bằng cách thay đổi nồng độ dung dịch phenol trong impinger và tốc độ cấp khí.

Trong quá trình di chuyển của dòng khí, hơi phenol tiếp xúc và bị hấp phụ vào lớp màng mỏng vi sinh vật dính bám trên bề mặt đệm (11). Tại đây, dưới tác động của vi sinh vật, phenol sẽ bị phân hủy thành  $CO_2$  và  $H_2O$ . Sau một khoảng thời gian nhất định, tiến hành lấy mẫu khí tại đầu vào, đầu ra để phân tích.

#### Chuẩn bị chất cấy và cấy vào mô hình

Bùn vi sinh sau khi được lấy từ nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt (Nhà máy xử lý nước thải Bình Hưng) có hàm lượng chất rắn lơ lửng (TSS) 1700 mg/L, được bổ sung DDDD và nuôi thích nghi trước khi cấy vào mô hình. Tiến hành sục khí chứa hơi phenol với nồng độ tăng dần theo thời gian trong 24 giờ để vi sinh vật dần thích nghi với môi trường có chứa phenol, đồng thời cho thêm 100 mL dung dịch phenol có nồng độ

5000 ppm vào dung dịch bùn để làm giàu chủng vi sinh vật có khả năng xử lý phenol. Trong suốt thời gian thích nghi các thông số TSS, pH, nồng độ oxy hoà tan (DO) được đo đặc hằng ngày để kiểm tra khả năng thích nghi cũng như đảm bảo điều kiện sống tốt nhất cho vi sinh vật [9,12].

Vật liệu đệm sau khi được làm sạch, vô trùng sẽ được ngâm vào hỗn hợp bùn và tiếp tục sục khí trong vòng 24 giờ tiếp theo để các vi sinh vật trong dung dịch bùn dính bám lên bề mặt vật liệu lọc. Kết thúc quá trình sục khí, vật liệu đệm được lấy ra, dung dịch bùn được tách nước và bổ sung thêm dung dịch dinh dưỡng để có TSS khoảng 3000 mg/L. Dùng bơm nhu động bơm tuần hoàn dung dịch bùn hoạt tính này vào cột lọc với lưu lượng là 107 mL/phút. Hỗn hợp bùn được bơm tuần hoàn đến khi TSS của dung dịch bùn giảm xuống khoảng 500 mg/L thì kết thúc quá trình cấy bùn. Trong quá trình cấy vẫn cho dòng khí có chứa hơi phenol đi qua cột lọc để cung cấp đủ lượng oxy cần thiết và tiếp tục quá trình làm giàu vi sinh vật phân hủy phenol cho cột lọc sinh học nhỏ giọt.

#### Phương pháp lấy mẫu và phân tích nồng độ hơi phenol trong dòng khí

Khả năng xử lý, hiệu suất xử lý hơi phenol của mô hình nghiên cứu được đánh giá thông qua nồng độ hơi phenol trong dòng khí đầu vào và đầu ra. Lấy mẫu khí chứa hơi phenol bằng cách cho hấp thụ vào 2 impinger, mỗi impinger chứa 10 mL dung dịch  $Na_2CO_3$ . Nồng độ phenol trong dòng khí được tính toán thông qua nồng độ phenol trong dung dịch sau khi hấp thụ. Thời gian lấy mẫu 15 phút. Sau khi lấy, mẫu được đem phân tích ngay. Nguyên tắc của phương pháp là dựa vào phản ứng tạo màu của phenol với paranitroanilin đã diazo hoá. Phức tạo thành có màu vàng và được đo quang tại bước sóng 480 nm bằng máy V-650 UV-VIS Spectrophotometer.

#### Phương pháp phân lập và làm giàu chủng vi sinh vật

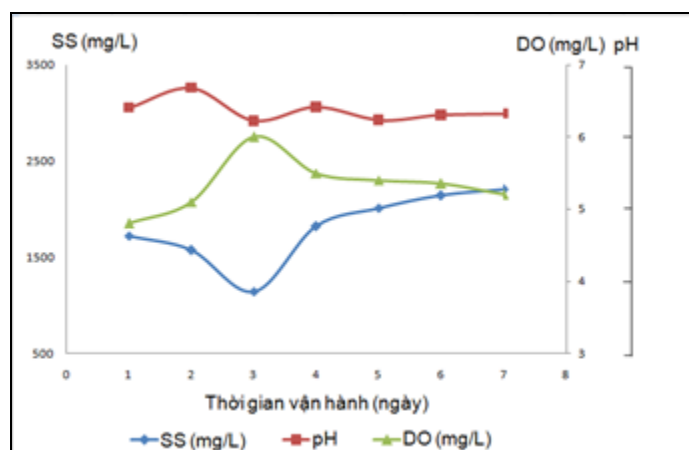
Để có thể xác định chủng vi sinh vật có khả năng xử lý hơi phenol ta cần phải tiến hành lấy mẫu, phân lập và làm giàu từng chủng vi sinh vật có trong mô hình lọc sinh học nhỏ giọt. Mẫu vi sinh vật trên bề mặt vật liệu đệm sẽ được cấy vào đĩa có chứa môi trường dinh dưỡng và được cấy chuyển vào các đĩa có chứa môi trường phân lập (NA). Các chủng vi sinh vật thuần sau khi phân lập được định danh bằng phương pháp giải trình tự gen 16s RNA và tra cứu trên BLAST SEARCH, tiến hành nhân sinh khối chủng vi sinh vật đó trong môi trường LB (Lactose Broth) trước khi cấy vào cột lọc.

## KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### Giai đoạn thích nghi vi sinh vật và cấy vi sinh vật vào mô hình

### Giai đoạn thích nghi vi sinh vật

Bùn hoạt tính được lấy từ nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt chứa nhiều loại vi sinh vật khác nhau. Trước khi cấy vào cột lọc, bùn hoạt tính cần được làm giàu vi sinh vật xử lý phenol [16, 17]. Quá trình này rất cần thiết để tăng hiệu suất xử lý của hệ thống và giảm thời gian khởi động cột lọc. Tiến hành làm giàu vi sinh vật oxy hóa phenol trong bùn hoạt tính bằng cách sục liên tục hơi phenol có nồng độ tăng dần ( $19 - 50 \text{ mg/Nm}^3$ ) trong vòng 7 ngày, đồng thời thêm vào dung dịch bùn 100 mL DDDD/ngày để cung cấp chất dinh dưỡng và năng lượng cần thiết cho vi sinh vật hoạt động. pH của dung dịch tuần hoàn được duy trì trong khoảng 6 – 8.



**Biểu đồ 1.** Đồ thị biểu diễn sự thay đổi nồng độ oxy hòa tan (DO), hàm lượng chất rắn lơ lửng (SS), pH trong dung dịch bùn hoạt tính theo thời gian vận hành

Vào ngày thứ nhất của quá trình thích nghi, vi sinh vật bắt đầu làm quen với hơi phenol được sục vào dung dịch bùn. Các vi sinh vật không thích nghi bắt đầu chết đi, làm cho SS dung dịch giảm nhanh, DO trong dung dịch không được vi sinh vật sử dụng nên tăng lên. Trong khi đó, các vi sinh vật oxy hóa phenol tăng về thể tích, khối lượng rõ rệt do quá trình tổng hợp các chất diễn ra mạnh mẽ nhưng chưa tăng về số lượng. Đây

chính là pha “lag” trong môi trường nuôi cấy tĩnh.

Giai đoạn từ ngày thứ 3 đến thứ 5 của quá trình thích nghi, vi sinh vật oxy hóa phenol bắt đầu pha “log”, số lượng tế bào tăng theo hàm số mũ. Do đó, SS của dung dịch bùn tăng nhanh từ 1140 - 1820 mg/L, đồng thời DO của dung dịch giảm xuống còn 5,2 mg/L. Những ngày tiếp theo

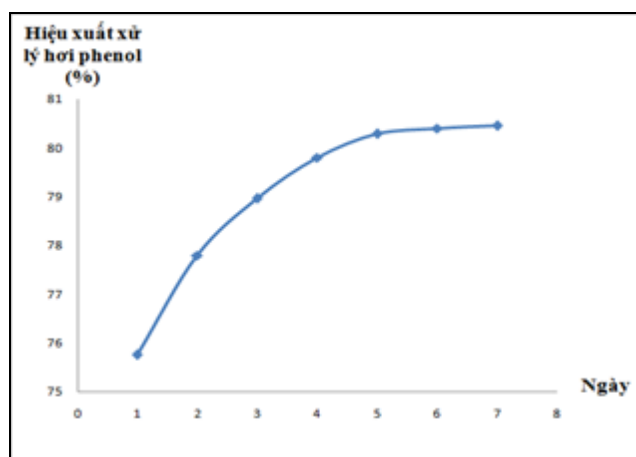
tốc độ biến đổi chậm dần và đạt trạng thái ổn định vào ngày thứ 6 và thứ 7 của quá trình.

**Giai đoạn cấy vi sinh vật vào mô hình và khởi động mô hình**

Khi quá trình thích nghi hoàn tất, chuẩn bị dung dịch bùn có SS khoảng 3000 mg/ L để cấy vào cột lọc sinh học nhỏ giọt. Lưu lượng dung dịch bùn được bơm tuần hoàn vào cột lọc được cố định ở 107 mL/phút nhằm tránh sự tắc nghẽn xảy ra trên cột lọc. Sau một ngày, giá trị SS của

dung dịch bùn giảm xuống còn khoảng 500 mg/L thì kết thúc quá trình cấy.

Trong quá trình cấy vi sinh vật lên cột, nồng độ hơi phenol trong dòng khí đầu vào được duy trì trong khoảng 650 - 850 mg/Nm<sup>3</sup>, tốc độ dòng khí 1,5 L/phút vào cột như là nguồn cung cấp điện tử duy nhất cho vi sinh vật sống và hoạt động. pH của dung dịch tuần hoàn được điều chỉnh trong khoảng 6 – 8.



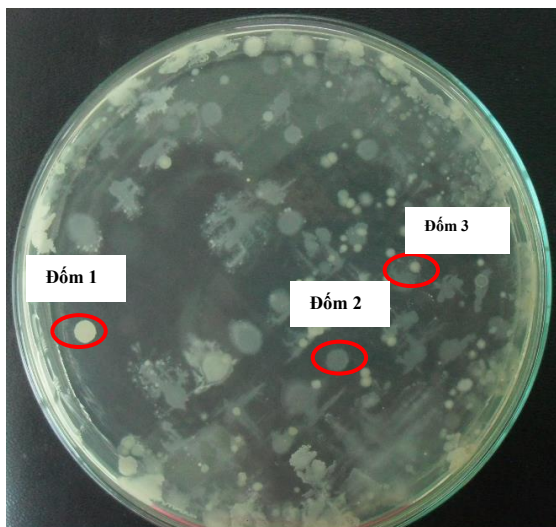
**Biểu đồ 2.** Hiệu suất xử lý hơi phenol của thiết bị lọc sinh học nhỏ giọt trong thời gian khởi động

Hiệu suất xử lý hơi phenol trong những ngày đầu tiên còn thấp do hàm lượng vi sinh vật trên lớp vật liệu đệm còn ít. Qua những ngày tiếp theo thì vi sinh đã phát triển nhiều trên lớp vật liệu đệm, tạo thành một màng sinh học mà ta có thể quan sát được bằng mắt thường. Đến ngày thứ 6, thứ 7 hiệu suất xử lý hơi phenol khoảng 80% điều này cho thấy màng sinh học đã phát triển

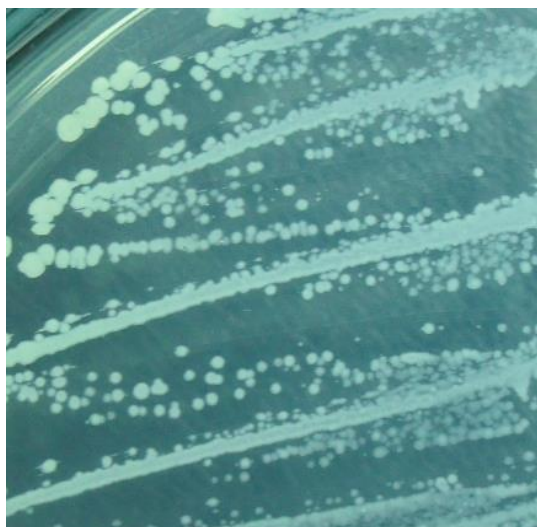
hoàn chỉnh trên lớp vật liệu đệm rắn. Phenol được hấp phụ vào lớp màng này và được các vi sinh vật trên màng phân hủy tạo thành CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O và một phần hình thành sinh khối vi sinh vật. Giai đoạn tăng trưởng và thích nghi với môi trường có thể làm giảm thời gian cấy và do đó, giảm sự phát tán chất ô nhiễm trong hoạt động của giai đoạn này.

**Giai đoạn vận hành**

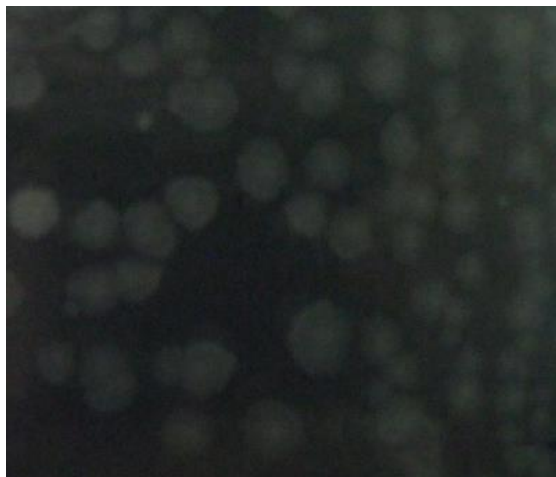
**Kết quả cấy, phân lập chủng vi sinh vật**



**Hình 2.** Các chủng vi sinh vật có mặt trong bùn hoạt tính xử lý hơi phenol



**Hình 3.** Chủng đục trắng sữa (Đốm 1)



**Hình 4.** Chủng hình vết loang (Đốm 2)

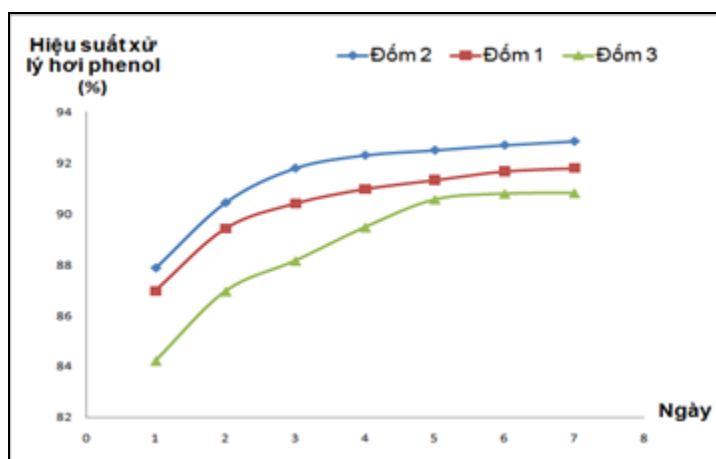


**Hình 5.** Chủng hình xương rồng (Đốm 3)

**Giai đoạn tăng sinh khối và cấy vi sinh vật sau phân lập vào mô hình**

Vi sinh vật sau khi phân lập sẽ được nhân sinh khối trong môi trường Lastose broth rồi tiến hành pha loãng với nước cất theo tỉ lệ 1:1, thêm 100 ml dung dịch dinh dưỡng vào dung dịch cấy. Tiến hành cấy vào mô hình và đánh giá hiệu suất xử lý của từng chủng. Kết quả cho thấy hiệu suất

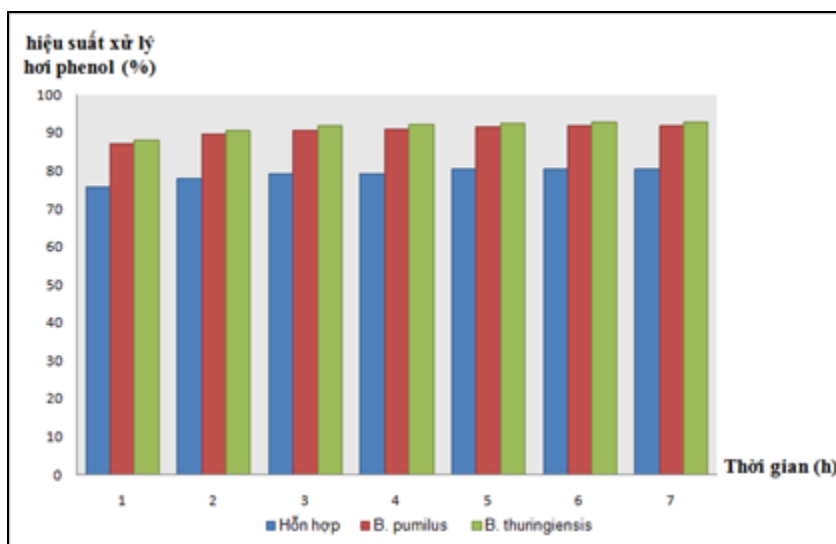
xử lý hơi phenol của từng chủng là khá cao (hơn 80%) nhưng chủng hình vết loang (đốm 2) cho hiệu suất xử lý cao nhất, tiếp theo là chủng đục trắng sữa (đốm 1) và sau cùng là chủng hình xương rồng (đốm 3). Hai chủng cho hiệu suất cao là chủng hình vết loang và chủng đục trắng sữa được đem định danh và tiếp tục khảo sát trong các thí nghiệm tiếp theo.



Biểu đồ 3. Đồ thị khảo sát hiệu suất xử lý hơi phenol trong dòng khí của từng chủng vi sinh vật sau phân lập

Theo kết quả phân tích vi sinh cho thấy 2 mẫu vi sinh đã được làm thuần và ký hiệu là chủng đục trắng sữa (đốm 1) và chủng hình vết loang (đốm 2) lần lượt có tên là *Bacillus pumilus* và *Bacillus thuringiensis*. Nhiều nghiên cứu trước đây cho thấy chủng *B. pumilus* và *B. thuringiensis* đã được ứng dụng rất nhiều trong các lĩnh vực nông nghiệp, công nghiệp, thực phẩm... Tuy nhiên, chưa có nhiều nghiên cứu cho thấy việc áp dụng các chủng vi sinh vật này

trong lĩnh vực xử lý khí thải. Kết quả này cũng cho thấy sự khác biệt so với nghiên cứu trước đây của M. Zili và cộng sự khi không tìm thấy chủng *Pseudomonas putida*, là chủng được tìm thấy cho hiệu suất xử lý cao khí thải có chứa hơi phenol [17]. Điều này có thể được giải thích do sự khác biệt về điều kiện khí hậu, thành phần và đặc tính nước thải, bùn hoạt tính tại Việt Nam so với các nước khác.



Biểu đồ 4. Đồ thị so sánh hiệu suất xử lý hơi phenol trong dòng khí của chủng *B. pumilus* và *B. thuringiensis* với bùn hoạt tính



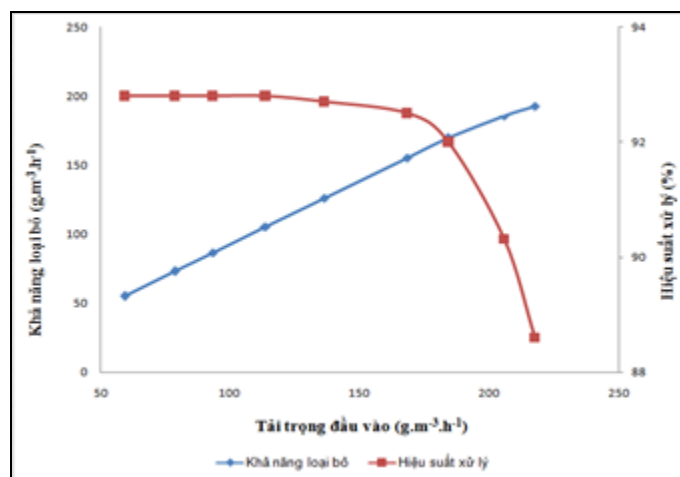
Dựa vào Biểu đồ 4 ta thấy hiệu suất xử lý hơi phenol của bùn hoạt tính trước khi phân lập thấp hơn nhiều so với sau khi được phân lập do trong bùn hoạt tính có chứa nhiều chủng vi sinh vật khác nhau có khả năng gây ức chế cho quá trình xử lý hơi phenol. Sau khi phân lập vi sinh vật có thể tránh được các tác động này, đồng thời làm tăng mật độ của chủng vi sinh vật phân hủy phenol trên bề mặt vật liệu đệm, làm tăng hiệu suất xử lý.

#### **Khảo sát khả năng loại bỏ của chủng *B. thuringiensis***

Để xác định được nồng độ phenol giới hạn mà chủng *B. thuringiensis* có thể xử lý được, nghiên cứu đã tiến hành tăng dần nồng độ hơi phenol trong dòng khí đầu vào lên đến khoảng

3600 mg/m<sup>3</sup>. Tốc độ dòng khí đầu vào được duy trì ở 1,5 L/phút.

Biểu đồ 5 cho thấy khả năng loại bỏ tăng đồng biến với sự gia tăng của tải trọng đầu vào. Khi tăng nồng độ dòng khí đầu vào lên đến 184,30 g.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup> thì hiệu suất xử lý của cột lọc vẫn đạt khoảng 92%. Đây chính là tải trọng giới hạn của cột lọc sinh học nhỏ giọt, vì với tải trọng đầu vào lớn hơn thì hiệu suất xử lý của thiết bị bắt đầu giảm xuống rất nhanh. Khi tăng tải trọng từ 184,30 g.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup> lên 205,81 g.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup> thì hiệu suất giảm xuống chỉ còn 90,3%. Tuy nhiên kết quả này cho thấy hiệu suất xử lý của chủng *B. thuringiensis* vẫn cao hơn nhiều so với chủng vi sinh vật khi chưa được phân lập.



**Biểu đồ 5.** Đồ thị khảo sát khả năng loại bỏ của chủng *B. thuringiensis* với các tải trọng đầu vào khác nhau

#### **KẾT LUẬN**

Cột lọc sinh học nhỏ giọt với vật liệu đệm làm từ mùt xốp được cấy vi sinh vật oxy hóa phenol đã cho thấy khả năng xử lý hơi phenol trong dòng khí khá cao. Hiệu suất của quá trình đạt hơn 80% với nồng độ khí thải đầu vào khoảng 850 mg/Nm<sup>3</sup>, tốc độ dòng khí 1,5 L/phút. Nghiên cứu cũng đã phân lập và định danh được chủng vi sinh vật oxy hóa phenol là *Bacillus pumilus* và *Bacillus thuringiensis*. Đồng thời, nghiên cứu cũng đánh giá được hiệu suất xử

lý của các chủng vi sinh này. Kết quả cho thấy hiệu suất xử lý của chủng vi sinh sau khi phân lập đạt khá cao, cụ thể chủng *Bacillus pumilus* có hiệu suất xử lý hơi phenol khoảng 90% và chủng *Bacillus thuringiensis* khoảng 92%. Ngoài ra, đề tài cũng đã tiến hành xác định được tải trọng đầu vào giới hạn của chủng *B. thuringiensis* lên đến 184,30 g.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup> mà hiệu suất xử lý vẫn đạt được hơn 92%.



# Investigating the species of microorganisms from activated sludge for handling phenol contaminated-air streams in biotrickling filter

- Nguyen Thi Kim Anh
- Le Thi Tra Mi
- Nguyen Ly Sy Phu
- Dang Diep Yen Nga
- To Thi Hien

University of Science, VNU-HCM

## ABSTRACT

*This research aimed at investigating the species of microorganisms from activated sludge is capable of handling gas-containing phenol vapor by means of trickling biofilter. By isolating and culturing microorganisms, two species, Bacillus pumilus and Bacillus thuringiensis, was discovered to dominate in phenol vapor removal equipment with high efficiency (about 90% with B. pumilus strain and 92% with B. thuringiensis strains) at inlet concentration about 650 - 850 mg/Nm<sup>3</sup> and*

*air flow of 1.5 L/min. Simultaneously, similar experiments were carried out with mixed microorganisms obtained removal efficiency of more than 80%. This result showed that microorganisms after being isolated gave higher performance than mixture of microorganisms. In particular, strain of B. thuringiensis could handle up to 3600 mg/Nm<sup>3</sup> in inlet concentration at about 184.3 g<sub>phenol</sub>/m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> elimination capacity when removal efficiency was over 92%.*

**Keywords:** phenol, biotrickling filter, air pollution, Bacillus thuringiensis, Bacillus pumilus.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J.S. Devinny, M.A. Deshusses, T.S. Webster, *Biofiltration for Air Pollution Control*, CRC – Lewis Publishers, New York, USA (1999).
- [2]. G. Moussavi, M. Mohseni, The treatment of waste air containing phenol vapors in biotrickling filter, *Chemosphere* 72, 1649–1654 (2008).
- [3]. H. Nikakhtari, *Bioremediation of Industrial VOC Air Pollutants*, 5, 25 – 27 (2006).
- [4]. H. Nikakhtari, G. A Hill, Continuous bioremediation of phenol-polluted air in an external loop airlift bioreactor with a packed bed, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81, 6, 1029 – 1038 (2006).
- [5]. HPA, Phenol. Toxicological overview (2007).
- [6]. HPA, Phenol. General information (2007).
- [7]. HPA, Compendium of Chemical Hazards, Phenol (2011).
- [8]. L.K. Wang, N.C. Pereira, Y.T. Hung, Air Pollution Control Engineering, *Handbook of Environmental Engineering*, 1, Humana Press, 421 – 433, 440 – 441 (2004).

- [9]. M.A. Deshusses, *Biological waste air treatment in biofilters*, 335- 339 (1997).
- [10]. M.C. Delhomenie, M. Heitz, Biofiltration of Air, 53 – 72 (2005).
- [11]. B.J. Ritchie, G.A. Hill, Biodegradation of phenol-polluted air using an external loop airlift bioreactor, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 62, 339 – 344 (1995).
- [12]. S. Jisiriwanit, M.A. Deshusses, Biotreatment of Combustion Gas, 1 – 10.
- [13]. The Clean Air Technology Center (CATC), U.S. Environmental Protection Agency (E143-03), Research Triangle Park, North Carolina 27711, Using bioreactors to control air pollution, EPA - 456/R – 03 – 003 (2003).
- [14]. WHO, Geneva, International Programme on Chemical Safety (IPCS). Environmental Health Criteria 161, Phenol (1994).
- [15]. WHO, Geneva, International Programme on Chemical Safety (IPCS) Phenol, Health and safety guide no 88 (1994).
- [16]. WHO, Geneva, International Programme on Chemical Safety (IPCS) Poisons Information Monograph 412 (1994).
- [17]. M. Zilli, A. Converti, A. Lodi, M.D. Borghi, G. Ferraiolo, Phenol removal from waste gases with a biological filter by *Pseudomonas putida*, *Biotechnology and Bioengineering* 41, 7, 693 – 699 (1993).
- [18]. M. Zilli, B. Fabiano, A. Ferraiolo, A. Converti, Macro-kinetic investigation on phenol uptake from air by biofiltration: Influence of superficial gas flow rate and inlet pollutant concentration, *Biotechnology and Bioengineering*, 49, 4, 391 – 398 (1996).