■Ngày nhận bài: 14/01/2022 ■Ngày sửa bài: 17/02/2022 ■Ngày chấp nhận đăng: 07/3/2022

Nghiên cứu mô hình hóa một số quá trình xử lý sinh học của công nghệ MBBR ứng dụng trong xử lý nước rỉ rác

Modeling some biological processes of MBBR technology applying for treatment of landfill leachate

> ĐỖ THỊ HỒNG DUNG[1,2], PGS.TS ĐẶNG XUÂN HIỂN[1,*]
[1]Viện KHCN MT, Đại học Bách khoa Hà Nội
[2]Viện MTNN, Viện Khoa học Nông nghiệp Việt Nam; *Emai: hien.dangxuan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đã xây dựng mô hình toán học để mô phỏng một số quá trình sinh học diễn ra trong hệ thống MBBR (Moving Bed Biofilme Reactor), trong đó tập trung vào các quá trình loại bỏ COD và xử lý nitơ trong nước rỉ rác. Nghiên cứu được thực hiện trên cơ sở phát triển các phương trình toán học được sử dụng để mô tả các quá trình bùn hoạt tính và các quá trình màng sinh học biofilm dựa trên nguyên lý ASM 1 và ASM 3 (Active Sludge Model) và các điều kiện thực tế nước rỉ rác của Việt Nam. Hệ phương trình thu nhận biểu thị sự tham gia của 15 cấu tử vào 19 quá trình sinh học xảy ra trong hệ thống xử lý nước rỉ rác bằng công nghệ AO-MBBR. Hệ phương trình được giải số bằng thuật toán Runge- Kutta bậc 4 và được code số bằng ngôn ngữ lập trình Matlab.

Nghiên cứu cũng đã xác định độ nhạy cục bộ để hiệu chỉnh đưa ra các thông số động học phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam.

Kết quả tính toán của mô hình đã được so sánh với các bộ số liệu thực nghiệm cho thấy sai số thấp, đặc biệt với các mốc thời gian dài như 33 giờ, 48 giờ cho sai số từ 0,26% - 0,29% đối với COD và 1,53% - 3,26% đối với NH_4^+. Kết quả thử nghiệm với bộ thông số của tác giả Giorgio Mannina và các cộng sự, 2011 cho thấy sai số lớn nhất giữa kết quả mô phỏng và số liệu đo đạc đối với thông số COD là 10%. Các kết quả tính toán cho thông số khác khác đều cho sai số <15%.

Mô hình số xây dựng được cho phép tính toán nồng độ đầu ra của một số thông số ô nhiễm bằng của hệ thống AO - MBBR, nhằm đánh giá hiệu quả xử lý của các hệ thống và trợ giúp thiết kế.

Từ khóa: Mô hình hóa; mô phỏng; MBBR; xử lý nước rỉ rác; xử lý nước thải

ABSTRACT

The research has built a mathematical model to simulate some biological processes taking place in the MBBR (Moving Bed Biofilme Reactor) system, which focuses on the COD removal and nitrogen treatment processes in landfill leachate. The study was carried out on the basis of developing mathematical equations used to describe activated sludge processes and biofilm biofilm processes based on the principles of ASM 1 and ASM 3 (Active Sludge Model) and ASM 3 (Active Sludge Model) and actual conditions of landfill leachate in Vietnam. The system of obtained equations represents the participation of 15 components in 19 biological processes occurring in the leachate treatment system by AO-MBBR technology. The system of equations is numerically solved by the 4th order Runge-Kutta algorithm and numerically coded in the Matlab programming language.

The study also determined the local sensitivity to calibrate to give the kinematic parameters suitable for the actual conditions in Vietnam.

The calculated results of the model have been compared with experimental data sets, showing low errors, especially with long time points such as 33 hours, 48 hours, with errors ranging from 0.26% -0.29 % for COD and 1.53% -3.26% for NH4+. Experimental results with the set of parameters of author Giorgio Mannina et al., 2011 show that the largest error between simulation results and measured data for COD parameter is 10%. The calculation results for other parameters all give error <15%.

The built numerical model is allowed to calculate the output concentration of some pollution parameters by the AO - MBBR system, in order to evaluate the treatment efficiency of the systems and assist in the design.

Keyword: Modeling; simulation; MBBR; leachate treatment; wastewater treatment

1. GIỚI THIỆU

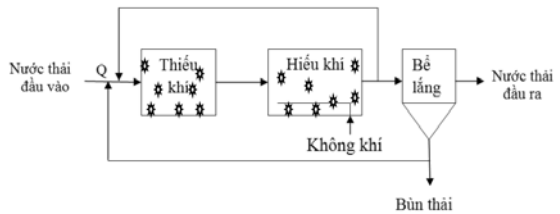
Mô hình hóa và mô phỏng là một công cụ quan trọng trong thiết kế và vận hành hệ thống xử lý nước thải bằng công nghệ bùn hoạt tính. Tuy nhiên, việc mô phỏng các hệ thống liên quan đến MBBR vẫn còn là vấn đề khó khăn do độ phức tạp của mô hình, các tham số quan trọng trong mô hình thường không được xác định [1; 2; 3; 4]. Các nghiên cứu mô phỏng các quá trình sinh học trong hệ thống xử lý bằng MBBR hiện nay được tạo thành từ hai mô hình con khác nhau để mô phỏng sinh khối cố định và lơ lửng. Sinh khối lơ lửng được mô phỏng theo mô hình ASM 1, trong đó xem xét các phương trình cân bằng khối lượng cho các cơ chất khác nhau dựa trên lý thuyết phương trình động học Monod (Henze et al., 1987) [2;5; 6; 7]. Mặt khác, đối với mô hình màng sinh học, một mô hình động đơn giản để mô phỏng nhanh việc loại bỏ nhiều cơ chất của các loài vi khuẩn khác nhau đã được áp dụng (Rauch et al., 1999) [8; 9; 10; 11]. Ý tưởng cơ bản đằng sau việc thực hiện mô hình màng sinh học là tách rời các tính toán của hai quá trình chính trong màng sinh học: khuếch tán cơ chất và chuyển đổi sinh hóa. Việc đánh giá riêng biệt về khuếch tán cơ chất cho phép liên kết độ sâu thâm nhập của cơ chất với một phần sinh khối đang hoạt động trong quá trình chuyển hóa. Cụ thể hơn, sinh khối lơ lửng đã được mô hình hóa theo khái niệm ASM1 nổi tiếng khi xem xét phương trình cân bằng khối lượng cho các chất khác nhau và sử dụng động học Monod cho các cơ chất khác nhau (Henze et al., 1987) [10; 12; 13; 14]. . Các quy trình đã được mô phỏng gồm: (a) tăng trưởng hiếu khí và sự phân rã của dị dưỡng; (b) tăng trưởng thiếu khí và phân rã của dị dưỡng; (c) tăng trưởng hiếu khí và phân rã tự dưỡng; (d) ammon hóa nitơ hữu cơ hòa tan; (e) thủy phân nitơ hữu cơ. Liên quan đến phân rã dị dưỡng và tự dưỡng, cách tiếp cận được đề xuất trong ASM3 đã được tshông qua (Gujer et al., 1999). Sự phân rã của sinh khối góp phần vào việc tiêu thụ oxy và sản xuất hạt trơ không giống như "sự chết - tái sinh" được áp dụng trong ASM1 (G. Mannina, D. Di Trapani, M. Torregrossa and G. Viviani, 2007) [10; 12; 13; 14].

Trên cơ sở kế thừa các tài liệu đã có và nghiên cứu thực tế, nghiên cứu này tập trung vào phát triển mô hình số để trợ giúp việc đánh giá các quá trình xử lý, đánh giá hiện trạng hoạt động và hỗ trợ cho việc thiết kế hệ thống xử lý nước rỉ rác bằng công nghệ AO - MBBR.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung vào việc thiết lập các phương trình toán học để mô phỏng các quá trình sinh học diễn ra trong hệ thống xử lý nước thải bằng công nghệ AO - MBBR. Cấu hình hệ thống được mô tả trong hình 1.



Hình 1 - Sơ đồ pilot nghiên cứu AO-MBBR xử lý nước rỉ rác

Các quá trình sinh học diễn ra trong hệ thống được mô phỏng gồm: các quá trình diễn ra trong bể thiếu khí, bể hiếu khí và các quá trình diễn ra trên màng sinh hoc biofilm.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng một số phương pháp như sau:

(i) Phương pháp kế thừa: kế thừa các kết quả của các công trình nghiên cứu, kinh nghiệm của các chuyên gia trong và ngoài nước, kế thừa các thuật toán đã được chứng minh.

(ii) Phương pháp mô hình hóa, mô phỏng: sử dụng các phương trình toán, phương trình vi phân vào để mô tả các quá trình chuyển hóa các thành phần trong mô hình. Sau đó tiến hành số hóa các phương trình trên phần mềm MATLAB để giải các phương trình toán học được xây dựng.

(iii) Phương pháp thực nghiệm: tiến hành thực nghiệm trên hệ thống AO-MBBR thực quy mô phòng thí nghiệm.

(iv) Phương pháp phân tích: phân tích COD theo TCVN 6491:1999: Chất lượng nước - Xác định nhu cầu oxy hóa hóa học. Phân tích NH_4^+, NO_2^- theo Hướng dẫn thực nghiệm 02 và 05 của Viện Khoa học Công nghệ môi trường, Đại học Bách khoa Hà Nội.

(v) Phương pháp thống kê: các số liệu thực nghiệm được xử lý trên phần mềm thống kê SPSS.

(vi) Phương pháp phân tích độ nhạy: phân tích độ nhạy được thực hiện theo phương pháp của tác giả Giorgio Mannina và các cộng sự, 2011. Đầu tiên, độ nhạy cục bộ của mỗi hệ số được đưa ra cho tất cả các kết quả đầu ra được sử dụng trong mô hình. Sau đó tính toán tổng độ nhạy cục bộ để xác định mức độ nhạy cảm của mỗi hệ số trong hệ thống. Độ nhạy cục bộ được tính theo công thức:

$$S_{j,av(n)} = \frac{1}{N_{meas}} \sum_{j=1}^{N_{meas}} \left(\frac{\left|O_{var,j} - O_{cal,j}\right|}{P_{var,j} - P_{cal,j}} \frac{P_{cal,j}}{O_{cal,j}} \right)$$

Trong đó: j- đại diện cho hệ số khảo sát; n- chỉ định đầu ra của mô hình; $O_{cal,j}$ là giá trị tham chiếu của đầu ra n, được tính toán trên cơ sở giá trị hệ số j thu được từ bước hiệu chỉnh mô hình; $O_{var,j}$ là kết quả mô phỏng cho đầu ra n, sau khi thay đổi hệ số j. $P_{cal,j}$ và $P_{var,j}$ đại diện cho giá trị mặc định và giá trị tăng lên của hệ số j tương ứng, trong khi N_{meas} là số các phép xác định thực nghiệm.

Từ $P_{var,j} = (1 + 0{,}1).P_{cal,j}$, phương trình độ nhạy chuyển thành:

$$S_{j,av(n)} = \frac{1}{N_{meas}} \sum_{j=1}^{N_{meas}} \frac{\left|O_{var,j} - O_{cal,j}\right|}{O_{cal,j}} 10$$

Tổng các độ nhạy cục bộ của mỗi hệ số j được suy ra từ biểu thức sau, có tính đến tất cả các độ nhạy cục bộ:

$$S_{j,TOT} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{n} S_{j,av(n)}^2}$$

(v) Phương pháp hiệu chỉnh: việc hiệu chỉnh mô hình được thực hiện theo phương pháp thử và phương pháp phương sai, bằng cách tối ưu hóa một hàm mục tiêu được xác định bởi chỉ số Nash và Sutcliffe như mô tả của tác giả Giorgio Mannina và các cộng sự, 2011, biểu thức hiệu chuẩn như sau:

$$E = \left(1 - \frac{\sigma_{sim}^2}{\sigma_{meas}^2}\right)$$

Trong đó :

σ_{sim}^2 : là giá trị của lỗi, được định nghĩa là sự khác biệt giữa các giá trị đo được và giá trị mô phỏng ;

σ_{meas}^2 : là phương sai của các quan sát.

Đặc biệt, chức năng mục tiêu hiệu quả đã được tính bằng tổng của mỗi hàm biến trạng thái mô hình được tính đến và cho các phần khác nhau của hệ thống.

$$E_{TOT} = \sum_{j=1}^{n} E_{i,j}$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác định các thành phần tham gia trong mô hình mô phỏng

Các thành phần và các quá trình diễn ra trong hệ thống phản ứng AO-MBBR với cấu hình như trên được lựa chọn dựa trên mô hình ASM1 và ASM 3 và cân nhắc để phù hợp với điều kiện của nghiên cứu. Các thành phần tham gia trong mô hình gồm các cấu tử ở dạng hòa tan (S_i) và các cấu tử dạng hạt X_i) được mô tả trong bảng 1.

Bảng 1. Mô tả các thành phần tham gia trong mô hình

TT	Ký hiệu	Mô tả
Cấu tử hòa tan (S_i)		
1	S_{NO_3}	Bao gồm nitrate và nitrit ($NO_3^- - N$, $NO_2^- - N$). Trong tính toán hệ số tỷ lượng (bảo toàn COD), thành phần trên coi như chỉ gồm nitrat.
2	S_{NH_4}	Bao gồm amoni tự do và NH_4^+, để đảm bảo cân bằng điện tích electron, S_{NH_4} được giả thiết tất cả đều là NH_4^+.
3	S_{PO_4}	Chất hữu cơ hòa tan, chủ yếu là ortho-photphat. Trong cân bằng điện tích electron, giả thiết rằng S_{PO_4} bao gồm 50% $H_2PO_4^-$ và 50% HPO_4^{2-}, phụ thuộc vào pH.
4	S_I	Chất hữu cơ hòa tan trơ. Đặc trưng của thành phần này là không bị phân hủy trong quá trình xử lý nước thải.
5	S_{ND}	Nito dễ phân hủy sinh học
6	S_{O_2}	Oxi hòa tan.
7	S_S	Cơ chất dễ phân hủy sinh học, bao gồm $S_F + S_A$.
Cấu tử dạng hạt (X_i)		
8	X_H	Thành phần vi sinh vật dị dưỡng đo dưới dạng COD, chúng có thể phát triển trong môi trường hiếu khí, thiếu khí (khử nitrat) và yếm khí (quá trình lên men hóa).
9	X_I	Thành phần COD trơ, dạng hạt trong hệ thống. Thành phần này không bị phân hủy trong suốt hệ thống, nó bám vào bông bùn và đi vào sinh khối, do đó nó có thể có trong dòng vào và sinh khối chết.
10	X_A	Nồng độ vi sinh vật tự dưỡng
11	X_S	Cơ chất (COD) phân hủy sinh học chậm.
12	X_{Hat}	Nồng độ vi sinh vật dị dưỡng trong biofilm. Các vi sinh vật này có thể phát triển được cả hai điều kiện hiếu khí và hầu hết chúng cũng có thể sống được ở điều kiện thiếu khí (quá trình khử nitơ). Chúng là các vi sinh vật bám dính trên các giá thể di chuyển và tạo thành biofilm trên giá thể sinh học.
13	X_{Aat}	Nồng độ vi sinh vật tự dưỡng trong biofilm (vi sinh vật trong quá trình nitơrat hoá). Các vi sinh vật này là tác nhân cho quá trình nitơrat hoá (nitrification), chúng là những vi sinh vật hiếu khí bắt buộc. Chúng là các vi sinh vật bám dính trên các giá thể di chuyển và tạo thành biofilm trên giá thể sinh học.
14	X_{ND}	Nitơ hữu cơ phân hủy sinh học chậm
15	X_{STO}	Nồng độ sản phẩm tích luỹ bên trong tế bào vi sinh vật dị dưỡng. Các sản phẩm này bao gồm: PHA và glycogen, chỉ xuất hiện với vi sinh vật dị dưỡng X_H.

3.2. Xác định các quá trình sinh học và ma trận hệ số tỷ lượng

Trong mô hình tập trung nghiên cứu các quá trình chuyển hoá sinh học trong hệ phản ứng AO-MBBR. Ma trận các hệ số tỷ lượng biểu diễn các quá trình sinh hoá xảy ra trong mô hình có dạng:

$T = t_{[j,i]}$

Trong đó: j - số quá trình (j = 1 - 19)

i - số cấu tử (i = 1 - 15)

Tổng hợp các nghiên cứu đã được minh chứng, các quá trình và ma trận hệ số tỷ lượng được mô tả trong bảng 2:

3.3. Thiết lập các phương trình toán học áp dụng mô phỏng các quá trình sinh học diễn ra trong hệ thống AO - MBBR

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu, kế thừa các công thức tính toán đã được minh chứng, nghiên cứu thiết lập các phương trình toán học biểu thị các quá trình sinh học chủ yếu trong hệ thống xử lý nước rỉ rác bằng công nghệ AO - MBBR. Để thiết lập được các phương trình toán học, nghiên cứu dựa trên nguyên lý các phương trình cân bằng khối lượng cơ chất và sinh khối trong bể phản ứng; xác định được các hệ số tỷ lượng trong bể sinh học hiếu khí, bể sinh học thiếu khí và các quá trình diễn ra trên màng sinh học biofilm trong hệ thống phản ứng đã được mô tả.

Bể phản ứng AO - MBBR được mô hình hóa như một bể phản ứng khuấy trộn hoàn toàn.

a. Phương trình cân bằng vật chất đối với các cấu tử ở dạng hòa tan (S_i): phương trình cân bằng vật chất trong bể đối với các cấu tử ở dạng hòa tan (S_i) được viết như sau:

$$V_{MBBR}\frac{dS_i^b(t)}{dt} = Q^{in}(S_i^{in} - S_i^b) - J_i(t,z)AF + R_i(t)V_{MBBR} \quad (1)$$

Trong đó: Q^{in} : Lưu lượng dòng vào bể MBBR (m^3/ngày);

S_i^{in}, S_i^b : Nồng độ cấu tử hòa tan i dòng vào và dòng ra (g/m^3);

Theo định luật khuếch tán Fick 1, $J_i(t,z)$ có dạng:

$$J_i(t,z) = -D_i^f\frac{dS_i^f(t,z)}{dz} \quad (2)$$

Trong đó: D_i^f : Hệ số khuếch tán trong màng sinh học của cấu tử i (m^2/ngày); D_i^f giả thiết bằng 80% hệ số khuếch tán trong nước (D_i^W)(Wanner and W. Gujer, 1985).

Từ phương trình (1), (2) phương trình cân bằng vật chất của cấu tử hòa tan trong bể AO - MBBR trở thành :

$$V_{MBBR}\frac{dS_i^b(t)}{dt} = Q^{in}(S_i^{in} - S_i^b) + D_i^f\frac{D_i^W}{D_i^f L_i}\left[S_i^b(t) - S_i^f(t,L)\right]AF + R_i(t)V_{MBBR} \quad (3)$$

Nếu không quan tâm đến sự hình thành lớp biên giữa màng và nước (Wanner, O., Gujer, W. 1986), $S_i^b(t) = S_i^f(t,L)$

Phương trình (3) trở thành:

$$V_{MBBR}\frac{dS_i^b(t)}{dt} = Q^{in}(S_i^{in} - S_i^b) + R_i(t)V_{MBBR} \quad (4)$$

Trong đó $R_i(t)$: tốc độ phản ứng của cấu tử hòa tan i trong toàn bộ quá trình và được tính theo công thức:

$$R_i = \sum_{j=1\div19}^{i=1\div7} t_{j,i}r_j \quad (5)$$

b. Phương trình cân bằng vật chất với các cấu tử dạng hạt (X_i): phương trình cân bằng vật chất với các cấu tử dạng hạt (X_i) được viết như sau:

$$V_{MBBR}\frac{dX_i^b(t)}{dt} = Q^{in}(X_i^{in} - X_i^b) + \lambda L(t)^2 AF\rho + R_i(t)V_{MBBR} \quad (6)$$

Trong đó:Q^{in} : Lưu lượng dòng vào bể AO - MBBR (m^3/ngày);

X_i^{in}, X_i^b : Nồng độ cấu tử dạng hạt (g/m^3).

Độ dày của màng sinh học L được mô tả bằng một phương trình vi phân:

$$\frac{dL(t)}{dt} = u(t,L(t)) - \lambda L(t)^2 \quad (7)$$

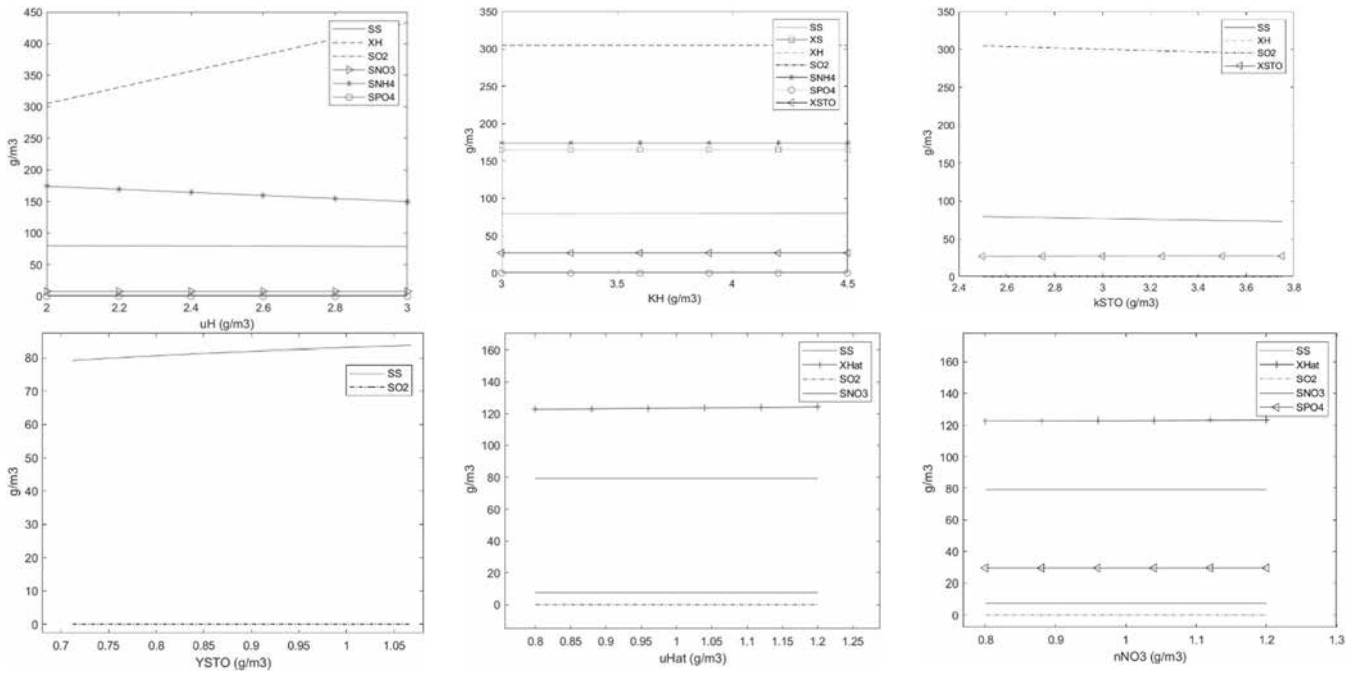
Vận tốc sinh khối di chuyển trong màng sinh học:

$$u(t,z) = \int_0^z \left(\sum_{i=7}^{15} X_i(t,z') \cdot R_i(t,z')\right) dz' \quad (8)$$

$$u(t,z) = 0 \quad (9)$$

Bảng 2. Các quá trình và ma trận, hệ số tỷ lượng tham gia trong mô hình

Quá trình j ↓		Cấu tử *i* ↓													
		S_S	X_S	X_I	X_H	X_A	X_{Hat}	X_{Aat}	S_{O_2}	S_{NO_3}	S_{NH_4}	S_{ND}	X_{ND}	S_{PO_4}	X_{STO}	S_I
1	Tăng trưởng của vi sinh vật dị dưỡng trong môi trường hiếu khí	$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{N,BM}$			$-i_{P,BM}$		
2	Tăng trưởng của vi sinh vật dị dưỡng trong môi trường thiếu khí	$-\frac{1}{Y_H}$			1					$-\frac{1-Y_H}{2,86Y_H}$	$-i_{N,BM}$			$-i_{P,BM}$		
3	Tăng trưởng của vi sinh vật tự dưỡng trong môi trường thiếu khí					1			$-\frac{4,57-Y_A}{Y_A}$	$-\frac{1}{Y_A}$	$-i_{N,BM}$ $-\frac{1}{Y_A}$			$-i_{P,BM}$		
4	Sự phân hủy của vi sinh vật dị dưỡng		1-f_p	f_p	-1								$i_{N,BM}-f_p i_{XP}$			
5	Sự phân hủy của vi sinh vật tự dưỡng		1-f_p	f_p		-1							$i_{N,BM}-f_p i_{XP}$			
6	Quá trình a môn hóa										1	-1				
7	Quá trình thủy phân thành phần hữu cơ	$1-f_{SI}$	-1													f_{SI}
8	Quá trình thủy phân thành phần N hữu cơ											1	-1			
9	Tăng trưởng của vi sinh vật dị dưỡng ở màng sinh học trong môi trường hiếu khí	$-\frac{1}{Y_{Hat}}$			1		1		$-\frac{1-Y_{Hat}}{Y_{Hat}}$		$-i_{N,BM}$					
10	Tăng trưởng của vi sinh vật dị dưỡng ở màng sinh học trong môi trường thiếu khí	$-\frac{1}{Y_{Hat}}$			1		1			$-\frac{1-Y_{Hat}}{2,86Y_{Hat}}$	$-i_{N,BM}$					
11	Tăng trưởng của vi sinh vật tự dưỡng ở màng sinh học trong môi trường hiếu khí							1	$-\frac{4,57-Y_{Aad}}{Y_{Aad}}$	$\frac{1}{Y_{Aat}}$	$-i_{N,BM}$ $-\frac{1}{Y_{Aat}}$					
12	Sự phân hủy của vi sinh vật dị dưỡng tại màng		$1-f_{p,at}$	$f_{p,a}$			-1						$i_{XPat}-f_p i_{XPat}$			
13	Sự phân hủy của vi sinh vật tự dưỡng tại màng		$1-f_{p,at}$	$f_{p,a}$				-1								
14	Thủy phân thành phần hữu cơ ở màng	$1-f_{SI}$	-1													f_{SI}
15	Thủy phân N hữu cơ ở màng											1	-1			
16	Quá trình amôn hóa tai màng sinh học										1	-1				
17	Lên men nhờ vi sinh vật dị dưỡng				1											
18	Hô hấp nội bào của vi sinh vật hiếu khí			f_{XI}	-1				$-(1-f_{XI})$							
19	Tích lũy cơ chất của vi sinh vật hiếu khí	$-\frac{1}{Y_{STO}}$							$-\frac{1-Y_{STO}}{Y_{STO}}$						1	



Hình 2 - Kết quả phân tích độ nhạy cục bộ đối với một số thông số trong mô hình

$$R_i = \sum_{j=1\div19}^{i=8\div15} \frac{t_{j,i} r_j}{X_i} \quad (10)$$

3.4. Giải hệ phương trình cân bằng vật liệu của mô hình

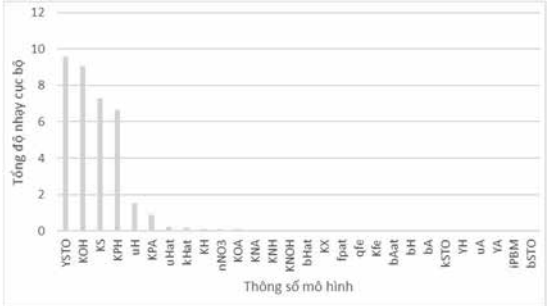
Để giải hệ phương trình cân bằng vật liệu thu được, phương pháp Runge-Kutta được biết là phương pháp hiệu quả, nó vừa có độ chính xác cao, thuật toán không quá phức tạp.

Hệ các phương trình trong mô hình được giải số bằng phương pháp Runge-Kutta bậc 4 và được code số bằng ngôn ngữ lập trình Matlab.

3.5. Phân tích độ nhạy

Thực hiện phân tích độ nhạy cục bộ và tính toán tổng độ nhạy cục bộ theo phương pháp đã được mô tả ở trên. Kết quả phân tích độ nhạy cục bộ đối với một số thông số như sau:

Khi phân tích ảnh hưởng của từng thông số có thể thấy thông số tốc độ phát triển cực đại (u_H) có ảnh hưởng lớn đến nồng độ X_H và S_{NH4}. Các thông số K_H, nNO_3 có ảnh hưởng tới hầu hết các tham số trong mô hình. Thông số năng suất tích lũy sản phẩm của vi sinh vật (Y_{STO}) có ảnh hưởng nhiều đến nồng độ S_S và S_{O2}.



Hình 3 - Kết quả tính toán tổng độ nhạy cục bộ

Kết quả tính toán tổng độ nhạy cục bộ được mô tả trong hình 3. Đồ thị hình 3 cho thấy các thông số màng sinh học và hệ số khuếch tán như năng suất tích lũy sản phẩm của vi sinh vật (Y_{STO}) có ảnh hưởng lớn nhất tới kết quả mô phỏng, với tổng độ nhạy cục bộ là 9,5. Đứng thứ hai về mức độ ảnh hưởng là hệ số bão hòa oxygen (K_{OH}) với tổng độ nhạy cục bộ là 9,0. Tiếp theo là hằng số bão hòa cơ chất hữu cơ dễ phân hủy sinh học (K_S) với tổng độ nhạy cục bộ là 7,3, hệ số bão hòa Phosphat (K_{PH}), thông số động học tốc độ phát triển cực đại (u_H). Các thông số khác có ảnh hưởng thấp. Kết quả phân tích độ nhạy được dùng để xác định các thông số tham gia trong quá trình hiệu chỉnh mô hình mô phỏng.

3.6. Hiệu chỉnh mô hình

Hiệu chỉnh mô hình được thực hiện trên cơ sở điều chỉnh các thông số có độ nhạy cao như đã phân tích ở trên. Các thông số động học của mô hình được lấy theo kết quả nghiên cứu của tác giả Marta Revilla và cs, 2016, Giorgio Mannina và cs, 2011, sau đó được hiệu chỉnh từng phần. Kết quả hiệu chỉnh được trình bày trong bảng 3.

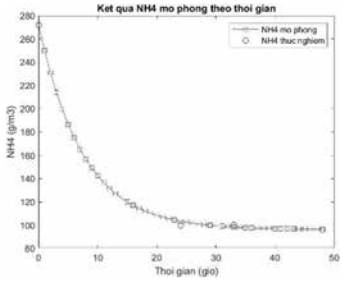
3.7. Chạy mô phỏng với các bộ số liệu đo đạc

Sau khi hiệu chỉnh các bộ thông số phù hợp, chạy mô phỏng trên phần mềm được viết trên ngôn ngữ lập trình Matlab với các bộ thông số đầu vào khác nhau. Kết quả mô phỏng đối với bộ số liệu số 1, thực nghiệm với hệ thống AO-MBBR quy mô phòng thí nghiệm. Kết quả mô phỏng cho thấy có sự khá tương đồng giữa kết quả chạy mô hình và số liệu đo, đặc biệt với kết quả mô phỏng NH_4^+.

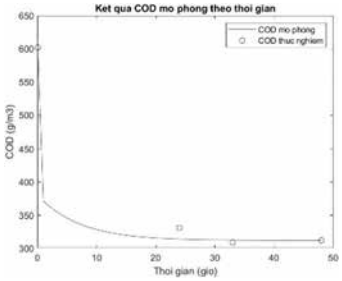
Bảng 3. Kết quả đo đạc và chạy mô hình mô phỏng với bộ số liệu 01

Thời gian (h)	COD (mg/l)		Sai số (%)	NH_4^+(mg/l)		Sai số (%)
	Đo đạc	Mô phỏng		Đo đạc	Mô phỏng	
0	614,0	614	0	234,4	234,4	0
3	624,1	377,4	39,52	166,5	171,7	3,12
6	526,3	362,7	31,05	125,7	138,2	9,94
9	402,6	355,0	11,69	131,0	120,3	8,17
24	376,2	347,3	7,63	100,3	100,5	0,20
33	348,1	347,1	0,26	96,6	99,7	3,21
48	348,0	347,0	0,29	98,1	99,6	1,53

Sai số giữa số liệu đo đạc và số liệu mô phỏng tại các thời điểm đo 33 giờ và 48 giờ là tương đối đồng nhất đối với kết quả mô phỏng với COD và NH_4^+. Ở các mốc thời gian ngắn hơn như 24 giờ, sai số giữa đo đạc và mô phỏng của NH_4^+ chỉ 0,2%.

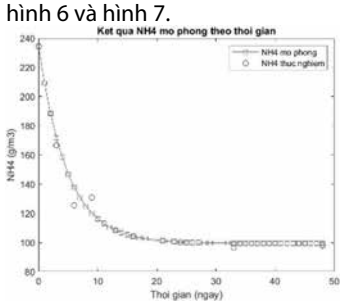


Hình 4 - Kết quả mô phỏng COD

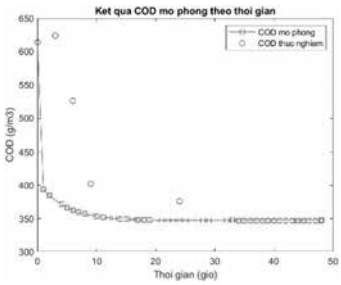


Hình 5 - Kết quả mô phỏng NH_4^+

Kết quả mô phỏng đối với bộ số liệu số 02, thực nghiệm với hệ thống AO-MBBR quy mô phòng thí nghiệm được thể hiện trong hình 6 và hình 7.



Hình 6 - Kết quả mô phỏng COD



Hình 7 - Kết quả mô phỏng NH_4^+

Kết quả mô phỏng cho thấy, số liệu COD và NH_4^+ trong dòng ra tại các thời điểm là khá tương đồng với kết quả đo đạc, đặc biệt là NH_4^+. Sai số trong khoảng 9 đến 40%. Các giá trị ở các mốc thời gian cao như 30 giờ, 48 giờ cho các sai số thấp hơn do tại các thời điểm này hệ thống bể phản ứng đã duy trì được ở mức ổn định để xử lý.

3.8. So sánh với số liệu của tác giả Giorgio Mannina và cộng sự (2011)

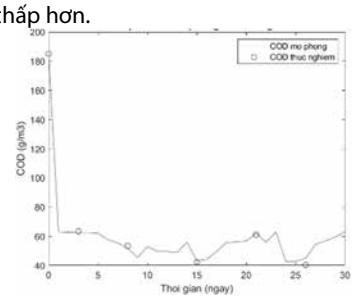
Số liệu thực nghiệm từ mô hình AO-MBBR của tác giả Giorgio Mannina et al. được sử dụng để chạy với mô hình mô phỏng mới được thiết lập mới. Các giá trị đầu vào mô hình như sau:

Bảng 4. Thông số đầu vào trong nghiên cứu của Giorgio Manninna [8]

Đơn vị tính: g/m³

Chỉ số	S_S	X_S	X_I	X_H	X_H	X_{Hat}	X_{Aat}	S_{02}
Đầu vào	42,73	81,89	17,81	21,37	0,.001	0,001	0,001	0
Chỉ số	S_{NO3}	S_{NH4}	S_{ND}	X_{ND}	S_{PO4}	X_{STO}	S_I	
Đầu vào	0,29	18,42	0,01	0,001	2,14	0,001	21,36	

Kết quả mô phỏng được thể hiện trong hình dưới, cho thấy sai số giữa kết quả mô phỏng và số liệu đo đạc của tác giả dao động từ 1,25% -11,26%. Sai số lớn nhất ở ngày thứ 26 với COD khi so sánh kết quả mô phỏng là 40,5 (mg/l) trong khi số liệu kiểm nghiệm của tác giả là 45 (mg/l), cho sai số 10%. Còn lại các kết quả đều cho sai số thấp hơn.



Hình 7 - Đồ thị so sánh kết quả mô phỏng COD với số liệu đo của tác giả Giorgio Mannina et al.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng được mô hình khái niệm, mô hình cấu trúc và ma trận tương hỗ của các cấu tử tham gia quá trình trong bể phản ứng sinh học AO-MBBR. Trên cơ sở đó đã thiết lập các phương trình toán học biểu thị mối quan hệ toán học của 19 quá trình xảy ra trong bể phản ứng sinh học MBBR và 15 cấu tử tham gia vào các quá trình này. Hệ phương trình được giải số bằng thuật toán Runge - Kutta bậc 4 và được code số bằng ngôn ngữ lập trình Matlab.

Nghiên cứu cũng đã xác định độ nhạy cục bộ để hiệu chỉnh và đưa vào các thông số động học phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam.

Kết quả tính toán của mô hình đã được so sánh với các bộ số liệu thực nghiệm cho thấy sai số thấp, đặc biệt với các mốc thời gian dài như 33 giờ, 48 giờ cho sai số từ 0,26% -0,29% đối với COD và 1,53% - 3,26% đối với NH_4^+. Kết quả thử nghiệm với bộ thông số của tác giả Giorgio Mannina và các cộng sự, 2011 cho thấy sai số lớn nhất giữa kết quả mô phỏng và số liệu đo đạc đối với thông số COD là 10%. Các kết quả tính toán cho thông số khác khác đều cho sai số <15%. Kết quả cho thấy mô hình bước đầu phù hợp để áp dụng mô phỏng các quá trình sinh học diễn ra trong hệ thống xử lý nước rỉ rác bằng công nghệ AO-MBBR.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin chân thành cảm ơn sự tài trợ cho nghiên cứu thông qua các đề tài KC08.05 và KC08.DA.02 của Bộ KHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] James Mcquarrie, Joshua Boltz - Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design, and Performance - Water Environment Research - 2011.

[2] M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosdrecht - Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment – IWA Scientific and Technical Report No. 9, 2000.

[3] Marta Revilla, Berta Galán, Javier R. Viguri - An integrated mathematical model for chemical oxygen demand (COD) removal in moving bed biofilm reactors (MBBR) including predation and hydrolysis – Water Research 98 (84 – 97) - 2016.

[4] Martina Ferrai, Giuseppe Guglielmi, Gianni Andreottola - Modelling respirometric tests for the assessment of kinetic and stoichiometric parameters on MBBR biofilm for municipal wastewater treatment - Environmental Modelling & Software 25 (626 - 632) - 2010.

[5] Khaoula Masmoudi Jabri, Thorsten Fiedler, Assia Saidi, Erwin Nolde, Michael Ogurek, Sven-Uwe Geissen, Latifa Bousselmi - Steady-state modeling of the biodegradation performance of a multistage moving bed biofilm reactor (MBBR) used for on-site greywater treatment - 2019.

[6] W. Rauch, H. Vanhooren, P. Vanrolleghem - A simplified mixed-culture biofilm model - Water Res. 33 (9) (2148-2162) - 1992.

[7] J.C. Kissel, P.L. McCarty, R.L. Street - Numerical simulation of mixed-culture biofilm - J. Environ. Eng. 110 (2) 9393–412) - 1984.

[8] Mannina G, Di Trapani D, Viviani G, Ødegaard H – Modelling and dynamic simulation of hybrid moving bed biofilm reactors: model concepts and application to a pilot plant. Biochem Eng J 56:23-36 - 2011.

[9] Hudson B. Carminati · Paula S. Lima · Argimiro R. Secchi · João P. Bassin - Modeling and dynamic simulation of a two-stage pre-denitrification MBBR system under increasing organic loading rates - 2018.

[10] R. K. Dereli, "Benchmarking leachate co-treatment strategies in municipal wastewater treatment plants under dynamic conditions and energy prices," Journal of Environmental Management, 2020.

[11] Masic, A., Bengtsson, J., Christensson, M. - Measuring and modeling the oxygen profile in a nitrifying moving bed biofilm reactor - Mathematical Biosciences 227 - 2010.

[12] Wanner, O., Gujer, W. - A multispecies biofilm model. Biotechnol - Bioeng. 28, 314-328 – 1986.

[13] Clara Jonfelt - An evaluation of an MBBR anammox model - sensitivity analysis and calibration - 2016.

[14] Galleguillos M, Vasel J.L. - Landfill leachate characterization for simulation of biological treatment with Activated Sludge Model No. 1 and Activated Sludge Model No. 3 – Environmental Technology - 2011.