

TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ VÀ VẬN HÀNH TRẠM XỬ LÝ NƯỚC THẢI

WASTEWATER TREATMENT PLANT DESIGN AND OPERATION OPTIMIZATION

Nguyễn Đình Huân, Lê Năng Định

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; ndhuan@dut.udn.vn

Tóm tắt - Câu hỏi đặt ra với trạm xử lý nước thải đô thị là cần bao nhiêu bể phản ứng sinh học để hiệu suất xử lý và hiệu quả kinh tế cao nhất. Đã có nhiều công trình nghiên cứu bằng thực nghiệm chưa, có câu trả lời chính xác cho vấn đề này. Để giải quyết vấn đề này, cần mô phỏng quy trình xử lý của trạm xử lý nước thải bằng toán học, trên cơ sở đó sử dụng lý thuyết tối ưu để tìm các thông số thiết kế xây dựng và vận hành thích hợp nhất. Kết quả nghiên cứu cho một trạm xử lý nước thải chỉ ra rằng chỉ cần sử dụng 2 bể (hiếu khí đặt trước và kỵ khí) sẽ cho hiệu quả xử lý và hiệu quả kinh tế cao nhất. Chạy thử với dữ liệu đầu vào của trạm xử lý nước thải Benchmark [5] cho thấy sau khi tối ưu hóa, hiệu quả kinh tế đạt từ 40% so với điều kiện vận hành thực tế của trạm.

Từ khóa - tối ưu hóa; trạm xử lý nước thải; xử lý nước thải đô thị; thiết kế; vận hành.

Abstract - A big question in urban wastewater treatment is that how many bioreactors are enough to provide the desired performance with the best economic efficiency. There have been many studies of the issue but so far no exact answer has been found. To address this issue, it is necessary to simulate the treatment procedure of the WWTP using mathematics with the optimization theory to make the basis for the determination of the most appropriate design and operation parameters. The research on a WWTP suggests that the use of 2 bioreactors would provide the best performance and economic efficiency. The pilot with the input data of the Benchmark WWTP [5] indicates that after the optimization, the economic efficiency increases 40% in comparison with the actual operation condition of the plant.

Key words - optimization; wastewater treatment plant; urban wastewater treatment; design; operation.

1. Đặt vấn đề

Vấn đề mô phỏng quy trình làm việc là khá phổ biến ở nhiều lĩnh vực khác nhau, tuy nhiên đối với lĩnh vực xử lý nước thải còn rất hạn chế. Một phần do người nghiên cứu khó có đồng thời 2 kỹ năng về xử lý nước thải và về tin học, một phần do đặc thù của công nghệ xử lý nước thải khó có thể chuyển hóa thành lý thuyết mô hình hóa như một số lĩnh vực khác. Tuy nhiên, hiện nay có một vài mô hình được giới khoa học đánh giá cao và đang được sử dụng để mô phỏng trạm xử lý nước thải là ASM1 [1], ASM2 [2],... tùy theo đặc thù và tính chất nước thải mà được áp dụng khác nhau.

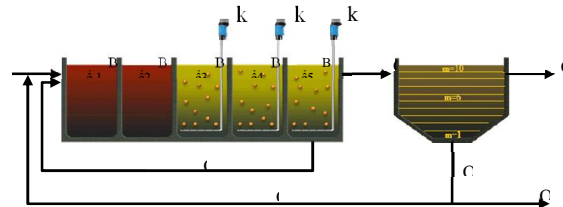
Liên quan đến tối ưu hóa trạm xử lý nước thải, Gillot, 1999 [3] đã trình bày cách xác định giá thành trạm xử lý với kết quả khá chính xác, nhưng ở đây chỉ mô phỏng dạng đơn giản nhất mà không đại diện cho mọi trường hợp có thể xảy ra. Alasino, 2007 [4] cũng đã tập trung giải quyết vấn đề giảm giá thành xây dựng cho một trạm xử lý nước thải. Nghiên cứu này mang tính tổng quan hơn bởi sự mô tả trạm xử lý nước thải được hiểu như một siêu cấu trúc, bao gồm 1 bể lắng và nhiều bể sinh học với các kích thước khác nhau và được giả thiết với nhiều trường hợp vận hành đa dạng hơn. Tuy nhiên, các nghiên cứu này lại không thay đổi kích thước các công trình của trạm xử lý, hay nói cách khác là làm rõ chi phí đầu tư của hệ thống xử lý nước thải. Chính vì thế, ở đây chúng tôi tiến hành mô phỏng và tối ưu dựa trên một trạm xử lý nước thải điển hình Benchmark [5] trên cơ sở giả thiết cho tất cả các trường hợp có thể áp dụng cho trạm, từ đó tìm ra số lượng bể phản ứng cũng như các đường lưu lượng vào và hồi lưu nước thải sao cho hiệu quả xử lý cũng như hiệu suất kinh tế cao nhất. Để thực hiện công việc này, ở đây mô hình ASM1 được áp dụng do tính chất nước thải đầu vào là nước thải đô thị.

Công cụ để tối ưu hóa ở đây là gProms [6]. Đó là một phần mềm lập trình rất mạnh và chính xác thường áp dụng để mô phỏng, tối ưu hóa cũng như điều khiển quy trình sản

suất trong các nhà máy công nghiệp hiện nay. Với gProms ta có thể giải các thuật toán hết sức phức tạp mà không cần sắp xếp các câu lệnh theo trình tự logic như các phần mềm truyền thống khác. Bên cạnh đó, gProms còn có khả năng đọc trực tiếp các file dữ liệu đo đạc đầu vào mà không cần chuyển đổi sang dạng công thức gần đúng. Hiện nay trên thế giới văn phòng đại diện gProms được đặt ở một số nước phát triển nhằm đưa công nghệ điều khiển vào công nghiệp sản xuất tự động.

2. Đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu dựa trên trạm xử lý nước thải Benchmark [5] gồm 5 bể phản ứng sinh học (2 kỵ khí, 3 hiếu khí) như Hình 1.



Hình 1. Trạm xử lý nước thải Benchmark

Các thông số của hệ thống được trình bày trong Bảng 1, còn lưu lượng các thành phần được mô tả trong Bảng 2.

Bảng 1. Các thông số của trạm xử lý Benchmark

Bể phản ứng	Thể tích (m ³)	k_{La} (*) (1/h)	Ghi chú
Bể 1	1 000	0	Kỵ khí
Bể 2	1 000	0	Kỵ khí
Bể 3	1 333	10	Hiếu khí
Bể 4	1 333	10	Hiếu khí
Bể 5	1 333	3.5	Hiếu khí

(*) k_{La} : hệ số cấp oxy cho bể sinh học.

Bảng 2. Lưu lượng trạm xử lý Benchmark

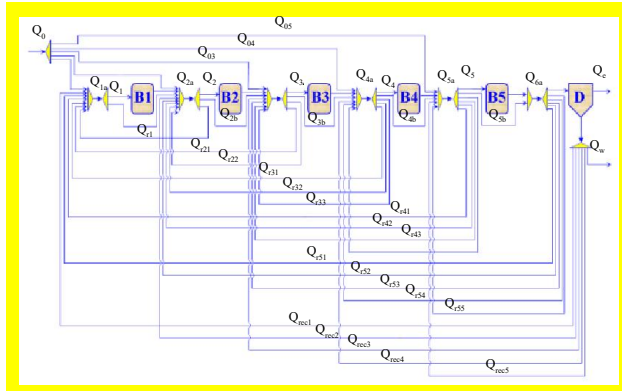
Thành phần	Giá trị	Đơn vị
Q_0	18 446	m ³ /d
Q_r	18 446	m ³ /d
Q_a	55 338	m ³ /d
Q_w	385	m ³ /d

Các dữ liệu đo đạc được công khai trên trang site của Benchmark (www.benchmarkWWTP.org), với số liệu đo đạc liên tục trong 2 tuần trong khoảng thời tiết khác nhau (mùa khô, mùa mưa, mùa bão), cứ 15 phút đo 1 lần.

3. Phương pháp nghiên cứu

Bước 1. Tiến hành mô phỏng trạm xử lý Benchmark để chuẩn hóa các tham số cho phù hợp với mô hình ASM1.

Bước 2. Dựa trên mô hình mô phỏng được, lập sơ đồ vận hành giả thiết với đầy đủ tất cả các kịch bản có thể xảy ra về dòng vào, tuần hoàn, cấp khí, tách bùn như Hình 2.

**Hình 2.** Kịch bản tổng hợp của trạm xử lý nước thải

Bước 3. Tiến hành tối ưu hóa tất cả các biến có trong sơ đồ Hình 2 để thỏa mãn 2 điều kiện chính: (1) nước thải đầu ra đạt tiêu chuẩn xả thải; (2) tổng giá thành của trạm xử lý là nhỏ nhất. Quá trình tối ưu hóa được thực hiện bằng phần mềm gProms [6]. Bằng phương pháp so sánh vòng lặp sẽ thu được bộ thông số cuối cùng ứng với giá thành nhỏ nhất, những thông số quá nhỏ hoặc bằng 0 coi như không áp dụng vào sơ đồ xử lý.

4. Giá thành của trạm xử lý

Có 2 loại giá thành của trạm xử lý nước thải, đó là giá thành đầu tư (IC) và giá thành vận hành (OC). Tổng của chúng (giá thành tổng) được tính toán như sau [4]:

$$NPV = IC + OC \quad (1)$$

a. Giá thành đầu tư (IC)

$$IC = IC_{reactor} + IC_{aerator} + IC_{settler} + IC_{pump} + IC_{recycle} \quad (2)$$

$$IC_{reactor} = \sum_{i=1}^5 b_i \cdot V_i^{\delta_i} \quad (3)$$

$$IC_{aerator} = \sum_{i=1}^5 b_a (B \cdot k_L a_i \cdot V_i)^{\delta_a} \quad (4)$$

$$IC_{settler} = b_{set,1} \cdot A^{\delta_{set,1}} + b_{set,2} \cdot A^{\delta_{set,2}} \quad (5)$$

$$IC_{pump} = b_{ips,1} \cdot Q_0^{\delta_{ips,1}} + b_{ips,2} \cdot Q_0^{\delta_{ips,2}} + b_{ips,3} \cdot Q_0^{\delta_{ips,3}} \quad (6)$$

$$IC_{recycle} = b_{sr} \cdot (Q_a + Q_r)^{\delta_{sr}} \quad (7)$$

ở đây: $IC_{reactor}$: giá thành đầu tư bể phản ứng.

$IC_{aerator}$: giá thành đầu tư máy cấp khí.

$IC_{settler}$: giá thành đầu tư bể lắng.

IC_{pump} : giá thành đầu tư bơm nước vào.

$IC_{recycle}$: giá thành đầu tư các bơm tuần hoàn.

$b_a, b_t, b_{ips,1}, b_{ips,2}, b_{ips,3}, b_{set,1}, b_{set,2}, \delta_{ips,1}, \delta_{ips,2}, \delta_{ips,3}, \delta_{set,1}, \delta_{set,2}, \delta_r$: các tham số (Bảng 3).

V_i : thể tích các bể phản ứng, (m³).

A : diện tích bể lắng, (m²).

B : hằng số = 3000⁻¹(kg O₂) d/h.m³.

$k_L a_i$: hệ số chuyển tải oxy ở các bể phản ứng.

Q_0, Q_a, Q_r : lưu lượng vào, tuần hoàn trong và ngoài, (m³/d).

Bảng 3. Tham số đầu tư và vận hành

b_t	10 304	δ_t	0,477
b_a	8 590	δ_a	0,433
$b_{set,1}$	6 630	$\delta_{set,1}$	0,678
$b_{set,2}$	6 338	$\delta_{set,2}$	0,325
$b_{ips,1}$	2 334	$\delta_{ips,1}$	0,637
$b_{ips,2}$	2 123	$\delta_{ips,2}$	0,540
$b_{ips,3}$	2 090	$\delta_{ips,3}$	0,349
b_{sr}	5 038	δ_{sr}	0,304

b. Giá thành vận hành (OC)

$$OC = \Gamma \cdot OC_i^T \quad (8)$$

$$OC_i^T = OC_{aerator} + OC_{pump} + OC_{sludge} \quad (9)$$

$$\Gamma = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+id)^j} = \frac{1-(1+id)^{-n}}{id} \quad (10)$$

$$OC_{aerator} = \alpha_E \cdot AE \quad (11)$$

$$AE = \frac{S_O^{sat}}{T \cdot 1,8 \cdot 1000} \int_{t=7 \text{ days}}^{t=14 \text{ days}} \left(\sum_{i=1}^5 V_i \cdot k_L a_i(t) dt \right) \quad (12)$$

$$OC_{pump} = \alpha_E \cdot PE \quad (13)$$

$$PE = \frac{1}{T} \int_{t=7 \text{ days}}^{t=14 \text{ days}} (0,004Q_a(t) + 0,008Q_r(t) + 0,05Q_w(t)) dt \quad (14)$$

$$OC_{sludge} = \alpha_{SLD} \cdot SP \quad (15)$$

$$SP = TSS_e \cdot Q_w \quad (16)$$

ở đây: $OC_{aerator}$: giá thành vận hành bể cấp khí.

OC_{pump} : giá thành vận hành bơm.

OC_{sludge} : giá thành xử lý bùn.

OC_i^T : giá vận hành năm thứ i .

Γ : hệ số cập nhật để tính giá hiện hành.

id : tỷ lệ trượt giá, $id = 0,05$.

n : tuổi thọ trạm xử lý, $n = 20$ (năm).

AE, PE : năng lượng bơm và máy cấp khí.

T : thời gian tính toán, (ngày).

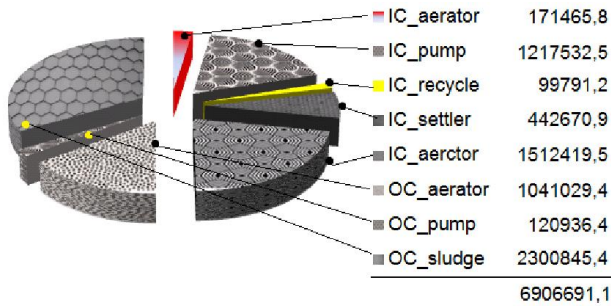
α_E, α_{SLD} : tham số vận hành (Bảng 4).

Bảng 4. Tham số chi phí vận hành hàng năm

Hệ số	Giá trị	Đơn vị
α_E	25	euro ngày/kWh.năm
α_{SLD}	75	euro ngày/kg SS.năm

5. Giá thành trạm xử lý khi chưa tối ưu hóa

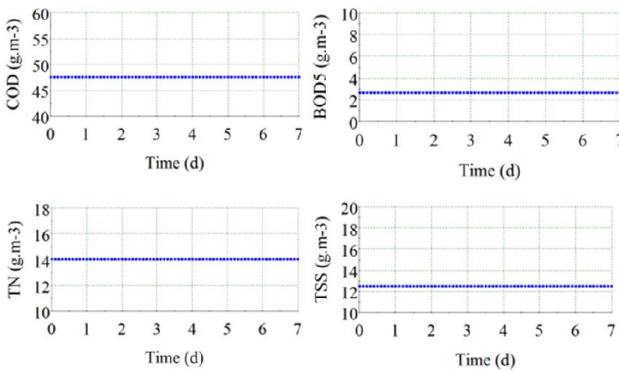
Các tham số vận hành thực tế của trạm xử lý Benchmark được trình bày trong Bảng 1 và 2. Sử dụng các dữ liệu đầu vào bởi các giá trị trung bình của các số liệu đo đạc thực tế, sẽ xác định được tổng giá thành đầu tư và vận hành hàng năm của trạm là 6906691,2 (euro/năm). Giá trị thành phần của các chi phí được trình bày trong Hình 3. Kết quả này hoàn toàn tương tự nghiên cứu của Alasino, 2007 [4].



Hình 3. Giá thành thực tế của trạm xử lý nước thải Benchmark

Hình 3 cho thấy rằng chi phí xử lý bùn, hệ thống cấp khí, đầu tư bơm, xây lắp bể phản ứng là khá cao. Do vậy, việc tối ưu hóa về mặt kích thước và phương pháp vận hành trạm xử lý nước thải để giảm chi phí là rất cần thiết.

Với số liệu vận hành thực tế của trạm, kết quả mô phỏng nồng độ các chất đầu ra được trình bày trong Hình 4.



Hình 4. Nồng độ đầu ra thực tế của trạm xử lý

Tất cả các nồng độ thấp hơn nhiều so với tiêu chuẩn xả thải. Điều này chứng tỏ rằng quá trình vận hành hoặc việc thiết kế trạm xử lý nước thải Benchmark là an toàn quá mức cần thiết, nên khá tốn kém trong đầu tư và vận hành. Ở đây tiêu chuẩn xả thải được quy định: $COD_{max} = 125 \text{ mg/m}^3$; $BOD_{5max} = 25 \text{ mg/m}^3$; $TSS_{max} = 35 \text{ mg/m}^3$; $TN_{max} = 10 \text{ mg/m}^3$.

6. Kết quả tối ưu hóa

Tiến hành tối ưu hóa tìm giá thành giá thành tổng nhỏ nhất ($NPV = IC + OC$), đồng thời thỏa mãn tiêu chuẩn xả

thải về COD, BOD_5, TN, TSS .

Quá trình tối ưu hóa được xác định bởi:

$$\text{Min}\{NPV = IC + OC\} \quad (17)$$

Các thông số cần xác định: $k_{La1}, k_{La2}, k_{La3}, k_{La4}, k_{La5}, Q_{01}, Q_{02}, Q_{03}, Q_{04}, Q_{r11}, Q_{r21}, Q_{r22}, Q_{r31}, Q_{r32}, Q_{r33}, Q_{r41}, Q_{r42}, Q_{r43}, Q_{r44}, Q_{r51}, Q_{r52}, Q_{r53}, Q_{r54}, Q_{r55}, Q_{rec1}, Q_{rec2}, Q_{rec3}, Q_{rec4}, Q_{rec5}, Q_w, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$.

Giới hạn không chế:

$$COD_e \leq COD_{max}$$

$$BOD_e \leq BOD_{5max}$$

$$TSS_e \leq TSS_{max}$$

$$TN_e \leq TN_{max}$$

$$k_{La1}, k_{La2}, k_{La3}, k_{La4}, k_{La5} \leq k_{La_{max}}$$

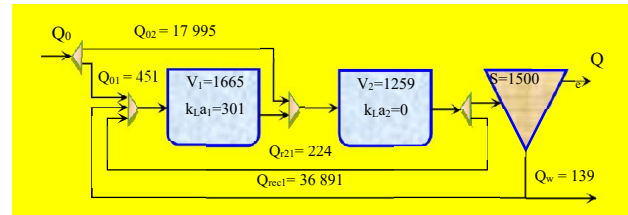
$$Q_{1b} \leq Q_{1a}; Q_{2b} \leq Q_{2a}; Q_{3b} \leq Q_{3a}; Q_{4b} \leq Q_{4a}; Q_{5b} \leq Q_{5a}.$$

$$Q_w \leq Q_{w_{max}}$$

$$Q_{r11} + Q_{r21} + Q_{r22} + Q_{r31} + Q_{r32} + Q_{r33} + Q_{r41} + Q_{r42} + Q_{r43} + Q_{r44} + Q_{r51} + Q_{r52} + Q_{r53} + Q_{r54} + Q_{r55} \leq Q_{a_{max}}.$$

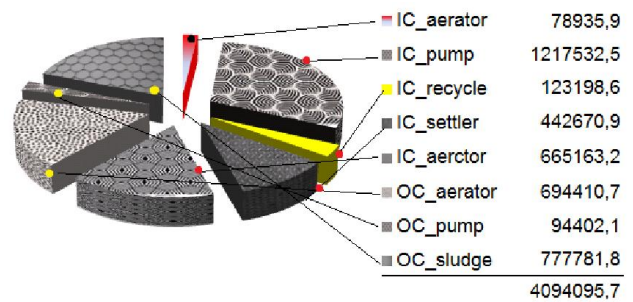
$$Q_{rec1} + Q_{rec2} + Q_{rec3} + Q_{rec4} + Q_{rec5} \leq Q_{r_{max}}$$

Sử dụng bộ công cụ tối ưu hóa của gProms [6] bằng phương pháp thử vòng lặp nhiều lần để tìm giá trị theo điều kiện đặt ra. Sau khi tối ưu, các giá trị bằng 0 (hoặc rất bé) có sẽ được bỏ qua. Do vậy, kết quả từ sơ đồ tổng quát ở Hình 2 được rút gọn thành sơ đồ tối ưu như Hình 5.



Hình 5. Kết quả sau khi tối ưu trạm xử lý nước thải

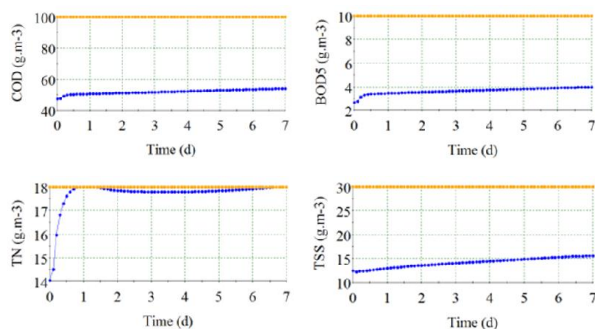
Sau khi tối ưu hóa, kết quả thu được là 2 bể với hệ số cấp khí $k_{La1} > 0$ et $k_{La2} = 0$. Có nghĩa là bể kỵ khí đặt trước và bể hiếu khí đặt sau.



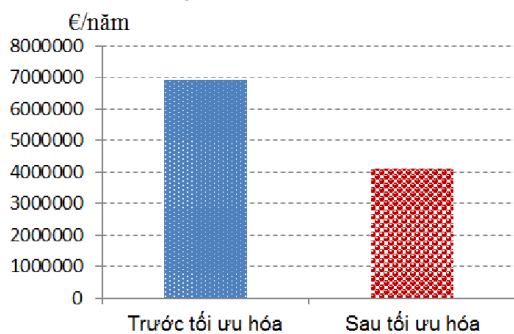
Hình 6. Các giá trị của giá thành sau khi tối ưu

Mô phỏng trạm xử lý nước thải với các dữ liệu trong Hình 5 được biểu diễn trong Hình 6. Trong trường hợp này, giá thành tổng sau khi tối ưu là 4094095,8 (€/năm).

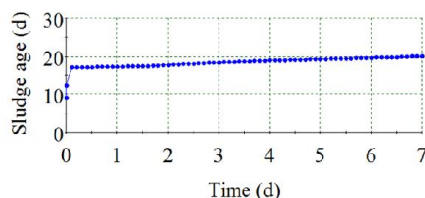
Mô phỏng với các dữ liệu trong Hình 7 chỉ ra rằng phần lớn các nồng độ đầu ra nằm dưới tiêu chuẩn xả thải, chỉ riêng TN là xấp xỉ bằng tiêu chuẩn xả thải của nó, điều này cũng chứng tỏ việc tối ưu hóa đạt mục tiêu đề ra.



Hình 7. Nồng độ đầu ra sau khi tối ưu hóa



Hình 8. Giá thành trạm xử lý nước thải trước và sau khi tối ưu hóa



Hình 9. Tuổi bùn sau tối ưu hóa khi bị khống chế

Giá thành tổng của trạm xử lý nước thải sau khi tối ưu giảm rất đáng kể so với trường hợp thực tế của Benchmark (Hình 8). Điều này cho phép tiết kiệm khoảng 41% giá thành tổng của trạm xử lý nước thải. Trong trường hợp này tuổi bùn hoàn toàn phù hợp yêu cầu công nghệ (Hình 9).

7. Kết luận

Sau khi tối ưu hóa, dòng ra của trạm xử lý nước thải đạt tiêu chuẩn cho phép. Chỉ có nồng độ TN đạt xấp xỉ ngưỡng cho phép. Điều này chứng tỏ trạm xử lý có nguy cơ gây ô nhiễm nhất là TN.

Quá trình tối ưu hóa cho thấy không cần xây dựng nhiều bể phản ứng mà chỉ cần 2 bể sẽ cho hiệu quả kinh tế cao nhất. Bên cạnh đó, một lưu ý đáng thảo luận là kết quả thu được cho thấy bể hiếu khí đặt trước bể kỵ khí. Điều này hơi khác với các ứng dụng trong thực tế là thường bố trí bể kỵ khí trước bể hiếu khí. Có thể giải thích cho vấn đề này là trạm Benchmark xử lý nước thải đô thị, có nồng độ TN khá cao, nên cần thực hiện quá trình nitrat hóa trong bể hiếu khí trước khi chuyển sang bể kỵ khí để thực hiện quá trình phản nitrat nhằm giảm nitơ tổng trong nước thải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Henze, M. et al., 1987. Activated Sludge Model No. 1. Technical Report 1, IAWQ, London.
- [2] Henze, M. et al., 1995. Activated Sludge Model No.2. IAWQ Scientific and Technical Report No. 3, London, UK.
- [3] Gillot, S. et al., 1999. Optimization wastewater treatment plant design and operation using simulation and cost analysis. 72nd annual conference WEFTEC 1999. 9-13 October, New Orleans, USA.
- [4] Alasino, N., Mussati, M.C. & Scenna, N., 2007. Wastewater treatment plant synthesis and design. Ind. Eng. Chem. Res., 46, 23, 7497.
- [5] www.benchmarkWWTP.org
- [6] gProms, Process Systems Enterprise, 1997–2009, www.psenterprise.com/gproms.

(BBT nhận bài: 17/8/2016, phản biện xong: 17/9/2016)