

EVALUATING SOME STRATEGIES FOR IMPROVING SYSTEM INDEXES IN WWTP BSM1

Bach Van Nam^{1*}, Do Trung Hai¹, Bach Nhat Hong²

¹TNU - University of Technology

²Academy of Military Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	14/8/2023	This study focuses on assessing strategies to optimize system indicators in a wastewater treatment plant utilizing the activated sludge method BSM1. Initially, the article introduces the BSM1 model and the criteria for evaluating the effectiveness of related control methods. The emphasis is then placed on presenting and analyzing control approaches for dissolved oxygen (DO) concentration in tank number 5, notably the implementation of the PI controller, fuzzy controller, predictive control, and their combinations. Leveraging the harmonic mean algorithm, the research findings pinpointed the harmonic mean strategy to enhance system indicators in the BSM1 wastewater treatment plant. This research serves as a valuable reference for future studies aiming to find and apply for advanced control techniques to meet quality standards and cost optimization in the wastewater treatment domain.
Revised:	28/9/2023	
Published:	28/9/2023	
KEYWORDS		
Benchmark simulation model 1 (BSM1)		
Dissolved oxygen (DO)		
Effluent Quality Index (EQI)		
Overall Cost Index (OCI)		
Harmonic mean		

ĐÁNH GIÁ MỘT SỐ CHIẾN LƯỢC CẢI THIỆN CHỈ TIÊU HỆ THỐNG TRONG NHÀ MÁY XỬ LÝ NƯỚC THẢI BSM1

Bạch Văn Nam^{1*}, Đỗ Trung Hải¹, Bạch Nhật Hồng²

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

²Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	14/8/2023	Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá các chiến lược nhằm tối ưu chỉ tiêu hệ thống tại nhà máy xử lý nước thải sử dụng bùn hoạt tính - BSM1. Đầu tiên, bài viết giới thiệu về mô hình BSM1 cùng với các tiêu chí để đánh giá hiệu quả của các phương pháp điều khiển liên quan. Tiếp theo, trọng tâm được đặt vào việc giới thiệu và phân tích các phương pháp điều khiển nồng độ oxy hòa tan (DO) ở bể số 5, trong đó nổi bật là việc áp dụng bộ điều khiển PI, bộ điều khiển mờ, điều khiển dự báo và sự kết hợp của chúng. Nhờ sử dụng thuật toán trung bình điều hòa, kết quả từ nghiên cứu đã xác định ra chiến lược điều khiển tối ưu cho việc cải thiện chỉ tiêu hệ thống tại mô hình nhà máy xử lý nước thải BSM1. Nghiên cứu này cung cấp nguồn tài liệu tham khảo cho những nghiên cứu sau này trong việc tìm kiếm và ứng dụng các kỹ thuật điều khiển tiên tiến, nhằm đạt tiêu chuẩn chất lượng và chi phí tối ưu trong lĩnh vực xử lý nước thải.
Ngày hoàn thiện:	28/9/2023	
Ngày đăng:	28/9/2023	
TỪ KHÓA		
Mô hình mô phỏng chuẩn BSM1		
Nồng độ Oxy hòa tan DO		
Chỉ số chất lượng nước thải EQI		
Chỉ số chi phí tổng thể OCI		
Trung bình điều hòa		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8547>

* Corresponding author. Email: bachvannam@tnut.edu.vn

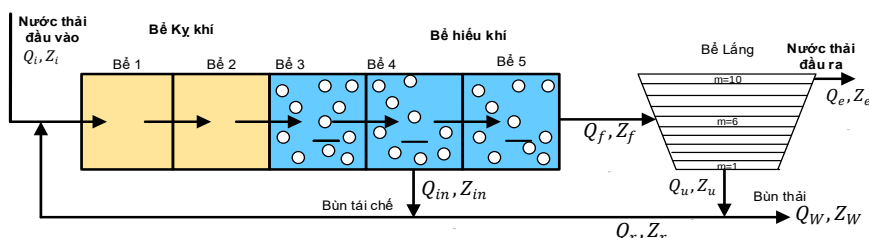
1. Giới thiệu

Nước thải phát sinh từ các hoạt động của con người như công nghiệp, thương mại, dân dụng và nông nghiệp,... được coi là một nguồn gây ô nhiễm lớn đối với môi trường. Để giảm thiểu tác động tiêu cực và bảo vệ chất lượng môi trường nước, việc xử lý nước thải trước khi thải ra là cần thiết. Quá trình này thường được thực hiện tại nhà máy xử lý nước thải WWTP (Wastewater treatment plants) thông qua quá trình xử lý bùn hoạt tính sinh học. WWTP là một hệ thống lớn, phức tạp, có độ trễ và tính phi tuyến tính, mà trong đó các quá trình sinh lý và sinh hóa bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của lưu lượng nước thải đầu vào [1]. Vào năm 2002, hiệp hội xử lý nước thải thế giới đã đưa ra mô hình mô phỏng chuẩn BSM1 (Benchmark Simulation Model no. 1) [2], [3] với các mẫu dữ liệu nước thải chuẩn cho trước nhằm làm tiêu chí cho việc đánh giá các giải pháp điều khiển trong xử lý nước thải dùng bùn hoạt tính. Trong mô hình mô phỏng chuẩn BSM1, việc đánh giá hiệu quả của các bộ điều khiển được thực hiện theo ba tiêu chí chính gồm: Giới hạn các thông số nước thải của đầu ra hệ thống, chất lượng bộ điều khiển (sai lệch điều khiển lớn nhất, tích phân sai lệch, bình phương tích phân sai lệch), và quan trọng nhất là các tham số về hoạt động tổng thể của hệ thống. Hai tham số liên quan đến chất lượng hoạt động của toàn bộ hệ thống xử lý nước thải là mức độ đáp ứng các tiêu chuẩn chất lượng nước thải đầu ra EQI (Effluent Quality Index) và chi phí hoạt động OCI (Overall Cost Index) của hệ thống. Đây là hai tiêu chí ngược nhau, nếu cần thỏa mãn đồng thời chỉ số EQI và OCI nhỏ thì đòi hỏi quá trình thiết kế bộ điều khiển cần phải giải bài toán tối ưu đa mục tiêu. Dựa trên tiêu chuẩn BSM1, đã có một loạt các phương pháp điều khiển được áp dụng như điều khiển theo tầng [4], [5]; điều khiển dự báo dựa trên mô hình [6] - [9]; điều khiển dự báo mô hình phi tuyến [10] - [12]; điều khiển logic mờ [13] - [15] và điều khiển học lặp [16], [17]. Bên cạnh giải pháp cải thiện chất lượng điều khiển cho hệ thống xử lý nước thải BSM1 thì các chiến lược điều khiển khác nhau cũng đã được áp dụng để cải thiện chỉ số EQI và chỉ số OCI như: Chỉ điều khiển nồng độ oxy hòa tan DO (Dissolved oxygen) ở bể 5: [2] - [5]; điều khiển nồng độ oxy hòa tan DO thêm ở bể 3, 4 [14], [18]; điều khiển DO với lượng đặt không đổi [3], [19] hoặc điều khiển DO với lượng đặt thay đổi [4], [5], [17]. Các chiến lược điều khiển đều cho thấy chỉ số OCI và EQI tốt hơn so với bộ điều khiển PI mặc định, tuy nhiên có chiến lược chỉ số OCI giảm mạnh, cũng có chiến lược chỉ số EQI lại giảm mạnh, có chiến lược giảm đồng thời cả 2 chỉ số EQI và OCI. Vì vậy, nhóm nghiên cứu sử dụng phương pháp trung bình điều hòa để đánh giá hiệu quả của các chiến lược điều khiển nồng độ oxy hòa tan DO trong bể 5 được triển khai trong hệ thống xử lý nước thải BSM1.

Bài báo được chia làm 4 phần. Ngoài phần giới thiệu, phần 2 bài báo trình bày hệ thống xử lý nước thải chuẩn theo BSM1 và phân tích một số chiến lược cải thiện các chỉ tiêu hệ thống trong hệ thống xử lý nước thải. Phần 3, kết quả và bàn luận. Phần 4 tóm tắt những phát hiện đáng chú ý và những điểm kết luận của bài viết này.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình xử lý nước thải BSM1



Hình 1. Tổng quan mô hình xử lý nước thải BSM1 [1]

Hệ thống xử lý nước thải chuẩn theo BSM1 bao gồm các bể bùn hoạt tính (hay các bể xử lý sinh học) và bể lắng thứ cấp như sơ đồ thể hiện trong Hình 1 [1]. Hệ thống xử lý nước thải chuẩn

BMS1 bao gồm năm bể bùn hoạt tính gồm hai bể kỵ khí tiếp theo là ba bể hiếu khí và ngay sau các bể bùn hoạt tính là bể lắng.

Các thông số vật lý cơ bản của hệ thống xử lý nước thải BSM1 như sau: Nhiệt độ của dòng nước thải đầu vào là 15°C ; Tốc độ dòng chảy trung bình đến hệ thống là $18446 \text{ m}^3/\text{ngày}$; Bể xử lý bùn hoạt tính gồm 5 bể được mắc nối tiếp nhau với tổng thể tích là 5999 m^3 . Các bể 1 và 2 là bể kỵ khí, mỗi bể có thể tích 1000 m^3 ; Các bể 3, 4 và 5 là bể hiếu khí, mỗi bể có thể tích 1333 m^3 . Trong đó ở bể 3 và 4 có hệ số truyền oxy $K_{La,k}$ là cố định, $K_{La,3} = K_{La,4} = 10 \text{ h}^{-1} = 240 \text{ d}^{-1}$. Còn trong bể 5 nồng độ oxy hòa tan DO ($S_{O,5}$) được điều khiển ở mức 2 mg/l bằng cách điều khiển $K_{La,5}$; Bể lắng thứ cấp, bể này gồm 10 tầng có tổng thể tích là 6000 m^3 .

2.2. Các tiêu chí đánh giá

Trong BMS1 [1], [2], để so sánh hiệu quả của các chiến lược điều khiển khác nhau khi áp dụng vào hệ thống xử lý thải, người ta đưa ra tiêu chí đánh giá bao gồm: Đánh giá chất lượng điều khiển (tiêu chí 1); Giới hạn nồng độ của một số chất trong nước thải (tiêu chí 2); Chỉ số chất lượng nước thải đầu ra của hệ thống (EQI - Effluent Quality Index) và Chỉ số chi phí tổng thể (OCI-Overall Cost Index) (tiêu chí 3).

2.2.1. Đánh giá chất lượng điều khiển

Chất lượng điều khiển được đánh giá thông qua 2 chỉ số IAE và ISE của sai lệch điều khiển e như sau [1], [2]:

Tích phân của sai số tuyệt đối IAE (Integral of the Absolute Error)

$$IAE_k = \int_{t_0}^{t_f} |e_k| \cdot dt \quad (1)$$

trong đó: e_k là sai lệch so với giá trị đặt, t_0 và t_f là thời gian một chu kỳ 14 ngày.

Tích phân của bình phương sai số ISE (Integral of the Squared Error)

$$ISE_k = \int_{t_0}^{t_f} e_k^2 \cdot dt \quad (2)$$

2.2.2. Giới hạn nồng độ một số chất trong nước thải đầu ra

Giới hạn nồng độ một số chất ở nước thải sau khi được xử lý là một thông số quan trọng không những để xác định xem các chiến lược điều khiển có đáp ứng được mục tiêu điều khiển hay không mà còn dựa vào đó để đưa những chiến lược điều khiển hiệu quả hơn.

Nồng độ nước thải của S_{Ntot} , COD_t , S_{NH} , TSS và BOD_5 phải tuân thủ các giới hạn nêu trong tài liệu [1], [2]. Bảng 1 dưới đây nêu rõ các quy định về giới hạn nồng độ các chất trong nước thải sau khi xử lý.

Bảng 1. Quy định về giới hạn nồng độ các chất trong nước thải sau khi xử lý

Tham số	Đơn vị	Giá trị
S_{Ntot}	gN/m^3	<18
COD_t	gCOD/m^3	<100
S_{NH}	gN/m^3	<4
TSS	gSS/m^3	<30
BOD_5	BOD/m^3	<10

2.2.3. Chỉ số chất lượng nước thải đầu ra EQI của hệ thống và chỉ số chi phí tổng thể OCI

Chỉ số chất lượng nước thải EQI được xác định để đánh giá chất lượng của nước thải, EQI tính bằng kg đơn vị ô nhiễm/ngày [1], [2]. Dựa vào chỉ số này, các cơ sở xả thải ô nhiễm ra môi trường nước sẽ phải chi trả tiền thuế hoặc tiền phạt. EQI được tính bởi công thức (3) sau đây:

$$EQI = \frac{1}{t_{obs}1000} \int_{t=7}^{t=14} \left(\beta_{TSS} TSS_e(t) + \beta_{COD} COD_e(t) + \beta_{NKj} S_{NKj,e}(t) + \beta_{NO} S_{NO,e}(t) + \beta_{BOD_5} BOD_{5,e}(t) \right) dQ_e(t) \quad (3)$$

trong đó:

$$S_{NKj,e} = S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB}(X_{B,H,e} + X_{X,A,e}) + i_{XP}(X_{P,e} + X_{I,e})$$

$$TSS_e = 0.75 \cdot (X_{S,e} + X_{I,e} + X_{B,H,e} + X_{B,A,e} + X_{P,e})$$

$$BOD_{5,e} = 0.25 \cdot (S_{S,e} + X_{S,e} + (1 - f_p) \cdot (X_{B,H,e} + X_{B,A,e}))$$

$$COD_e = S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{I,e} + X_{B,H,e} + X_{B,A,e} + X_{P,e}$$

Các tham số β_i là các trọng số được cho trong bảng 2

Bảng 2. Giá trị của các trọng số β_i

Hệ số	β_{TSS}	β_{COD}	β_{NKj}	β_{NO}	β_{BOD_5}
Giá trị	2	1	30	10	2

Chỉ số chi phí tổng thể OCI được tính bằng công thức (4):

$$OCI = AE + PE + 5SP + 3EC + ME \quad (4)$$

trong đó:

AE (Aeration Energy) là năng lượng cho công đoạn sục khí AE được tính theo công thức (5):

$$AE = \frac{S_O^{sat}}{t_{obs}1,8 \cdot 1000} \int_{t=7}^{t=14} \sum_{k=1}^5 V_{as,k} K_L a_k(t) dt \quad (5)$$

PE là năng lượng dành cho bơm, được xác định bằng công thức (6):

$$PE = \frac{1}{t_{obs}} \int_{t=7}^{t=14} (0,004 Q_{int}(t) + 0,008 Q_r(t) + 0,05 Q_w(t)) dt \quad (6)$$

SP là sản lượng bùn được xử lý, SP được tính bằng công thức (7):

$$SP = \frac{1}{t_{obs}} \left(TSS(14d) - TSS(7d) + 0,75 \int_{t=7}^{t=14} (X_{S,w} + X_{I,w} + X_{B,H,w} + X_{B,A,w}) Q_w(t) dt \right) \quad (7)$$

EC là lượng tiêu thụ cacbon bên ngoài, EC được tính bằng công thức (8):

$$EC = \frac{COD_{EC}}{t_{obs} \cdot 1000} \int_{t=7}^{t=14} \left(\sum_{k=1}^n Q_{EC,k} \right) \cdot dt \quad (8)$$

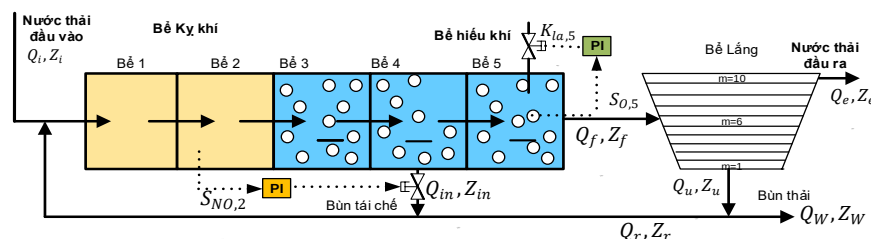
và ME là năng lượng khuấy, được tính bởi công thức (9)

$$ME = \frac{24}{t_{obs}} \int_{t=7}^{t=14} \sum_{k=1}^{k=5} [0,005 V_{as,k} \text{ nếu } K_L a_k(t) < 20 d^{-1}] \cdot dt \quad (9)$$

2.3. Một số chiến lược cải thiện các chỉ tiêu hệ thống trong hệ thống xử lý nước thải

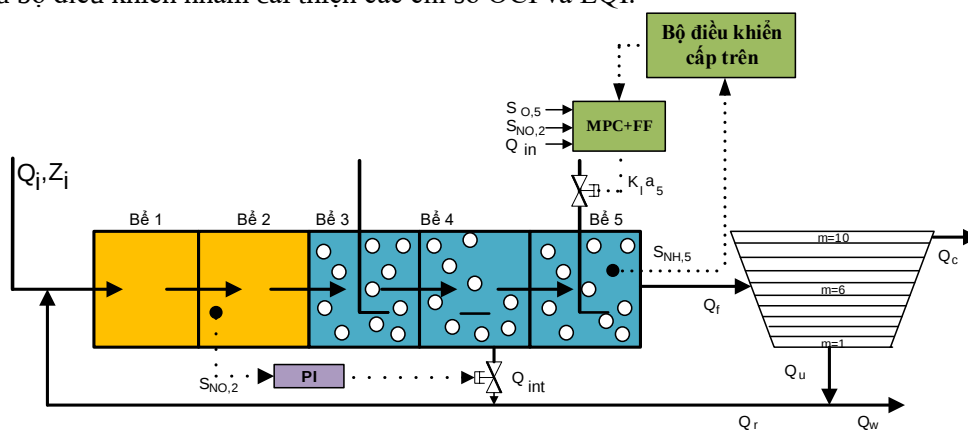
Khi yêu cầu về chất lượng nước thải EQI trở nên nghiêm ngặt hơn trong quá trình xử lý, việc tăng tiêu thụ năng lượng và hóa chất dẫn đến việc tối ưu hóa chi phí vận hành OCI trở nên thách thức. Để vận hành hiệu quả hệ thống xử lý nước thải sinh học dựa trên quá trình bùn hoạt tính, việc cung cấp lượng oxy phù hợp với nhu cầu của hệ vi sinh là cần thiết, tránh việc cung cấp quá mức hoặc thiếu hụt, ảnh hưởng đến chi phí và chất lượng. Điều này giúp nâng cao chất lượng

nước thải EQI và tối ưu hóa chi phí hoạt động OCI. Các chiến lược được đánh giá dưới đây tập trung vào việc kiểm soát nồng độ oxy hòa tan DO tại bể số 5 nhằm tối ưu các chỉ tiêu hệ thống, bao gồm chỉ số OCI và EQI, cho hệ thống xử lý nước thải.

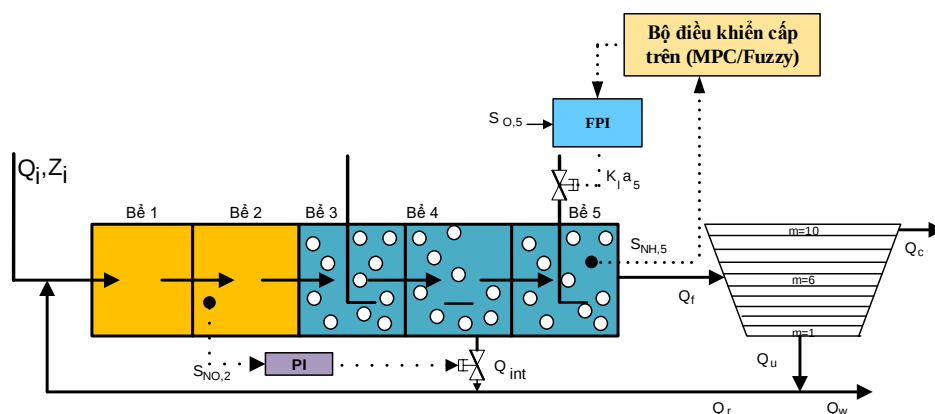


Hình 2. Phương pháp điều khiển PI cho BSM1

Trong hệ thống xử lý nước thải BSM1 người ta dùng bộ điều khiển PI (Hình 2) để điều khiển nồng độ oxy DO với lượng đặt không đổi 2 mg/l vì bộ điều khiển này hoạt động tin cậy, đơn giản và chất lượng điều khiển ổn định DO chấp nhận được [2]. Tuy nhiên các tác giả nhận thấy hệ số của bộ điều khiển (K_{SO5} , Ti_{SO5}) là giá trị khuyến nghị chứ không phải giá trị tối ưu [19]. Vì vậy, nghiên cứu đã sử dụng giải thuật di truyền GA (Genetic Algorithm) để tìm các hệ số K_{SO5} , Ti_{SO5} của bộ điều khiển nhằm cải thiện các chỉ số OCI và EQI.



Hình 3. Bộ điều khiển MPC + FF và điều khiển phân cấp

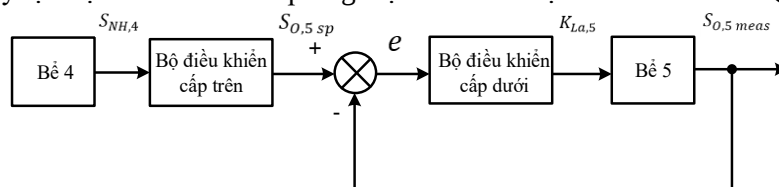


Hình 4. Chiến lược điều khiển phân cấp FPI-Fuzzy và FPI-MPC

Cấu trúc điều khiển hai cấp được đề xuất bởi I. Santín và đồng nghiệp đã thay thế cho bộ điều khiển PI mặc định [4]. Ở bộ điều khiển cấp dưới, cấu hình MPC + FF được áp dụng để bám theo điểm đặt $S_{NO,2}$ là 1 mg/l bằng cách điều chỉnh Q_a và bám theo điểm đặt $S_{O,5}$ được đưa ra bởi bộ điều khiển cấp trên bằng cách điều chỉnh $K_{La,5}$. Giải pháp MPC + FF này được áp dụng với mục tiêu cải thiện việc bám theo các điểm đặt $S_{O,5}$ và $S_{NO,2}$. Bộ điều khiển cấp cao điều chỉnh điểm đặt $S_{O,5}$ của bộ điều khiển cấp dưới dựa trên nồng độ $S_{NH,5}$, thay vì giữ nó ở giá trị cố định 2 mg/l (Hình 3).

Trong [5], các tác giả trình bày hai chiến lược điều khiển phân cấp: FPI-Fuzzy và FPI-MPC. Ở bộ điều khiển cấp dưới, bộ điều khiển PI bằng bộ điều khiển phân đoạn FPI (Fractional PI) để điều khiển nồng độ oxy DO thông qua $K_{La,5}$ ở bể số 5 (hình 4). Bộ điều khiển mờ và điều khiển dự báo được thiết kế làm bộ điều khiển cấp trên để thay đổi lượng đặt $S_{O,5}$ cho bộ điều khiển cấp dưới. Người ta quan sát thấy rằng chiến lược điều khiển FPI-MPC mang lại hiệu suất tốt hơn với khả năng bám theo điểm đặt tốt hơn với chi phí vận hành giảm.

Do hệ thống xử lý nước thải BSM1 làm việc có chu kỳ (14 ngày), bộ điều khiển phản hồi kết hợp truyền thẳng dựa trên học lặp ILC nhằm ổn định nồng độ DO cho bể số 5 được đề xuất [16], tuy nhiên các chỉ số OCI và EQI hầu như không được cải thiện. Để cải thiện các chỉ số này, các tác giả đã thêm bộ điều khiển cấp trên sao cho lượng đặt DO trong bể 5 luôn tỷ lệ với NH_4 [17]. Các thông số của bộ tỷ lệ được tìm bởi GA đáp ứng mục tiêu cải thiện chỉ số OCI và EQI.



Hình 5. Chiến lược điều khiển phân cấp ILC+PI+GA [17]

Kết quả áp dụng các chiến lược điều khiển để cải thiện chỉ số chất lượng nước thải đầu ra EQI và chi phí tổng thể OCI trong điều kiện thời tiết khô, như được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Chỉ số EQI và OCI với các chiến lược điều khiển khác nhau

Chiến lược điều khiển	Chỉ số EQI	Chỉ số OCI
PI [1]	6096,71	16366,26
PI+GA [19]	6089,67	16252,36
MPC+FF [4]	6048,25	16382,97
MPC + FF và điều khiển phân cấp [4]	6047,52	16196,68
FPI-Fuzzy [5]	6008,84	16295,33
FPI-MPC [5]	6049,88	16227,20
ILC+PI [16]	6095,23	16364,77
ILC+PI+GA [17]	6007,12	16267,14

3. Kết quả và bàn luận

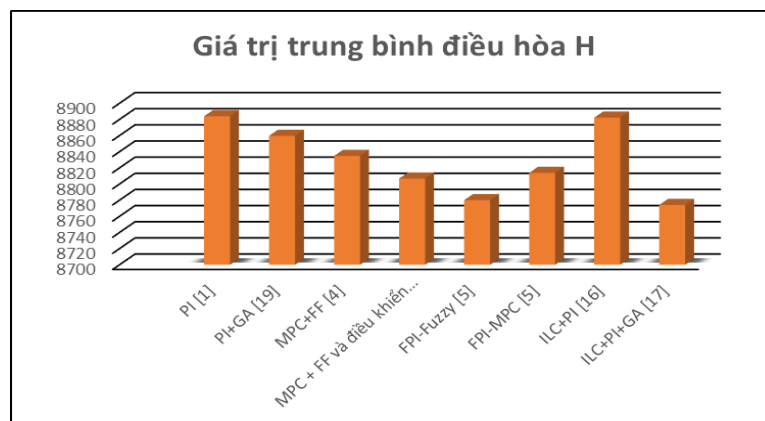
Như đã được đề cập trước đó, các chiến lược được đề xuất đều tiến tới mục tiêu giảm đồng thời cả 2 chỉ số OCI và EQI. Tuy nhiên dựa vào bảng 3, chúng ta thấy rằng so với bộ điều khiển PI mặc định, các chiến lược điều khiển khác đều cho chỉ số OCI và EQI tốt hơn, tuy nhiên có chiến lược chỉ số OCI giảm mạnh (MPC + FF và điều khiển phân cấp), cũng có chiến lược chỉ số EQI lại giảm mạnh (ILC+PI+GA), có chiến lược giảm đồng thời cả 2 chỉ số EQI và OCI. Vì vậy, để đánh giá hiệu quả của chiến lược được đề xuất so với các chiến lược khác, nhóm tác giả sử dụng phương pháp trung bình điều hòa, giá trị trung bình điều hòa của các chiến lược điều khiển khác nhau được thể hiện trong bảng 4.

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}} \quad (10)$$

Trong đó: $x_1 = EQI$, $x_2 = OCI$, $n=2$.

Bảng 4. Giá trị trung bình điều hòa của các chiến lược điều khiển khác nhau

Chiến lược điều khiển	Chỉ số EQI	Chỉ số OCI	Giá trị H
PI [1]	6096,71	16366,26	8883,98
PI+GA [19]	6089,67	16252,36	8859,67
MPC+FF [4]	6048,25	16382,97	8834,86
MPC + FF và điều khiển phân cấp [4]	6047,52	16196,68	8806,77
FPI-Fuzzy [5]	6008,84	16295,33	8780,06
FPI-MPC [5]	6049,88	16227,20	8813,78
ILC+PI [16]	6095,23	16364,77	8882,19
ILC+PI+GA [17]	6007,12	16267,14	8774,13



Hình 6. Biểu đồ so sánh giá trị trung bình điều hòa giữa các chiến lược điều khiển

Từ bảng 4 và hình 6, các chiến lược được áp dụng và hệ thống xử lý nước thải BSM1 đều cho giá trị trung bình điều hòa thấp hơn so với chiến lược sử dụng bộ điều khiển PI. Các chiến lược điều khiển 1 cấp với lượng đặt DO không đổi [1], [19], [16], có giá trị trung bình điều hòa tương đối cao chứng tỏ giá trị lượng đặt DO 2 mg/l là giá trị khuyến nghị chứ không phải là giá trị tối ưu. Hai chiến lược sử dụng bộ điều khiển 2 cấp FPI-Fuzzy [5] và bộ điều khiển ILC+PI+GA [17] với lượng đặt DO thay đổi, cho thấy giá trị trung bình điều hòa đạt giá trị nhỏ nhất, qua đó chứng minh lượng đặt DO phải thay đổi phụ thuộc vào quá trình sinh hóa của hệ thống xử lý nước thải để đưa vào lượng oxy cho phù hợp.

4. Kết luận

Điều khiển các quá trình phức tạp tại nhà máy xử lý nước thải không phải là công việc dễ dàng và cần có những chiến lược điều khiển hiệu quả. Quá trình này phụ thuộc nhiều vào lưu lượng, nồng độ các chất và chịu ảnh hưởng của hằng số thời gian dài. Do đó, việc sử dụng mô hình toán học và mô phỏng trên máy tính là bắt buộc để đánh giá các chiến lược điều khiển. Bài báo giới thiệu mô hình mô phỏng BSM1 với cấu hình và các tiêu chí đánh giá cụ thể. Trong bài báo, nhiều chiến lược điều khiển đã được áp dụng như bộ điều khiển PI kết hợp GA, bộ điều khiển PI kết hợp điều khiển mờ, điều khiển mờ kết hợp điều khiển dự báo. Các kết quả cho thấy các chiến lược đều cải thiện chỉ số OCI và EQI so với bộ điều khiển PI. Dựa trên phương pháp trung bình điều hòa, chiến lược điều khiển tốt nhất là sự kết hợp giữa bộ điều khiển phản hồi kết hợp truyền thẳng dựa trên học lặp ILC và giải thuật di truyền GA (ILC+PI+GA).

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. Shen, X. Chen, and J. P. Corriou, "Application of model predictive control to the BSM1 benchmark of wastewater treatment process," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 32, pp. 2849–2856, 2008.
- [2] J. Alex, L. Benedetti, J. Copp, K.V. Gernaey, U. Jeppsson, I. Nopens, M. N. Pons, L. Rieger, C. Rosen, J. P. Steyer, P. Vanrolleghem, and S. Winkler, "Benchmark Simulation Model. 1 (BSM1)," Report by the IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs, April 2008.
- [3] H. B. Zhou, "Dissolved oxygen control of the wastewater treatment process using self-organizing fuzzy neural network," *CIESC J.*, vol. 68, pp. 1516–1524, 2017.
- [4] I. Santin, C. Pedret, and R. Vilanova, "Applying variable dissolved oxygen set point in a two level hierarchical control structure to a wastewater treatment process," *Journal of Process Control*, vol. 28, pp. 40–55, 2015.
- [5] E. S. S. Tejaswini, S. Panjwani, and A. S. Rao, "Design of hierarchical control strategies for biological wastewater treatment plants to reduce operational costs," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 161, pp. 197–205, 2020.
- [6] H.-G. Hana, H.-H. Qiana, and J.-F. Qiaoa, "Nonlinear multiobjective model-predictive control scheme for wastewater treatment process," *Journal of Process Control*, vol. 24, pp. 47–59, 2014.
- [7] M. Sadeghassadi, C. Macnab, and D. Westwick, "Design of a generalized predictive controller for a biological wastewater treatment plant," *Water Science and Technology*, vol. 73, no. 8, pp. 1986–2006, 2016.
- [8] V.-M. Cristea, C. Pop, and P. S. Agachi, "Model Predictive Control of the Waste Water Treatment Plant Based on the Benchmark Simulation Model No.1-BSM1," *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 25, pp. 441–446, December 2008.
- [9] W. Shena, X. Chen, M. N. Pons, and J. P. Corriou, "Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 155, pp. 161–174, 2009.
- [10] M. Francisco, S. Skogestad, and P. Vega, "Model predictive control for the self-optimized operation in wastewater treatment plants: analysis of dynamic issues," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 82, no. 2, pp. 259–272, 2015.
- [11] H. Han, L. Zhang, and J. Qiao, "Data-based predictive control for wastewater treatment process," *IEEE Access*, vol. 6, no. 2, pp. 1498–1512, 2018.
- [12] M. Sadeghassadi, C. J. B. Macnab, and B. Gopaluni, "Application of neural networks for optimal-setpoint design and MPC control in biological wastewater treatment," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 155, pp. 1–19, 2018.
- [13] C. A. C. Belchior, R. A. M. Araujo, and J. A. C. Landeckb, "Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using stable adaptive fuzzy control," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 37, pp. 152–162, 2012.
- [14] I. Santin, C. Pedret, and R. Vilanova, "Fuzzy control and model predictive control configurations for effluent violations removal in wastewater treatment plants," *Industrial and Engineering Chemical Research*, vol. 54, no. 10, pp. 2763–2775, 2015.
- [15] M. Nasr, M. A. E. Moustafa, H. A.-A. Seif, and E.-K. Galal, "Application of fuzzy logic control for Benchmark simulation model.1," *Sustainable Environment Research*, vol. 24, no. 4, pp. 235–243, 2014.
- [16] V. L. Nguyen, V. N. Bach, T. H. Do, and T. M. Nguyen, "ILC combined with a PI regulator for Wastewater Treatment Plants," *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, vol. 18, no. 2, pp. 1054–1061, April 2020.
- [17] H. T. Do, N.V. Bach, L. V. Nguyen, H. T. Tran, and M. T. Nguyen, "A design of higher-level control based genetic algorithms for wastewater treatment plants," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 872–878, August 2021.
- [18] I. Santin, C. Pedret, M. Meneses, and R. Vilanova, "Process Based Control Architecture for avoiding effluent pollutants quality limits violations in wastewater treatment plants," *19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, vol. 19, pp. 396–402, 2015.
- [19] V. N. Bach, T. H. Do, and P. H. Nguyen, "Solution improving performance of the of dissolved oxygen in wasted-water treatment system using activated sludge method," *Journal of Military Science and Technology*, special issue of FEE, pp. 135–143, 2018.