

Tối ưu hóa đa tiêu chí trạm xử lý nước thải

Multi-critical optimization of waste water treatment plant

> **TS NGUYỄN ĐÌNH HUẤN**

Khoa Môi trường, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

Email: ndhuan@dut.udn.vn

TÓM TẮT

Trạm xử lý nước thải (TXLNT) phụ thuộc rất nhiều yếu tố, để tăng cường hiệu quả xử lý của trạm cần thực hiện theo quá trình tối ưu hóa các thông số liên quan. Quá trình tối ưu hóa trạm xử lý nước thải được phát triển khá nhiều trong những năm gần đây. Tuy nhiên việc tối ưu hóa này thường chỉ tập trung vào một tiêu chí (thông số) cụ thể nào đó mà ít có nghiên cứu tối ưu hóa cho nhiều tiêu chí đồng thời (đa tiêu chí). Nghiên cứu này áp dụng lý thuyết về tối ưu hóa đa tiêu chí dựa trên số liệu đo đạc của Trạm xử lý nước thải Benchmark được các nhà nghiên cứu châu Âu xây dựng, vận hành và thí nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tối ưu hóa 2 tiêu chí cùng lúc sẽ làm giảm chi phí vận hành của TXLNT khoảng 11.3% so với với tối ưu hóa 1 tiêu chí. Nếu so với vận hành thực tế của TXLNT, sau khi tối ưu hóa chi phí vận hành giảm 40%.

Từ khóa: Tối ưu hóa; đa tiêu chí; trạm xử lý nước thải; TXLNT; Benchmark.

ABSTRACT

Wastewater treatment plant (WWTP) depends on many factors, in order to enhance the treatment efficiency of the plant, it is necessary to optimize the related parameters. The process of optimizing wastewater treatment plants has been developed quite a lot in recent years, however, this optimization usually only focuses on a specific criterion (parameter) and there are few optimization studies for many simultaneous criteria (multi-criteria). This study applies the theory of multi-criteria optimization based on the measurement data of the Benchmark Wastewater Treatment Station built, operated and tested by European researchers. The research results show that optimizing 2 criteria at the same time will reduce the operating cost of the WWTP by about 11.3% compared to optimizing 1 criterion. Compared with the actual operation of the wastewater treatment plant, after optimization, the operating cost is reduced by 40%.

Keywords: Optimization; multi criteria; waste water treatment plant; WWTP; Benchmark.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề tối ưu hóa cần được xem xét nhiều yếu tố (tiêu chí) đồng thời mới mô tả đúng hành vi của đối tượng nghiên cứu. Tuy nhiên, các tiêu chí này thường mâu thuẫn (đối nghịch) với nhau, để đạt được tối ưu đồng thời cho nhiều tiêu chí là không thể thực hiện được. Việc tối ưu hóa đa tiêu chí rất khó thực hiện cả về mặt lý thuyết lẫn kỹ thuật, phần lớn các nghiên cứu của các tác giả trước đây đều tập trung chủ yếu vào tối ưu hóa đơn tiêu chí. Đối với tối ưu hóa TXLNT, các nghiên cứu tối ưu hóa đơn tiêu chí gần đây gồm có SinaBorzoeei và cộng sự với mục đích giảm năng lượng tiêu thụ cho TXLNT; Sylvie Gillot và cộng sự nghiên cứu về giá thành đầu tư và vận hành TXLNT; Nadja Hvala, Darko Vrečko và Cirila Bordon nghiên cứu quá trình tối ưu hóa để xử lý Nitơ và Photpho trong nước thải; Roberta Muoio và cộng sự thực hiện tối ưu hóa để tìm thời gian lắng trong hệ thống xử lý nước thải; Run Ting Siew và cộng sự thực hiện tối ưu hóa chi phí vận hành; Andreja Nemet và cộng sự thực hiện tối ưu hóa để xác định thời gian xử lý nước thải trong mỗi bể sinh học; D.H. Nguyen và cộng sự thực hiện mô phỏng và tối ưu hóa dữ liệu động để tìm ra cách thay đổi cấp khí cho các bể phản ứng; Wanqiu Hu và cộng sự thực hiện quá trình tối ưu việc bổ sung các bon cho quá trình xử lý nước thải;...

Đối với TXLNT, có hai tiêu chí có thể kể đến là chi phí vận hành (CO) và chất lượng nước thải (QE). Hai tiêu chí này đối nghịch nhau, muốn chất lượng nước thải được cải thiện thì chi phí vận hành phải tăng lên, và ngược lại. Việc cân đối giá trị giữa hai tiêu chí này như thế nào để có phương án thiết kế vận hành hợp lý là khó xác định. Nghiên cứu này sẽ trình bày tối ưu hóa đồng thời về chất lượng của nước thải và chi phí vận hành trong khi vẫn tuân thủ các quy định đối với nước thải.

2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

Quá trình được xem xét ở đây là trạm Benchmark bao gồm một bể bùn hoạt tính 5 ngăn (2 bể anoxic đặt trước, 3 bể hiếu khí đặt sau). Quá trình nitrat hóa và khử nitrat được kết hợp để loại bỏ nitơ. Phía sau các bể lắng sinh học là bể lắng hai với hai dòng ra: một dòng thoát ra ngoài môi trường và dòng còn lại tuần hoàn về ngăn đầu tiên. Bên cạnh đó, một dòng bên trong tái chế bùn từ bể hiếu khí cuối cùng đến bể anoxic đầu tiên (Hình 1).



Hình 1- Cấu tạo TXLNT

Các số liệu thiết kế của trạm xử lý được nêu trong Bảng 1. Dữ liệu đo đạc được xác dòng vào và ra được thể hiện trên www.benchmarkWWTP.org.

Bảng 1. Kích thước của trạm xử lý nước thải

Thông số	Giá trị	k_{La} (h^{-1})
Bể sinh học 1	1 000 m ³	n/a
Bể sinh học 2	1 000 m ³	n/a
Bể sinh học 3	1 333 m ³	10
Bể sinh học 4	1 333 m ³	10
Bể sinh học 5	1 333 m ³	3.5
Chiều cao bể lắng	4 m	-
Diện tích bể lắng	1 500 m ²	-
Thể tích bể lắng	6 000 m ³	-

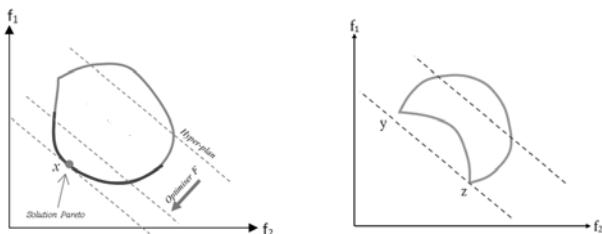
3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TỐI ƯU HÓA

Có một vài cách tối ưu hóa đa mục tiêu, ở đây tiếp cận theo cách của (Hwang & Masud, 1979) được đánh giá là có độ chính xác cao và cơ sở khoa học rõ ràng. Việc tiến hành tối ưu hóa đa mục tiêu được dựa trên sự tổng hợp các tiêu chí thành một tiêu chí duy nhất. Đó là việc chuyển đổi tối ưu hóa đa mục tiêu (MOP) thành tối ưu hóa đơn mục tiêu (MOP ω) để kết hợp các hàm chi phí khác nhau (f_i) của vấn đề thành một hàm mục tiêu F:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x) \quad (1)$$

Ở đây $\omega_i \in [0...1]$ và $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$: trọng số của các tiêu chí khác nhau.

Hình 2 minh họa hoạt động của phương pháp tổng hợp. Giải pháp Pareto tối ưu là điểm mà siêu phẳng có tiếp tuyến chung (điểm x trong hình). Các kết quả thu được MOP ω phụ thuộc nhiều vào các tham số được chọn cho vectơ trọng lượng. Các trọng số ω_i cũng phải được chọn liên quan đến các mục tiêu. Do đó, cách tiếp cận thường được sử dụng bao gồm giải quyết vấn đề (MOP ω) với các giá trị khác nhau của ω .



Hình 2- Phương pháp tối ưu hóa tổng hợp các tiêu chí

Nếu các mục tiêu khác nhau không cùng độ lớn, có thể viết phương trình dưới dạng:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n c_i \omega_i f_i(x) \quad (2)$$

Trong đó c_i là hằng số đặt các mục tiêu khác nhau trên cùng một tỷ lệ. Các hằng số c_i có giá trị ban đầu là $1/f_i^*(x)$, với $f_i^*(x)$ là giải pháp tối ưu liên quan đến hàm mục tiêu f_i .

4. TỐI ƯU HÓA TXLNT

Trong nghiên cứu này, tối ưu hóa TXLNT là xác định các thông số vận hành hợp lý hệ thống sục khí và bơm bùn tuần hoàn bên trong hệ thống nhằm giảm thiểu chi phí vận hành và chi phí phát sinh do không tuân thủ chất lượng nước thải đầu ra.

Chi phí vận hành được thiết lập như sau:

$$f_1 = C_{CO} = \alpha_E \cdot AE + \alpha_E \cdot PE + \alpha_{SLD} \cdot SP, (\text{€/ngày}) \quad (3)$$

Trong đó AE, PE và SP tương ứng là năng lượng cấp cho hệ thống sục khí, bơm và xử lý bùn thải. Theo (Alex et al., 2001) xác định như sau:

$$AE = \frac{S_O^{sat}}{T \cdot 1.8 \cdot 1000} \int_{7 \text{ days}}^{14 \text{ days}} \sum_{i=3}^5 V_i \cdot k_L a_i(t) dt, (\text{kWh/ngày}) \quad (4)$$

$$PE = \frac{1}{T} \int_{t=7 \text{ days}}^{t=14 \text{ days}} (0.004 \cdot Q_a(t) + 0.008 \cdot Q_r(t) + 0.05 \cdot Q_w(t)) dt'$$

$$(\text{kWh/ngày}) \quad (5)$$

$$SP = TSS_e \cdot Q_w, (\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (6)$$

Chất lượng của nước thải được xác định bởi:

$$EQ = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_{t=7}^{t=14} \left\{ B_{SS} \cdot TSS_e(t) + B_{COD} \cdot COD_e(t) + B_{Nkj} \cdot S_{Nkj,e}(t) \right. \\ \left. + B_{NO} \cdot S_{NO,e}(t) + B_{BOD_5} \cdot BOD_{5e}(t) \right\} dt \quad (7)$$

Ngoài ra, chi phí được phát sinh do không tuân thủ chất lượng nước đầu ra được thể hiện bằng:

$$f_2 = C_{EQ} = \alpha_{EQ} \cdot EQ, (\text{€/ngày}) \quad (8)$$

ở đây:

$$S_{Nkj,e} = S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB} (X_{B,H,e} + X_{B,A,e}) + i_{XP} (X_{P,e} + X_{I,e}) \quad (9)$$

$\alpha_E, \alpha_{SLD}, \alpha_{EQ}$ là các hệ số của chi phí vận hành, xử lý bùn và chất lượng nước thải (Bảng 2).

Bảng 2. Các hệ số (Alasino et al, 2007)

Hệ số	Giá trị	Đơn vị
α_E	25/365	€ (kWh.ngày) ⁻¹
α_{EQ}	50/365	€ (kg PU. ngày) ⁻¹
α_{SLD}	75/365	€ (kg SS. ngày) ⁻¹

$S_{S_e}, S_{NO,e}, S_{SH,e}, S_{ND,e}, X_{ND,e}, X_{B,H,e}, X_{B,A,e}, X_{P,e}, X_{I,e}$ các hợp phần trong nước thải.

$B_{SS}, B_{COD}, B_{Nkj}, B_{NO}, B_{BOD_5}$: là các trọng số các loại ô nhiễm khác nhau, xác định như Bảng 3 (Vanrolleghem et al., 1996).

Bảng 3. Các giá trị Bi

B_{SS}	B_{COD}	B_{Nkj}	B_{NO}	B_{BOD_5}
2	1	30	10	2

Vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu được xác định bởi:

$$\text{Min } F = [f_1, f_2]^T \quad (10)$$

Tuần thủ giới hạn:

$$TSS_e \leq TSS_{max}; TN_e \leq TN_{max}; BOD_{5e} \leq BOD_{5max}; COD_e \leq COD_{max};$$

$$k_L a_i \leq k_L a_{max}; Q_a \leq Q_{a_max}$$

Để thực hiện, bài toán đa tiêu chí được chuyển thành bài toán đơn tiêu chí bằng cách tổng hợp hai tiêu chí dưới dạng trọng số tổng.

$$Min F = \{\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2\} = \{\omega f_1 + (1-\omega) f_2\} \quad (11)$$

ở đây ω_1, ω_2 là các trọng số liên quan đến các tiêu chí f_1, f_2 , như là: $\omega_1, \omega_2 > 0$ và $\omega_1 + \omega_2 = 1$.

Trọng số (ω) thể hiện tầm quan trọng liên quan đến các thuộc tính của tiêu chí. Mỗi vectơ cố định (ω) chỉ cho một giải pháp Pareto tối ưu, để có được một tập hợp nhiều giải pháp Pareto tối ưu thì phải thực hiện nhiều lần.

Từ phương trình (1), bài toán tối ưu hóa có thể được viết như sau:

$$Min_{Q_a, K_L a_i, i=3, \dots, 5} \left\{ \omega \cdot \frac{C_{CO}}{C_{CO}^*} + (1-\omega) \cdot \frac{C_{EQ}}{C_{EQ}^*} \right\} \quad (12)$$

Ở đây C_{EQ}^* và C_{CO}^* là các tham số chuẩn hóa chi phí C_{EQ} và C_{CO} .

5. KẾT QUẢ TỐI ƯU HÓA

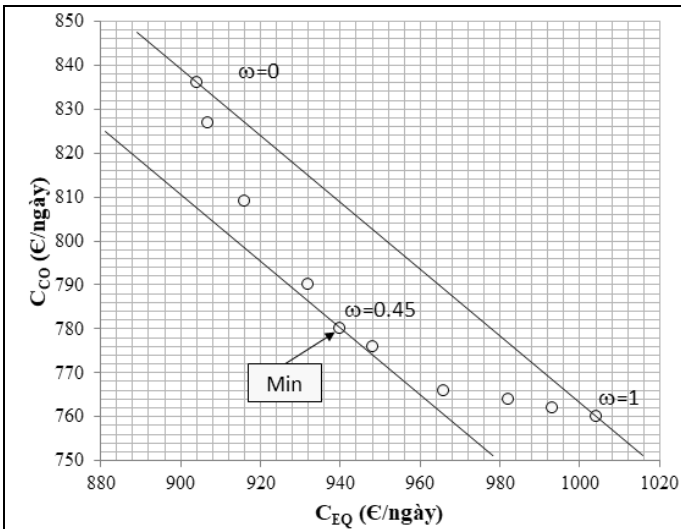
Trên cơ sở lý thuyết tối ưu đã trình bày ở trên, việc tối ưu hóa cho TXLNT ở đây được thực hiện bởi phần mềm gProms, là phần mềm thương mại rất mạnh có khả năng giải quyết bài toán nhiều vòng lặp nhằm đưa ra kết quả tối ưu hóa.

Quá trình tối ưu hóa trong nghiên cứu này được áp dụng cho hai trường hợp: (1) thực hiện vận hành TXLNT với một mức thời gian tương ứng với 7 ngày làm việc liên tục (cấp khí không thay đổi trong 7 ngày liên tục); (2) thực hiện vận hành TXLNT bảy mức thời gian tương ứng với 7 ngày làm việc riêng rẽ (cấp khí thay đổi theo từng ngày). Mục đích của quá trình là xác định các hệ số cấp khí $k_L a_i$ tối ưu nhất cho hệ thống.

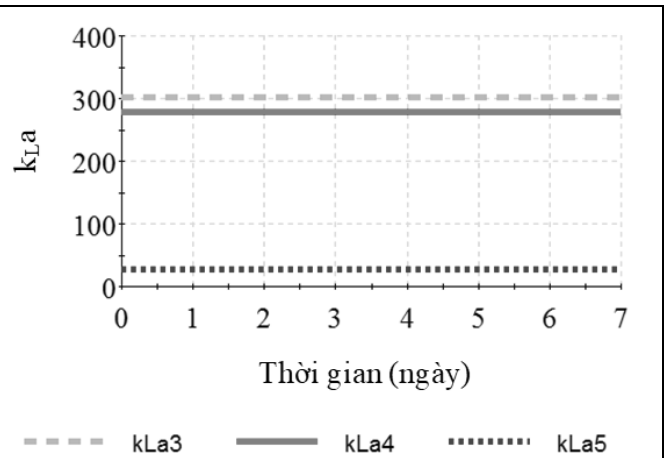
Sau khi thực hiện tối ưu hóa, kết quả của trường hợp (1) thể hiện như Hình 3.

Thực hiện với nhiều giá trị của ω khác nhau để tìm giải pháp tối ưu tương ứng. Các kết quả thu được khác nhau của ω được trình bày trong Hình 3, dưới dạng các biến thiên của CCO và CEQ.

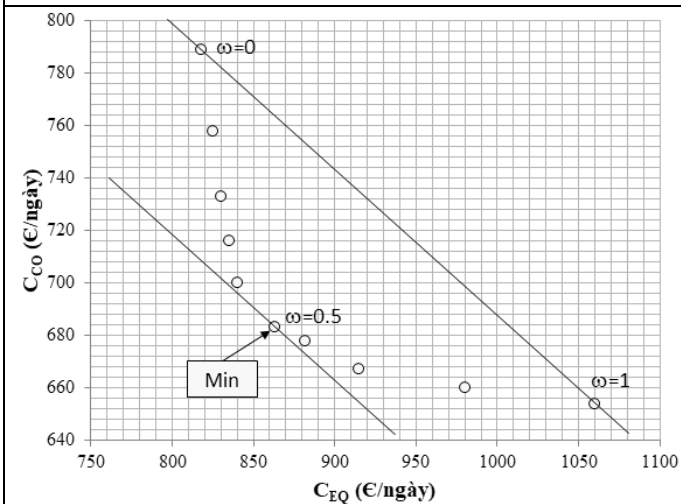
Dựa vào biến thiên ω trong Hình 3, có thể tìm kiếm điểm x với chi phí thấp nhất, tương ứng điểm có $\omega = 0.45$ với chi phí là



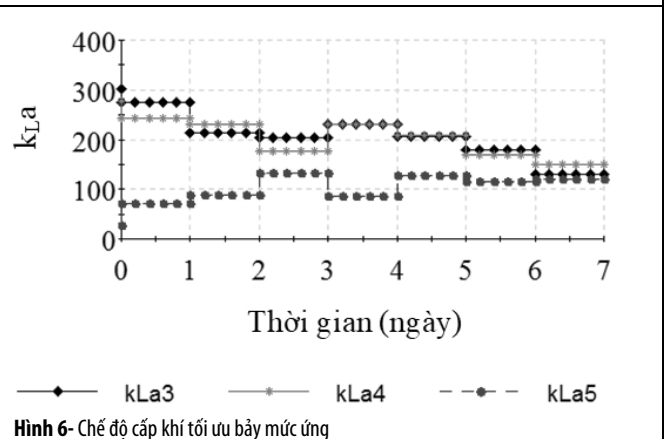
Hình 3- Ảnh hưởng của giá trị ω đến tối ưu hóa (trường hợp cấp khí cố định)



Hình 4- Chế độ cấp khí tối ưu cho chế độ cấp khí ổn định



Hình 5- Ảnh hưởng của giá trị ω đến tối ưu hóa (trường hợp 7 mức thời gian)



Hình 6- Chế độ cấp khí tối ưu bảy mức ứng

1720 (€/ngày). Lúc này biểu thị tham số cấp khí cho TXLNT được thể hiện như Hình 4.

Về mặt giá trị, các tham số vận hành hệ thống cấp khí được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Giá trị các tham số tối ưu (trường hợp cấp khí ổn định)

k_{La3} (ngày ⁻¹)	k_{La4} (ngày ⁻¹)	k_{La5} (ngày ⁻¹)	Q_a (m ³ /ngày)
301.8	278.2	27.1	64 237.9

Kết quả trong Hình 4 và Bảng 4 cho thấy sau khi tối ưu hóa, dòng tuần hoàn Q_a tăng lên và hệ số k_{La3} và k_{La4} lớn hơn so với giá trị vận hành thực của trạm Benchmark, trong khi hệ số k_{La5} thấp hơn. Kết quả này là hợp lý vì các điều kiện đều được thỏa mãn với tổng chi phí thấp nhất, đồng thời thỏa mãn đầu ra của chất lượng nước thải.

Đối với trường hợp (2), chọn 7 mức thời gian tương ứng với 7 ngày theo file dữ liệu đo đạc. Tương tự như trong trường hợp của một mức, kết quả thu được của giá trị ω trình bày trong Hình 5. Có thể xác định điểm x tương ứng với tổng chi phí tối thiểu, tương ứng với $\omega = 0.5$ và chi phí tối thiểu là 1546 (€/ngày). Kết quả này tiết kiệm ít hơn 11.3% so với trường hợp vận hành ổn định một chế độ cấp khí.

Hình 6 trình bày hình dạng chế độ sục khí khác nhau ở mỗi mức thời gian để phù hợp với các biến thiên về lưu lượng và thành phần nước thải đầu vào nhằm giảm thiểu chi phí vận hành TXLNT. Giá trị k_{La} của bể thứ 3 và thứ 4 cao hơn so với bể thứ 5. Điều này phù hợp với thực tế vì tỷ lệ cấp khí tỷ lệ thuận với lượng chất hữu cơ có trong nước thải.

Bảng 5. Giá trị của các tham số sau khi tối ưu hóa ứng với bảy mức

Thời gian (ngày)	1	2	3	4	5	6	7
k_{La3} (ngày ⁻¹)	274.4	212.4	203.3	231.2	206.4	179.7	130.5
k_{La4} (ngày ⁻¹)	243.3	230.2	177.7	230.3	207.9	168.9	150.6
k_{La5} (ngày ⁻¹)	71.4	89.1	131.9	85.5	127.6	115.9	121.1
Q_a (m ³ . ngày ⁻¹)	63 989.4						

6. KẾT LUẬN

Cả hai trường hợp cấp khí (1 mức và 7 mức) được nghiên cứu ở trên cho thấy rằng nếu sử dụng vận hành ổn định một giá trị duy nhất (1 mức), tổng chi phí cao hơn so với trường hợp vận hành thay đổi theo 7 mức. Trường hợp vận hành 7 mức có thể tiết kiệm hơn trường hợp thứ nhất 174 (€/ngày) hay 63510 (€/năm), tương ứng 11.3%. Ngoài ra, nếu so sánh với hiệu quả với vận hành thực tế của trạm Benchmark thì giảm được khoảng 40% chi phí vận hành nếu áp dụng phương án tối ưu hóa.

Kết quả tối ưu hóa cũng xác định được lượng tuần hoàn bên trong $Q_a \approx 64000$ m³/ngày cao hơn giá trị đang vận hành thực tế của trạm Benchmark ($Q_a = 55338$ m³/ngày) để có hiệu quả vận hành tốt hơn.

Như vậy, quá trình tối ưu hóa đã đưa ra được cách thức vận hành TXLNT hiệu quả hơn, đồng thời xác định lại các thông số vận hành để đảm bảo nước thải đầu ra đạt quy định cho phép của cơ quan quản lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] SinaBorzooei et al, 2019. Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation. Science of The Total Environment, Volume 691, 15 November 2019, Pages 1182-1189.
- [2] Sylvie Gillot et al. 2019. <https://www.researchgate.net/publication/2304372>.
- [3] Nadja Hvala; Darko Vrečko; Cirila Bordon. 2018. Plant-wide modelling for assessment and optimization of upgraded full-scale wastewater treatment plant performance. Water Practice and Technology (2018) 13 (3): 566-582.
- [4] Roberta Muoio et al, 2019. Optimization of a large industrial wastewater treatment plant using a modeling approach: A case study. Journal of Environmental Management, Volume 249, 1 November 2019, 109436.
- [5] Run Ting Siew et al, 2018. Synthesis and Optimisation of A Sustainable Wastewater Treatment Plant via Material Flow Cost Account (MFCA)-based Approach. MATEC Web Conf. Volume 152, 2018.
- [6] Andreja Nemet et al, 2021. Optimization of the Sequence of Wastewater Treatment in the Cosmetic Industry. Chemical Engineering Transactions. Vol. 88, 2021.
- [7] D.H. Nguyen et al, 2013. Dynamic simulation and optimization of wastewater treatment plants. IEEE Conference Publications, pp. 407-414.
- [8] Wanqiu Hu et al, 2020. Wastewater treatment system optimization with an industrial symbiosis model: A case study of a Chinese eco-industrial park. Journal of industrial ecology.
- [9] Alex, J. et al., 2001. The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual. COST Action 624 and COST Action 682.
- [10] Alasino, N., Mussati, M. et Scenna, N., (2007). Wastewater treatment plant synthesis and design. Ind. Eng. Chem. Res., 46, 23, 7497.
- [11] Vanrolleghem, P.A. et al., 1996. Integration of wastewater treatment plant design and operation - a systematic approach using cost functions. Wat. Sci. Tech., 34(3-4), 159-171.
- [12] gProms, Process Systems Enterprise, 1997-2009, www.pcenterprise.com/gproms.
- [13] www.benchmarkWWTP.org.
- [14] [4] Alex, J. et al., 2008. Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs.
- [15] Henze, M. et al., 1987. Activated Sludge Model No. 1. Technical Report 1, IAWQ, London.
- [16] Henze, M. et al., 1995. Activated Sludge Model No.2. IAWQ Scientific and Technical Report No. 3, London, UK.
- [17] Nguyen, D.H. et al., 2013b. Optimal aeration - time programming in a wastewater treatment plant. Récents Progrès en Génie des Procédés, N°104, ISBN: 978-2-910239-78-7, Ed. SFGP, Paris, France.
- [18] Farai, T.M., 2016. Modelling municipal wastewater treatment plants for Industrial effluent discharge. PhD thesis, Engineering at the University of KwaZulu-Natal, South Africa.
- [19] Chachuat, B., 2001. Méthodologie d'optimisation dynamique et de commande optimale des petites stations d'épuration à boues activées. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- [20] Alex, J. et al., 2008. Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs.