



DOI:10.22144/ctujos.2025.108

## ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CUNG CẤP OXY HÒA TAN VÀO TRONG NƯỚC THẢI BẰNG ỚNG VENTURI

Phan Xuân Lợi<sup>1</sup> và Kim Lavane<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Học viên cao học, Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

<sup>2</sup>Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): klavane@ctu.edu.vn

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 02/01/2025

Sửa bài (Revised): 22/02/2025

Duyệt đăng (Accepted): 10/05/2025

**Title:** Appreciating the competence of supply dissolved oxygen by a venturi tube in wastewater

**Author:** Phan Xuan Loi<sup>1</sup> and Lavane Kim<sup>2\*</sup>

**Affiliation(s):** <sup>1</sup>Master student in Environmental Engineering, College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam;

<sup>2</sup>College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục tiêu đánh giá khả năng cung cấp oxy hòa tan của ống venturi vào trong môi trường nước thải. Thí nghiệm được thực hiện để đánh giá hai kiểu sục khí hoạt động độc lập gồm ống venturi kết hợp hai vòi phun và máy thổi khí nén qua đá sỏi bọt. Nồng độ oxy hòa tan trong nước được đánh giá liên tục theo thời gian và tỷ lệ truyền khối oxy vào trong nước được tính toán. Sau 240 phút vận hành hệ thống, kết quả thí nghiệm cho thấy mô hình ống venturi-vòi phun cho giá trị DO từ xấp xỉ 0 mg/L trước khi sục khí lên đến đạt 8,1 mg/L tại vị trí trung tâm bể và 7,3 mg/L ở vị trí đo xung quanh sau thời gian sục khí, cao hơn so với hệ thống khí nén-đá bọt khoảng 1,0 mg/L. Bên cạnh đó, hệ số truyền oxy  $Kla_{20_{max}}$  đạt 4,23 và tốc độ truyền oxy tiêu chuẩn SOTR là  $1.1 \times 10^{-2} \text{ kgO}_2/\text{h}$ . Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ thống ống venturi-vòi phun hoạt động tốt hơn trong việc cung cấp oxy hòa tan so với hệ thống cấp khí nén qua đá sỏi trong môi trường nước bị ô nhiễm.

**Từ khóa:** Hiệu suất truyền oxy, nồng độ oxy hòa tan, ống venturi, thí nghiệm sục khí

### ABSTRACT

This study was conducted to assess the potential of the venturi tube for dissolved oxygen supply into the wastewater. The experiments were carried out by two independent aeration types, including a venturi two nozzle-tube and air compressor-porous air stone systems. DO concentration was measured over time in the water tank and theoretical oxygen transfer rate was calculated. After 240 minutes of operation, the venturi tube-ejector model resulted in a DO concentration from nearly 0 mg/L up to over 8.1 mg/L at the central of the tank and 7.3 mg/L at the surrounding measured points, which is higher than that of the air compressor-porous air stone. In addition, the oxygen transmission coefficient  $Kla_{20_{max}}$  reaches 4.23 and (SOTR-the standard oxygen transfer rate)<sub>max</sub> was  $1.1 \times 10^{-2} \text{ kgO}_2/\text{h}$  of using the venturi device to suck the air and supply it to water through a nozzle. This study shows that the venturi two nozzle-tube system was better in supplying dissolved oxygen compared to the air compressor-porous air stone system in wastewater.

**Keywords:** Aeration experiment, dissolved oxygen, oxygen transfer efficiency, venturi tube

## 1. GIỚI THIỆU

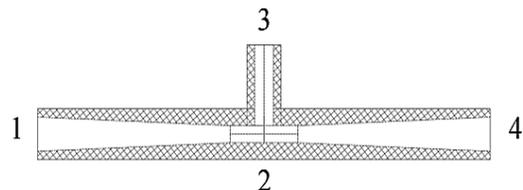
Xử lý nước thải được thực hiện ở hầu hết các thành phố lớn, thị trấn hoặc nông thôn đặc biệt ở khu vực người dân sinh sống cao, nơi mỗi ngày xả thải ra môi trường hàng nghìn mét khối nước thải sinh hoạt trong ngày (Siatou et al., 2020). Các nhà máy xử lý nước thải hoặc công trình xử lý thường áp dụng các quy trình sinh học trong xử lý nước thải như quá trình bùn hoạt tính, lọc sinh học nhỏ giọt, đất ngập nước, ... (Santos et al., 2022). Trong đó, quy trình xử lý sinh học có sử dụng bùn hoạt tính được áp dụng trong hầu hết các nhà máy xử lý nước thải (Schwarz et al., 2021) và nguyên tắc xử lý của quy trình này là chuyển hóa sinh học các chất hữu cơ có mặt trong nước thành khí CO<sub>2</sub> và sinh khối của vi sinh vật nhờ sự có mặt của oxy hòa tan trong nước (Dissolved oxygen – DO) (Yaparatne et al., 2022). Sục khí là một giai đoạn không thể thiếu trong quá trình xử lý sinh học bùn hoạt tính để cung cấp một lượng không khí cần thiết, liên tục và có kiểm soát trong suốt quá trình (Khan et al., 2020 & Schwarz et al., 2021). Tuy nhiên quá trình sục khí thường tiêu tốn rất nhiều năng lượng của một nhà máy (Siatou et al., 2020; Schwarz et al., 2021 & Santos et al., 2022). Nghiên cứu trước đây cho thấy, tiêu thụ năng lượng là vấn đề của các nhà máy xử lý nước thải có sử dụng công nghệ bùn hoạt tính, một nhà máy xử lý nước thải có sử dụng công nghệ bùn hoạt tính hoạt động ở công suất 100.000 m<sup>3</sup>/ngày.đêm tiêu thụ 0,28 kWh/m<sup>3</sup> (Siatou et al., 2020). Ngoài ra, hiệu suất truyền oxy không cao chỉ khoảng 30% đối với kiểu bể bùn hoạt tính có độ sâu 4,5 m (Atkinson et al., 2019) chủ yếu là do các bong bóng kích thước lớn, trung bình và nhỏ được tạo ra do máy nén khí thổi khí qua các đĩa phân phối khí bố trí dưới đáy bể nổi lên bề mặt bể quá nhanh trước khi kịp giải phóng lượng không khí chứa bên trong bong bóng ra môi trường nước, thay vào đó lại giải phóng lượng không khí này ra môi trường không khí trên bề mặt lớp nước. Ngoài ra, sự tắc nghẽn các lỗ thoát khí trên đĩa phân phối khí do sự bám dính của bùn hoạt tính làm giảm lượng khí cung cấp vào bể, để duy trì lượng oxy trong bể tối thiểu 2,0 mg/L bắt buộc phải tăng công suất máy nén khí, từ đó làm tăng chi phí cho nhà máy (Jiang et al., 2020; Yaparatne et al., 2022).

Để cải thiện hiệu suất truyền oxy trong nước, tăng hiệu quả xử lý nước thải và tiết kiệm chi phí vận hành, nhiều nhà khoa học bắt đầu nghiên cứu về các bong bóng khí kích thước siêu nhỏ (mịn) và phương pháp đơn giản để tạo ra chúng. Các bong bóng siêu nhỏ hoặc còn gọi là nano và micro bubbles

có kích thước dưới 200 nanomet (Agarwal et al., 2022) có những đặc điểm nổi bật như: không nổi lên mặt nước ngay như các bong bóng kích thước lớn và trung bình mà sục đở giữa chừng khi lên mặt nước (Movahed & Sarmah, 2021); hiệu suất truyền khối cao; diện tích bề mặt tiếp xúc lớn, điện thế zeta cao và tạo ra các gốc hydroxyl – OH<sup>•</sup> (Zhang et al., 2020; Zhang et al., 2023). Kết quả nghiên cứu của Rameshkumara et al. (2019) về tạo bọt khí siêu nhỏ hoặc nanobubbles bằng phương pháp ion hóa và ứng dụng trong xử lý nước thải, kết quả cho thấy các bong bóng khí siêu nhỏ làm tăng gấp đôi nồng độ oxy trong nước, cải thiện hiệu quả xử lý BOD, COD, nitrate, phosphate trong nước thải sinh hoạt, đồng thời làm tăng DO từ ngưỡng không phát hiện dưới 0,2 mg/l lên đến 7,4 mg/l sau 2 – 3h sục khí. Một nghiên cứu khác của Yaparatne et al. (2022) cũng đã chứng minh sự cải thiện nồng độ oxy hòa tan trong nước, hiệu suất truyền oxy gấp 6 lần và hiệu quả xử lý COD cao gấp 3 lần của việc sục khí bằng các bong bóng kích thước siêu nhỏ so với sục khí bằng các bong bóng kích thước lớn và trung bình.

Những ưu điểm của bọt khí siêu nhỏ đã được chứng minh song nhược điểm chính vẫn nằm ở phương pháp tạo ra các bọt khí này. Những phương pháp được sử dụng để tạo bọt khí kích thước siêu nhỏ bao gồm xả khí hòa tan có điều áp, thủy động lực học, điện hóa và siêu âm (Zhang et al., 2020, Abadie et al., 2022). Phương pháp tạo bọt khí mịn với giá thành vừa phải (rẻ và có thể tiếp cận dễ dàng), vận hành đơn giản, đạt hiệu suất cao và ổn định theo thời gian vẫn là vấn đề đang được quan tâm nghiên cứu (Favvas et al., 2021).

Ống venturi (Hình 1) tạo bọt khí kích thước siêu nhỏ dựa trên phương trình Bernouli nổi tiếng và là một dạng của phương pháp thủy động lực học (Wiraputra et al., 2016, Stoppatoa et al., 2023).



Hình 1. Ống venturi

Venturi có cấu tạo gồm các phần đầu vào của pha lỏng (1), đầu vào pha khí (3), phần cổ thắt hoặc cổ hẹp của ống (2), phần đầu ra của pha lỏng sau trộn khí (4). Về nguyên lý hoạt động, nước đi vào đầu vào phần đầu ống co hẹp liên tục để tăng tốc dòng chảy và khi đến đoạn co hẹp hoặc nút thắt, tại

đây vận tốc nước đạt tối đa và hình thành áp suất âm ( $< 1,0$  atm), không khí bên ngoài là xấp xỉ 1,0 atm nên không khí bị hút vào thụ động qua một đầu ống lấy khí thiết kế tại đoạn co hẹp (Li et al., 2023). Ống venturi được ứng dụng sục khí kích thước siêu nhỏ trong nhiều lĩnh vực như xử lý nước thải, cây trồng, thủy sản vì sự hiệu quả truyền khí cao trong thực nghiệm, dễ vận hành, giá thành hợp lý và cấu tạo không quá phức tạp chỉ cần một máy bơm nước, ống venturi kết nối, các đoạn ống cần thiết để ứng dụng xử lý nước thải sinh học hiếu khí và tiết kiệm năng lượng (với 20% năng lượng là đủ để tạo ra lực hút (Therrien et al., 2019, Yadav et al., 2021). Một nghiên cứu của Wiraputra et al. (2016) nhằm đánh giá khả năng tạo bọt khí kích thước vài nanomet của ống venturi nhưng kết quả cho thấy tốc độ dòng nước thay đổi làm ảnh hưởng đến kích thước bong bóng được tạo ra và chỉ tạo được các bong bóng kích thước tối đa vài trăm micromet. Nghiên cứu của Therrien et al. (2019) nhằm xác định tốc độ dòng nước, độ sâu vòi phun và số lượng vòi phun tác động như thế nào đến hiệu suất truyền không khí trong môi trường nước máy, kết quả cho thấy độ sâu không ảnh hưởng đến hiệu suất và hiệu suất truyền không khí cao nhất đạt ở tốc độ dòng nước 400 L/phút với 4 vòi phun. Một nghiên cứu khác của Yadav et al. (2021) cho thấy đối với các yếu tố hình học của ống venturi với chiều dài đoạn co hẹp là 100 mm, số lượng lỗ lấy khí là 17 và với hai góc tại đoạn co hẹp và mở rộng cho tốc độ truyền oxy tiêu chuẩn (SOTR - standard oxygen transfer rate) và hiệu suất sục khí tiêu chuẩn (SAE - standard aeration efficiency) cao nhất lần lượt 0,02  $\text{kgO}_2/\text{h}$  và 0,6  $\text{kgO}_2/\text{kWh}$  trong môi trường nước máy. Và nghiên cứu của Ramiro Escudero et al. (2022) nhằm mô phỏng việc bố trí các lỗ hút khí ở đoạn co hẹp của ống venturi cho thấy với 8 lỗ hút khí giúp bọt khí được tạo ra và phân tán đều hơn trong cột nước sau ra khỏi thiết bị trộn. Ngoài ra, theo nghiên cứu của John et al. (2022), as cited in Hamad et al., 2023 nhằm đánh giá khả năng truyền khối của các bong bóng trong nước, kết quả nghiên cứu cho thấy các bong bóng siêu nhỏ kích thước dưới 2 mm tồn tại lơ lửng trong nước từ 0,12 đến 0,66 giây và các bong bóng kích thước dưới 50  $\mu\text{m}$  lại tồn tại từ 193 đến 1053 giây.

Qua một vài nghiên cứu về ống venturi của Wiraputra et al. (2016); Therrien et al. (2019); Yadav et al. (2021); Ramiro et al. (2022) ở trên cho thấy chủ đề nghiên cứu chủ yếu tập trung nhiều vào yếu tố hiệu suất truyền không khí vào nước thông qua thay đổi hình dạng hình học ống venturi như: chiều dài cổ họng, số lượng lỗ lấy khí, góc tại đoạn

co hẹp. Yếu tố xét đến thứ hai là chiều sâu đặt vòi phun, vị trí bố trí vòi phun và số lượng vòi phun, các yếu tố khác như tốc độ dòng chảy cũng được đề cập, kích thước bong bóng được tạo ra và thời gian lưu trú trong nước. Nhưng có ít nghiên cứu hoặc còn đánh giá chưa rõ về vị trí bố trí vòi phun trong bể, về nồng độ oxy hòa tan hoặc DO được đo tại các vị trí khác nhau trong bể ở từng độ sâu. Đa số các nghiên cứu chỉ sử dụng nước máy (nước sinh hoạt) để thí nghiệm mà không sử dụng nguồn nước bị ô nhiễm do nước thải. Ngoài ra, hướng nghiên cứu bố trí ống venturi kết hợp vòi phun tia lắp đặt chìm trong nước thải đã được đề cập nhằm đánh giá thêm về khả năng cung cấp oxy trong nước thải của Therrien et al. (2019). Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hai yếu tố chính là khả năng và hiệu suất phân phối khí trong môi trường nước thải ở các độ sâu khác nhau ở từng vị trí khác nhau trong bể của ống venturi so với kiểu máy nén khí sục khí truyền thống.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là ống venturi (Hình 1), ống có cấu tạo gồm 1 đầu ống dẫn nước vào và 1 đầu ống dẫn nước ra, 1 đoạn cổ thắt nằm giữa ống, 1 lỗ thu khí nằm ở đoạn co hẹp có nhiệm vụ thu khí khi có dòng nước áp lực cao chảy qua.

Nước mặt được thu thập từ kênh Búng Xáng có tọa độ X:10,0282283 và Y: 105,7634544. Kênh tiếp nhận nguồn nước thải sinh hoạt từ khu vực sinh sống của người dân thuộc phường Xuân Khánh và phường An Khánh, quận Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ thải ra. Thời điểm thu mẫu vào lúc thủy triều thấp từ 4 h đến 9 h sáng.

Nước mặt được sử dụng vì nồng độ oxy hòa tan thấp dưới 0,5 mg/L hoặc xấp xỉ bằng 0,0 mg/L và phù hợp cho thí nghiệm kiểm tra hiệu suất truyền oxy trong nước. Các thí nghiệm kiểm tra hiệu suất truyền khí khác của Therrien et al. (2019) và Yadav et al. (2021) được lý giải thì nước máy đã được thêm hóa chất sodium sulfite -  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  nồng độ 10 mg/L và coban clorua -  $\text{CoCl}_2$  nồng độ 0,1 mg/L với mục đích giảm DO về dưới 0,5 mg/L.

### 2.2. Mô hình thí nghiệm

Thí nghiệm: kiểm tra khả năng phân phối khí của NT1 và NT2.

Mô hình bể kính được sử dụng với kích thước dài, rộng cao: 98,5; 69,0; 68,7 cm. Độ dày thành kính khoảng 1 cm nhằm đảm bảo an toàn khi bể

được sử dụng để chứa một thể tích nước lớn và chịu một áp lực lớn.

Tất cả thí nghiệm được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm và đều được lặp lại 3 lần cho hai nghiệm thức sục khí bằng ống venturi-vòi phun (NT1) và máy nén khí-đá sùi bọt (NT2). NT1 được lắp đặt 1 máy bơm Panasonic công suất 125 W (220 V – 1,55 A) cung cấp tối đa 30 L nước/phút với đầu bơm kết nối với các ống nhựa dẫn nước PVC đường kính 27 cm, bộ ống venturi có van điều chỉnh cấp khí bằng nhựa, cung cấp xấp xỉ 5,0 – 6,0 L khí/phút và 2 vòi phun với hướng phun bố trí hướng lên trên cách mặt nước 45 cm và cách đáy bể 15 cm. Vòi phun có nhiệm vụ phun nước sau trộn vào bể và đầu hút có nhiệm vụ tuần hoàn nước trở lại vào máy bơm (Hình 2). NT2 được bố trí với một máy bơm nén khí thương hiệu Trung Quốc công suất 35W (65 L khí/phút) kết nối với 6 cục đá bọt sục khí được bố trí đều trong bể (Hình 3).

### 2.3. Vận hành mô hình

Nước được sử dụng trong thí nghiệm là nước thu gom từ nguồn nước mặt, nước sau khi thu gom được loại bỏ những chất rắn có thể lắng được trước khi cho vào bể. Để đảm bảo an toàn trong quá trình vận hành, mực nước trong bể được duy trì cách 10 cm so với chiều cao thực của bể, vì vậy thể tích nước vận hành là xấp xỉ 373 L. Máy đo DO thương hiệu TOA DKK model DO-31P (xuất xứ Nhật Bản) được sử dụng với đầu dò có thể kéo dài được gắn cố định với một thanh inox 304 được chia vạch từ 5 cm, 30 cm và 60 cm cách mặt nước để đo giá trị DO tại 5 vị trí khác nhau trong bể (Hình 4) theo tuần tự từ vị trí có đánh số 1 đến 5. Tại mỗi vị trí được đo giá trị DO ở các khoảng ở 3 độ sâu được nêu ở trên mỗi 15 phút và trong 240 phút cho một lần lặp lại. Sau 240 phút sục khí, môi trường nước được để tĩnh trong 30 đến 60 phút, tiếp theo đo lại DO ở cả 5 vị trí nhằm kiểm tra sự suy giảm của DO sau khi ngưng sục khí.

Bốn vị trí được chọn (2, 3, 4, 5) là các vị trí ở sát góc bể làm vị trí đo giá trị DO nhằm đánh giá khả năng phân tán oxy ổn định và liên tục trong quá trình sục khí vì đây là các vùng trong bể nằm xa điểm sục khí và để các bọt khí có thể khuếch tán oxy phải mất nhiều thời gian. Đặc biệt trong kiểu bố trí với vòi phun hướng lên tại vị trí tâm bể (vị trí 1) trong NT1.

Lưu lượng khí được sử dụng cho NT1 là xấp xỉ 5 L khí/phút và cho NT2 là xấp xỉ 65 L khí/phút, lưu lượng khí được đo bằng lưu lượng kế đo khí, việc lưu lượng khí sử dụng khác nhau ở hai nghiệm thức so sánh nhằm kiểm chứng giả thuyết NT1 có lưu lượng cấp khí thấp hơn nhưng lại cho khả năng cung

cấp oxy hòa tan vào nước tốt hơn NT2 nhờ vào việc tạo ra các bọt khí kích thước nhỏ. Giá trị DO được thu thập và xử lý bằng phần mềm Excel 2019. Nếu độ lệch giữa các lần lặp lại quá cao (> 0,5 mg/L) thì thí nghiệm được lặp lại cho đến khi khoảng giá trị giữa 3 lần lặp lại là thấp nhất.

Thông số khuếch tán được tính toán, công thức tính toán tham khảo từ hai nghiên cứu của Therrien et al. (2019) và Dange and Warkhedkar (2023).

\* Tính toán hệ số truyền oxy theo thể tích ở một nhiệt độ T xác định:

$$K_{LaT} = \frac{\ln(C_s - C_0) - \ln(C_s - C_t)}{t} \quad (1)$$

Trong đó:

$K_{LaT}$  là hệ số truyền oxy theo thể tích ở nhiệt độ đã cho,

$T^{\circ}\text{C}$  ( $\text{h}^{-1}$ ),

$t$  là thời gian,

$\ln$  biểu thị cho hàm logarit,

$C_s$  là nồng độ oxy đã bão hòa hoặc DO sau khi sục khí (mg/L),

$C_0$  là nồng độ oxy ban đầu hoặc DO trước khi sục khí (mg/L),

$C_t$  là nồng độ oxy tại thời điểm  $t$  hoặc DO xác định tại một khoảng nhiệt độ nào đó (mg/L).

Tuy nhiên, trong thực tế lượng oxy hòa tan bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ thay đổi liên tục nên biểu thức trên được quy về công thức tính chuẩn để thuận tiện trong việc đối chiếu.

$$K_{La20} = K_{LaT} \times \theta^{(20 - T)} \quad (2)$$

Trong đó:

$K_{La20}$  là hệ số truyền oxy theo thể tích ở điều kiện chuẩn  $20^{\circ}\text{C}$  ( $\text{h}^{-1}$ ),

$\theta$  là hệ số điều chỉnh nhiệt độ, lấy bằng nước máy với  $\theta = 1,024$ . Việc lấy  $\theta = 1,024$  vì hệ số có thể sử dụng cho các nghiên cứu truyền khí trong nước thải tại các nhà máy xử lý nước thải có sử dụng quy trình hiếu khí (Lee, 2020).

\* Tính toán tốc độ truyền oxy tiêu chuẩn (SOTR - Standard Oxygen Transfer Rate)

SOTR là lượng oxy truyền vào nguồn nước trên một đơn vị thời gian ở điều kiện chuẩn  $20^{\circ}\text{C}$ , nồng độ DO ban đầu dưới 0,5 mg/L.

$$\text{SOTR} = K_{La20} \times (C_{s20} - C_0) \times V \times 10^{-3} \quad (3)$$

Trong đó:

$C_{s20}$  là nồng độ bão hòa oxy ở 20°C,  $C_{s20}=9,07$  (mg/L);

$C_0$  là nồng độ oxy ban đầu, xem như  $C_0 = 0$  (mg/L);

$V$  là thể tích nước ( $m^3$ ).

\* Tính toán hiệu suất sục khí tiêu chuẩn (SAE - Standard Aeration Efficiency):

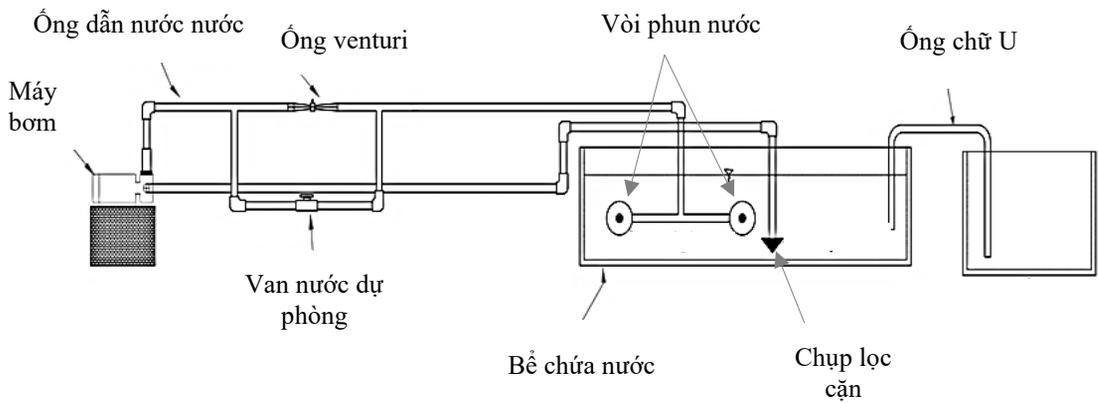
$$SAE = \frac{SOTR}{P} = \frac{K_{La20} \times (C_s - C_0) \times V \times 10^{-3}}{P} \quad (4)$$

Trong đó:

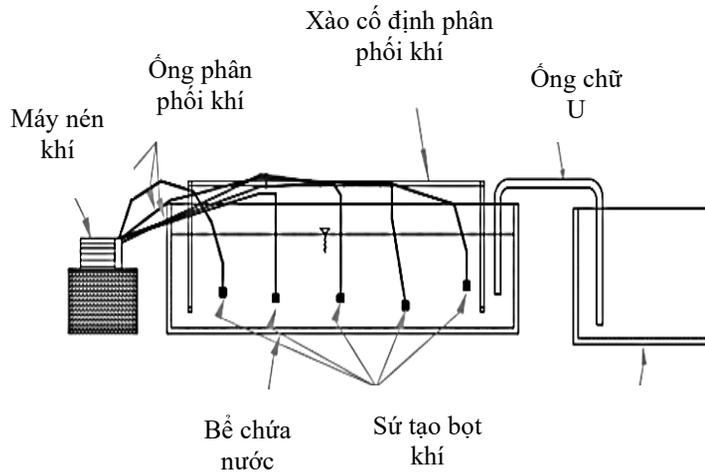
SAE là hiệu suất sục khí tiêu chuẩn ( $kgO_2/KWh$ ),

$P$  là công suấtphanh hay công suất chưa vào tải của động cơ.

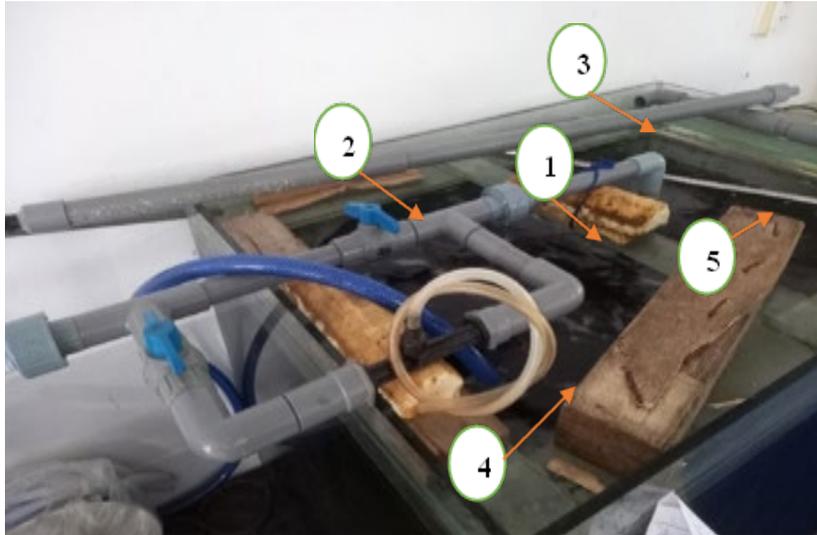
Các thông số  $K_{La20}$ ,  $SOTR$  và  $SAE$  được tính toán và phân tích bằng phần mềm Excel 2019.



**Hình 2. Mô hình hệ thống sục khí có sử dụng venturi kết hợp 2 vòi phun**



**Hình 3. Mô hình hệ thống sục khí sử dụng máy nén khí**



Hình 4. Sơ đồ bố trí 5 vị trí đo DO trong bể

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

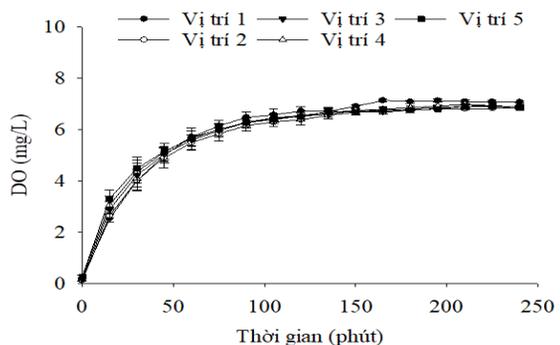
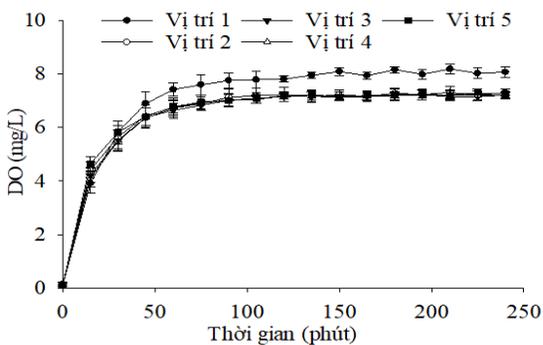
#### 3.1. Kiểm tra phân phối khí

##### 3.1.1. Độ sâu 5 cm cách mặt nước

Nồng độ oxy hòa tan (DO) sau quá trình chạy thí nghiệm sục khí ở cả hai nghiệm thức ở độ sâu 5 cm cách mặt nước điều cho kết quả ổn định. Ở vị trí 1 (vị trí trung tâm của bể) đối với NT1 có sử dụng ống venturi cho kết quả DO đạt cao nhất,  $DO \approx 8,0$  mg/L sau 135 phút sục khí và đối với NT2 sục khí bằng máy nén khí chỉ cho kết quả  $DO \approx 7,0$  mg/L. Mặc dù lưu lượng cấp khí của NT1 chỉ khoảng 5 L khí/phút so với 65 L khí /phút đối với NT2, có thể giải thích vì khả năng tạo bọt khí kích thước siêu nhỏ của ống venturi (Ramiro et al., 2022). Kết quả thể hiện ở Hình 5 cho thấy, giá trị DO tăng nhanh từ giá trị nhỏ hơn 1,0 mg/L đến 4,0 mg/L đối với NT1 lớn hơn 3,0 mg/L so với NT2 sau 15 đến 20 phút sục

khí. Sự tăng nhanh giá trị DO trong khoảng thời gian ban đầu vì sự tạo ra các bong bóng khí siêu nhỏ của ống venturi, các bong bóng khí siêu nhỏ làm tăng diện tích tiếp xúc giữa không khí và nước từ đó đẩy nhanh quá trình khuếch tán oxy vào trong nước. Ngoài ra, trong giai đoạn đầu của sục khí giá trị DO còn xa mức bão hòa nên giá trị DO vẫn còn cao và chưa bị giới hạn bởi các yếu tố về hóa học và sinh học.

Giá trị DO tiếp tục tăng trong khoảng 60 đến 65 phút sục khí tiếp theo, tại NT1 đạt giá trị xấp xỉ 7,0 mg/L đối với NT1 và 6,0 mg/L đối với NT2 ở các vị trí 2, 3, 4, 5 xung quanh bể. Nhưng trong khoảng 180 phút còn lại, các giá trị DO ở tất cả các vị trí đều không tăng tiếp tục vì giá trị DO trong nước gần đạt trạng thái bão hòa. Ngược lại, đối với kiểu bố trí 6 viên đá bọt phân bố đều điều trong NT2 cho phép giá trị DO phân bố ổn định ở tất cả các vị trí đo.



Hình 5. Biểu đồ thể hiện nồng độ oxy hòa tan (DO) tại 5 vị trí khác nhau trong bể ở độ sâu 5 cm cách mặt nước sau 240 phút sục khí

Giá trị DO (sau thời gian sục khí 240 phút) của NT1 ở có giá trị lần lượt là 6,85 mg/L, 5,9 mg/L, 5,9 mg/L, 5,7 mg/L và 5,8 mg/L tương ứng với các vị trí 1, 2, 3, 4 và 5. Còn NT2 cho giá trị lần lượt 5,93 mg/L, 5,46 mg/L, 5,25 mg/L, 5,27 mg/L và 5,19 mg/L tương ứng với các vị trí 1, 2, 3, 4 và 5. Giá trị DO (sau thời gian sục khí 240 phút) của NT1 cao hơn khoảng 1,0 mg/L tại vị trí đo số 1, các vị trí còn lại cho giá trị DO chênh lệch từ 0,5 đến 0,7 mg/L.

3.1.2. Độ sâu 30 cm cách mặt nước

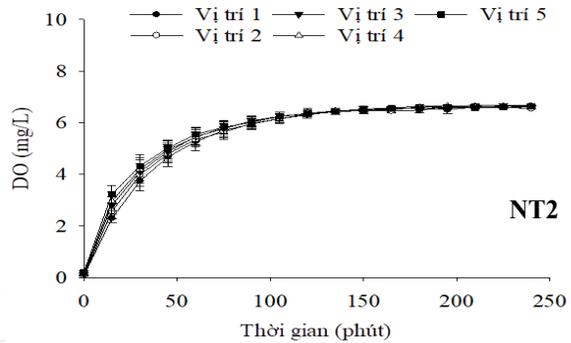
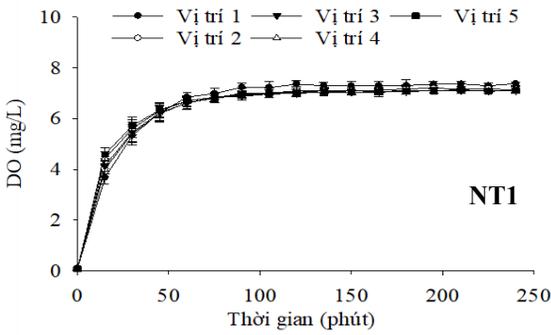
Giá trị DO ở độ sâu 30 cm tăng nhanh sau 50 phút sục khí ở cả hai nghiệm thức 1 và 2 từ giá trị gần bằng 0,0 mg/L lên trên 5,0 mg/L. Sau khoảng 30 phút sục khí tiếp theo thì giá trị DO gần bằng 7,0 mg/L đối với NT1 và xấp xỉ 6,0 mg/L đối với NT2, có sự chênh lệch khoảng 1,0 mg/L giữa hai nghiệm thức, điều này chứng minh ở độ sâu 30 cm giá trị DO ở NT1 vẫn cao hơn giá trị DO ở NT2 (Hình 6). Trong khoảng thời gian sục khí còn lại (160 phút) giá trị DO gần như không tăng ở cả hai nghiệm thức vì giá trị DO tiến gần đến trạng thái bão hòa.

Ngoài ra, giá trị DO duy trì ổn định ở mức 7,0 mg/L, cao hơn NT2 (6,0 mg/L) trong suốt 160 phút cuối của quá trình sục khí. Sự chênh lệch giá trị giữa các vị trí sục khí là không đáng kể trong khoảng từ 0,2 mg/L đến 0,5 mg/L. Giá trị DO đạt giá trị gần giống nhau ở các vị trí 1, 2, 3, 4 và 5 trong 40 phút

cuối của thời gian sục khí. Ở độ sâu sục khí 30 cm, không có sự chênh lệch giá trị DO giữa vị trí 1 (vị trí đặt hai vòi phun) so với các vị trí còn lại của NT1, giá trị DO ở NT1 cho  $DO_{max} = 7,4$  mg/L trong khi  $DO_{max} = 6,7$  mg/L đối với NT2, kết quả đo DO ở NT1 cao hơn so với NT2 chênh lệch khoảng 1,0 mg/L.

Cả hai NT1 và NT2 đều cho thấy khả năng cung cấp và phân phối oxy hòa tan đều ở các vị trí đo được chọn trong bể thí nghiệm ở độ sâu 30 cm. Và độ chênh lệch giữa các giá trị không có sự khác biệt quá lớn so với giá trị DO ở độ sâu 5 cm (gần mặt nước), nhưng ở vị trí 1 của NT1 ở độ sâu 5 cm cho giá trị DO  $\approx 8,0$  mg/L cao hơn các vị trí còn lại. Có thể lý giải sự khác biệt trên vì vị trí số 1 (5 cm cách mặt nước) là nơi gần mặt nước nhất và vùng tập trung bọt khí kích thước siêu nhỏ sau khi được phun ra từ vòi phun.

DO (sau thời gian sục khí) lần lượt đạt 5,9 mg/L, 5,7 mg/L, 5,7 mg/L, 5,7 mg/L và 5,7 mg/L tương ứng với các vị trí 1, 2, 3, 4 và 5 của NT1 so với 5,3 mg/L ở vị trí 1, 5,3 mg/L ở vị trí 2, 5,2 mg/L ở vị trí 3, 5, 10 mg/L ở vị trí 4 và 5,12 mg/L ở vị trí 5 của NT2, độ chênh lệch trong khoảng 0,4 – 0,7 mg/L là không quá lớn của giá trị DO đo được giữa 2 nghiệm thức. Giá trị DO (sau thời gian sục khí 240 phút) ở NT1 tiếp tục cao hơn NT2 và lý do giải thích đã được trình bày ở mục 3.1.1.



Hình 6. Biểu đồ thể hiện nồng độ oxy hòa tan (DO) tại 5 vị trí khác nhau trong bể ở độ sâu 30 cm cách mặt nước sau 240 phút sục khí

3.1.3. Độ sâu 60 cm cách mặt nước

Ở độ sâu 60 cm, giá trị DO cũng tăng nhanh sau 15 đến 20 phút sục khí đầu tiên (Hình 7), đạt giá trị  $DO_{max} \approx 4,0$  mg/L đối với NT1 và  $DO_{max} \approx 3,0$  mg/L đối với NT2 ở cả 5 vị trí đo. Độ chênh lệch giá trị giữa các vị trí đo lần lượt từ 0,4 đến 1,0 mg/L có thể là vì các vị trí không được đo trong cùng một thời điểm mà có vị trí đo trước và vị trí đo sau. Sau khoảng 30 đến 35 phút tiếp theo, giá trị DO lần lượt

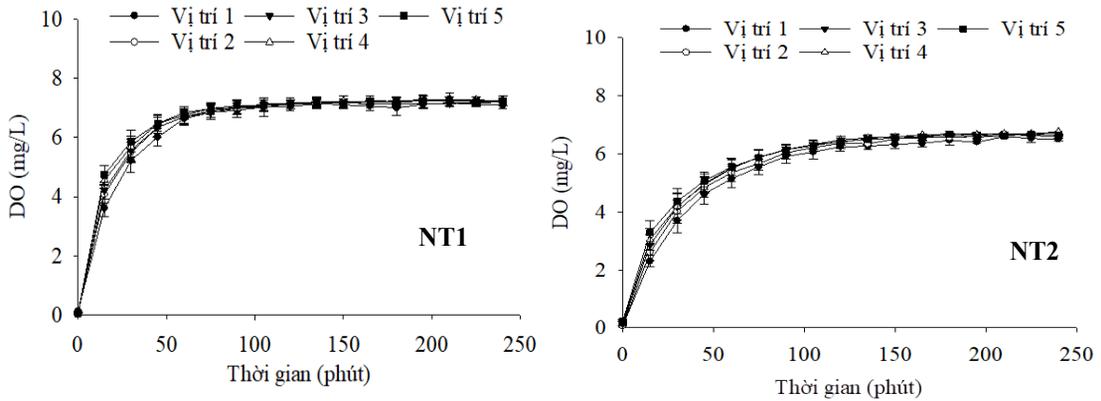
đạt xấp xỉ 6,1 mg/L ở NT1 và 5,0 mg/L ở NT2. Trong khoảng thời gian còn lại, DO ở NT1 tăng chậm, đạt 7,2 mg/L ( $DO_{max}$ ) và 7,0 mg/L ( $DO_{min}$ ) tại các vị trí đo. Ở NT2, DO tăng thêm 1,5 – 1,7 mg/L, đạt 6,7 mg/L ( $DO_{max}$ ) và 6,3 mg/L ( $DO_{min}$ ) thấp hơn NT1. Sau thí nghiệm kiểm tra sự phân bố oxy hòa tan trong bể với NT1 và NT2 cho thấy cả hai hệ thống sục khí cho hiệu quả sục khí ổn định và phân bố đều lượng oxy ở các vị trí trong bể. Ngoài ra, độ

sâu 30 cm và 60 cm kết quả đo DO không có sự chênh lệch quá lớn giữa các giá trị đo, giá trị DO đều trên 7,0 mg/L của NT1 và trên 6,0 mg/L của NT2 ở cả 5 vị trí đo gần đúng với nghiên cứu của Therrien et al. (2019) không có sự khác biệt quá lớn về nồng độ oxy hòa tan ở các độ sâu khác nhau.

Tuy nhiên, độ sâu 5 cm cách mặt nước cho kết quả chênh lệch ở giá trị DO xấp xỉ 8,0 mg/L cao hơn 1,0 mg/L so với độ sâu 30 cm, 60 cm chứng

minh có sự khác biệt về nồng độ oxy ở các độ sâu khác nhau đặc biệt là ở vị trí gần mặt nước.

DO (sau thời gian sục khí 140 phút) lần lượt đạt 6,0 mg/L, 5,5 mg/L, 5,7 mg/L, 5,6 mg/L và 5,6 mg/L ở NT1 so với 5,3 mg/L, 4,9 mg/L, 5,2 mg/L, 4,9 mg/L và 5,2 mg/L ở NT2, sự chênh lệch trong khoảng 0,35 – 0,7 mg/L tương tự ở các vị trí 1, 2, 3, 4 và 5. Giá trị DO (sau thời gian sục khí 240 phút) ở NT1 tiếp tục cao hơn NT2 và lý do giải thích đã được trình bày ở mục 3.1.1.



Hình 7. Biểu đồ thể hiện nồng độ oxy hòa tan (DO) tại 5 vị trí khác nhau trong bể ở độ sâu 60 cm cách mặt nước sau 240 phút sục khí

### 3.2. Hiệu suất truyền oxy trong nước

Xét theo từng độ sâu khác nhau tương tự như ở nội dung kiểm tra phân phối khí của hai nghiệm thức (Bảng 1, 2, 3).

#### \*Độ sâu 5 cm

Kết quả tính toán cho hệ số  $Kla_{20_{max}} = 3,11$  ở vị trí số 4 và  $Kla_{20_{min}} = 0,92$  ở độ sâu 5 cm tại vị trí số 2 của NT1;  $Kla_{20_{max}} = 1,9$  ở vị trí số 5 và  $Kla_{20_{min}} = 0,99$  ở vị trí số 3 của NT2, hệ số truyền oxy tối đa của NT1 cao hơn so với NT2 chứng tỏ hệ thống cấp khí bằng ống venturi truyền oxy vào nước tốt hơn nhờ tạo ra các bọt khí kích thước siêu nhỏ (Wiraputra et al., 2016, Stoppatoa et al., 2023). Giá trị trung bình của  $Kla_{20} = 1,75$  ở NT1 cao hơn so với 1,25 ở NT2.

Thông số  $SOTR_{max} = 0,01$   $kgO_2/h$  ở vị trí số 5 và  $SOTR_{min} = 3,1 \times 10^{-3}$   $kgO_2/h$  ở vị trí số 2 của NT1 vẫn cao hơn so với  $SOTR_{max} = 6,4 \times 10^{-3}$   $kgO_2/h$  ở vị trí số 5 và  $SOTR_{min} = 3,3 \times 10^{-3}$   $kgO_2/h$  ở vị trí số 3

cho thấy hiệu suất truyền oxy vào nước của ống venturi khá tốt, chênh lệch xấp xỉ  $4 \times 10^{-3}$   $kgO_2/h$  của 2 vị trí cho giá trị tính toán cao nhất.  $SOTR_{trung\ bình} = 6 \times 10^{-3}$   $kgO_2/h$  của NT1 vẫn cao hơn so với giá trị trung bình của NT2 chỉ đạt  $4 \times 10^{-3}$   $kgO_2/h$ .

Thông số  $SAE_{max} = 0,08$   $kgO_2/kWh$  ở vị trí số 5 của NT1 thấp hơn so với  $SAE_{max} = 0,18$   $kgO_2/kWh$  của NT2, chênh lệch xấp xỉ 0,1  $kgO_2/kWh$  vì bản chất thông số đặc trưng cho lượng oxy truyền được vào nước trong một kWh điện lý thuyết (hiệu suất sục khí tiêu chuẩn) khác so với thực tế vì ở NT1 chỉ sục khí với lưu lượng 5,0 – 6,0 L khí/phút trong khi ở NT2 là 65 L khí/phút.

Ngoài ra, nhiệm vụ chính của máy bơm nước là đẩy nước và bản chất việc trộn khí qua ống venturi chỉ là một quá trình gián tiếp trong lúc đẩy nước của máy bơm khi nước đi qua đoạn co hẹp của ống venturi thì áp suất giảm dưới áp suất khí quyển (1,0 atm) và không khí bị hút vào một cách thụ động.

**Bảng 1. Tính toán các thông số khuếch tán oxy trong nước ở độ sâu 5 cm**

TT	Thông số	Độ sâu cách mặt nước 5 cc					
		NT1			NT2		
		Thấp nhất	Trung bình	Cao nhất	Thấp nhất	Trung bình	Cao nhất
1	Kla20	0,92	1,75	3,11	0,99	1,25	1,9
2	SOTR (kgO <sub>2</sub> /h)	3,1x10 <sup>-3</sup>	6x10 <sup>-3</sup>	0,01	3,3x10 <sup>-3</sup>	4x10 <sup>-3</sup>	6,4x10 <sup>-3</sup>
3	SAE (kgO <sub>2</sub> /kWh)	0,02	0,05	0,08	0,09	0,12	0,18

**\* Độ sâu 30 cm**

Thông số  $Kla_{20,max} = 3,16$  ở vị trí số 5 của NT1 cao hơn  $Kla_{20,max} = 1,93$  của NT2 ở cùng vị trí.  $Kla_{20,Trung\ bình} = 1,82$  của NT1 tiếp tục cao hơn so với 1,26 của NT2, chênh lệch khoảng 0,5. Chứng tỏ hiệu suất truyền oxy ở NT1 vẫn cao hơn NT2 ở độ sâu 30 cm cách mặt nước.

Thông số  $SOTR_{max} = 0,01$  kgO<sub>2</sub>/h ở vị trí số 5 của NT1 cao hơn so với  $SOTR_{max} = 6,5x10^{-3}$  kgO<sub>2</sub>/h của NT2 nhờ vào các bọt khí kích thước siêu nhỏ

được tạo ra và hòa tan vào môi trường nước nước mà không nổi lên của ống venturi,  $SOTR_{Trung\ bình} = 6x10^{-3}$  kgO<sub>2</sub>/h của NT1 cao hơn so với  $4x10^{-3}$  kgO<sub>2</sub>/h của NT2.

Thông số  $SAE_{max} = 0,08$  kgO<sub>2</sub>/kWh ở vị trí số 5 của NT1 thấp hơn so với  $SAE_{max} = 0,19$  kgO<sub>2</sub>/kWh của NT2 và giá trị trung bình SAE của NT1 = 0,05 kgO<sub>2</sub>/kWh tiếp tục thấp hơn 0,12 kgO<sub>2</sub>/kWh của NT2, lý do đã được giải thích ở phần so sánh thông số tương tự ở độ sâu 5 cm.

**Bảng 2. Tính toán các thông số khuếch tán oxy trong nước ở độ sâu 30 cm**

TT	Thông số	Độ sâu cách mặt nước 30 cm					
		NT1			NT2		
		Thấp nhất	Trung bình	Cao nhất	Thấp nhất	Trung bình	Cao nhất
1	Kla20	0,93	1,82	3,16	0,88	1,26	1,93
2	SOTR (kgO <sub>2</sub> /h)	3,3x10 <sup>-3</sup>	6x10 <sup>-3</sup>	0,01	2,9x10 <sup>-3</sup>	4x10 <sup>-3</sup>	6,5x10 <sup>-3</sup>
3	SAE (kgO <sub>2</sub> /kWh)	0,03	0,05	0,08	0,08	0,12	0,19

**\* Độ sâu 60 cm**

Kết quả so sánh tương tự như ở độ sâu 5 và 30 cm. Hệ số  $Kla_{20,max} = 4,23$  và giá trị  $SOTR_{max} = 0,01$  kgO<sub>2</sub>/kWh ở vị trí số 5 của NT1 cao hơn so với hệ số  $Kla_{20,max} = 1,96$  và  $SOTR_{max} = 6,6x10^{-3}$  kgO<sub>2</sub>/h của NT2 ở cùng vị trí. Thông số  $Kla_{20,Trung\ bình} = 1,89$  ở NT1 tiếp tục cao hơn 1,28 ở NT2 và  $SOTR_{Trung\ bình} = 6x10^{-3}$  kgO<sub>2</sub>/h tiếp tục cao hơn  $4x10^{-3}$  kgO<sub>2</sub>/h của NT2.

Thông số  $SAE_{max} = 0,19$  kgO<sub>2</sub>/kWh của NT2 cao hơn so với  $SAE_{max} = 0,09$  kgO<sub>2</sub>/kWh của NT1,

chênh lệch xấp xỉ 0,1 kgO<sub>2</sub>/kWh, giá trị trung bình SAE của NT2 vẫn cao hơn của NT1 ở độ sâu 60 cm, chênh lệch 0,14 kgO<sub>2</sub>/kWh.

Kết quả tính toán hệ số Kla20, hai thông số SOTR, SAE và so sánh các giá trị cao nhất và thấp nhất giữa NT1 và NT2 cho thấy hiệu suất truyền oxy của NT1 luôn cao hơn so với NT2 qua hệ số Kla20 và thông số SOTR. Đối với thông số SAE thì ngược lại vì lượng khí cấp của NT1 nhỏ hơn so với NT2 và cấp khí chỉ là quá trình phụ của máy bơm nước do sự gián tiếp hút khí khi đẩy nước qua đoạn co hẹp.

**Bảng 3. Tính toán các thông số khuếch tán oxy trong nước ở độ sâu 60 cm**

TT	Thông số	Độ sâu cách mặt nước 60 cm					
		NT1			NT2		
		Thấp nhất	Trung bình	Cao nhất	Thấp nhất	Trung bình	Cao nhất
1	Kla20	1,09	1,89	4,23	0,97	1,28	1,96
2	SOTR (kgO <sub>2</sub> /h)	3,7x10 <sup>-3</sup>	6x10 <sup>-3</sup>	0,01	3,2x10 <sup>-3</sup>	4x10 <sup>-3</sup>	6,5x10 <sup>-3</sup>
3	SAE (kgO <sub>2</sub> /kWh)	0,03	0,05	0,09	0,09	0,12	0,19

**3.3. So sánh với các nghiên cứu khác**

Kết quả nghiên cứu của Yadav et al. (2021) – (TN1) và Dange and Warkhedkar (2023) – (TN2) cho kết quả tính toán hai thông số SOTR và SAE cao hơn so với thí nghiệm trên.

Thông số  $SOTR_{max} = 0,02$  kgO<sub>2</sub>/h và  $SAE_{max} = 0,6$  kgO<sub>2</sub>/kWh của (TN1); thông số  $SOTR_{max} = 0,3$  kgO<sub>2</sub>/h và  $SAE_{max} = 0,3$  kgO<sub>2</sub>/kWh của (TN2) cao hơn so với  $SOTR_{max} = 0,01$  kgO<sub>2</sub>/h và  $SAE_{max} = 0,09$  kgO<sub>2</sub>/kWh trong thí nghiệm này.

Kết quả tính toán thông số  $SOTR_{max}$  và  $SAE_{max}$  của hai thí nghiệm TN1 và TN2 cao hơn so với thí nghiệm này được giải thích vì liên quan đến công suất máy bơm. Cụ thể, máy bơm (TN1) có công suất 230 V - 9,5 A và TN2 có công suất 430 V - 2,56 A cao hơn so với 220 V - 1,55 A trong thí nghiệm này.

Ngoài ra, trong thí nghiệm của (TN1) và (TN2) nguồn nước máy được sử dụng và bổ sung hai hóa chất natri sunfit -  $Na_2SO_3$  (10 mg/L) và coban clorua -  $CoCl_2$  (0,1 mg/L) với mục đích giảm DO về dưới 0,5 mg/L thay vì sử dụng nguồn nước mặt lấy từ kênh có yếu tố sinh học và hóa học can thiệp vào lượng oxy hòa tan được cung cấp trong suốt thời gian thử nghiệm.

Tuy nhiên, giá trị SOTR chênh lệch không lớn khoảng 0,01  $kgO_2/h$  đối với thí nghiệm của (TN1). Một lưu ý, mặc dù hai thông số SOTR và SAE trong thí nghiệm điều thấp hơn so với TN1 và TN2, nhưng hệ số truyền oxy  $KLa_{20}$  tối đa trên 3 cao hơn so với chỉ 2,58 trong thí nghiệm của (TN2) và 1,4 - 2,3 trong thí nghiệm của (TN1), chứng minh việc bố trí thí nghiệm của ống venturi với công suất máy bơm 220 V - 1,55 A với hai vòi phun trong thử nghiệm trên vẫn cung cấp một lượng oxy hòa tan ổn định và liên tục trong môi trường bị cạn kiệt oxy.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

Abadie, T., Awali, S. M. M., Brennan, B., Briciu-Burghina, C., Tajparast, M., Passos, T. M., Durkan, J., Holland, L., Lawler, J., Nolan, K., Quilty, B., Fitzsimons, L., Regan, F., & Delauré, Y. (2022). *Oxygen transfer of microbubbles clouds in aqueous solutions – Application to wastewater*. *Chemical Engineering Science*, 257, 117693. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117693>

Agarwal, K., Trivedi, M., & Nirmalkar, N. (2022). *Does salting – out effect nucleate nanobubbles in water: Spontaneous nucleation?*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 82, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2021.105860>

Atkinson, A.J., Apul, O.G., Schneider, O., Garcia-Segura, S., & Westerhoff, P. (2019). *Nanobubble technologies offer opportunities to improve water treatment*. *Acc. Chem. Res.* 52(5), 1196 –1205. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00606>

Dange, A., & Warkhedkar, R. (2023). *An experimental study of venturi aeration system*. *Materials Today: Proceedings*, 72, 615–621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.155>

Favvas, E., Kyzas, G. Z., Eleni K. Efthimiadou, E. K., & Athanasios Ch Mitropoulos, A. Ch. (2021). *Bulk nanobubbles, generation methods*

#### 4. KẾT LUẬN

Hiệu quả cung cấp oxy vào trong môi trường nước của ống venturi kết hợp hai vòi phun cao hơn hoặc tương đương với máy nén khí kết hợp đá sủi bọt. Giá trị  $DO_{max} = 8,0$  mg/L của NT1 cao hơn so với NT2, các thông số khác như hệ số  $KLa_{20}$ , SOTR và SAE đều cao hơn so với NT2. Thiết bị có sử dụng ống venturi để sục khí hoàn toàn có khả năng được ứng dụng để cung cấp đủ lượng oxy hòa tan ổn định, phân bố đồng đều và liên tục theo từng độ sâu khác nhau trong bể của hệ thống sục khí làm thoáng chứa nước thải ô nhiễm. Tuy nhiên, nghiên cứu còn hạn chế ở việc chưa xác định được các yếu tố tác động đến nồng độ oxy hòa tan khác như: nhiệt độ, TDS, TSS, COD, BOD, Coliform,...

Trong tương lai, nhiều nghiên cứu về yếu tố vật lý cần được thực hiện thêm như: công suất máy bơm, độ dài đường ống dẫn nước; yếu tố vật lý – hóa học: nhiệt độ, chất rắn lơ lửng, chất hoạt động bề mặt, ... nhằm phân tích chuyên sâu thêm sự tác động của các yếu tố này đến hiệu suất truyền oxy vào môi trường nước thải của ống venturi.

*and potential applications*. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 54, 101455. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101455>

Hamad, F. A., Pun, K., Alessio, B., Najim, S. A., Ganesan, P. B., & Hughes, D. (2023). *Experimental measurements on the microbubble characteristics and dissolved oxygen (DO) in water using single and twin – Venturi type microbubble generators*. *Chemical Engineering Science* 280, 118994. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118994>

Jiang, L. M., Chen, L., Zhou, Z., Sun, D., Li, Y., Zhang, M., Liu, Y., Du, S., Chen, G., & Yao, J. (2020). *Fouling characterization and aeration performance recovery of fine - pore diffusers operated for 10 years in a full-scale wastewater treatment plant*. *Bioresource Technology*, 307, 123197. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123197>

Lee, J. (2020). *The baseline mass transfer coefficient: Water and Wastewater aeration systems* (1st ed). Cambridge Scholars Publishing.

Li, H., Zhang, Q., Zeng, M., Cao, J., Zhao, Q., & Hao, L. (2023). *Insights into gas flow behavior in venturi aerator by CFD-PBM model and verification of its efficiency in sludge reduction*

- through O<sub>3</sub> aeration. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103960.  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103960>.
- Movahed, S. M. A., & Sarmah, A. K. (2021). *Global trends and characteristics of nano- and micro-bubbles research in environmental engineering over the past two decades: A scientometric analysis*. *Science of the Total Environment*, 785, 147362.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147362>.
- Rameshkumar, C., Senthilkumar, G., Subalakshmi, R., & Gogoi, R. (2019). *Generation and characterization of nanobubbles by ionization method for wastewater treatment*. *Desalination and Water Treatment*, 164, 98 – 101.  
 doi:10.5004/dwt.2019.24389.
- Ramiro Escudero, G., José, E. G. H., & Martín. R. P. (2022). *CFD simulation of a venturi gas bubbles generator in a water-air system*. *International Journal of Software & Hardware Research in Engineering*, 10(1), 136 – 145. ISSN-2347-4890.
- Santos, E., Albuquerque, A., Lisboa, I., Murray, P., & Ermis, H. (2022). Economic Assessment of Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants: Applicability of Alternative Nature-Based Technologies in Portugal. *MDPI, Water*, 14(13), 2042.  
<https://doi.org/10.3390/w14132042>.
- Schwarz, M., Behnisch, J., Trippel, J., Engelhart, M. & Wagner, M. (2021). Oxygen Transfer in Two-Stage Activated Sludge Wastewater Treatment Plants. *MDPI, Water*, 13(14), 1964,  
<https://doi.org/10.3390/w13141964>
- Siatou, A., Manali, A. & Gikas, P. (2020). Energy Consumption and Internal Distribution in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants of Greece. *MDPI, Water*, 12(4), 1204,  
<https://doi.org/10.3390/w12041204>
- Stoppatoa, A., Benatoa, A., Vannaa, F. D., Tassinato, G., & Nisato, F. (2023). Hydrodynamic Cavitation for Pollutant Treatment in the New Horizon of Green Chemistry. *Chemical Engineering Transactions*, 99, 145 – 150.  
<https://doi.org/10.3303/CET2399025>.
- Therrien, J. – D., Vanrolleghem, P. A., & Dorea, C. C. (2019). Characterization of the performance of venturi-based aeration devices for use in wastewater treatment in low-resource settings. *Water SA*, 45(2), 251 – 258.
- Wiraputra, I. G. P. A. E., Edikresna, D., Munir, M. M., & Khairurrija. (2016). Generation of Submicron Bubbles using Venturi Tubi Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 739, 012058. doi:10.1088/1742-6596/739/1/012058.
- Yadav, A., Kumar, A., & Sarkar, S. (2021). Performance evaluation of venturi aeration system. *Aquacultural Engineering*, 93, 102156.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102156>.
- Yapararne, S., Doherty, Z. E., Magdaleno, A. L., Matula, E. E., MacRae, J. D., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G. (2022). Effect of air nanobubbles on oxygen transfer, oxygen uptake, and diversity of aerobic microbial consortium in activated sludge reactors. *Bioresource Technology*, 351, 127090.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127090>.
- Zhang, M., Qiu, L., & Liu, G. (2020). Basic characteristics and application of micro – nano bubbles in water treatment. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 510, 042050.  
 doi:10.1088/1755-1315/510/4/042050.
- Zhang, Q., Zhao, X., Yin, J., & Sun, Z. (2023). Micro-Nano Bubbles Conditioning Treatment of Contaminated Sediment for Efficient Reduction: Dehydration Characteristic and Mechanism. *MDPI, Water*, 15, 1985.  
<https://doi.org/10.3390/w15111985>.