

THỬ NGHIỆM KHẢ NĂNG KHỬ TRÙNG TRONG NƯỚC THẢI SINH HOẠT BẰNG SÓNG SIÊU ÂM

Hoàng Đức An^{1,*}, Huỳnh Thị Minh Thành¹, Võ Thị Hồng Phượng¹

¹Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Quy Nhơn

*Email: hoangduc.an@qnu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả khử trùng bằng chiếu xạ siêu âm đối với nước thải sinh hoạt được lấy từ hệ thống nước thải tại phường Quy Nhơn Nam, tỉnh Gia Lai. Ảnh hưởng của tần số siêu âm (30 và 40 kHz), thời gian chiếu xạ (1-12 phút) và mật độ công suất (50-200 W/L) đến khả năng bất hoạt vi sinh vật được khảo sát. Sóng siêu âm ở tần số 30 kHz và 40 kHz được thử nghiệm với thời gian chiếu xạ từ 1-12 phút và công suất từ 50-200 W/L. Các chỉ tiêu vi sinh, bao gồm tổng số vi sinh vật hiếu khí và tổng số *Coliform* được xác định trước và sau khi xử lý bằng sóng siêu âm. Kết quả cho thấy, mật độ vi sinh vật giảm đáng kể sau khi chiếu xạ, với hiệu quả khử trùng tăng tỷ lệ thuận với thời gian và công suất siêu âm. Ở tần số 30 kHz, hiệu quả loại bỏ vi sinh vật tăng từ 0,13 LOG (tương đương với mức giảm 26,16%) ở 1 phút lên 0,37 LOG (mức giảm 57,56%) ở 12 phút. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận ở tần số 40 kHz, với mức giảm dao động từ 0,09 LOG (19,19%) đến 0,31 LOG (51,16%). Khi mật độ công suất được tăng lên 200 W/L ở tần số 30 kHz, hiệu quả khử trùng vi sinh vật đạt mức tối đa 0,78 LOG (giảm 83,37%). Nghiên cứu này chứng minh rằng, siêu âm công suất cao là một giải pháp tiềm năng nhằm đến giai đoạn tiền xử lý hoặc kết hợp như một bước xử lý khử trùng cuối cùng cho nước thải sinh hoạt.

Từ khóa: Siêu âm, sự tạo bọt khí, nước thải sinh hoạt, khử trùng, tổng số *Coliforms*.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nước thải sinh hoạt phát sinh từ các hoạt động của con người trong khu dân cư, trung tâm thương mại và cơ quan công sở mang theo tải lượng lớn chất ô nhiễm. Trong đó, vi sinh vật gây bệnh (như vi khuẩn, virus, ký sinh trùng...) là một trong những yếu tố nguy hại nhất, có khả năng lây truyền dịch bệnh qua nguồn nước và ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe cộng đồng.

Siêu âm công suất cao là một hướng công nghệ môi trường tiên tiến. Khi sóng siêu âm tần số thấp (>18 kHz) truyền vào pha lỏng, hiện tượng bọt khí cavitation phát sinh, sinh trường và sụp đổ cơ học. Quá trình này tạo ra các điểm nóng cục bộ cục đoạn với nhiệt độ đạt đến 5.000 K và áp suất lên tới 1.000 atm [1]. Các điều kiện này, kết hợp với sự hình thành các gốc oxy hóa mạnh như OH[•], sẽ phá hủy vách và màng tế bào của vi sinh vật. Trên thế giới, công nghệ này đã bước đầu được ứng dụng tại Nhật Bản, Hàn Quốc để kiểm soát tảo độc, vi sinh vật và chất hữu cơ [2-4].

Tuy nhiên, việc áp dụng siêu âm để khử trùng trực tiếp nước thải thô (chưa qua xử lý) là hoàn toàn không thực tế do hàm lượng chất rắn lơ lửng và chất hữu cơ cao sẽ che chắn, hấp thụ năng lượng sóng. Vì vậy, trong nghiên cứu này, quá

trình siêu âm được định hướng khảo sát nhằm hai mục đích: (1) Đánh giá khả năng tiền xử lý để phá vỡ cấu trúc bông cặn, chất hữu cơ mạch dài, hỗ trợ cho các công đoạn sinh học phía sau; hoặc (2) Ứng dụng như một công đoạn khử trùng cuối sau khi nước thải đã được làm sạch cơ học và sinh học. Thử nghiệm được thực hiện trên mẫu nước thải sinh hoạt tại phường Quy Nhơn Nam, tỉnh Gia Lai nhằm tìm kiếm các thông số vận hành tối ưu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu và phương pháp lấy mẫu

Phương pháp lấy mẫu: Mẫu nước thải được thu thập tại cửa xả của hệ thống thoát nước riêng (tách biệt hoàn toàn với hệ thống thoát nước mưa) của khu dân cư thuộc phường Quy Nhơn Nam, tỉnh Gia Lai. Để đảm bảo tính đại diện, đã tiến hành lấy mẫu tổ hợp gộp từ 5 mẫu đơn lẻ lấy ở các khung giờ cao điểm phát thải sinh hoạt (6 giờ 30, 11 giờ 30, 12 giờ 30, 17 giờ 30 và 19 giờ) trong các ngày thời tiết khô ráo, hoàn toàn không có mưa để tránh hiện tượng pha loãng do nước mưa.

Thiết bị thực nghiệm: Sử dụng 2 biến từ phát sóng siêu âm công suất danh định 100 W hoạt động ở tần số 30 kHz và 40 kHz.

2.2. Bố trí thực nghiệm

2.2.1. Ảnh hưởng của thời gian chiếu xạ

Cố định thể tích mẫu 100 mL, công suất phát 100 W, khảo sát thời gian chiếu xạ từ 1-12 phút.

2.2.2. Ảnh hưởng của công suất chiếu xạ

Thay đổi công suất từ 50-200 W/L. Tại tần số 30 kHz cố định thời gian 3 phút; tại tần số 40 kHz cố định thời gian 8 phút.

2.2.3. Hiệu suất khử trùng

Để phản ánh chính xác bản chất động học vi sinh theo các tiêu chuẩn quốc tế, hiệu suất khử trùng không dùng đơn vị phần trăm (%) mà được chuyển đổi sang đơn vị giảm LOG (Log reduction) theo công thức:

$$\text{Log Reduction} = \log_{10}(N_0) - \log_{10}(N_t)$$

Trong đó: N_0 là mật độ vi sinh vật ban đầu và N_t là mật độ vi sinh vật tại thời điểm t.

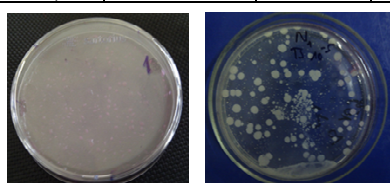
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng tính chất của mẫu nước thải đầu vào

Kết quả phân tích các thông số cơ bản của mẫu nước thải tổ hợp trước xử lý được thể hiện tại bảng 1. Để đảm bảo tính cập nhật pháp lý, mẫu được đo chiếu trực tiếp với Quy chuẩn QCVN 14:2025/BTNMT [5].

Bảng 1. Tính chất mẫu nước thải sinh hoạt tại phường Quy Nhơn Nam, tỉnh Gia Lai

Chi tiêu	Nước thải sinh hoạt	QCVN 14:2025/BTNMT [5]	
		Loại A (cột A)	Loại B (cột B)
pH	6,72±0,01	6-9	6-9
BOD ₅ (mg/L)	48,05±1,16	30	50
Tổng chất rắn lơ lửng (mg/L)	216,12±2,21	50	100
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	19,14±1,06	5	10
Tổng Coliform (CFU/100 mL)	4,3±0,3x10 ⁶	3.000	5.000
Tổng số vi sinh vật hiếu khí (CFU/mL)	7,2±0,2x10 ⁵	Không quy định	Không quy định



Hình 1. Khuẩn lạc Coliform và tổng số vi khuẩn hiếu khí trên môi trường đĩa thạch

Giá trị pH đo được của mẫu là 6,72±0,01, nằm hoàn toàn trong khoảng giới hạn cho phép (6-9) của QCVN 14:2025/BTNMT [5] đối với cả hai mức phân loại A và B. Giá trị pH này cho thấy mẫu nước thải có môi trường gần trung tính và tương đối ổn định. Theo Nguyễn Văn Phước và cs (2011) [6] pH là một trong những thông số quan trọng cần được kiểm soát trong quá trình xử lý nước sinh hoạt và công nghiệp bằng phương pháp sinh học, do pH có ảnh hưởng trực tiếp đến hoạt động của hệ vi sinh vật và hiệu quả của quá trình xử lý. Với giá trị pH 6,72±0,01, mẫu nghiên cứu nằm trong vùng phù hợp cho các quá trình xử lý sinh học thông thường. Do đó, pH không được xem là thông số ô nhiễm đáng quan ngại đối với mẫu nước thải trong nghiên cứu này.

Đối với chỉ tiêu chất hữu cơ, giá trị BOD₅ đạt 48,05±1,16 mg/L. Hàm lượng này đã vượt quá giới hạn mức A (30 mg/L) nhưng vẫn nằm trong phạm vi cho phép của mức B (50 mg/L). Đáng chú ý, giá trị BOD₅ này ở mức tương đối thấp so với giá trị trung bình của nước thải sinh hoạt đô thị. Điều này có thể được giải thích, là do đặc thù của mạng lưới đường ống thu gom tại khu vực khảo sát; dù là hệ thống thoát nước riêng, nước thải vẫn có khả năng chịu sự pha loãng cục bộ bởi lượng nước xám (nước tắm giặt, tẩy rửa) có tải lượng hữu cơ thấp, hoặc do sự thấm thấu của nước ngầm rò rỉ vào hệ thống tuyến cống. Tuy nhiên, kết quả này vẫn nằm trong dải phân tích đậm đặc phổ biến (40-70 mg/L) được ghi nhận trong báo cáo của Trần Thị Mỹ Diệu (2017) [7] tại một số khu dân cư quy mô nhỏ ở miền Trung, phản ánh tính chất điển hình của nước thải đô thị trước xử lý sinh học.

Thông số tổng chất rắn lơ lửng (TSS) đạt giá trị (216,12±2,21) mg/L, vượt xa tiêu chuẩn cho phép của cả mức A (50 mg/L) và mức B (100 mg/L). Mức vượt ngưỡng nghiêm trọng này (gấp 4,32 lần mức A và 2,16 lần mức B) minh chứng cho hàm lượng cặn hữu cơ, vô cơ lơ lửng trong nước thải chưa qua lắng lọc là rất lớn. Theo kết quả nghiên cứu của Lê Hoàng Việt (2015) [8], TSS trong nước thải sinh hoạt chưa xử lý tại Việt Nam thường dao động trong khoảng 150-300 mg/L. Sự hiện diện của mật độ TSS cao như vậy được dự báo sẽ gây hiệu ứng chắn sóng và phân tán năng lượng, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả truyền dẫn của sóng siêu âm trong các công đoạn xử lý phía sau.

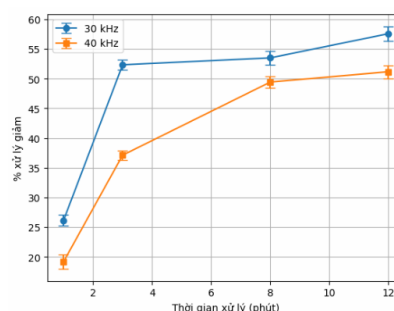
Nồng độ nitơ amoni (N-NH_4^+) trong mẫu đạt $(19,14 \pm 1,06)$ mg/L, vượt mức giới hạn quy định của QCVN 14:2025/BTNMT [5] (mức A: 5 mg/L và mức B: 10 mg/L). Sự tích lũy amoni cao là sản phẩm của quá trình phân hủy các hợp chất nitơ hữu cơ có trong các hoạt động bài tiết và thức ăn thừa. Theo U.S. Environmental Protection Agency (Cục bảo vệ môi trường Hoa Kỳ) (2010) [9], nitrogen là một trong những nhóm chất dinh dưỡng cần được kiểm soát trong hệ thống xử lý nước thải; trong đó, các quá trình sinh học có vai trò quan trọng trong chuyển hóa và loại bỏ nitrogen nhằm nâng cao chất lượng nước sau xử lý. Do đó, hàm lượng N-NH_4^+ tương đối cao trong mẫu nghiên cứu cho thấy cần áp dụng các biện pháp kiểm soát và loại bỏ nitrogen phù hợp, đặc biệt là xử lý sinh học chuyên sâu trước khi ứng dụng các giải pháp khử trùng, nhằm giảm tải chất ô nhiễm và nâng cao hiệu quả của quá trình xử lý tổng thể.

Về phương diện vi sinh vật, mật độ tổng số *Coliform* sau khi quy đổi chuẩn hóa theo đơn vị pháp lý đạt $(4,3 \pm 0,3) \times 10^6$ CFU/100 mL, vượt giới hạn quy định của QCVN 14:2025/BTNMT [5] hàng ngàn lần (mức A: 3.000 CFU/100 mL và mức B: 5.000 CFU/100 mL). Mức độ ô nhiễm vi sinh vật nghiêm trọng này hoàn toàn tương đồng với các nghiên cứu đô thị của Ngô Thị Nga (2016) [10] và Nguyễn Hữu Hiếu (2018) [11] khi mật độ *Coliform* thô thường duy trì ở mức 10^4 - 10^6 CFU/mL. Bên cạnh đó, mật độ tổng số vi sinh vật hiếu khí được ghi nhận ở mức $(7,2 \pm 0,2) \times 10^5$ CFU/mL. Mặc dù thông số vi sinh vật tổng số không được quy định giới hạn trực tiếp trong các quy chuẩn xả thải hiện hành, nhưng việc phân tích và đánh giá mật độ sinh khối này để đánh giá hiệu quả khử trùng bằng công nghệ sóng siêu âm ở các nội dung tiếp theo.

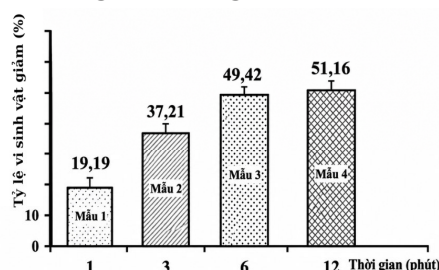
Khi đối chiếu với các giới hạn nghiêm ngặt của QCVN 14:2025/BTNMT [5], mẫu nước thải sinh hoạt tại khu vực nghiên cứu chỉ đạt yêu cầu duy nhất đối với thông số pH. Tất cả các thông số đặc trưng bao gồm: Giá trị BOD_5 , TSS, N-NH_4^+ và *Coliform* đều ô nhiễm vượt tiêu chuẩn cho phép. Kết quả này khẳng định, nguồn nước thải bắt buộc phải trải qua các công đoạn xử lý cơ học (lắng lọc TSS) và xử lý sinh học trước khi áp dụng công nghệ siêu âm như một giải pháp hỗ trợ phân rã bông cặn hoặc khử trùng cuối dây chuyền.

3.2. Động học khử trùng theo thời gian chiếu xạ (tần số 30 kHz và 40 kHz)

Kết quả nghiên cứu thời gian chiếu xạ ở tần số 30 kHz và 40 kHz được thể hiện ở hình 2 và 3.



Hình 2. Ảnh hưởng của thời gian chiếu xạ đến khả năng khử trùng ở tần số 30 kHz



Hình 3. Ảnh hưởng của thời gian chiếu xạ đến khả năng khử trùng ở tần số 40 kHz

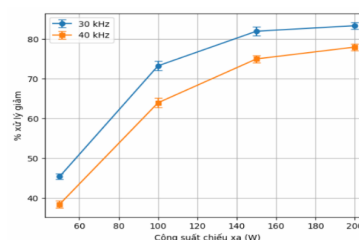
Kết quả hình 2 cho thấy, tại tần số 30 kHz: Chi chiếu xạ 1 phút, mật độ vi sinh vật giảm 26,16%, tương đương giảm 0,13 LOG. Khi kéo dài thời gian lên 12 phút, hiệu suất tăng lên 57,56%, tương đương giảm 0,37 LOG. Tại các mốc 3 và 8 phút, giá trị LOG giảm đạt quanh mức 0,32 LOG. Tại tần số 40 kHz: Xu hướng tương tự xảy ra nhưng hiệu suất thấp hơn rõ rệt. Tại 1 phút chỉ giảm 19,19% (0,09 LOG) và đạt tối đa 0,31 LOG (51,16%) ở mốc 12 phút. Điều này cho thấy, tần số thấp (30 kHz) mang lại hiệu quả cơ học mạnh hơn 40 kHz do ở tần số thấp hơn, các bọt khí cavitation có kích thước lớn hơn trước khi sụp đổ, tạo ra các xung kích và sóng áp lực cơ học mạnh hơn để xé rách màng tế bào vi khuẩn. Tuy nhiên, ngay cả ở 12 phút, mức giảm tối đa chỉ là 0,37 LOG. Trong công nghệ khử trùng nước, mức giảm này là rất thấp (thông thường yêu cầu đạt từ 2 - 4 LOG, tức giảm 99-99,99%). Nguyên nhân là do hàm lượng TSS quá cao (216,12 mg/L) trong nước thải thô tạo nên hiệu ứng chắn sóng và các chất hữu cơ cạnh tranh trực tiếp với gốc $\text{OH}^\cdot$ tự do.

3.3. Ảnh hưởng của mật độ công suất chiếu xạ

Kết quả nghiên cứu công suất chiếu xạ ở tần số 30 kHz được thể hiện trong hình 4.

Kết quả cho thấy, khi tăng mật độ công suất từ 50 W/L lên 200 W/L, số lượng bọt khí cavitation được sinh ra trên một đơn vị thể tích

tăng mạnh. Ở tần số 30 kHz (cố định 3 phút), hiệu suất khử trùng tăng từ 45,35% (0,26 LOG) lên 83,37% (0,78 LOG) tại công suất 200 W/L. Ở tần số 40 kHz (cố định 8 phút), tăng công suất giúp hiệu suất tăng từ 38,37% (0,21 LOG) lên 77,98% (0,66 LOG). Mặc dù năng lượng tăng gấp 4 lần nhưng hiệu suất bất hoạt vẫn không thể vượt qua ngưỡng 1 LOG (<90%). Điều này một lần nữa khẳng định, sóng siêu âm chỉ làm vỡ tế bào hoặc phân rã tạm thời các cụm vi sinh vật, một số chủng vi sinh vật bền nhiệt hoặc ẩn nấp sâu bên trong các bông cặn lơ lửng hoàn toàn sống sót.



Hình 4. Ảnh hưởng của công suất chiếu xạ đến khả năng diệt khuẩn ở tần số 30 kHz

3.4. Đánh giá toàn diện hiệu quả biến đổi các chỉ tiêu chất lượng nước sau siêu âm

Bảng 2. So sánh các thông số chất lượng nước thải trước và sau xử lý siêu âm

Chỉ tiêu	Mẫu trước xử lý	Mẫu sau xử lý siêu âm	Hiệu suất	Đối chiếu QCVN 14:2025/BTNMT [5]
pH	6,72±0,01	6,78±0,03	Không biến động	Đạt mức A
BOD ₅ (mg/L)	48,05±1,16	26,4±1,51	Giảm 45%	Đạt mức A
Tổng chất rắn lơ lửng (mg/L)	216,12±2,21	162,78±1,03	Giảm 24,7%	Không đạt (vượt mức B)
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	19,14±1,06	16,15±1,12	Giảm 15,6%	Không đạt (vượt mức B)
Tổng Coliform (CFU/100 mL)	4,3±0,3x 0 ⁶	4,9±0,3x10 ⁵	Giảm 0,94 LOG (88,6%)	Không đạt (vượt gấp 98 lần mức B)
Tổng số vi sinh vật hiếu khí (CFU/mL)	7,2±0,2x10 ⁵	1,1±0,2x10 ⁵	Giảm 0,81 LOG (84,7%)	-

Thí nghiệm được thực hiện ở điều kiện tối ưu về mặt hiệu suất: Tần số 30 kHz, mật độ công suất 200 W/L trong thời gian 12 phút, tiến hành thử nghiệm đánh giá hiệu quả xử lý thông qua các chỉ tiêu đặc trưng của nước thải. Kết quả được thể hiện ở bảng 2.

Đối với chỉ tiêu chất hữu cơ, giá trị BOD₅ giảm mạnh từ 48,05±1,16 mg/L xuống còn 26,4±1,51 mg/L, tương đương với hiệu suất xử lý đạt 45%. Giá trị đầu ra này không chỉ đáp ứng nghiêm ngặt yêu cầu mức B (≤50 mg/L) mà còn vượt qua và đạt tiêu chuẩn mức A (≤30 mg/L) của QCVN 14:2025/ BTNMT [5].

Kết quả này có tính tương đồng cao với kết quả nghiên cứu của Doosti và cs (2012) [12] khi chứng minh siêu âm dải tần 35 kHz có thể cắt giảm 30-50% giá trị BOD nhờ động lực phân hủy cấu trúc vi mô. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu Nguyễn Thị Hương (2018) [13] cũng từng ghi nhận mức suy giảm 40% giá trị BOD trong nước thải sinh hoạt dưới tác động của sóng siêu âm tần số 28-32 kHz. Cơ chế của hiện tượng này có thể liên quan trực tiếp đến quá trình xâm thực khí (cavitation). Sự sụp đổ dữ dội của các bọt khí siêu âm sinh ra các gốc tự do có tính oxy hóa cực mạnh, đặc biệt là gốc hydroxyl (OH[•]). Các gốc tự do này tấn công và bẻ gãy các liên kết mạch polymer hữu cơ dài, khó phân hủy tồn tại trong nước thải, chuyển

hóa chúng thành các phân tử mạch ngắn, đơn giản hoặc bị khoáng hóa một phần. Quá trình cắt mạch này làm thay đổi cấu trúc chất nền hữu cơ, dẫn đến sự sụt giảm nhu cầu oxy sinh hóa (BOD₅) tổng thể trong hệ thống.

Ngược lại với sự thay đổi của giá trị BOD₅, hàm lượng tổng chất rắn lơ lửng (TSS) chỉ giảm nhẹ từ 216,12±2,21 mg/L xuống còn 162,78±1,03 mg/L, đạt hiệu suất khiêm tốn là 24,68%, khiến chỉ tiêu này vẫn vượt ngưỡng mức B của QCVN 14:2025/BTNMT [5]. Do bản chất của trường sóng siêu âm công suất cao chủ yếu sinh ra các ứng suất cắt cơ học phá vỡ cấu trúc hạt hơn là tạo lực thúc đẩy quá trình keo tụ hay kết tủa lắng, nên hiệu quả loại bỏ TSS thường thấp hơn rõ rệt so với các chỉ tiêu hóa - sinh khác. Điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết của Mason và Lorimer (2002) [14], chỉ ra rằng năng lượng cavitation phân rã các bông cặn kích thước lớn thành các hạt mịn có kích thước vi mô, làm thay đổi phân bố kích thước hạt hạt cặn sinh học khiến cấu trúc lỏng lẻo hơn nhưng không làm mất đi khối lượng TSS tổng thể nếu không có sự hỗ trợ của các biện pháp lắng lọc cơ học tiếp theo. Nghiên cứu của Trần Minh Tuấn (2021) [15] cho thấy, khi xử lý nước thải sinh hoạt bằng siêu âm dải 25-40 kHz cũng ghi nhận mức suy giảm TSS bão hòa chỉ dao động quanh ngưỡng 20-30%.

Đối với chỉ tiêu dinh dưỡng nitơ, nồng độ amoni (N-NH_4^+) ghi nhận mức giảm từ $19,14 \pm 1,06$ mg/L xuống còn $16,15 \pm 1,12$ mg/L, đạt hiệu suất 15,62%. Kết quả này tiệm cận với báo cáo của Gogate (2011) [16] về hiệu suất khử amoni từ 10-20% dưới tác động của siêu âm tần số thấp. Động học của quá trình suy giảm amoni trong môi trường siêu âm được kích hoạt bởi hai cơ chế đồng thời: (1) Quá trình oxy hóa gián tiếp ion (N-NH_4^+) bởi các gốc tự do $\text{OH}^\cdot$ sinh ra ở vùng biên của bọt khí cavitation; (2) Tại thời điểm bọt khí sụp đổ, nhiệt độ cục bộ cực đoạn (đạt đến 5.000 K) chuyển dịch cân bằng hóa học, biến đổi một lượng nhỏ amoni hòa tan thành khí amoniac (NH_3) tự do và giải phóng/thoát khí ra khỏi pha lỏng. Tuy nhiên, do thời gian phản ứng ngắn và nồng độ cặn lơ lửng cao bao bọc, hiệu suất chuyển hóa này bị giới hạn đáng kể.

Về phương diện vi sinh, mật độ tổng số *Coliform* giảm từ $(4,3 \pm 0,3) \times 10^6$ CFU/100 mL xuống còn $(4,9 \pm 0,3) \times 10^5$ CFU/100 mL, tương đương mức giảm hiệu suất đạt 88,60% (ứng với giá trị giảm 0,94 LOG). Mức chuyển đổi này tương thích với công bố của Doosti và cs (2012) [12] khi diệt *E. coli* đạt tỷ lệ 70-95% tại tần số 30-40 kHz. Tương tự, động học suy giảm tổng số vi khuẩn hiếu khí cũng ghi nhận mức giảm ấn tượng từ $(7,2 \pm 0,2) \times 10^5$ CFU/mL xuống còn $(1,1 \pm 0,2) \times 10^5$ CFU/mL, tương đương hiệu suất 84,72% (giảm 0,81 LOG). Tỷ lệ bất hoạt khuẩn hiếu khí này hoàn toàn tương đồng với kết quả nghiên cứu kinh điển của Joyce và cs (2003) [17] khi dùng siêu âm 20-40 kHz để giảm 80 - 90% tổng vi khuẩn nước thải, và Nguyễn Văn Phước (2016) [18] với mức giảm 75-85% sinh khối khuẩn ở tần số 28 kHz. Cơ chế tiêu diệt và bất hoạt tế bào khuẩn ở đây được giải thích dựa trên lý thuyết ứng suất cắt cơ học trực tiếp của Akhavan và cs (2014) [19]. Hiện tượng cavitation vật lý tạo ra các vi phản lực (microjets) và sóng xung kích (shockwaves) với áp lực cơ học cục bộ lên tới 1.000 atm khi nổ bọt khí. Động lực cơ học cực đại này tác động trực tiếp lên vách tế bào vi khuẩn, xé rách màng sinh chất và làm thất thoát tế bào chất ra ngoài. Song song đó, xung nhiệt độ cao tức thời cấu thành từ các điểm nóng (hotspots) kết hợp với các gốc oxy hóa mạnh ($\text{OH}^\cdot$) tấn công trực tiếp cấu trúc phân tử DNA và enzyme nội bào, làm mất khả năng tái bản của vi khuẩn.

Mặc dù hiệu suất phần trăm đạt mức tương đối cao (>84%), xét về bản chất khử trùng cuối xả thải, phương pháp này vẫn chưa đạt yêu cầu do mật độ *Coliform* sau xử lý ($4,9 \times 10^5$ CFU/100 mL)

vẫn vượt chuẩn QCVN 14:2025/BTNMT [5] (mức B là 5.000) tới gần 100 lần. Nguyên nhân sâu xa là do hàm lượng TSS còn tồn dư quá lớn (162,78 mg/L); các hạt cặn lơ lửng này vô tình đóng vai trò như các "lá chắn vật lý" bao bọc, bảo vệ một lượng lớn quần thể vi khuẩn khỏi sự tác động trực tiếp của sóng xung kích siêu âm. Do đó, sóng siêu âm chỉ phát huy tối đa hiệu quả diệt khuẩn nếu được đặt sau công đoạn lắng lọc cơ học triệt để, hoặc đóng vai trò như một bước tiền xử lý phá vỡ cấu trúc bông cặn sinh học.

4. KẾT LUẬN

Sóng siêu âm tần số thấp có khả năng cải thiện một phần tính chất nước thải sinh hoạt thối. Tần số 30 kHz cho hiệu quả biến đổi cấu trúc tốt hơn tần số 40 kHz. Về khía cạnh khử trùng cuối, phương pháp siêu âm đơn lẻ trên mẫu nước thải thô đạt hiệu suất rất kém (chỉ giảm tối đa 0,94 LOG đối với *Coliform*) và không thể giúp nước xả thải đạt quy chuẩn cập nhật QCVN 14:2025/BTNMT. Xét về khía cạnh tiền xử lý, siêu âm cho thấy tiềm năng công nghệ rất lớn khi giúp giảm 45% BOD_5 và phân rã mạnh mẽ cấu trúc các chất hữu cơ phức tạp trong nước thải.

Kiến nghị các nghiên cứu tiếp theo nên ứng dụng siêu âm như một bước trợ dòng đầu vào hoặc phải tiến hành lắng lọc triệt để TSS trước khi dùng siêu âm làm tác nhân khử trùng ở cuối dây chuyền

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J Henry C. Wallace, Hugo Destailats and Michael R. Hoffmann (2003). Chemical degradation methods for wastes and pollutants, MarcellDekker inc. Allrights Resevered, U.S.A.
- [2]. Ichiro Imai. Nobuharu Inaba. Keigo Yamamoto (2021). Harmful algal blooms and environmentally friendly control strategies in Japan. *Fisheries Science* 87(4), 437-464 <https://doi.org/10.1007/s12562-021-01524-7>.
- [3]. Sirje Sildever1, Noriko Nishi, Nobuharu Inaba, Taiga Asakura, Jun Kikuchi, Yasuhito Asano, Takanori Kobayashi, Takashi Gojobori, Satoshi Nagai (2022). Monitoring harmful microalgal species and their appearance in Tokyo Bay, Japan, using metabarcoding. *Metabarcoding and Metagenomics*, 6, 261-280.
- [4]. Seungjun Lee, Boseung Choi, Sung Jae Kim, Jinam Kim, Dayun Kang, Jiyoung Lee (2022). Relationship between freshwater harmful algal blooms and neurodegenerative disease incidence rates in South Korea, *Environ Health*, 21(1), 116-127.

- [5]. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về Nước thải sinh hoạt và nước thải đô thị, khu dân cư tập trung QCVN 14:2025/BTNMT.
- [6]. Nguyễn Văn Phước (2011). Giáo trình xử lý nước thải sinh hoạt và công nghiệp bằng phương pháp sinh học. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [7]. Trần Thị Mỹ Diệu (2017). Đánh giá chất lượng nước thải sinh hoạt tại một số khu dân cư miền Trung. *Tạp chí Môi trường*, 24(3), 32-38.
- [8]. Lê Hoàng Việt (2015). Khảo sát hàm lượng chất rắn lơ lửng trong nước thải sinh hoạt tại các đô thị Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 39, 120-128.
- [9]. Randall, Clifford; Barnard, James; Stensel, H. David; Dufresne, Laura (2010). Nutrient Control Design Manual. EPA/600/R-10/100. United states environmental protection agency, Cincinnati, Ohio.
- [10]. Ngô Thị Nga (2016). Đánh giá ô nhiễm vi sinh vật trong nước thải sinh hoạt tại một số quận nội thành Hà Nội. *Tạp chí Y học Dự phòng*, 26(6), 112118.
- [11]. Nguyễn Hữu Hiếu (2018). Khảo sát chỉ tiêu vi sinh trong nước thải sinh hoạt khu vực đô thị thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khoa học - Trường Đại học Mở thành phố Hồ Chí Minh*, 13(2), 90-97.
- [12]. M. R. Doosti, R. Kargar, M. H. Sayadi (2012). Water treatment using ultrasonic assistance. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental.
- [13]. Nguyễn Thị Hương (2018). Nghiên cứu ứng dụng sóng siêu âm trong xử lý nước thải sinh hoạt. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 60(4), 45-51.
- [14]. Mason, T. J. & Lorimer, J. P (2002). Applied sonochemistry: The uses of power ultrasound in chemistry and processing. Wiley-VCH.
- [15]. Trần Minh Tuấn (2021). Đánh giá hiệu quả của siêu âm tần số thấp (25-40 kHz) trong xử lý TSS nước thải sinh hoạt. *Khoa học Tài nguyên và Môi trường*, 3(59), 21-28.
- [16]. Gogate, P. R (2011). Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Current Science*, 100(5), 761-768.
- [17]. Joyce, E. Mason, T. J. Phull, S. S. & Lorimer, J. P (2003). The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions: a study of frequency, power and sonication time. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(6), 315-318.
- [18]. Nguyễn Văn Phước (2016). Ứng dụng công nghệ siêu âm trong xử lý vi sinh vật trong nước thải đô thị. *Tạp chí Công nghệ Môi trường*, 17(2), 30-36.
- [19]. Akhavan, A., Moussavi, G., & Giannakis S (2014). Ultrasonic disinfection of water and wastewater: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(4), 1637-1647.

TESTING THE DISINFECTION EFFICIENCY OF DOMESTIC WASTEWATER BY ULTRASONIC WAVES

Hoang Duc An¹, Huynh Thi Minh Thanh¹, Vo Thi Hong Phuong¹

¹Faculty of Natural Sciences, Quy Nhon University

Abstract

This study investigates the disinfection efficiency of ultrasound irradiation on domestic wastewater collected from a separate drainage system in Quy Nhon Nam ward, Gia Lai province. Ultrasound waves at frequencies of 30 kHz and 40 kHz were tested with irradiation times ranging from 1 to 12 minutes and power densities from 50 to 200 W/L. Microbiological parameters, including total aerobic microorganisms and total *Coliforms*, were determined before and after treatment. The results show that microbial density significantly decreased after irradiation, with disinfection efficiency increasing proportionally with ultrasound time and power. At a frequency of 30 kHz, the microbial removal efficiency increased from 0.13 LOG (equivalent to a 26.16% reduction) at 1 minute to 0.37 LOG (57.56% reduction) at 12 minutes. A similar trend was also recorded at 40 kHz, with reductions ranging from 0.09 LOG (19.19%) to 0.31 LOG (51.16%). When the power density was increased to 200 W/L at 30 kHz, the microbial inactivation efficiency reached a maximum of 0.78 LOG (83.37% reduction). The study demonstrates that high-power ultrasound is a potential solution targeted for the pre-treatment stage or combined as a final disinfection step for domestic wastewater.

Keywords: *Ultrasound, cavitations, wastewater, disinfection, coliforms.*

Ngày nhận bài: 20/4/2026

Ngày chuyển phản biện: 11/5/2026

Ngày thông qua phản biện: 24/6/2026

Ngày duyệt đăng: 30/7/2026