



Tác giả: Nghiên cứu sinh Tiến sĩ
Trần Phương Thảo

Đơn vị công tác: Đại học Công nghệ
Nagaoka, Nhật Bản

Email: s175005@stm.nagaokaut.ac.jp;
pthao222@gmail.com

Chị Trần Phương Thảo hiện đang làm nghiên cứu sinh Tiến sĩ năm thứ 3 chương trình Doctoral Program for World-leading Innovative & Smart Education nằm trong Dự án Top Global University, tại trường Đại học Công nghệ Nagaoka (Nagaoka University of Technology), phòng thí nghiệm Môi trường đất và nước (Aqua & Soil Environmental Laboratory) của giáo sư Yamaguchi Takashi. Chị Thảo dành được JSPS fellowship và hiện đang làm sinh viên nghiên cứu tại Viện Nghiên cứu môi trường Quốc gia (National Institute for Environment Studies, Tsukuba) với giáo sư Syutsubo Kazuaki về hệ thống DHS xử lý nước thải sinh hoạt. Trước đó, chị cũng đã có kinh nghiệm vận hành hệ thống DHS dạng hiếu khí xử lý nước thải sản xuất cao su trong dự án "Tạo lập hệ chu trình vòng khí thải cacbon với cao su thiên nhiên" 2011 – 2016 ("Establishment of Carbon-Cycle-System with Natural Rubber - ESCANBER") và hệ thống DHS dạng kỵ khí kết hợp xử lý ô nhiễm nitơ và giảm phát thải metan. Nhóm nghiên cứu của giáo sư Yamaguchi và giáo sư Syutsubo đã phát triển và triển khai nhiều dự án về hệ thống DHS trong xử lý nước thải ở Nhật Bản, Việt Nam, Thái Lan, Indonesia, Ấn Độ, và Ai Cập.

<https://doi.org/10.15625/yap.2021.0019>

Tiềm năng của công nghệ chảy xuôi dòng với giá thể bọt biển (Down-flow Hanging Sponge - DHS) trong xử lý nước thải

Trần Phương Thảo

Nghiên cứu sinh Tiến sĩ, Đại học Công nghệ Nagaoka, Niigata, Nhật Bản

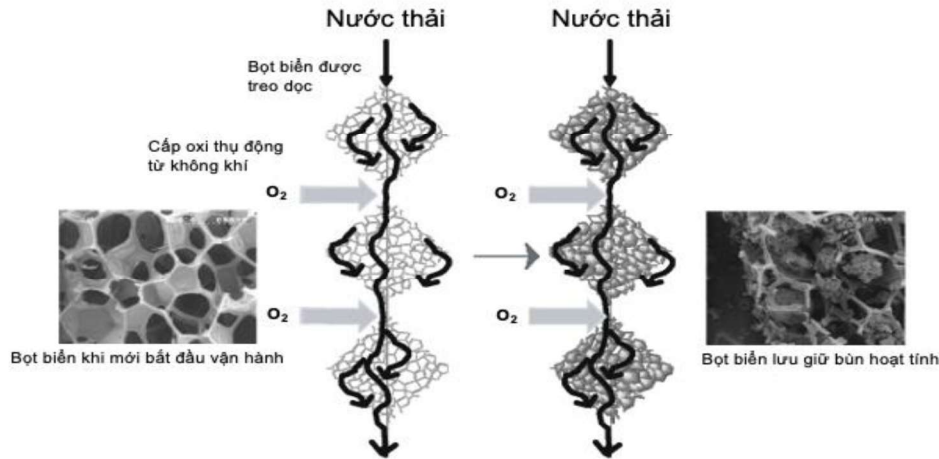
TÓM TẮT:

Công nghệ chảy xuôi dòng với giá thể bọt biển (Down-flow Hanging Sponge - DHS) đã được phát triển và nghiên cứu ứng dụng để xử lý nước thải trong hơn hai thập kỷ gần đây. Với nguyên lý hoạt động dựa vào việc cấp thụ động oxy trong không khí vào nước thải chảy nhỏ giọt từ trên cao xuống, hệ thống DHS đã khắc phục được các nhược điểm của hệ thống hiếu khí thông thường, như tiêu tốn điện năng cho bơm sục khí, lắp đặt hệ thống đường ống khí phức tạp, và cần diện tích xây dựng lớn. Cấu tạo của DHS tương tự công nghệ lọc nhỏ giọt sinh học nhưng vật liệu là các miếng bọt biển polyurethane có khả năng lưu giữ vi sinh vật trên và trong vật liệu, giúp tăng hiệu quả xử lý ô nhiễm, đồng thời cũng giảm đáng kể lượng bùn dư sinh ra. Bài viết này giới thiệu về công nghệ DHS với các biến thể của hệ thống (với tên gọi từ G1 tới G6) và ứng dụng của chúng trong xử lý nước thải. Ngoài ra, ưu điểm của DHS so với các hệ thống xử lý nâng cao khác và một số lưu ý trong xây dựng và vận hành hệ thống cũng được chia sẻ và thảo luận.

Từ khóa: công nghệ chảy xuôi dòng với giá thể bọt biển, down-flow hanging sponge, xử lý nước thải, công nghệ sinh học

1. Giới thiệu hệ thống DHS

Trước hiện trạng xả thải không ngừng từ các hoạt động sinh hoạt và sản xuất của con người, nhu cầu về công nghệ xử lý nước thải giá thành thấp, xây dựng và bảo trì đơn giản luôn được chú trọng, đặc biệt là ở các nước đang phát triển. Các khu vực đã có công trình hạ tầng kỹ thuật ổn định và đông dân cư, việc nâng cấp, lắp đặt thêm các hệ thống đường ống mới nhằm thu gom nước thải để xử lý tập trung là vô cùng khó khăn. Ngoài ra, hệ thống xử lý tập trung cũng không thể vận hành tối ưu ở các khu vực có mật độ dân cư thấp do chi phí lắp đặt và vận hành bình quân đầu người cao. Với các khu vực này, việc xử lý nước thải tại nguồn, sử dụng các công nghệ xử lý nước thải phi tập trung (Decentralised Wastewater Treatment Systems - DEWATS) trước khi xả vào hệ thống chung là phương án tối ưu hơn hẳn. Hệ thống xử lý nước thải phi tập trung tại Việt Nam cần đáp ứng được các yêu cầu trong Thông tư số 04/2015/TT-BXD do Bộ Xây dựng ban hành, cơ bản cần có các đặc điểm sau: (i) chịu được biến động của dòng vào thay đổi theo thói quen sinh hoạt với khu dân cư hoặc theo chu kỳ sản xuất, (ii) nguyên vật liệu sản xuất rẻ tiền sẵn có tại địa phương, (iii) không yêu cầu bảo trì phức tạp, chi phí cao. Hơn nữa, nhu cầu nước sạch ngày càng cao trên toàn cầu do gia tăng dân số, nhưng nguồn nước sạch tự nhiên lại ngày càng trở nên hạn chế do ảnh hưởng của đô thị hoá gia tăng và biến đổi khí hậu, nên việc tái sử dụng trực tiếp hoặc gián tiếp nước thải đủ chất lượng đáp ứng được các quy định về an toàn cho sức khỏe con người cũng là một chiến lược phát triển bền vững được quan tâm hiện nay tại nhiều nước trên thế giới.



Hình 1. Ý tưởng ban đầu của hệ thống DHS (dựa theo Uemura và Harada, 2010 [1])

Bài viết này sẽ giới thiệu về công nghệ chảy xuôi dòng với giá thể bọt biển (Down-flow Hanging Sponge - DHS) được phát triển bởi nhóm nghiên cứu của giáo sư Hideki Harada tại Đại học công nghệ Nagaoka (Nagaoka University of Technology) từ năm 1995, hiện nay giáo sư đang giảng dạy ở Đại học Tohoku, Nhật Bản. Công nghệ DHS đạt được ba yêu cầu cần có của công nghệ xử lý nước thải phi tập chung như đã đề cập ở trên. Hơn nữa công nghệ này cũng có nhiều ưu điểm vượt trội hơn so với các hệ thống xử lý nâng cao thông thường (được thảo luận cụ thể ở phần dưới). Công nghệ này đã bước đầu được ứng dụng trong xử lý nước thải sinh hoạt và nước thải nông nghiệp-công nghiệp-nuôi thủy hải sản tại nhiều nước như Thái Lan, Ấn Độ, Ai Cập và Việt Nam.

1.1. Nguyên lý vận hành và đặc điểm tiêu biểu

Công nghệ DHS được đặt tên dựa theo cách vận hành hệ thống: nước thải cấp vào từ trên cao và theo trọng lực chảy xuống (“down-flow”) tương tự công nghệ lọc sinh học nhỏ giọt (trickling filter), tuy nhiên DHS sử dụng vật liệu là các miếng bọt biển (“sponge”) bằng polyurethane – vật liệu rẻ, không bị phân hủy sinh học, và ổn định về mặt cơ học. Kết cấu ban đầu của hệ thống DHS là các miếng bọt biển hình khối vuông treo thành dải dọc nên được gọi là “hanging” sponge. Ý tưởng ban đầu của hệ thống DHS được miêu tả trong **Hình 1**.

Điểm đặc biệt của hệ thống này trong khi thiết kế cần đảm bảo khoảng cách giữa các miếng bọt biển nhằm tăng độ tiếp xúc giữa nước thải với không khí, chất ô nhiễm trong nước thải được loại bỏ bằng phương pháp sinh học hiếu khí mà không cần hệ thống sục khí phức tạp, do đó chi phí lắp đặt – vận hành không cao như bể aerotank bùn hoạt tính (Activated Sludge Process – ASP). Với độ rỗng chiếm tới hơn 90%, các miếng bọt biển có khả năng lưu giữ bùn hoạt tính cả bên trong và trên bề mặt vật liệu giúp cho hai quá trình hiếu khí và yếm khí có thể diễn ra lần lượt trên bề mặt

vật liệu nơi có diện tích tiếp xúc không khí lớn và bên trong vật liệu khi oxy bị hạn chế. Mật độ bùn trên miếng bọt biển của DHS cao giúp đẩy nhanh quá trình phân hủy sinh học, rút ngắn thời gian lưu của nước thải. Dù thời gian lưu của nước thải được rút ngắn nhưng nhờ cấu trúc rỗng của miếng bọt biển nên lưu giữ được bùn với thời gian rất dài, hơn 5 – 10 lần so với hệ thống bùn hoạt tính khác. Trong điều kiện đó, các chất dinh dưỡng trong nước thải và oxy được vi sinh vật sử dụng để duy trì chuyển hoá nội bào, thay vì tăng trưởng sinh khối, vì vậy lượng bùn dư sinh ra trong quá trình vận hành DHS qua thực nghiệm cho thấy rằng rất ít so với các hệ thống xử lý nước thải khác [2]. Ngoài ra, quá trình xử lý chính của DHS phụ thuộc vào thời gian và khả năng tiếp xúc giữa không khí và nước thải dọc theo dòng chảy từ trên cao xuống nên hệ thống thường được lắp đặt với chiều cao 2 – 4 m, mà không yêu cầu diện tích lớn như với hệ thống ASP. Quá trình lắp đặt và khởi động hệ thống cũng khá đơn giản và chỉ cần 4 – 6 tuần để hệ thống vận hành ổn định. Với nguyên lý vận hành đơn giản, hiệu suất cao, tiết kiệm về điện năng, chi phí lắp đặt – bảo trì, và diện tích xây dựng, hệ thống DHS là một phương án tiềm năng thay thế các hệ thống xử lý nâng cao thông thường.

1.2. Các biến thể của DHS

Từ 1995 tới nay, nhóm nghiên cứu của chúng tôi đã phát triển sáu biến thể của DHS được đặt tên lần lượt từ G1 tới G6. Hình dạng của vật liệu chính – miếng bọt biển (polyurethane sponge) và cách bố trí sắp xếp chúng trong hệ thống xử lý thực tế từ quy mô phòng thí nghiệm tới quy mô công nghiệp đã được cải tiến để khắc phục các nhược điểm trong khi thực tiễn vận hành hệ thống, đồng thời vẫn đảm bảo tính kinh tế trong thiết kế.

Thế hệ DHS đầu tiên (G1) sử dụng các khối bọt biển polyurethane hình lập phương có kích thước 1.5×1.5×1.5 cm được nối với nhau bằng sợi nylon

thành dải dọc [3]. Tuy nhiên kết cấu này khó có thể nâng cấp quy mô lớn do kết nối bằng dây nylon làm thủ công và các khối bọt biển nhỏ kém bền về cơ học, việc phân bố nước thải đều trong cả hệ thống lớn cũng khó hơn so với ở quy mô phòng thí nghiệm.

Thế hệ DHS thứ hai (G2) được thay đổi về hình dáng và cách nối các miếng bọt biển để tăng độ bền cơ học, chịu được công suất xử lý cao hơn so với G1 và dễ dàng sản xuất được với quy mô lớn. Các khối bọt biển G2 có hình lăng trụ tam giác vuông cân có chiều dài là 75 cm và cạnh tam giác là 3 cm, được dính song song trên hai mặt của tấm plastic phẳng có chiều cao 2 m [4]. Tuy nhiên, DHS-G2 vẫn chưa cải thiện được việc phân bố nước thải đồng đều ở cả hệ thống và sinh khối bám trên tấm bọt biển G2 dễ bị rửa trôi hơn.

Thế hệ DHS thứ ba (G3) không nối các miếng bọt biển dọc theo khung như G1 và G2, mà có thiết kế linh hoạt hơn, tương tự bể lọc sinh học thông thường nhưng thay các vật liệu rắn như sỏi, đá, gôm, v.v., bằng các cục bọt biển được bao bởi lưới nhựa polypropylene hình trụ có đường kính 2.7 cm và cao 2.7 cm để định hình, tránh dòn nát vật liệu khi vật liệu ngập nước. Khả năng lưu giữ sinh khối và bền cơ học, cũng như phân bố nước thải đều được cải thiện ở thế hệ G3, hơn nữa cấu thành bởi các miếng bọt biển đơn lẻ nên DHS-G3 dễ dàng mở rộng quy mô hơn. Nhưng điểm hạn chế của hệ thống G3 là khả năng đảm bảo không khí tiếp xúc được với nước thải để xử lý kém hơn G1 và G2 do các khối bọt biển sắp xếp ngẫu nhiên trong bể.

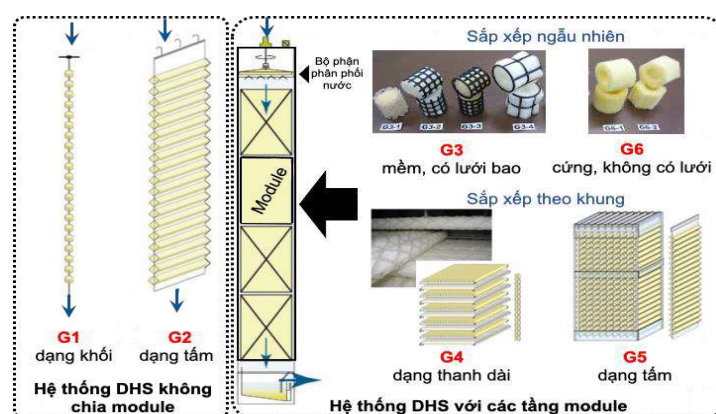
Thế hệ DHS thứ tư (G4) tiếp tục được cải tiến từ G3 nhằm tăng khả năng thông khí và hạn chế tắc hệ thống do bùn tích tụ. Tương tự G3, thanh bọt biển được bọc trong lưới nhựa polypropylene hình trụ có đường kính 2.5 cm nhưng chiều dài 50 cm. Các thanh bọt biển được xếp song song trên một tầng, và các tầng được trồng lên nhau cách 0.7 – 1.0 cm để thông khí, và xoay 90° để phân bố đều nước thải [5]. Thực tế vận hành cho thấy nhược điểm của DHS-G4 là cấu trúc các

thanh bọt biển bị biến dạng trong bể xử lý do sức nặng của bùn, cũng như các chất rắn tích tụ trên bề mặt và trong các thanh bọt biển.

Thế hệ DHS thứ năm (G5) được cải tiến từ G2 để ứng dụng vào quy mô xử lý lớn hơn. Cấu trúc của tấm G5 cũng được thay đổi đơn giản hơn bằng cách dán nguyên tấm bọt biển có bề mặt gấp khúc, thay vì dán từng thanh bọt biển hình lăng trụ tam giác lên tấm plastic. Các tấm G5 được treo song song trong khung và cách nhau khoảng 4 cm thành một module. Một hệ thống hoàn chỉnh sẽ gồm nhiều module xếp chồng lên nhau. Cách bố trí và cấu tạo miếng bọt biển này giúp tăng thể tích bọt biển trong hệ thống lên 55 – 57% từ 36 – 38% ở G2, nhờ đó không chiếm nhiều thể tích, hệ thống xử lý sẽ nhỏ gọn hơn [6]. Vấn đề của hệ thống này là giá treo tấm bọt biển sẽ bị uốn cong hoặc các tấm plastic kém bền bị rách khỏi giá treo sau vài tháng vận hành do nước thấm vào miếng bọt biển sẽ làm tăng khối lượng tấm bọt biển lên đáng kể.

Thế hệ DHS thứ sáu (G6) được phát triển đồng thời với G5, là thế hệ mới nhất được cải tiến từ G3, vẫn theo nguyên lý bể lọc sinh học với vật liệu xếp ngẫu nhiên, nhưng vật liệu G6 là các miếng bọt biển polyurethane cứng hơn nhờ xử lý với nhựa epoxy resin, thay vì các miếng polyurethane mềm nhét trong khung nhựa cứng như G3 [7]. Thay đổi về cấu trúc này làm đơn giản hoá hệ thống, vật liệu được chế tạo đơn giản hơn chỉ với một thành phần, thay vì phải lắp ráp thủ công hai thành phần (miếng bọt biển và vỏ khung nhựa). Tuy nhiên, việc sử dụng epoxy resin làm giảm thể tích rỗng của vật liệu từ hơn 95% ở miếng bọt biển mềm thông thường, còn 70%.

Trên đây là phân loại các biến thể dựa theo lịch sử phát triển của công nghệ DHS. Ngoài ra, công nghệ DHS có thể phân loại dựa vào cách bố trí các miếng bọt biển thành hai loại: DHS không chia module kiểu treo - G1 và G2; DHS với các tầng module: sắp xếp theo khung - G4 và G5, sắp xếp ngẫu nhiên - G3 và G6 (Hình 2).



Hình 2. Các biến thể của hệ thống DHS (dựa theo Onodera và Syutsubo, 2015 [8])

2. Ứng dụng của công nghệ DHS

2.1. Xử lý nước thải sinh hoạt

Tới nay, nghiên cứu về ứng dụng của hệ thống DHS trong xử lý nước thải sinh hoạt là toàn diện nhất. Nhiều hệ thống từ quy mô phòng thí nghiệm [10] tới quy mô lớn [2, 4, 7, 9, 11] đã được xây dựng và đánh giá khả năng xử lý nước thải thực tế tại Nhật Bản [2, 7], Ấn Độ [4, 9], Indonesia [10], và Thái Lan [11] như được miêu tả trong **Bảng 1**.

Trong các nghiên cứu quy mô phòng thí nghiệm với nước thải nhân tạo, nhằm đẩy nhanh quá trình thích nghi đi vào vận hành ổn định của hệ thống, bùn hoạt tính có thể được cấy vào hệ thống bằng cách bóp các miếng bọt biển trong bùn hoạt tính, bùn sẽ được hấp phụ vào các lỗ rỗng của vật liệu [12]. Với các nghiên cứu quy mô lớn hơn, sử dụng lượng lớn các miếng bọt biển, không cần cấy bùn vào bể DHS thủ công như trên, mà có thể trực tiếp sử dụng sinh khối có sẵn trong nước thải để cung cấp nguồn vi sinh cho hệ thống [2, 4, 7, 9]. Hệ thống DHS có thể vận hành liên tục mà không phải xử lý bùn dư sinh ra trong quá trình vận hành như với các hệ thống bùn hoạt tính khác.

Với thời gian lưu nước ngắn (chỉ vài giờ), hệ thống DHS vẫn loại bỏ trên 80% lượng ô nhiễm hữu cơ COD, BOD nhờ quá trình phân huỷ hiếu khí, loại trên 20% ô nhiễm nitơ hữu cơ, amoni nhờ quá trình nitrat hóa, và trên 50% các chất rắn lơ lửng (SS) được giữ lại ở các tầng bọt biển (**Bảng 1**).

Nghiên cứu của Danshita và cộng sự (2020) đã chứng minh hệ thống DHS có thể áp dụng xử lý trực tiếp nước thải sinh hoạt phi tập trung tại khu vực Đông Nam Á nhờ hiệu quả xử lý của quy mô pilot khá ổn định kể cả khi lưu lượng nước thải thay đổi vào các khoảng thời gian khác nhau trong ngày [11]. Cụ thể, trong giờ cao điểm (khoảng 6-9 giờ sáng và 6-9 giờ tối) lưu lượng dòng tăng gấp hơn hai lần so với các thời điểm còn lại, dẫn tới thời gian lưu nước trong giờ cao điểm ngắn chỉ có 3h, trong khi bình thường là khoảng 7h. Khả năng thông khí tốt (nồng độ oxy hoà tan ở dòng ra trên 4 mg/L), nồng độ bùn bám trên miếng bọt biển khá cao (15-20 gVSS/L bọt biển) trong suốt 250 ngày lưu lượng nước thải thay đổi, và khả năng lưu nước thực tế trong hệ thống tương đương nhau giữa giai đoạn lưu lượng ổn định và giai đoạn lưu lượng biến động là ba yếu tố chính giúp hệ thống DHS luôn có dòng ra có chất lượng BOD và SS đạt tiêu chuẩn xả thải [11]. Ngoài ra, khi lưu lượng nước thay đổi theo chu kì, một phần bùn ở các tầng module trên bị rửa trôi xuống module dưới, khiến bùn phân bố đều ở các tầng module trong cả hệ thống thay vì tập trung ở tầng module trên như trong giai đoạn vận hành với lưu lượng ổn định. Sinh khối khi bị rửa trôi xuống các tầng module thấp này được sử dụng làm nguồn cacbon hữu cơ cho quá trình phản nitrat hoá (endogenous denitrification), nhờ đó nitơ được loại bỏ trong hệ thống tốt hơn [11].

2.2. Xử lý nước thải khác

Ngoài nước thải sinh hoạt, hệ thống DHS cũng được nghiên cứu để áp dụng với các loại nước thải khác như nước mương trong nông nghiệp [13], nước thải trong sản xuất cao su [14], nước rỉ rác [15], nước thải dệt nhuộm [16] và tuần hoàn nước trong nuôi thủy hải sản [17, 18]. Do đặc tính của các loại nước thải này khá phức tạp và thay đổi tại các địa điểm nên các nghiên cứu áp dụng DHS hiện vẫn còn đang ở quy mô pilot tại các nhà máy hoặc các trung tâm nghiên cứu, chứ chưa được ứng dụng trên quy mô lớn như với nước thải sinh hoạt. Hệ thống DHS thường được sử dụng với vai trò xử lý hiếu khí nhằm nâng cao chất lượng nước (về nồng độ nitơ, chất rắn lơ lửng, kim loại nặng, v.v.) ở khâu xử lý nâng cao, sau xử lý yếm khí. Nước thải sau xử lý yếm khí cũng đã loại bỏ được phần lớn ô nhiễm hữu cơ, tỉ lệ C/N thấp là điều kiện tối ưu giúp cho vi khuẩn nitrat hóa trong hệ thống DHS phát triển, tránh cạnh tranh về oxy và vùng phân bố với vi khuẩn dị dưỡng sinh trưởng nhanh. Qua quá trình nghiên cứu thực nghiệm, hệ thống DHS sử dụng vật liệu dạng G3 với các cục bọt biển hình trụ nhỏ sắp xếp ngẫu nhiên cho tới nay là phổ biến nhất do tính linh hoạt trong thiết kế, tuổi thọ sử dụng cao, và vật liệu cấu tạo sẵn có và dễ sản xuất. **Bảng 2** tóm tắt một số hệ thống có kết hợp DHS trong xử lý nước thải khác.

3. Ưu điểm và thách thức trong vận hành và lắp đặt

3.1. Ưu điểm của hệ thống DHS

Hệ thống DHS được phát triển nhằm thay thế các phương pháp xử lý hiếu khí sẵn có như hồ điều hoà, bể aerotank bùn hoạt tính, lọc sinh học thông thường. Trong hơn hai thập kỉ nghiên cứu, hệ thống DHS đã chứng minh được tiềm năng trong xử lý nước thải nhờ các ưu điểm trong lắp đặt (cấu trúc đơn giản, vật liệu sẵn có rẻ bền, tiết kiệm diện tích, có thể cải tạo ngay trên các hệ thống sẵn có) và vận hành-bảo trì (không yêu cầu kĩ thuật cao, thời gian lưu nước ngắn, rất ít bùn dư, chịu được tải trọng thay đổi, tiết kiệm điện năng). Quá trình xử lý bằng bùn hoạt tính truyền thống tiêu thụ năng lượng chính vào bơm để sục khí và bơm để tuần hoàn bùn hoạt tính bị rửa trôi ở bể lắng quay lại vào bể sục. Tuy nhiên với DHS, do không sử dụng bơm sục khí và lượng bùn sinh ra cũng rất ít (DHS sinh ra 0.09 gSS bùn/g COD_{loại bỏ}, trong khi các công nghệ khác sinh ra 0.15-0.88 gSS bùn/g COD_{loại bỏ}) và thường tự phân huỷ trong hệ thống [2], nên chi phí chính là chi phí vật liệu, cụ thể là các miếng bọt biển. Như đã nêu ở các nghiên cứu trên, hiện nay hệ thống DHS sử dụng miếng bọt biển G3 hình trụ, sắp xếp ngẫu nhiên là phổ biến hơn cả. Dựa trên nguyên lý và các đặc tính cơ bản của DHS-G3, các nhóm nghiên cứu trên thế giới cũng có những biến thể về hình dáng miếng bọt biển phù hợp với điều kiện sản xuất của mình. Miếng bọt biển làm từ vật liệu polyurethane xốp, mềm, độ rỗng cao, bao ngoài bằng lưới polypropylene hình trụ có thể có kích thước dài 3.3cm × đường kính 3.3 cm [11], dài 3 cm × đường kính 2.8 cm [15], hay 5 cm × đường kính 3.5 cm [19].

Bảng 1. Nghiên cứu áp dụng DHS trong xử lý nước thải sinh hoạt

Cấu tạo hệ thống	Điều kiện vận hành, công suất xử lý (Q), đặc tính nước thải	Thời gian lưu nước (tính dựa vào thể tích bọt biển)	Bùn trong DHS	Năng suất loại hữu cơ	Năng suất loại nitơ	Năng suất loại chất rắn	Năng suất loại bỏ coliform	Nguồn tham khảo
DHS cao 4m, gồm 10 module G3 (dạng hình trụ dài 33mm, đường kính 33mm), $V_{\text{bọt biển}} = 454\text{L}$ (53% V_{DHS})	T = 10-28°C, 850 ngày, Q ~ 3.4 m ³ /ngày ^b , BOD _{inf} = 53±23mg/L, COD _{inf} = 113±36mg/L, TKN _{inf} = 30±4mg/L, NH ₄ -N _{inf} = 27±3mg/L, SS _{inf} = 33±21mg/L	3-2 giờ	Tốc độ sinh bùn: 0.09 gSS/gCOD _{loại bỏ} , nồng độ bùn: 26.9 gVSS/L bọt biển, SRT > 135 ngày	BOD _{eff} = 7±4mg/L (loại 96% ^a), COD _{eff} = 36±22mg/L (loại 88% ^a)	TKN _{eff} = 3±3 mg/L (loại 91% ^a)	SS _{eff} = 12±12 mg/L (loại 88% ^a)	-	[2]
DHS gồm 4 module (mỗi module cao 76.5cm, đường kính 24cm, cách nhau 15cm) chứa G6 (dạng hình trụ có lỗ ở giữa dài 30mm, đường kính ngoài 42mm, đường kính lỗ trong 22mm), $V_{\text{bọt biển}} = 46\text{L}$ (33.8% V_{DHS})	T = 12.2-27.1°C, 730 ngày, Q ~ 0.55 m ³ /ngày ^b , BOD _{inf} = 93±39mg/L, COD _{inf} = 169±80mg/L, TKN _{inf} = 34±6mg/L, NH ₄ -N _{inf} = 24.6±6.4mg/L, SS _{inf} = 44±38mg/L; Tổng coliform _{inf} = 7.27×10 ⁶ MPN/100 mL	2 giờ	Tốc độ sinh bùn: 0.08 gSS/gCOD _{loại bỏ} , nồng độ bùn: 12-19 gVSS/L bọt biển, SRT = 47 ngày	BOD _{eff} = 12±7mg/L (loại 87±6%), COD _{eff} = 48±19mg/L (loại 68±17%)	TN loại 28±20%, TKN _{eff} = 34±6mg/L (loại 82±13%)	SS _{eff} = 17±9 mg/L (loại 51±33%)	Tổng coliform = 2.21×10 ⁴ MPN/100 mL, Tổng coliform giảm 10 ²⁻⁵	[7]
DHS cao 5.3m, đường kính 5.5m, gồm 2 module treo G2 (dài 2m), $V_{\text{bọt biển}} = 31.1\text{m}^3$ (24.7% V_{DHS})	T = 15-32 °C ^b , 1800 ngày, Q = 500m ³ /ngày BOD _{inf} = 56±19mg/L, COD _{inf} = 177±44mg/L, TN _{inf} = 26±8mg/L, NH ₄ -N _{inf} = 26±8mg/L, SS _{inf} = 53±20mg/L	1.5 giờ	Tốc độ sinh bùn: 0.12 gTSS/gBOD _{loại bỏ} , nồng độ bùn: 23-46gVSS/L bọt biển, SRT = 69 ngày	BOD _{eff} = 6±4mg/L (loại 95%), COD _{eff} = 37±18mg/L (loại 91%)	TN _{eff} = 11±4mg/L (loại 65%), NH ₄ -N _{eff} = 6±5mg/L (loại 79%)	SS _{eff} = 19±8 mg/L (loại 90%)	Fecal coli giảm 10 ^{1.9}	[4]

Cấu tạo hệ thống	Điều kiện vận hành, công suất xử lý (Q), đặc tính nước thải	Thời gian lưu nước (tính dựa vào thể tích bọt biển)	Bùn trong DHS	Năng suất loại hữu cơ	Năng suất loại nito	Năng suất loại chất rắn	Năng suất loại bỏ coliform	Nguồn tham khảo
DHS cao 5.3m, đường kính 5.5m, gồm 4 module G3, $V_{\text{bọt biển}} = 27.7\text{m}^3$ (22.3% V_{DHS})	T = 20.3±2 °C, 365 ngày, Q = 1000m ³ /ngày, BOD _{inf} =62±20mg/L, COD _{inf} =168±34mg/L, TN _{inf} =34±11mg/L, NH ₄ -N _{inf} =26±6mg/L, SS _{inf} =51±15mg/L, Fecal coliform _{inf} = 6.3×10 ⁶ MPN/100 mL	0.66 giờ	Nồng độ bùn: ~20gVSS/Lbọt biển ^b	BOD _{eff} = 14±9mg/L (loại 90±7%), COD _{eff} = 52±20mg/L (loại 86±7%)	TN _{eff} = 34±7mg/L (loại 23±13%), NH ₄ -N _{eff} = 19±8mg/L (loại 28±19%)	SS _{eff} = 20±9mg/L (loại 90±7%)	Fecal coliform eff = 8.1×10 ⁵ M PN/100 mL, Fecal coliform giảm 10 ^{0.9}	[9]
DHS cao 1m dạng G1 (20 khối lập phương 2cm/chiều) treo trong 1 ống kín	T = 26.7-30.3°C, 90 ngày với nước thải thực tế, Q = 0.48L/ngày, COD _{inf} =224±97mg/L, NH ₄ -N _{inf} = 26±8mg/L,	8 giờ		COD _{eff} = 15±7mg/L (loại 91±6%)	NH ₄ -N _{eff} = 0.7±0.5mg/L (loại 97±3%)			[10]
DHS cao 4.1m, gồm 4 module G3, $V_{\text{bọt biển}} = 350\text{L}$ (40% V_{DHS})	T = 25-30°C, 596 ngày, Q ~ 1.68 m ³ /ngày ^b BOD _{inf} =105±23mg/L, COD _{inf} =285±71mg/L, TN _{inf} =50±10mg/L, NH ₄ -N _{inf} =37±6mg/L, SS _{inf} =83±37mg/L, E.coli _{inf} =2.6×10 ⁵ CFU/mL	5 giờ	Nồng độ bùn: 10-20 gVSS/Lbọt biển	BOD _{eff} = 4±1.2mg/L (loại 95±2%), COD _{eff} = 31±11mg/L (loại 89±7%)	TN _{eff} = 32±12mg/L (loại 41±24%), NH ₄ -N _{eff} = 3.2±3mg/L (loại 90±5%)	SS _{eff} = 5.8±5.8 mg/L (loại 91±8%)	E.coli _{eff} = 6.2×10 ² , E.coli giảm 10 ^{2.5}	[11]

inf Dòng nước thải vào hệ thống DHS

eff Dòng nước thải ra khỏi hệ thống DHS

^a Kubota K và cộng sự, 2014

^b Ước tính từ số liệu trong bài

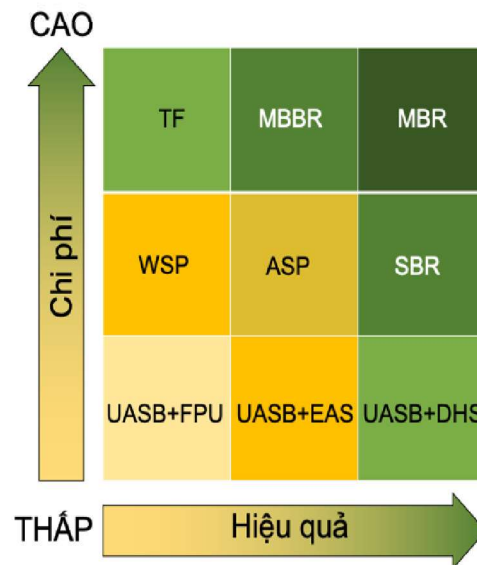
- Không đề cập trong nghiên cứu

Bảng 2. Nghiên cứu áp dụng DHS trong xử lý nước thải khác

Cấu tạo hệ thống	Điều kiện vận hành, công suất xử lý (Q), đặc tính nước thải	Nguồn thải	Thời gian lưu nước	Năng suất loại hữu cơ (COD, BOD)	Năng suất loại nitơ (nitơ tổng- TN, nitơ hữu cơ Kjeldahl- TKN, NO ₃ -N, NO ₂ -N)	Năng suất loại chất rắn lơ lửng (SS)	Ô nhiễm khác	Ngưỡng gây hại	Nguồn tham khảo
DHS đường kính trong 0.15m, cao 1.8m, gồm 3 module G3 (dạng hình trụ dài 55mm, đường kính 20mm) và có cửa thông khí giữa các module, V _{bọt biến} =16% V _{DHS}	T=25°C, 227 ngày, Q = 48L/ngày, COD _{inf} =203.5±123 mg/L, BOD _{inf} =162.1±45.1 mg/L, SS _{inf} =156.6±87.4 mg/L, TKN _{inf} =26.2±8.5 mg/L, NH ₄ -N _{inf} =18.5±7.7 mg/L, TP _{inf} =3.1±1.1mg/L	Nước ở lưu vực sông Nile gần vùng nông nghiệp	2.63 giờ	COD _{eff} = 55.5±40.5 mg/L (loại 72±18%), BOD _{eff} = 22±11.9mg g/L (loại 86.7±4.3%)	TKN _{eff} = 8.7±5.3 mg/L (loại 67.2±12%), NH ₄ -N _{eff} = 3±5mg/L (loại 84.7±11.7%)	SS _{eff} = 14.9±13 mg/L (loại 90.4±2.1%)	TP _{eff} = 1.9±1.3 mg/L (loại 35.6±19.7%)	OLR > 2 kgCOD/ m ³ /ngày	[13]
Hệ thống pilot bê yếm khí có cách ngăn ABR (76.5m ³) - bể chứa trung gian (5m ³) - bể UASB (3m ³) - bể lắng (1m ³) - DHS-G3 (V _{DHS} = 2m ³ , V _{bọt biến} = 0.84m ³ , 16% V _{DHS}), dòng ra từ DHS tuần hoàn lại 1 phần vào DHS	T=29.1±1.1°C, 267 ngày, Q = 1.8 ± 0.4 m ³ /ngày COD _{inf} = 3940±310 mg/L, BOD _{inf} =3320±410 mg/L, SS _{inf} =170±17mg/L, TN _{inf} =202±54mg/L, NH ₄ -N _{inf} =109±17mg/L,	Nước thải sơ chế cao su tự nhiên	ABR 3.4 ngày, UASB 1.8 ngày, bể lắng 0.6 ngày, DHS 0.5 ngày	COD _{eff} = 140±64mg /L (loại 95%), BOD _{eff} = 31±12mg/ L (loại 98%)	TN _{eff} = 58±24 mg/L (loại 68.3±15.1%), NH ₄ -N _{eff} = 49±22 mg/L	SS _{eff} = 46±32 mg/L (loại 72%)	Biogas từ UASB được thu hồi làm khí đốt, giảm 92% phát thải khí nhà kính so với hệ thống mở trước đó	[14]	

Cấu tạo hệ thống	Điều kiện vận hành, công suất xử lý (Q), đặc tính nước thải	Nước thải	Thời gian lưu nước	Năng suất loại hữu cơ (COD, BOD)	Năng suất loại nitơ (nitơ tổng- TN, nitơ hữu cơ Kjeldahl- TKN, NO ₃ -N, NO ₂ -N)	Năng suất loại chất rắn lơ lửng (SS)	Ô nhiễm khác	Ngưỡng gây hại	Nguồn tham khảo
Hệ thống pilot UASB(10.8L) – DHS(21L, 3 tầng tổng cao 1.8cm, đường kính trong 0.15m, có ngăn thông khí, G3 dạng hình trụ dài 30mm, đường kính 28mm, V _{bọt biến} = 38% V _{DHS})	310 ngày, Q ~ 11.27 L/ngày ^a COD _{inf} = 3421.3±474.5 mg/L, SS _{inf} = 1742.5±319.1 mg/L, TKN _{inf} = 482.3±33.1 mg/L, NH ₄ -N _{inf} = 118.1±42 mg/L, Độ mặn 22.6±4.6g/L Kim loại nặng, Polychlorinated biphenyls (PCB)	Nước rỉ rác từ khu chôn lấp rác độc hại công nghiệp	UASB: 23 giờ, DHS: 17 giờ	COD _{eff} = 1772±323 mg/L (loại 59.2±4.8 %), chủ yếu nhờ DHS loại COD _{dạng phân tán}	DHS loại NH ₄ -N sau UASB 92.8±6.0%	DHS loại SS trong nước thải sau UASB hơn 35%	Kim loại nặng tạo phức sulfite hoặc polyme ngoại bào của vi sinh vật, lắng dưới lớp bùn của UASB hoặc giữ lại trên bọt biến của DHS loại được 42.9-87.6%, PBC được phân huỷ dần dần qua hệ thống và loại được trên 87.2 – 95.7%	Tổng chất rắn hoà tan > 20g/L, tỉ lệ C/N > 60	[15]
Hệ thống nuôi tuần hoàn cá Epinephelus bruneus ở bể cá 5m ³ , sâu 1m, sử dụng kết hợp 2 bể USB (mỗi bể có đường kính 0.2m, cao 1.5m) và 2 bể DHS (mỗi bể 400L, đường kính 0.6m, cao 1.3m, dạng G3, V _{bọt biến} = 50% V _{DHS})	224 ngày, Độ mặn 30-35 ‰, Cấp thêm CH ₃ COONa vào USB để phản nitrat hoá và bổ sung thức ăn cho cá, Tải trọng nitơ tối đa 8.32 ± 3.11 gN/ngày	Nước nuôi cá tuần hoàn	USB: 1.9-3.2 giờ, DHS: 1.85-1.22 phút		Tổng ammonia (TAN) trong bể cá duy trì 0.33 ± 0.12 mgN/L trong cả thí nghiệm (>1 mgN/L ức chế sinh trưởng của cá)				[18]

^a Ước tính từ số liệu trong bài



Hình 3. So sánh tương quan giữa hiệu quả xử lý ô nhiễm và chi phí xử lý của các công nghệ phổ biến hiện nay (dựa theo Mazhar và cộng sự, 2020 [20])

TF-trickling filter, MBBR-moving bed bio reactor, MBR-membrane reactor, WSP-waste stabilization pond, ASP-activated sludge process, SBR-sequencing batch reactor, UASB-upflow anaerobic sludge blanket, FPU-final polishing unit, EAS-extended aeration system, DHS-downflow hanging sponge

Mazhar và cộng sự (2020) bằng thực nghiệm trên quy mô lớn (công suất 5000 m³/ngày, tương đương 35000 dân cư Ấn Độ) đã chỉ ra những ưu điểm kể trên của DHS so với các công nghệ xử lý nâng cao khác như hồ vách ngăn (final polishing unit-FPU), hồ điều hoà (waste stabilization pond), hồ nuôi bèo (duckweed pond), hồ nông (shallow polishing pond), lọc sinh học nhỏ giọt (trickling filter-TF), bể sục khí (aerated fixed bed), v.v. Trong nghiên cứu này, bể DHS xử lý nước thải sau UASB không chỉ hiệu quả hơn về xử lý ô nhiễm hữu cơ và chất rắn lơ lửng so với FPU, mà chỉ sử dụng 6% diện tích xây dựng so với FPU, và thời gian lưu nước cũng được rút ngắn từ 24 giờ với FPU còn 1.5 giờ với DHS. Ngoài hiệu quả xử lý chất ô nhiễm, nghiên cứu này còn so sánh chi phí xây dựng-vận hành-bảo trì của hệ thống UASB-DHS với các hệ thống xử lý nước thải khác và xếp loại trong **Hình 3** [20].

3.2. Thách thức trong vận hành và lắp đặt

Bên cạnh các ưu điểm nêu trên, để hệ thống DHS đạt hiệu quả xử lý tốt nhất, cần lưu ý năm điểm sau:

(i) đảm bảo thông khí trong hệ thống bằng các cửa thông khí ở dọc thành bể và tỉ lệ sắp xếp các miếng bọt biển hợp lý nhằm cung cấp đủ oxy, đặc biệt với những tầng module phía dưới vì oxy bị vi khuẩn dị dưỡng tiêu thụ nhanh ở tầng cao nhất khi nước thải giàu nguồn cacbon.

(ii) thay vì cần diện tích xây dựng lớn như các bể hiếu khí hay hồ xử lý thông thường, hệ thống DHS cần được xây cao từ nhiều tầng module để tăng thời gian

tiếp xúc giữa không khí – nước thải – vi sinh vật trong bùn. Việc chia thành từng module nhỏ giúp cho quá trình vận chuyển, lắp đặt, và bảo trì hệ thống dễ dàng hơn.

(iii) đảm bảo phân bố đồng đều nước thải trên các lớp bọt biển bằng hệ thống phân bố xoay tròn với hệ thống to hoặc đĩa phân bố với hệ thống nhỏ nhằm hạn chế các vùng chết không hoạt động trong hệ thống, tránh trường hợp short-cut, nước thải không chảy qua lớp bọt biển có chứa bùn để xử lý mà chảy dọc theo thành bể xuống đáy không qua xử lý, sẽ làm giảm chất lượng nước dòng ra.

(iv) các miếng bọt biển bằng polyurethane ban đầu rất nhẹ, nhưng có khả năng giữ nước cao nên khối lượng các miếng bọt biển trong hệ thống khá nặng nên cần lưu ý không nên sắp xếp các lớp bọt biển dày sẽ đè nặng và làm biến dạng các miếng bọt biển ở đáy, ngoài ra hệ thống đỡ giữa các tầng cũng cần chịu được sức nặng của các miếng bọt biển ngậm nước.

(v) nước thải cần được loại bỏ các chất rắn kích thước lớn trước khi xử lý bằng DHS nhằm tránh làm tắc hệ thống phân phối nước; nên có bước tiền xử lý bằng phương pháp yếm khí nếu nước thải có nồng độ ô nhiễm hữu cơ cao (tải trọng hữu cơ trên 2 kgCOD m⁻³ ngày⁻¹)

Hệ thống DHS cơ bản là phương pháp xử lý nước thải hiếu khí, nên khó để đạt được hiệu quả xử lý ô nhiễm nitơ cao do mới dừng lại ở bước oxy hóa amoni và nitrat hoá. Một vài biện pháp nhằm cải thiện khả năng

khử nitrat hoá, chuyển hoá hoàn toàn ô nhiễm nito (dạng nitrat và nitrit) thành khí N_2 , được đề xuất như cho chảy tuần hoàn nước thải đầu ra vào lại bể yếm khí [21], cho phần dưới của bể DHS ngập nước để tạo môi trường anoxic và bổ sung cấp nước thải trực tiếp vào vùng anoxic đó để tăng tỉ lệ C/N phù hợp với quá trình phân nitrat [22].

Do hệ thống DHS thường được lắp đặt phía sau hệ thống yếm khí như bể UASB nên hiện nay ngoài làm xử lý hiếu khí, một cách tiếp cận khác đã được áp dụng với DHS: DHS dạng kín, không thông khí. Metan, thành phần chính trong biogas sinh ra từ hệ thống yếm khí, thường được thu hồi để làm khí đốt, tuy nhiên trong thực nghiệm, khí metan sinh ra bị thất thoát 19-63% dưới dạng hòa tan trong nước thải sau xử lý [23]. Hệ thống DHS dạng kín lắp đặt phía sau hệ thống xử lý nước thải yếm khí còn tận dụng được nguồn metan hoà tan đó như làm nguồn cacbon và chất cho điện tử tham gia quá trình phân nitrat, hoặc tiếp tục được oxy hoá thành sản phẩm cuối cùng là CO_2 , với tiềm năng làm nóng lên toàn cầu ít hơn 21-28 lần so với metan [10, 24].

4. Kết luận

Công nghệ chảy xuôi dòng với giá thể bọt biển (DHS) đã được chứng minh là công nghệ xử lý nước thải hiệu quả cao, đáp ứng được tiêu chuẩn xả thải trong hầu hết các nghiên cứu với nước thải sinh hoạt, với chi phí thấp, phù hợp để áp dụng tại các quốc gia đang phát triển. Tới nay hệ thống được áp dụng chủ yếu trong xử lý nước thải sinh hoạt nhằm xử lý nước thải phi tập trung tại các địa bàn dân cư nhỏ, do chi phí lắp đặt-vận hành thấp và thao tác đơn giản. Ứng dụng của hệ thống DHS cho các loại nước thải khác với thành phần phức tạp hơn cũng đang được nghiên cứu rộng rãi. Cho tới nay việc ứng dụng của hệ thống DHS tại Việt Nam mới chỉ dừng lại ở quy mô pilot trong các dự án nghiên cứu mà chưa được áp dụng trong cộng đồng. Đề đưa công nghệ DHS vào ứng dụng phổ biến, chính quyền và cơ quan chức năng cần hoàn thiện thể chế, ban hành quy chuẩn/tiêu chuẩn, quy trình thẩm định để đảm bảo chất lượng thiết kế và thi công công trình; ngoài ra, năng lực vận hành - bảo trì, giám sát, theo dõi và kiểm soát của địa phương đồng thời với sự tham gia của cộng đồng dân cư nơi dự án triển khai thực hiện là yếu tố không thể thiếu trong thành công triển khai mô hình.

Lời cảm ơn

Tác giả gửi lời cảm ơn tới giáo sư Yamaguchi Takashi đã giới thiệu và tạo điều kiện để tác giả thực hiện nghiên cứu về hệ thống DHS. Tác giả đặc biệt gửi lời cảm ơn tới giáo sư Syutsubo Kazuaki và TS. Onodera Takashi đã cung cấp cái nhìn toàn diện và kinh nghiệm thực tiễn của mình khi áp dụng hệ thống DHS trong các dự án đã và đang triển khai không chỉ ở Nhật Bản mà còn ở các quốc gia khác.

Tài liệu tham khảo

- [1] Uemura, S. and Harada, H. Application of UASB technology for sewage treatment with a novel post-treatment process. In *Environmental Anaerobic Technology: Applications and New Developments*, Imperial College Press, 91-112, 2010.
- [2] Onodera, T., Matsunaga, K., Kubota, K., Taniguchi, R., Harada, H., Syutsubo, K., Okubo, T., Uemura, S., Araki, N., Yamada, M. and Yamauchi, M. Characterization of the retained sludge in a down-flow hanging sponge (DHS) reactor with emphasis on its low excess sludge production. *Bioresource Technology*, 136, 169-175, 2013.
- [3] Machdar, I., Harada, H., Ohashi, A., Sekiguchi, Y., Okui, H. and Ueki, K. A novel and cost-effective sewage treatment system consisting of UASB pre-treatment and aerobic post-treatment units for developing countries. *Water Science and Technology*, 36(12), 189-197, 1997.
- [4] Onodera, T., Okubo, T., Uemura, S., Yamaguchi, T., Ohashi, A. and Harada, H. Long-term performance evaluation of down-flow hanging sponge reactor regarding nitrification in a full-scale experiment in India. *Bioresource technology*, 204, 177-184, 2016.
- [5] Tandukar, M., Uemura, S., Machdar, I., Ohashi, A. and Harada, H. A low-cost municipal sewage treatment system with a combination of UASB and the "fourth-generation" downflow hanging sponge reactors. *Water science and technology*, 52(1-2), 323-329, 2005.
- [6] Tandukar, M., Ohashi, A. and Harada, H. Performance comparison of a pilot-scale UASB and DHS system and activated sludge process for the treatment of municipal wastewater. *Water Research*, 41(12), 2697-2705, 2007.
- [7] Onodera, T., Tandukar, M., Sugiyana, D., Uemura, S., Ohashi, A. and Harada, H. Development of a sixth-generation down-flow hanging sponge (DHS) reactor using rigid sponge media for post-treatment of UASB treating municipal sewage. *Bioresource technology*, 152, 93-100, 2014.
- [8] Onodera, T. and Syutsubo, K. Development of simple and cost-effective treatment system for municipal wastewater. In *Proceedings of The Annual International Conference*, Syiah Kuala University-Life Sciences & Engineering Chapter, 2015.
- [9] Okubo, T., Kubota, K., Yamaguchi, T., Uemura, S. and Harada, H. Development of a new non-aeration-based sewage treatment technology: performance evaluation of a full-scale down-flow hanging sponge reactor employing third-generation sponge carriers. *Water research*, 102, 138-146, 2016.

- [10] Machdar, I., Matsuura, N., Kodera, H. And Ohashi, A. Prospective combined system of UASB and DHS reactor for the treatment of domestic wastewater in Jakarta. *Journal of Water and Environment Technology*, 12(6), 459-468, 2014.
- [11] Danshita, T., Yoochatchaval, W., Takemura, Y., Miyaoka, Y., Kada, M., Tepjun, W., Thonglee, S., Sonaka, H., Yamaguchi, T., Tomioka, N. and Banjongproo, P. Performance evaluation of a down-flow hanging sponge (DHS) reactor as a decentralized domestic wastewater treatment system in tropical regions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 1-11, 2020.
- [12] Uemura, S., Suzuki, S., Maruyama, Y. and Harada, H. Direct treatment of settled sewage by DHS reactors with different sizes of sponge support media. *International Journal of Environmental Research*, 6(1), 25-32, 2012.
- [13] Fleifle, A., Tawfik, A., Saavedra, O.C. and Elzeir, M. Treatment of agricultural drainage water via downflow hanging sponge system for reuse in agriculture. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(2), 403-412, 2013.
- [14] Watari, T., Mai, T.C., Tanikawa, D., Hirakata, Y., Hatamoto, M., Syutsubo, K., Fukuda, M., Nguyen, N.B. and Yamaguchi, T. Performance evaluation of the pilot scale upflow anaerobic sludge blanket–Downflow hanging sponge system for natural rubber processing wastewater treatment in South Vietnam. *Bioresource technology*, 237, 204-212, 2017.
- [15] Ismail, S., Nasr, M., Abdelrazek, E., Awad, H.M., Zhaof, S., Meng, F. and Tawfik, A. Techno-economic feasibility of energy-saving self-aerated sponge tower combined with up-flow anaerobic sludge blanket reactor for treatment of hazardous landfill leachate. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101415, 2020.
- [16] Watari, T., Hata, Y., Hirakata, Y., Nguyet, P.N., Nguyen, T.H., Maki, S., Hatamoto, M., Sutani, D., Setia, T. and Yamaguchi, T. Performance evaluation of down-flow hanging sponge reactor for direct treatment of actual textile wastewater; Effect of effluent recirculation to performance and microbial community. *Journal of Water Process Engineering*, 101724, 2020.
- [17] Tanikawa, D., Nakamura, Y., Tokuzawa, H., Hirakata, Y., Hatamoto, M. and Yamaguchi, T. Effluent treatment in an aquaponics-based closed aquaculture system with single-stage nitrification–denitrification using a down-flow hanging sponge reactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 132, 268-273, 2018.
- [18] Watari, T., Nakamura, Y., Kotcharoen, W., Hirakata, Y., Satanwat, P., Pungrasmi, W., Powtongsook, S., Takeuchi, Y., Hatamoto, M. and Yamaguchi, T., Application of down-flow hanging sponge–Upflow sludge blanket system for nitrogen removal in *Epinephelus bruneus* closed recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 532, 735997, 2021.
- [19] Tra, V.T., Dang, B.T., Binh, Q.A., Nguyen, Q.H., Nguyen, P.T., Nguyen, H.H., Nguyen, T.T., Le, T.H., Le, D.T., Itayama, T. and Bui, X.T. Influence of hydraulic loading rate on performance and energy-efficient of a pilot-scale down-flow hanging sponge reactor treating domestic wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 101273, 2020.
- [20] Mazhar, M.A., Khan, N.A., Khan, A.H., Ahmed, S., Siddiqui, A.A., Husain, A., Tirth, V., Islam, S., Shukla, N.K., Changani, F. and Yousefi, M. Upgrading combined anaerobic-aerobic UASB-FPU to UASB-DHS system: Cost comparison and performance perspective for developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 124723, 2020.
- [21] Takahashi, M., Yamaguchi, T., Kuramoto, Y., Nagano, A., Shimozaki, S., Sumino, H., Araki, N., Yamazaki, S., Kawakami, S. and Harada, H. Performance of a pilot-scale sewage treatment: an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and a down-flow hanging sponge (DHS) reactors combined system by sulfur-redox reaction process under low-temperature conditions. *Bioresource technology*, 102(2), 753-757, 2011.
- [22] Bundy, C.A., Wu, D., Jong, M.C., Edwards, S.R., Ahammad, Z.S. and Graham, D.W. Enhanced denitrification in Downflow Hanging Sponge reactors for decentralised domestic wastewater treatment. *Bioresource technology*, 226, 1-8, 2017.
- [23] Crone, B.C., Garland, J.L., Sorial, G.A. and Vane, L.M. Significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: A review. *Water Research*, 104, 520-531, 2016.
- [24] Thao, T. P., Hatamoto, M., Tsuba, D., Watari, T. and Yamaguchi, T. Positive impact of a reducing agent on autotrophic nitrogen removal process and nexus of nitrous oxide emission in an anaerobic downflow hanging sponge reactor. *Chemosphere*, 126952, 2020.