

# Hiện trạng công nghệ xử lý nước thải theo hướng phát triển bền vững

Cao Thế Hà<sup>1\*</sup>, Vũ Ngọc Duy<sup>2</sup>, Nguyễn Thị An Hằng<sup>3</sup>, Nguyễn Trường Quân<sup>1</sup>, Cao Thế Anh<sup>4</sup>, Trần Mạnh Hải<sup>5</sup>, K. Fukushi<sup>6</sup>, H. Katayama<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Trung tâm Nghiên cứu Công nghệ Môi trường và Phát triển Bền vững, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

<sup>2</sup>Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

<sup>3</sup>Chương trình kỹ thuật môi trường, Trường Đại học Việt Nhật, Đại học Quốc gia Hà Nội

<sup>4</sup>Khoa Kỹ thuật hóa học, Đại học KU Leuven (Bỉ)

<sup>5</sup>Viện Công nghệ Môi trường, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

<sup>6</sup>Khoa Kỹ thuật đô thị, Đại học Tokyo (Nhật Bản)

Ngày nhận bài 8/11/2018; ngày chuyển phản biện 14/11/2018; ngày nhận phản biện 10/12/2018; ngày chấp nhận đăng 18/12/2018

## Tóm tắt:

Hiện nay, trên thế giới nước thải đô thị được xử lý tới cấp 2 (xử lý hữu cơ, TN tới nitrat, vi sinh), cấp 3 (xử lý TN, TP), một số nơi đã xử lý nâng cao tới mức tái sử dụng hoặc bổ cập nguồn an toàn. Xử lý cấp 2 là cách tiếp cận thông thường được khởi động từ đầu thế kỷ XX ở châu Âu, Mỹ và Việt Nam cũng đang đi theo hướng này, đôi khi phát triển tới cấp 3. Tuy nhiên, xử lý kiểu này tốn nhiều điện năng (trung bình thế giới hiện là 4% lượng điện quốc gia, và tới 2040 sẽ là 8%), lãng phí các tài nguyên có thể tái tạo trong nước thải. Mặt khác, lượng rác thải sinh hoạt tăng không ngừng theo dân số và mức sống, các thành phố lớn ở Việt Nam phải chi tới 3-3,5% ngân sách để thu gom, vận chuyển và xử lý rác thải sinh hoạt, trong đó, khoảng 60% là rác hữu cơ, chủ yếu là dùng công nghệ chôn lấp hợp vệ sinh. Từ khoảng hơn 20 năm trở lại đây, nhiều nghiên cứu bắt đầu hiện thực hóa các cách tiếp cận mới đối với công nghiệp vệ sinh môi trường, đó là hướng phát triển bền vững - nền kinh tế tuần hoàn (circular economy), thu hồi tối đa tiềm năng về mặt năng lượng, vật chất và nước từ nước thải đô thị, nước thải giàu hữu cơ từ công nghiệp và khu vực chăn nuôi cũng như phần hữu cơ trong rác sinh hoạt (RSH). Bài báo này tổng quan những thay đổi trong công nghiệp xử lý nước thải theo hướng phát triển bền vững mà Việt Nam có cơ hội theo đuổi.

**Từ khóa:** chất thải, công nghệ xử lý nước thải, nước thải, nước thải đô thị.

**Chỉ số phân loại:** 2.7

## **Đặt vấn đề**

Hiện nay, trên thế giới nước thải đô thị thường được xử lý tới cấp 2 (loại bỏ hữu cơ - HC, tổng nitơ - TN có thể chuyển hóa tới nitrat, xử lý vi sinh), xử lý cấp 3 (loại bỏ thêm TN, tổng phospho - TP), một số nơi đã xử lý nâng cao tới mức đạt các tiêu chuẩn có thể tái sử dụng hoặc bổ cập nguồn nước. Đây là cách tiếp cận thông thường được khởi động từ đầu thế kỷ XX ở châu Âu, Mỹ và về nguyên tắc là đảm bảo các yêu cầu về vệ sinh môi trường. Hiện nay, Việt Nam cũng đang thực hiện theo hướng này. Tuy nhiên, phương thức xử lý kiểu này tiêu tốn nhiều điện năng, trung bình thế giới hiện nay lĩnh vực nước cấp và nước thải tiêu thụ tới 4% lượng điện quốc gia, và tới 2040 sẽ là 8%) [1], đồng thời lãng phí các tài nguyên có thể tái tạo có trong nước thải (nước, năng lượng, N, P, K...). Nhiều nhà khoa học gần đây coi kiểu xử lý nước thải này là sai đường, một số khác thì kêu gọi hãy “khai mỏ trong nước thải” [2, 3].

Mặt khác, lượng rác thải sinh hoạt tăng không ngừng theo sự gia tăng của dân số và mức sống.

Các thành phố lớn ở Việt Nam phải chi tới 3-3,5% ngân sách để thu gom, vận chuyển và xử lý rác thải sinh hoạt, trong đó khoảng 60% là rác hữu cơ, chủ yếu là dùng công nghệ chôn lấp hợp vệ sinh [4]. Phương thức xử lý này kéo theo nhu cầu lớn và không ngừng tăng về diện tích đất xây dựng bãi chôn lấp, dẫn đến những thách thức không nhỏ về việc phải đối phó với các hệ quả môi trường phát sinh từ các bãi chôn lấp rác như nước rỉ rác, mùi, các vectơ truyền bệnh, phát thải khí nhà kính (KNK)... Đây là giải pháp rất lãng phí tài nguyên, chỉ có tiềm năng nhỏ trong việc thu hồi năng lượng từ khí bãi rác, các công nghệ khác (làm phân compost, đốt, nhà máy phân loại...) có suất đầu tư và chi phí vận hành rất lớn, khó khăn trong việc tiêu thụ sản phẩm (phân compost) nên thiếu tính bền vững. Từ khoảng hơn 20 năm trở lại đây, nhiều nghiên cứu của các nhà khoa học

\*Tác giả liên hệ: Email: caotheha@gmail.com

# Current status of in wastewater treatment technology toward sustainable development

The Ha Cao<sup>1\*</sup>, Ngoc Duy Vu<sup>2</sup>, Thi An Hang Nguyen<sup>3</sup>,  
Truong Quan Nguyen<sup>1</sup>, The Anh Cao<sup>4</sup>,  
Manh Hai Tran<sup>5</sup>, K. Fukushi<sup>6</sup>, H. Katayama<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Research Centre for Environmental Technology and Sustainable Development, University of Science, Vietnam National University, Hanoi

<sup>2</sup>Faculty of Chemistry, University of Science, Vietnam National University, Hanoi

<sup>3</sup>Program of Environmental Engineering, Vietnam Japan University (MEE-VJU), Vietnam National University, Hanoi

<sup>4</sup>Department of Chemical Engineering, KU Leuven (Belgium)

<sup>5</sup>Institute of Environmental Technology, Vietnam Academy of Science & Technology

<sup>6</sup>Urban Engineering, Tokyo University (Japan)

Received 8 November 2018; accepted 18 December 2018

## Abstract:

At the present practice of urban wastewater treatment in the world, secondary treatment (removal of organics, pathogens, TN to nitrate), tertiary treatment (plus removal of TN, TP), and advanced treatment are applied to reclaim water for safe reuse or recharging groundwater sources. Secondary treatment is a conventional approach which originated since early 1900s from Europe and America, and Vietnam is now applying this approach with some improvement. However, this kind of treatment consumes a lot of energy (the world average consumption is 4% of total electricity produced, and it will reach 8% by 2040), and waste renewable resources in wastewater. On the other side, the amount of municipal solid wastes (MSW) constantly increases along with the growth of population and living; in Vietnam, the large cities have to spend about 3-3.5% of their budget just for MSW (containing ~60% organics) collection, transportation and treatment for landfilling. During the last 20 years, a lot of researches have been conducted in the direction of new approaches in the field of waste treatment, this is the concepts of sustainable development - circular economy. This mean energy and materials including wastewater are recovered and reused. Urban wastewater, industrial rich organic wastewaters, animal breeding wastewater, organic fraction of MSW can be the input into this treatment system, outputs such as renewable energies, reclaimed water and fertilizers, and other useful materials can also be produced. This paper reviews real developments in this promising field, a sustainable development opportunity that Vietnam should pursue.

**Keywords:** urban wastewater, waste, wastewater, wastewater treatment technology.

**Classification number:** 2.7

kết hợp với cố gắng từ các nhà công nghiệp, các nhà quản lý đã bắt đầu hiện thực hóa các cách tiếp cận mới đối với công nghiệp vệ sinh môi trường, đó là các cách tiếp cận theo hướng phát triển bền vững - nền kinh tế tuần hoàn (Circular Economy), thu hồi tối đa tiềm năng về mặt năng lượng, vật chất và nước từ nước thải đô thị, nước thải giàu hữu cơ từ công nghiệp và khu vực chăn nuôi cũng như phần hữu cơ trong RSH. Đã xuất hiện một số pilot, bước tiến đáng kể nhất là tháng 6/2017 ở Billund, Đan Mạch đã xuất hiện nhà máy xử lý chất thải đầu tiên theo hướng này. Nhà máy xử lý nước thải đô thị theo kiểu “chi phí, xử lý - thải bỏ” đã và đang dần tiến hóa thành “chi phí, xử lý - thu hồi tài nguyên - không phát thải”, nó xử lý đồng thời nước thải đô thị với các dòng thải giàu hữu cơ, bao gồm cả phần chất thải rắn hữu cơ trong RSH và công nghiệp giàu hữu cơ, bao gồm cả chất thải chăn nuôi. Báo cáo này tổng quan những thay đổi trong công nghiệp xử lý nước thải theo hướng phát triển bền vững nêu trên. Việt Nam là một đất nước đang đô thị hóa nhanh nhưng chưa cao (mức đô thị hóa khoảng 35%), nông thôn đang đổi mới theo hướng sản xuất hàng hóa tập trung, phát thải rất lớn nên rất cần có sự thay đổi và có cơ hội thay đổi ngành công nghiệp xử lý môi trường theo hướng kinh tế tuần hoàn này.

## Hiện trạng và thách thức

Đô thị hóa - hiện đại hóa là sự phát triển tất yếu của thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng, tuy nhiên, kéo theo nó là những thách thức mà muốn đạt các mục tiêu phát triển bền vững loài người bắt buộc phải vượt qua [5], đó là: ô nhiễm không khí; nước và nước thải; chất thải rắn; phát thải các KNK; nghèo đói và các khu nhà ổ chuột; bất ổn xã hội.

Vậy, công nghiệp môi trường với chức năng làm sạch có thể “tuần hoàn” những gì từ lượng chất thải không ngừng gia tăng? Ở mức độ nhất định, con người đã và đang tái chế, tái sử dụng thành công rất nhiều chất thải như kim loại, nhựa, giấy... Nước thải công nghiệp, rác công nghiệp theo quy định thì thuộc trách nhiệm của người phát thải. Còn những dòng thải không lồ khác như nước thải, rác thải từ khu vực dân sinh hiện nay nhà nước đang phải căng sức để giải quyết. Vậy hiện trạng vấn đề này như thế nào?

Trong lĩnh vực xử lý nước thải sinh hoạt, nếu chỉ tính riêng cho dân cư đô thị, với mức độ đô thị hóa hiện nay và tương lai luôn lớn hơn mức tăng dân số trung bình, tới 2030 Việt Nam sẽ có khoảng 106,3 triệu dân với 47,87 triệu dân đô thị (44,87% dân số) [6]. Với định mức cấp nước đô thị hiện nay là ~200 l/người/ngày, hiệu quả thu gom xử lý là 80%, giả thiết là toàn bộ nước thải của dân số đô thị được xử lý thì tổng công suất xử lý nước thải đô thị cần có năm 2017 và 2030 tương ứng là 5,25 triệu m<sup>3</sup>/ngày và 7,63 triệu m<sup>3</sup>/ngày. Theo [7] thì tới nay, Việt Nam mới có 37 nhà máy xử lý nước thải tập trung với tổng công suất 890.000 m<sup>3</sup>/

ngày - đêm, tới 2020 sẽ có thêm 50 nhà máy với tổng công suất 2 triệu m<sup>3</sup>/ngày - đêm, nghĩa là tổng công suất chưa đạt 50% của nhu cầu 2030. Để có được công suất xử lý này, với suất đầu tư 250 USD/người tới 2030, theo [8] Việt Nam sẽ cần tổng chi đầu tư xây dựng các nhà máy xử lý là 11,925 tỷ USD. Tiếp theo là chi phí xử lý nước thải, thải bỏ bùn thải. Giả thiết là toàn bộ nước thải đô thị được xử lý bằng công nghệ phổ biến nhất hiện nay là bùn hoạt tính (BHT), tạm tính con số chi phí trực tiếp (điện năng, hóa chất, nhân công, sửa chữa nhỏ, chưa tính khấu hao) ở mức khiêm tốn là 4.000 đồng/m<sup>3</sup>, với lưu lượng nước thải nêu trên, chi phí 2017 và 2030 để xử lý nước thải đô thị tương ứng là 18,4 tỷ đồng/ngày, 6.716 tỷ đồng/năm và 24 tỷ đồng/ngày, 8.760 tỷ đồng/năm (chưa tính trượt giá) tương ứng, nếu tính cả chi phí khấu hao, con số chờ đợi là gần gấp đôi [2]. Rất tiếc, việc đầu tư xử lý nước thải ở Việt Nam hầu như chỉ tập trung ở các khu công nghiệp và các đô thị lớn, khu vực phát thải nặng nề hơn là nông thôn chưa được đầu tư, các đô thị cũng chỉ mới đáp ứng trên 10% nhu cầu cần xử lý [7].

Ở khía cạnh thu hồi năng lượng và tài nguyên từ chất thải, về nguyên tắc, nước thải và RSH có tiềm năng thu hồi - tái sử dụng nhất định, đó là tiềm năng: nước, năng lượng (điện, nhiệt), các thành phần khác trong nước/chất thải. Lợi ích khác của việc xử lý theo cách tiếp cận “Kinh tế tuần hoàn” đối với các loại nước thải giàu hữu cơ và phân hữu cơ trong RSH bao gồm: vệ sinh môi trường; giảm phát thải KNK; giảm thiểu nhu cầu chôn lấp, tạo điều kiện để phát triển công nghiệp thu hồi, tái chế rác thải; thu hồi, bảo vệ tài nguyên, nhất là P - tài nguyên không tái tạo và đang cạn kiệt nhưng là yếu tố cần thiết để đảm bảo một nền nông nghiệp năng suất cao và bền vững.

Nếu Việt Nam áp dụng các nguyên lý của “Kinh tế tuần hoàn” hay là “Phát triển xanh” như đã đề cập [9], chắc chắn công tác xử lý nước thải sinh hoạt và RSH sẽ góp phần quyết định trong việc giảm thiểu tác động của cả 6 thách thức trên con đường đạt các SDG mà Chính phủ Việt Nam mong muốn thực hiện [10]. Sau đây sẽ là tổng quan ngắn gọn về những thành tựu trong lĩnh vực nghiên cứu xử lý nước thải sinh hoạt theo hướng phát triển bền vững và nhất là về những ứng dụng ở quy mô công nghiệp trong lĩnh vực này.

### Những nghiên cứu quan trọng trong lĩnh vực xử lý nước thải

Về khía cạnh lịch sử quản lý - xử lý nước thải, con người đã bắt đầu quan tâm đến vấn đề nước thải sinh hoạt từ thời cổ đại. Những di chỉ khảo cổ cho thấy, nhà vệ sinh đã có mặt ở Mohenjo-Daro gần sông Indus (Pakistan) từ năm 1500 trước Công nguyên (CN), ở Cloaca Maxima, Rome (Ý) đã phát hiện những công trình thu gom - thoát nước thải được xây dựng từ năm 500 trước CN, tài liệu lịch sử cho thấy những hệ thống thu gom - thoát - thải bỏ nước thải đã có từ

2000 năm trước CN [11]. Cách mạng công nghiệp (CMCN) lần thứ nhất (khoảng cuối thế kỷ XVIII, nửa đầu thế kỷ XIX) và nhất là CMCN lần thứ hai (nửa sau thế kỷ XIX) đã dẫn tới sự ra đời của hàng loạt thành phố lớn, điển hình là London - thành phố lớn nhất thế giới thời đó. Ở London, 1865-1868 là thời điểm hệ thống kênh thoát nước thải hiện đại ra sông Thames được xây dựng và phục vụ tới ngày nay. Bức tranh tương tự cũng được thực hiện ở toàn châu Âu và Bắc Mỹ [11], rồi lan ra toàn cầu, trong đó có Việt Nam. Vấn đề chất lượng nước cấp được chính quyền London rất quan tâm, họ đã đề cử Viện Hoàng gia Anh Frankland thực hiện nhiệm vụ báo cáo chất lượng nước sông - nguồn nước cấp hàng tháng, Ủy ban ô nhiễm sông do Frankland phụ trách đã phát triển các phương pháp phân tích chất lượng nước. Năm 1868, trong một cuộc họp Frankland đã báo cáo về hiện tượng nước cấp của London lấy từ các dòng chảy từ núi Cader Idris và Pylalimmon (Bắc Wales) đã bị ô nhiễm bởi các vi trùng có hại (unhealthy germs) và hóa chất. Tuy nhiên, tới năm 1871 các phương pháp phân tích do Frankland mới được áp dụng rộng rãi để đánh giá chất lượng nước và hỗ trợ công tác nghiên cứu xử lý nước thải.

Ngày nay, vai trò chủ đạo của công nghệ sinh học, trong đó vi khuẩn, một mặt là tác nhân gây các bệnh dịch lan truyền theo đường nước, nhất là dịch tả và sốt phát ban, mặt khác là tác nhân chủ lực thực hiện các quá trình xử lý ô nhiễm nước thải sinh hoạt, được mọi người công nhận, tuy nhiên, tới cuối thế kỷ XIX, câu hỏi “hóa học hay sinh học” thường xuyên được tranh cãi trong giới khoa học.

Đầu tiên, các nhà khoa học chú ý đến hiện tượng “tự làm sạch” của hỗn hợp nước sông và nước thải. Có lẽ Alexander Müller vào 1869 đã khẳng định là ô nhiễm hữu cơ trong nước được phân hủy nhờ các quá trình vi sinh. Tới năm 1883, J. König đưa một tấm lưới vào nước thải và ghi nhận sự hình thành các màng vi sinh kèm theo là sự phân hủy các chất hữu cơ hòa tan, dưới sự hướng dẫn của Robert Koch thí nghiệm này được lặp lại bởi Wolffhügel và Thiemann, kết luận là màng vi sinh có thể xuất hiện trên nhiều loại vật liệu mang. Sau đó, từ 1885 tới 1890, các nhà khoa học châu Âu (Emich 1885; König 1886; Knauff 1887; Weigmann 1888; Winogradsky 1890) đã chứng minh là bên cạnh việc ôxy hóa hữu cơ tới CO<sub>2</sub>, các quá trình vi sinh còn ôxy hóa NH<sub>4</sub><sup>+</sup> thành NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mà nay ta gọi là nitrat hóa - bước đầu tiên trong quá trình khử tổng nitơ TN trong các hệ xử lý nước thải hiện đại. Trên cơ sở quá trình tự làm sạch của nước thải, những công trình “xử lý nước thải” đầu tiên sử dụng các hồ, kênh chứa, các cánh đồng lọc đã được hình thành. Tuy nhiên, diện tích lớn, hiệu quả xử lý thấp và hiện tượng tắc các cánh đồng lọc thúc đẩy sự ra đời của những công nghệ mạnh mẽ hơn.

Trước năm 1913, không có ai chú ý đến vai trò của mặt

độ vi sinh trong xử lý nước thải. Sự ra đời của công nghệ xử lý nước thải hiện đại BHT được gắn với phát minh của Edward Arden và William T. Lockett từ Ủy ban sông thuộc Tập đoàn Manchester vào năm 1914. Kết quả nghiên cứu của họ được trình bày tại cuộc họp ở Grand Hotel, Manchester ngày 3/4/1914. Thí nghiệm được thực hiện trong bình thủy tinh 2,27 l bọc giấy đen để tránh tác động của tảo, nước thải được lấy từ cống ở Davyhulme. Nếu mật độ vi khuẩn tăng đến mức thể tích bùn lắng chiếm tới 25%, các hợp chất cacbon và N-amoni biến mất sau 24h sục khí. Các kết quả đầu tiên cho thấy, trong 4h đầu, chất hữu cơ giảm nhanh, từ 4-8h giảm chậm dần, sau đó gần như ổn định, đây cũng là thời điểm tăng tốc của quá trình nitrat hóa. Sau nhiều thí nghiệm ở Anh và Mỹ, năm 1920 nhà máy xử lý nước thải đầu tiên dựa trên nguyên lý BHT đã được xây dựng ở Sheffield, UK, sau đó 1921 ở Indianapolis, USA, 1926 ở Essen-Rellinghausen và 1929-1931 ở Stahnsdorf gần Berlin [11]. Đến nay, BHT được công nhận là phương pháp chủ lực trong xử lý nước thải, phổ biến rộng rãi trên toàn thế giới, kể cả ở Việt Nam.

Tuy nhiên, bên cạnh nhiệm vụ vệ sinh môi trường, công nghệ môi trường từ những năm 1970 nhận thêm chức năng bảo vệ môi trường, trong đó vấn đề thu hồi tài nguyên ngày càng được chú ý. Năm 2010, tại Hội thảo môi trường đô thị ở Xiamen (Trung Quốc), GS Verstraete (Đại học Gent, Bỉ) đã nêu quan điểm “BHT truyền thống: hướng đi sai lầm” [2]. Phân tích từ [2] chỉ rõ, nước thải sinh hoạt của con người thực sự là kho tài nguyên tái tạo có giá trị 80,4 Euro/người/năm (giá ở châu Âu), nếu kết hợp với rác nhà bếp (RNB) - phần gây ô nhiễm, ẩm ướt và cản trở xử lý RSH bằng các công nghệ mà Việt Nam muốn phát triển là thu hồi - tái chế, đốt, con số sẽ là 84,5 Euro. Quan trọng hơn, cách tiếp cận này sẽ giảm thiểu nhu cầu diện tích đất cho các bãi chôn lấp - công nghệ xử lý RSH kinh tế nhất hiện vẫn rất phổ biến trên thế giới, kể cả ở Việt Nam. Điểm quan trọng ở đây là lượng năng lượng có thể thu hồi thông qua quá trình xử lý yếm khí - đồng phát điện nhiệt. Với hiệu suất chuyển hóa biogas là 70%, hiệu suất phát điện là 38%, phát nhiệt là 40%, con số thu hồi là 16 và 17 tính theo điện năng (kWh-el)/người/năm và nhiệt năng (kWh-th)/người/năm tương ứng. Tạm tính cho dân số đô thị Việt Nam 2017 (32,8 triệu người), tổng tiềm năng thu hồi năng lượng là  $33 \times 32.813.400 = 1,083$  tỷ kWh/năm, so với sản lượng điện Việt Nam (2017) là 191,593 tỷ kWh, tiềm năng thu hồi là 0,57%. Nếu quy ra tiền, ta có con số  $84,5 \times 32.813.400 = 2.772.732.300$  Euro, chuyển sang USD (2010), con số = 3.698.824.888 USD. Với Việt Nam, thực tế hơn sẽ là 50% con số này (do chênh lệch giá nước, giá năng lượng) song 1,8 tỷ USD/năm cũng là con số cần suy nghĩ.

Về mặt công nghệ để hiện thực hóa ý tưởng này, ngay từ những năm 1980, GS Lettinga (Đại học Nông nghiệp

Wageningen, Hà Lan) và các công sự kế thừa, sau thành công vang dội của công nghệ xử lý yếm khí tốc độ cao (UASB), đã phát triển ý tưởng lấy công nghệ vi sinh yếm khí làm trọng tâm, hãy thực hiện quá trình khoáng hóa sinh học tự nhiên (Natural Biological Mineralization route-NBM) để thực sự biến nước thải, RNB và các nguồn thải hữu cơ khác thành tài nguyên tái tạo được [12], đây là xuất phát điểm của “công nghệ lọc sinh khối” - BioRefinery sẽ đề cập ở phần sau, với ví dụ là Nhà máy Billund.

Ở cấp độ nghiên cứu, cùng với những với mục tiêu nhằm thu hồi từng phần từ các dòng thải của con người, ví dụ như thu hồi P dưới dạng phosphat hoặc struvit, hoặc thu hồi năng lượng dưới dạng biogas, nhiều nghiên cứu mang tính tổng thể nhắm tới mục tiêu thu hồi tối đa tài nguyên năng lượng, vật liệu từ các dòng thải của con người đã được thực hiện. Các kết quả này được thể hiện qua nhiều công bố, đặc biệt là từ nhóm Lettinga của GS G. Zeeman [13]. Các kết quả nghiên cứu đã công bố rất đa dạng, tuy nhiên đó không phải là mục tiêu của bài này, ở đây chúng tôi tập trung vào hiện trạng áp dụng cách tiếp cận Kinh tế tuần hoàn trong xử lý nước thải đô thị và chất thải hữu cơ, trong đó có RNB ở quy mô sản xuất.

## Ứng dụng

### Thu hồi, tái sử dụng nước (làm nguồn nước cấp)

Ở Mỹ, Công ty nước quận Cam - Orange County Water District (OCWD) xử lý nước cấp từ 1933, phục vụ 2,3 triệu dân. OCSWD xử lý nước thải bằng hệ thống Advanced Water Purification Facility được gọi là Water Factory 21 (WF21) - Nhà máy nước thế kỷ XXI. Công nghệ cơ bản của WF21 bao gồm: lọc MF (áp dụng từ 1993) - RO (áp dụng 1976, 19.000 m<sup>3</sup>/ngày), sát trùng UV. Dây chuyền xử lý nước thải sau xử lý vi sinh tới cấp độ tái sử dụng có công suất 265.000 m<sup>3</sup>/ngày, tối đa là 492.000 m<sup>3</sup>/ngày, nước sau xử lý được bơm lại bù cho nước ngầm theo chương trình Groundwater replenishment system (GWRS) hoạt động từ 2008. Hiện nay, đi đầu trong tái tạo nước ở Mỹ là Florida và California. Mức độ sử dụng nước tái tạo đang tăng nhanh. Ở nơi khai sinh ra khái niệm “nước tái tạo” (Orange County) nước được tái sử dụng chủ yếu dưới dạng gián tiếp (bổ cập nguồn) để đáp ứng đồng thời hai mục tiêu: bổ cập nguồn nước ngọt và chống nước mặn xâm thực.

Ở Singapore có Chương trình NEWater (nước mới), chương trình này bao gồm các nhà máy: Nhà máy Bedok nghiệm thu 2002, hoạt động từ 2/2003, công suất 80.000 m<sup>3</sup>/ngày; Nhà máy Kranji nghiệm thu 2002, hoạt động từ 2/2003, công suất 80.000 m<sup>3</sup>/ngày; Nhà máy Ulu Pandan (do Keppel Seghers đầu tư) nghiệm thu 2007, công suất 148.000 m<sup>3</sup>/ngày (giá nước năm đầu là 0,3 SSD/m<sup>3</sup>); Nhà máy Changi (Sembcorp đầu tư) nghiệm thu 2009, hoạt động

từ 2010, công suất 228,000 m<sup>3</sup>/ngày (giá năm đầu là 0,3 USD/m<sup>3</sup> không tính phí vận chuyển); Nhà máy BEWGUESH Newater ở Changi, công suất 190,000 m<sup>3</sup>/ngày; Nhà máy ở Seletar, nghiệm thu tháng 2/2004, được đóng cửa 2011 khi cơ quan quản lý chuyển nó về Hệ thống xử lý tái sử dụng trung tâm trong Hệ thống hầm cống sâu. Tổng công suất NEWater hiện bằng 726.000 m<sup>3</sup>/ngày, đáp ứng 40% tổng nhu cầu nước sạch của Singapore là 1,8 triệu m<sup>3</sup>/ngày. Trên thực tế, do yếu tố tâm lý, Singapore có kế hoạch tăng dần phần nước thải thu hồi trong phần nước cấp, dự kiến tới 2030 sẽ đạt 30%.

Ở Australia chưa có hệ thống nước tái sử dụng trực tiếp quy mô toàn thành phố, nhưng các nghiên cứu đang được thực hiện ở Bộ phận nghiên cứu Nam cực của Úc (Australian Antarctic Division) ở trại nghiên cứu Davis ở Nam cực. Các công nghệ áp dụng: ozon hóa, sát trùng bằng UV, clo, lọc UF, hấp phụ trên than hoạt tính và lọc RO. Brisbane là thành phố đi đầu trong lĩnh vực tái sử dụng nước, các thành phố khác tham gia Dự án tuần hoàn nước ở hành lang phía Tây.

Tại Israel, số liệu năm 2010 cho thấy, quốc gia này dẫn đầu thế giới về mức độ tái sử dụng nước. 80% nước thải (400 triệu m<sup>3</sup>/năm) được xử lý, ở vùng thủ đô Tel Aviv, 100% nước thải được xử lý và tái sử dụng trong nông nghiệp và các mục đích công. Hiện nay, nước tái sử dụng chỉ cho nông nghiệp, công cộng và các mục tiêu tái tạo môi trường.

Cho tới nay, ví dụ đầu tiên về sử dụng nước tái tạo trực tiếp lại thuộc về Tp Windhoek ở Namibia. Nhà máy tái tạo nước thải New Goreangab Water Reclamation Plant (NGWRP) bắt đầu hoạt động từ hơn 40 năm trước, nước thải sau xử lý tái tạo đã được trộn lẫn với nước sạch cho người sử dụng. Công nghệ xử lý/tái tạo nước bao gồm: tiền ozon hóa, keo tụ tăng cường kết hợp tuyến nôi, lọc cát nhanh, hậu ozon hóa, lọc than hoạt/vi sinh, lọc UF, clo hóa. Hiện nay tỷ lệ nước tái tạo/nước cấp thành phố đạt 14%.

Ở Nam Phi, động lực chính để sử dụng nước tái tạo là khô hạn. Ở Beaufort West, Nhà máy nước tái tạo trực tiếp được xây dựng cuối năm 2010, công suất 2.300 m<sup>3</sup>/ngày. Dây chuyền công nghệ: lọc cát, lọc UF, lọc RO hai đợt, sát trùng bằng đèn cực tím (UV).

### **Thu hồi năng lượng (phát điện, nhiệt)**

Về lý thuyết, nước thải sinh hoạt có dự trữ năng lượng dưới dạng các chất ô nhiễm hữu cơ (COD) lớn hơn nhu cầu điện năng cần để xử lý nó, tuy nhiên mức độ thu hồi lại phụ thuộc vào công nghệ [14]. Sau đây là một số ví dụ thành công trong sản xuất.

Áo [15]: Nhà máy xử lý nước thải Strass, phục vụ 31 khu dân cư ở Thung lũng Strass với dân số dao động mạnh từ 60.000 tới 250.000 dân, tăng vào mùa du lịch. Ý tưởng bắt đầu từ đầu những năm 1990, Nhà máy này đã thu hồi/

sản xuất năng lượng nhiều hơn nó tiêu thụ. Kế hoạch ban đầu là: tới 1996 hệ số thu hồi năng lượng đạt hơn 50% lượng sử dụng, tới 2005 nhà máy đã thu hồi vượt quá lượng năng lượng sử dụng, trở thành nhà máy phát điện - nhiệt. Các giải pháp áp dụng: quá trình hai công đoạn A/B (Adsorption - Belebung). Công đoạn A là hấp phụ 55-65% tải lượng hữu cơ bằng sinh khối vi sinh tuần hoàn có thời gian lưu tế bào (solids retention time - SRT) thấp, nhỏ hơn 0,5 ngày. Công đoạn B có SRT tới 10 ngày để thực hiện quá trình xử lý tới 80% TN. Khi đó phần lớn hữu cơ dưới dạng bùn dư từ quá trình A sẽ được chuyển sang phân hủy yếm khí (AD) thu hồi biogas - năng lượng. Theo công nghệ này, dòng nước tuần hoàn từ bể phân hủy yếm khí (AD) có nồng độ amôni rất cao, từ 2004 đã đưa vào hệ xử lý nitơ - amôni DEMON<sup>®</sup> dùng quá trình annamox nên rất tiết kiệm năng lượng và hóa chất, đồng thời dành hữu cơ (đáng nhờ để khử nitrat) cho hệ AD tăng thu hồi biogas. Biogas thu hồi từ AD được dùng để đồng phát điện - nhiệt (CHP) với hiệu suất 38% điện (cao hơn điện than của Việt Nam). Từ năm 2008, để tăng sản lượng điện, hệ AD của nhà máy bắt đầu tiếp nhận rác hữu cơ và thực hiện quá trình đồng phân hủy với bùn vi sinh từ dây chuyền xử lý nước thải.

Đan Mạch: có nhà máy xử lý nước thải Marselisborg, Aarhus. Dự án bắt đầu được nghiên cứu từ 2006 với mục tiêu giảm chi phí năng lượng, giảm phát thải CO<sub>2</sub>, kế hoạch là thay 14 nhà máy nhỏ bằng 4 nhà máy mới lớn, hiện đại hơn, thực hiện trong giai đoạn 2011-2015. Marselisborg là nhà máy lớn nhất, phục vụ 220.000 dân, công suất 32.918 m<sup>3</sup>/ngày [16]. Nhà máy đã áp dụng hàng loạt giải pháp tiết kiệm và thu hồi năng lượng, kể cả điều khiển tự động, trong đó tiết kiệm lớn nhất là quá trình annamox để xử lý N, thu hồi năng lượng qua hệ AD sản xuất biogas từ bùn thải và đồng phát điện - nhiệt CHP.

### **Thu hồi phân bón**

Về lý thuyết, nước thải ngoài dự trữ năng lượng (dưới dạng các hợp chất carbon - C, có thể chuyển hóa thành biogas để thu hồi năng lượng) có thể thu hồi, còn có một lượng lớn N, P, K, các kim loại (bao gồm cả kim loại nặng) nếu không thu hồi được, trừ K (gần như không tác động tới môi trường) sẽ phải chi phí xử lý; sau xử lý phát sinh bùn cặn chủ yếu là hữu cơ tro, không xử lý được bằng vi sinh. Hiện nay, công nghệ đã được phát triển tới quy mô sản xuất để thu hồi hoặc xử lý N, P, cặn bùn hữu cơ. Thu hồi kim loại nặng đang trong quá trình nghiên cứu và phát triển. Hiện nay, công nghệ thu hồi photpho (P) dưới dạng phân bón P đã được phát triển thành công, hứa hẹn bảo vệ nguồn P có hạn (Việt Nam còn dự trữ appatit, với mức tiêu thụ phân P như hiện nay, chỉ đủ dùng 20-30 năm nữa). Hơn nữa, photpho là thành phần trong nước thải gây phú dưỡng các nguồn nước rất mạnh, rất khó xử lý bằng các kỹ thuật vi

sinh. Công nghệ thu hồi P từ nước và bùn thải phổ biến nhất là kết tinh dưới dạng struvit ( $NH_4MgPO_4$ ) - một dạng phân P nhả chậm, ngoài P còn có cả N, Mg cũng là những thành phần phân bón quan trọng, có giá trị thương mại cao. Trong nhiều công nghệ được nghiên cứu có tới 9 công nghệ đã và đang được triển khai ở quy mô sản xuất, sớm nhất là công nghệ Phosnix do Công ty Unitika Ltd. (Nhật Bản) phát triển từ 1987, đã và đang áp dụng từ 1998 ở Nhà máy xử lý nước thải Hồ Shinji, tỉnh Shimane, để xử lý 1.000 m<sup>3</sup>/ngày dòng thải từ hệ xử lý bùn với hiệu suất thu hồi P lên tới 80-90%.

Ở châu Âu có các công nghệ: Phospaq™ (Hà Lan) đang áp dụng ở các nhà máy nước thải Olburgen (Hà Lan) và Stoke Bardolph (Anh); AirPrex™ (Đức, Hà Lan) đang áp dụng tại 2 nhà máy xử lý nước thải ở Đức, 1 ở Hà Lan (AirPrex Technical Factsheet, 2015 [17]); Seaborne (Đức) áp dụng ở nhà máy nước thải Gifhorn từ 2007, sản lượng 270 kg sản phẩm ngày (P-Rex, Gifhorn Technical Factsheet, 2015 [17]); ở Pháp có công nghệ của Naskeo environment (2014), sản lượng struvit đạt 90 kg/ngày [18].

Thành công nhất là công nghệ Pearl do Đại học British Columbia, Canada phát triển. Năm 2007 mới thử nghiệm quy mô pilot ở Bắc Mỹ. Chỉ sau 2 năm (2009) đã có nhà máy đầu tiên ở Durham Advanced Wastewater Treatment Facility of Clean Water Services, Portland, Oregon (USA) với công suất thu hồi là 760 tấn/năm. Đến nay, công nghệ Pearl đã hiện diện tại 17 nhà máy xử lý nước thải đang hoạt động ở 6 quốc gia (Canada, Mỹ, Anh, Hà Lan, Tây Ban Nha, Ba Lan) với tổng công suất 19.000 tấn struvit/năm dưới tên thương mại là Crystal Green® (Ostara, 2018).

**Mô hình BBR [Billund BioRefinery (Nhà máy “lọc sinh khối” Billund)]**

BBR là một nhà máy trong hệ thống của Công ty dịch vụ công Billund Vand A/S, Đan Mạch, là Công ty có trách nhiệm cung cấp dịch vụ trong lĩnh vực cấp nước, xử lý nước thải và cấp năng lượng cho thị trấn Billund và khu vực xung quanh. BBR là nhà máy xử lý nước thải (XLNT), đồng thời là nhà cung cấp năng lượng. Ở đây hệ thống XLNT được kết nối với hệ xử lý bùn yếm khí thể mới đồng phân hủy bùn từ nhà máy XLNT kết hợp với phần hữu cơ trong RSH (ODW) và các chất thải hữu cơ từ công nghiệp (OIW). BBR không những tự túc về mặt năng lượng, nó còn cung cấp cho nhu cầu xung quanh hơn 150% năng lượng (điện, nhiệt năng) “xanh” so với năng lượng nó tiêu thụ, tái tạo nước thải để tái sử dụng, và sản xuất phân hữu cơ chất lượng cao phục vụ nông nghiệp. Nó thu hồi tới 98% tiềm năng có thể thu hồi có trong nước thải và chất thải. Nhà máy BBR được coi là ví dụ ở quy mô công nghiệp về khái niệm “Kinh tế tuần hoàn”, điều này rất quan trọng đối với sự nghiệp phát triển bền vững [19].

Để đạt được các kết quả ấn tượng trên, BBR áp dụng hàng loạt tiến bộ khoa học công nghệ trong lĩnh vực xử lý nước/chất thải, trong đó trái tim của hệ thống là công nghệ phân hủy yếm khí (AD) bản quyền Exelys™ của Veolia. Công nghệ này cho phép phân hủy yếm khí chất hữu cơ sâu hơn, tăng thu hồi biogas lên 20-40% so với thông thường, lượng cặn bùn sinh ra để làm phân compost giảm về lượng đồng thời thay đổi về chất: dễ tách nước, làm khô hơn. Cùng với Exelis™, BBR còn áp dụng những thành tựu tốt nhất của ngành công nghiệp nước thải, quan trọng nhất là: STAR Utility Solutions; ANITA™Mox; BioPasteur™; Lọc đĩa Hydrotech™ [20].

Có thể coi, BBR là một bước tiến hóa của nhà máy nước thải Marselisborg đã nêu ở trên về khía cạnh thu hồi năng lượng. Bảng 1 so sánh các thông số giữa hai nhà máy về khía cạnh thu hồi năng lượng xanh.

**Bảng 1. Cân bằng năng lượng năm, so sánh BBR và nhà máy nước thải Marselisborg.**

		10° Nm <sup>3</sup>	kWh	So sánh	Marselisborg
<b>Đầu vào</b>	Biogas tự sinh	4,2	27.000.000	100,0%	
Sản lượng điện			10.800.000	40,0%	
Sản lượng nhiệt			12.100.000	44,8%	
Tôn thất			4.100.000	15,2%	
<b>TỔNG, kWh/năm</b>			22.900.000		9.628.000
<b>Xuất ra</b>	Điện năng		10.800.000	100,0%	817.000
	Nhiệt năng		5.000.000	41,3%	2.500.000
<b>Tiêu thụ năng lượng ở BBR</b>	Điện năng (mua)		3.200.000	29,6% bán	
	Nhiệt năng		7.100.000	58,7% tự sản xuất	
<b>TỔNG, kWh/năm</b>			10.300.000		6.311.000
<b>Hệ số năng lượng (sinh ra:tiêu thụ)</b>	<b>Điện năng</b>		<b>3,3</b>		
	<b>Nhiệt năng</b>		<b>2,4</b>		

Nguồn: [21].

Lưu ý là về mặt công suất nhà máy XLNT Marselisborg có công suất lớn hơn nhiều (32.918 m<sup>3</sup>/ngày) [22] so với BBR (~7.000 m<sup>3</sup>/ngày). Tuy nhiên, bên cạnh nước thải sinh hoạt, BBR còn nhận xử lý một lượng lớn nước thải, chất thải giàu hữu cơ từ các nhà máy và khu vực chăn nuôi xung quanh, bao gồm cả phần hữu cơ trong RSH với tổng lượng hữu cơ quy chất khô (DS) là 4.200 tấn/năm [22].

Về hiệu quả thu hồi năng lượng tái tạo qua phân hủy hữu cơ thành biogas và phân hữu cơ, BBR đạt tới 99,9%, trong đó 70% thành biogas. Hiệu suất phát điện - nhiệt từ biogas ở BBR đạt tới gần 85%, tổn thất nhiệt có 15,2%, đây là con số lý tưởng nếu so sánh với các nhà máy nhiệt điện ở Việt Nam hiện nay. Về khía cạnh thu hồi P (52 tấn P/năm), BBR đạt tới 96%, tuy nhiên, do áp dụng quá trình annamox (ôxy hóa yếm khí NH<sub>3</sub> bằng NO<sub>2</sub>-), hiệu suất thu hồi N (dưới dạng phân hữu cơ) chỉ đạt 32%, phần N còn lại được thải vào môi trường dưới dạng N<sub>2</sub>, ngoài ra một lượng điện năng đáng kể phải chi phí cho quá trình nitrit hóa khoảng 50%

của 182 tấn N-amôni/năm. Phân hữu cơ thu được 1.562 tấn/năm với hàm lượng dinh dưỡng khá cao: 5,9%N, 3,2%P, các con số này vượt xa các loại phân hữu cơ vi sinh hiện nay ở Việt Nam.

Có thể thấy, điểm mạnh của BBR là công nghệ AD rất hiệu quả, tận dụng phát sinh chất lượng cao về mặt dinh dưỡng và cả vi sinh, có thể sử dụng cho nông nghiệp. Hơn nữa, công nghệ BBR cho phép xử lý đồng thời cả phân hữu cơ trong RSH, điều này rất quan trọng với Việt Nam vì có thể giảm thiểu nhu cầu chôn lấp rác, tạo thuận lợi cho công nghiệp thu hồi - tái chế chất thải rắn. Điểm còn chưa hoàn thiện là phần N thu hồi còn thấp, điều này kéo theo chi phí điện năng trong quá trình xử lý TN ở đây chuyên xử lý nước.

### Kết luận và kiến nghị

Dưới áp lực của ô nhiễm môi trường, của sự cạn kiệt tài nguyên, của sự biến đổi khí hậu, mô hình “Kinh tế tuần hoàn” trong công nghiệp xử lý nước thải là điều phải và nên theo đuổi. Sự thành công của Mô hình BBR ở Đan Mạch là rất nên học tập. Mô hình BBR cho phép loại bỏ nhu cầu chôn RSH, xử lý đồng thời nước thải đô thị, phân hữu cơ trong RSH từ cả đô thị lẫn nông thôn, nước thải giàu hữu cơ, bao gồm cả nước thải chăn nuôi, góp phần phát triển nông nghiệp bền vững thông qua xử lý chất thải và cung cấp các dạng phân bón, hình thành liên kết đô thị - nông thôn kiểu mới.

Về mặt **thuận lợi**, *thứ nhất* là mức độ đô thị hóa của Việt Nam đang ở mức rất thấp so với mức trung bình của thế giới, đồng thời mức độ xử lý nước thải đô thị hiện cũng còn rất khiêm tốn so với nhu cầu phải thực hiện. Điều này có nghĩa là các đô thị mới hình thành sẽ cần có các trạm xử lý nước thải xây mới, cộng với nhu cầu xử lý RSH mới, kể cả nước thải giàu hữu cơ ở vành đai xanh xung quanh đô thị mới, điều này sẽ là thuận lợi để áp dụng ngay cách tiếp cận BBR mới với hạ tầng mới phù hợp để thay thế mô hình BHT đã được đánh giá là “sai” về mặt bảo vệ tài nguyên [2]. Ở các nước phát triển, với mức độ đô thị hóa đã rất cao, hạ tầng đô thị đã hoàn thiện ở mức cao, sẽ khó hơn nhiều để quyết định chi phí cho việc phá cũ, xây mới, Việt Nam ít khó khăn hơn về khía cạnh này.

Thuận lợi *thứ hai*, rất quan trọng là Chính phủ Việt Nam rất coi trọng chính sách “không đánh đổi môi trường lấy phát triển kinh tế”, Việt Nam có nhu cầu lớn về mặt năng lượng để phát triển, tuy nhiên COP21 vẫn cam kết giảm phát thải 8% KNK. Mô hình BBR sẽ đồng thời giải quyết bài toán vệ sinh môi trường (nước thải, rác hữu cơ), thu hồi năng lượng tái tạo và giảm phát thải KNK. Sẽ thuận lợi hơn khi một số thành phố ở Việt Nam đã bắt đầu chính sách phân loại RSH, tách riêng rác nhà bếp bắt buộc.

Thuận lợi *thứ ba* là đầu ra, nhất là đối với phân hữu cơ

chất lượng cao và an toàn cho vành đai xanh - nông thôn xung quanh các đô thị mới để phát triển nông nghiệp hữu cơ, một chính sách mới nữa của ngành nông nghiệp Việt Nam, vốn là một nước thuần nông đang phát triển. Hơn nữa, mô hình BBR còn sẵn sàng nhận các chất thải hữu cơ từ chăn nuôi, chế biến thực phẩm... ở vành đai thực phẩm xung quanh đô thị để thực hiện chu trình xử lý - tái tạo tài nguyên, giảm nhẹ gánh nặng xử lý môi trường cho nông thôn xung quanh vốn rất khó khăn về nguồn lực để xử lý môi trường, góp phần phát triển chính sách nông thôn mới.

Về mặt **khó khăn**, Việt Nam sẽ phải đối mặt với sức ỳ của “thói quen” làm theo cái mà số đông thường vẫn làm. Khó khăn tiếp theo sẽ là vấn đề tổ chức lại hệ thống vệ sinh môi trường hiện có. Khó khăn lớn nhất và cần vượt qua sớm nhất là tư duy quy hoạch. Hiện nay, quy hoạch đô thị, nông thôn gần như độc lập, sự thể hiện của các hệ thống môi trường trong đó rất mờ nhạt, cách tiếp cận theo BBR rất cần sự thống nhất, hơn nữa, một số thay đổi cần thiết trong thiết kế hạ tầng cần được nghiên cứu (ví dụ, đường dẫn nước thải từ đô thị nếu áp dụng nghiền rác nhà bếp tại chỗ hay hệ thống dẫn thải về trung tâm xử lý từ khu vực nông thôn). Khó khăn cuối cùng là vốn đầu tư, công nghệ mới nên có thế đất? Tuy nhiên, yếu tố giá có thể tham khảo từ dự án BBR và có thể khắc phục nhờ các lợi ích mà nó mang lại (điện - năng lượng, nước sạch, phân bón). Các khó khăn này chỉ có thể vượt qua được nếu tập hợp được đội ngũ cán bộ đa ngành, đa lĩnh vực có quyết tâm và sẵn sàng thực hiện các công tác nghiên cứu, tuyên truyền để có sự ủng hộ của hệ thống chính quyền các cấp và dân cư ở khu vực dự án. Đặc biệt là cần sự tham gia của những nhà đầu tư có tầm và có tâm với tương lai của đất nước.

Mô hình BBR hoàn toàn có thể áp dụng ở Việt Nam và nên áp dụng càng sớm càng tốt, khi mức độ đô thị hóa còn chưa quá cao (ở mức 35-40%). Việc áp dụng mô hình BBR đòi hỏi sự thay đổi tư duy từ bước quy hoạch, cần kết hợp quy hoạch đô thị với phát triển nông thôn. Các nội dung nghiên cứu kỹ thuật cần kết hợp với các yếu tố kinh tế để làm rõ hơn tính khả thi của phương án này. Hơn nữa, vấn đề xã hội, tổ chức thực hiện, như sự chuyển đổi vai trò của các Urenco cũng cần được quan tâm.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] IEA (2016), *Water Energy Nexus, World Energy Outlook 2016 Excerpt*, OECD/IEA 2016, p.31.

[2] Willy Verstraete and Siegfried E. Vlaeminck, *ZeroWasteWater (2010), Short-cycling of Wastewater Resources for Sustainable Cities of the Future*, Keynote Paper 2nd Xiamen International Forum on Urban Environment.

[3] Choan - hong Xing (2008), *100 years of biological wastewater treatment practice: A perspectives*, Report at Bangkok ASTS.

[4] <https://www.tienphong.vn/xa-hoi/35-chi-ngan-sach-cua-ha>

noi-va-tphcm-la-thu-gom-xu-ly-rac-1071253.tpo on Finland-Vietnam Cooperation Forum “Water Supply and Sewerage”, Organizers: Vietnam Ministry of Construction and Finnish Ministry of Foreign Affairs, Hochiminh City, 8<sup>th</sup> November 2016) (truy cập 16/04/18).

[5] World Bank (2012), *Solid Wastes*.

[6] <http://www.worldometers.info/world-population/> (truy cập 22/8/2018).

[7] Cục Hạ tầng kỹ thuật, Bộ Xây dựng (2018), *Báo cáo tại Hội thảo Việt - Nhật về thoát nước và xử lý nước thải*.

[8] World Bank (2013), *Report No: ACS7712 Vietnam Urban Wastewater Review*, 158p.

[9] Cao Thế Hà, Lê Văn Chiêu, Vũ Ngọc Duy, Nguyễn Thị An Hằng, Nguyễn Trường Quân, Cao Thế Anh, Trần Mạnh Hải, K. Fukushi, H. Katayama (2018), *Cần cách tiếp cận mới để bảo vệ môi trường Việt Nam trong bối cảnh đô thị hóa, hiện đại hóa nông thôn nhằm đạt các mục tiêu phát triển bền vững*, Báo cáo tại Hội nghị khoa học của Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

[10] Intended Nationally Determined Contribution (INDC) of Viet Nam, 2015.

[11] Udo Wiesmann, In Su Choi, Eva - Maria Dombrowski (2007), *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

[12] Env, Ana, Tech (2010), *Applications and New Developments*, Editor Herbert H.P. Fang, Imperial College Press.

[13] G. Zeeman (2017), *Source separation, the future for efficient resource recovery*.

[14] A. van Haandel and J. van der Lubbe (2007), *Handbook of Biol. Wastewater Treatment. Design and Optimization of activated sludge systems*.

[15] Katrin Eitrem Holmgren, Hong Li, Willy Verstraete, Peter Cornel (2015), *State of the Art Compendium Report on Resource Recovery from Water*.

[16] <https://stateofgreen.com/en/partners/aarhus-vand/solutions/marselisborg-wwtp-energy-neutral-water-management/> (truy cập 4/7/2018).

[17] [www.p-rex.eu](http://www.p-rex.eu) (truy cập 4/7/2018).

[18] Platform, 2016.

[19] Bro, Bjarne, Raju, S. Chitra, Gadegaard, Theis N. Billund BioRefinery (2017), *How WWTPs Can Contribute to a Circular Economy, Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2017: Session 210 through Session 219*, pp.401-412.

[20] VEOLIA Wave #1 Insights from Veolia Water Technologies, 4/2015.

[21] Gilbert, A.B. Billund BioRefinery (2016), *Advancing the Recycle Circle*, European Biosolids and Organic Resources Conference, 15-16 Nov. 2016, Edinburgh, Scotland.

[22] <https://stateofgreen.com/en/partners/aarhus-vand/solutions/marselisborg-wwtp-energy-neutral-water-management/> (truy cập 4/7/2018).