

Tổng quan về kỹ thuật yếm khí cao tải trong xử lý nước thải

Trần Mạnh Hải¹, Nguyễn Hoài Châu¹, Nguyễn Triều Dương¹,
Cao Thế Hà², Nguyễn Việt Hà², Trần Đức Dự²

¹Viện Công nghệ môi trường, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

²Trung 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

Xử lý yếm khí (YK) là công nghệ lâu đời, gần đây khi biogas được coi là một nguồn năng lượng tái tạo, nó trở nên hấp dẫn và được quan tâm phát triển. Theo Lettinga [13] phương pháp này có nhược điểm là tốc độ sinh trưởng vi khuẩn YK thấp, tuy nhiên những kỹ thuật hiện đại đã khắc phục được hạn chế này. Các kỹ thuật YK ngày nay chấp nhận tải lượng từ hàng chục tới trên 100 kg COD/m³/ngày với hiệu suất thường là 70-90% [11, 12].

Nghiên cứu [4] cho thấy, khi BOD nước thải vượt 1000 mg/l thì hệ YK (hệ UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket) kinh tế hơn hiêm khí (bùn hoạt tính) cả về mặt xây dựng cơ bản lẫn phí vận hành - bảo trì. Cũng theo [4], có ba nhóm kỹ thuật YK: (1) hệ phản ứng với vi sinh phân tán; (2) hệ vi sinh cố định trên vật liệu mang và (3) hệ với lớp bùn giả lỏng hoặc giãn nở. Kỹ thuật UASB do Lettinga nghiên cứu từ những năm 70 thuộc nhóm (3), áp dụng từ năm 1980 sử dụng vi sinh dạng hạt có mật độ rất cao (tới 80-100 g/l).

Theo [11], kỹ thuật YK hiện đại bắt đầu từ bồn khuấy trộn hoàn toàn, bồn tiếp xúc, bước ngoặt là hệ UASB, đỉnh cao là các kỹ thuật tiếp xúc và tách vi sinh rất tốt, đó là EGSB (Expanded Granular Sludge Bed), IC (Internal Circulation). Nếu coi kỹ thuật bồn phản ứng khuấy trộn hoàn toàn có năng suất xử lý so sánh trên đơn vị thể tích là 1 thì bồn tiếp xúc là 5, UASB là 25 và EGSB, IC là 75. Bài viết này tóm tắt sự phát triển của công nghệ xử lý YK, tập trung vào hệ thống xử lý YK cao tải UASB, EGSB, IC.

Từ khóa: EGSB, IC, UASB, yếm khí cao tải.

Chỉ số phân loại 1.7

Giới thiệu chung

Từ những năm 70 của thế kỷ trước, sự thành công trong công nghiệp của kỹ thuật UASB dẫn tới một trào lưu nghiên cứu cả về khía cạnh hàn lâm lẫn thực tiễn về tiềm năng của các vi sinh dạng hạt. Trong khoảng 30 năm trở lại đây, nhiều thiết kế khác nhau được đề xuất, ứng dụng của kỹ thuật YK bắt đầu từ nước thải công nghiệp đậm đặc đã bắt đầu lan sang nước thải sinh hoạt [10].

Tới nay, những ưu thế của các kỹ thuật vi sinh YK dạng hạt đã được khẳng định, đó là chi phí vận hành thấp, thiết bị nhỏ gọn, thu hồi được năng lượng dưới dạng biogas, sản sinh ít bùn. Theo đại diện Công ty Biwater (Pty) Ltd, kỹ thuật IC có khả năng chịu tải và năng suất là cao nhất trong các kỹ thuật hiện có. Chính vì yếu tố này, số nhà máy sử dụng hệ xử lý cao tải tăng trưởng rất ấn tượng.

Các kỹ thuật vi sinh YK dạng hạt (UASB) bắt đầu từ các nhà máy đường vào giữa những năm 70 với tải lượng thiết kế 4-12 kg COD/m³/ngày, các biến thể của UASB (BFB, EGSB, IC) với tải lượng thiết kế lên đến 20-30 kg COD/m³/ngày bắt đầu được đưa vào ứng dụng những năm cuối thế kỷ XX, tới đầu thế kỷ XXI đã được ứng dụng ở trên 65 quốc gia với trên 1400 nhà máy đang hoạt động, hiện có tới trên 16 công ty đa quốc gia đang hoạt động trong lĩnh vực này [7]. Năm 1997, cả thế giới mới có 32 nhà máy IC (18 xử lý nước thải bia, 6 xử lý nước thải chế biến khoai tây, 2 cho nước thải sản xuất bánh kẹo, 1 cho mỗi ngành công nghiệp đường, bột giấy, tinh bột, sản xuất rượu, sữa, thực phẩm); tới tháng 4.2003 con số đã lên tới 178 hệ IC được lắp đặt trên toàn thế giới: 89 cho sản xuất bia và nước uống, 39 cho công nghiệp thực phẩm, 33 cho công nghiệp giấy, 9 cho cất cồn rượu, 8 cho công nghiệp hóa

OVERVIEW OF THE HIGH RATE ANAEROBIC TECHNIQUES IN WASTEWATER TREATMENT

Summary

Anaerobic processing is an old technology. Recently, Anaerobic Treatment (AT) has become attractive and be developed due to biogas considered a renewable energy source. According to Lettinga [13], although the growth rate of anaerobic bacteria is low, this weakness has gradually been overcome with modern AT technology. The present AT techniques accept the organic loading rates from tens to over 100 kg COD/m³/day with its performance from 70% to 90% [11, 12]. The study [4] shows that when the biochemical oxygen demand (BOD) of the effluent exceeds 1000 mg/l, the cost of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) is lower than that of activated sludge treatment, both in terms of basic construction and maintenance free. According to [4], there are three groups of anaerobic techniques: (i) the reactors with dispersed microorganisms; (ii) the microorganisms immobilized on carrying material; and (iii) the Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) system. The UASB technique invented by Lettinga in the 1970s is classified into the group (iii), and has been applied since 1980 using granular microorganisms with very high density (up to 80-100 g/l).

According to [11], the modern AT techniques began at the continuous stirred-tank reactor (CSTR), then the anaerobic contact reactor (CR), turning-point with the UASB system, peak with the Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) and the Internal Circulation Reactor (IC). Suppose that the CSTR has the relative capacity of 1, then 5 for CR, 25 for UASB, 75 for EGSB and IC. This article summarize the development of anaerobic treatment technology and focuses on the high-rate anaerobic treatment systems as UASB, EGSB, IC.

Keywords: Anaerobic, EGSB, IC, UASB.

Classification number 1.7

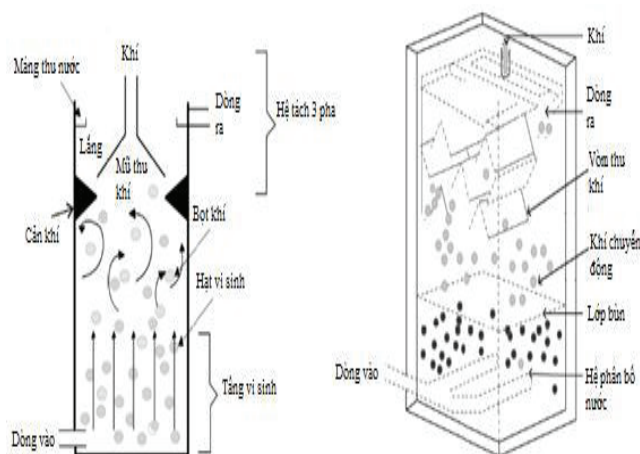
chất (kể cả thuộc da và dệt nhuộm). Đặc trưng công nghệ, các thông số thiết kế và vận hành thực tế dưới đây sẽ cho thấy khả năng ứng dụng lớn của các kỹ thuật vi sinh YK cao tải.

Các kỹ thuật YK cao tải

Kỹ thuật phản ứng ngược dòng với vi sinh dạng hạt (UASB)

UASB là kỹ thuật đầu tiên sử dụng vi sinh dạng hạt tự sinh không chất mang được đề xuất bởi GS. Lettinga. Đây là kỹ thuật được sử dụng rộng rãi nhất để xử lý nước thải có độ ô nhiễm hữu cơ cao, kể cả nước thải sinh hoạt [5, 9, 14, 20].

Nguyên tắc căn bản của kỹ thuật UASB là sử dụng khả năng tạo thành hạt vi sinh của một số dạng vi sinh YK nhất định, chúng tạo thành tập hợp keo tụ đặc, thường được gọi là hạt vi sinh. Hạt vi sinh có khả năng lắng rất tốt và vì vậy dễ tích lũy trong khối phản ứng, trong khi loại không có khả năng tạo hạt sẽ trôi theo nước ra ngoài. Với phương thức chọn lọc vi sinh này, mật độ sinh khối trong bể phản ứng đạt rất cao, thông thường 20-30 kg/m³ tính theo hàm lượng chất hữu cơ. Nét đặc trưng nổi bật của hệ xử lý UASB là bộ phận tách ba pha. Nhờ các cấu trúc cản khí (sắp xếp theo kiểu dích dắc, xen phủ lẫn nhau của các vòm thu khí) nên dòng khí được thu về các vòm thu khí, tại đó khí thoát ra khỏi nước và tách khỏi các hạt vi sinh. Bộ phận tách pha chia bể YK thành hai vùng: vùng phân hủy nằm ở dưới và vùng lắng ở phía trên.



Hình 1: sơ đồ hệ xử lý UASB [15]

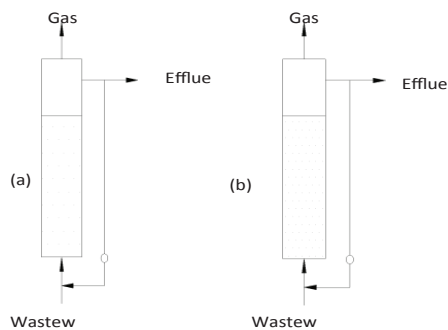
Bể xử lý theo kỹ thuật UASB có các đặc trưng chính sau: nước thải cần xử lý được phân bố đều vào đáy bể chảy ngược lên phía trên với tốc độ 1÷2 m/h, cùng với khí tạo thành để duy trì trạng thái lơ lửng của tầng vi sinh (hình 1), trên lớp bùn là lớp nước trong không chứa sinh khối và trên cùng là lớp tách pha (rắn - lỏng - khí).

Kỹ thuật phản ứng với lớp vi sinh dạng lưu thể BFB (Biofilm Fluidized Bed)

Hệ BFB có vi sinh dạng hạt trên chất mang, nước thải thô được đưa vào bồn qua lớp vật liệu rắn kích thước nhỏ (ví dụ cát với $d \sim 0,2-0,8$ mm) ở tốc độ đủ lớn để các hạt lơ lửng và trở thành một dạng lưu thể. Ở trạng thái này, các hạt rắn có diện tích bề mặt riêng rất lớn để vi khuẩn có thể bám dính, khi đó mật độ vi sinh có thể lên tới $10-40$ kg/m³ [2]. Đối với các hệ hiếu khí, không khí sẽ được cấp vào bằng cách tuần hoàn hỗn hợp bùn nước từ bể lắng qua bộ bão hòa khí [1]. Đối với các loại nước thải có nhu cầu oxy lớn, oxy không khí có thể được cấp trực tiếp vào bồn, khi đó ta có hệ BFB ba pha (three-phase BFB reactor) [6, 17, 18]. Hệ BFB phù hợp nhất đối với những chất thải hữu cơ hoặc N-amoni yêu cầu vi sinh có tuổi cao trên 15 ngày, có SS thấp (dưới 100 mg/l) [16].

Kỹ thuật phản ứng với lớp vi sinh dạng hạt dẫn nở EGSB (Expanded Granular Sludge Bed)

EGSB [8, 23] là tổ hợp các đặc trưng của UASB và BFB. Sinh khối dạng hạt sẽ được nâng lên nhờ tốc độ dòng nước (~ 10 m/h) và biogas (7 m/h) rất gần với hệ BFB. Nhờ tốc độ ngược dòng cao, khuấy trộn nội rất tốt nên EGSB có thể chịu tải đầu vào tới 30 kg COD/m³/ngày để xử lý các loại nước thải từ công nghiệp hóa chất, sinh hóa và sinh học [22].



Hình 2: sơ đồ thiết bị phản ứng BFB (a) và EGSB (b)

Có thể thấy, BFB và EGSB (hình 2) nhìn rất giống nhau bởi cả hai hệ này sử dụng vật liệu mang dạng hạt cho vi khuẩn bám dính, dưới tác động của dòng nước, hạt mang sinh học sẽ lơ lửng. Sự khác biệt chính giữa BFB và EGSB là BFB cần tốc độ dâng cao (tuần hoàn) phải lớn để duy trì sự phân tán đồng đều hạt vi khuẩn, thể tích dẫn nở của lớp bùn đạt 25 đến 300%. Trong kỹ thuật EGSB, tốc độ dâng nước là cần thiết để duy trì độ giãn nở của lớp bùn vi sinh vật khoảng 15-30% so với thể tích ban đầu; các hạt bùn lơ lửng là do dòng chảy và một phần do

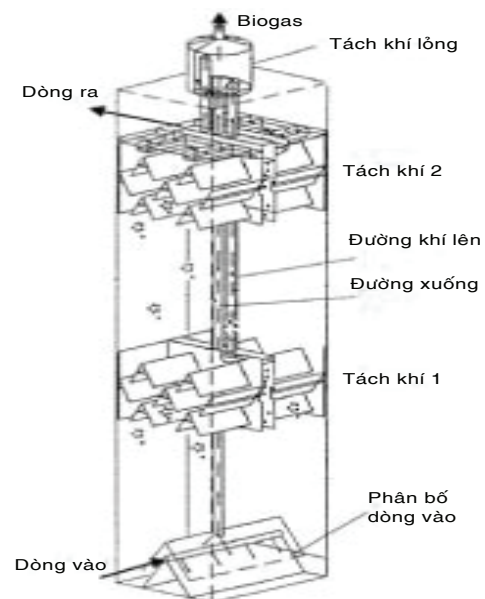
sự tương tác với các hạt xung quanh. Vật liệu mang diện tích bề mặt $9-11$ nghìn m²/m³, độ xốp 45-55% trong trường hợp EGSB và $4-10$ nghìn m²/m³, độ xốp 50-90% trong trường hợp BFB. Hai phản ứng có hiệu quả xử lý rất cao. Vấn đề là trong thời gian hoạt động, các hạt nhỏ mới hình thành sẽ bám dính và làm tăng độ dày của lớp vi sinh vật. Các hạt nhẹ hơn sẽ có xu hướng tích lũy nổi lên bề mặt và thoát ra ngoài thiết bị phản ứng. Do đó, cấu trúc chà sát là cần thiết để loại bỏ vi sinh dư thừa và đưa vật liệu mang trở lại thiết bị phản ứng.

Hãng Biothane B.V. cũng xây dựng vài chục hệ EGSB dưới tên thương mại Biobed để xử lý các loại nước thải công nghiệp khác nhau (thực phẩm, hóa chất, hóa dược) ở nhiều nước.

Kỹ thuật phản ứng tuần hoàn nội IC (Internal Circulation)

Mô tả hệ thống:

Kỹ thuật tuần hoàn nội bộ IC được hãng Paques nghiên cứu phát triển [19]. Hệ hoạt động dựa trên nguyên tắc của hai hệ thống UASB xếp chồng lên nhau (hình 3). Khí tách ra từ bộ phận tách pha phía dưới (lưu lượng lớn do tải lượng cao) được thu lại vào khoang thu khí và đi lên bộ phận tách khí lỏng phía trên qua đường khí lên. Khi dòng khí chuyển động lên sẽ cuốn theo nước và bùn từ vùng phân hủy cao tải. Sau khi tách khí, nước và vi sinh được đưa trở lại vào vùng phản ứng, xuống đáy bể, hòa trộn với dòng vào qua đường ống dẫn xuống. Dòng nước và vi sinh quay ngược lại vùng phản ứng cao tải là tính chất đặc trưng của kỹ thuật IC và vì vậy có tên là tuần hoàn nội bộ.



Hình 3: sơ đồ hệ xử lý tuần hoàn nội bộ

Thành phần cấu tạo cơ bản của hệ xử lý IC gồm hệ phân bố nước đầu vào, hệ tuần hoàn nội bộ, vùng phản ứng cao tải ở phía dưới và vùng phản ứng tải lượng thấp (làm sạch sâu) nằm ở phía trên. Vùng phản ứng cao tải kéo dài cho tới tận phía dưới của bộ tách khí thứ nhất, chiếm 55-65% chiều cao của cột nước và tầng hạt vi sinh cũng có thể chiếm trọn chiều cao của nó (bộ tách khí thứ nhất có chiều cao khoảng 2 m). Do mật độ vi sinh dạng hạt ở ngăn dưới lớn, tải lượng hữu cơ cao, nên hệ có năng suất phân hủy hữu cơ rất cao và sinh ra nhiều biogas. Do tốc độ dòng nước đi lên lớn nên ngăn này hoạt động giống hệ EGSB hơn là hệ UASB. Điểm khác biệt là trong hệ này ở mỗi ngăn đều có cơ cấu tách ba pha và thu khí nối với ống lên, ống lên - riser hoạt động như một airlift bơm kéo cả khí (biogas) - lỏng (nước thải) - rắn (hạt vi sinh) lên bồn cao vị.

Hệ thống tuần hoàn nội bộ bao gồm: hệ tách khí phía nửa dưới nhằm tách khí của vùng phản ứng cao tải, đưa khí đó qua đường ống dẫn lên bộ phận tách khí - lỏng - rắn ở phía trên của bồn chính, khí được tách ra khỏi chất lỏng và bùn ra khỏi hệ xử lý trong khi bùn và nước theo ống xuống - downcomer quay trở lại khoang phản ứng cao tải. Trong ngăn dưới, tốc độ dâng nước được thiết kế ở mức 10-30 m/h. Ngăn trên thực tế thực hiện xử lý lần hai nên chịu tải thấp, tốc độ dòng lên chỉ khoảng 2 đến 10 (thường 4-8) m/h. Để bố trí được các cơ cấu đã nêu, hệ IC thường có dạng bồn trụ rất cao, độ cao lên tới 25 m, cùng với năng suất xử lý thuộc loại cao nhất nên nó chiếm diện tích nhỏ nhất.

Như vậy, có thể nhận xét: (1) so với hệ EGSB thì hệ IC phức tạp hơn (hai lần tách 3 pha), hoạt động như hệ EGSB, tuy nhiên nhờ cơ cấu tuần hoàn nội khuấy trộn sẽ tốt hơn nên năng suất xử lý sẽ cao hơn, ít chi phí bơm tuần hoàn hơn để duy trì tốc độ dâng nước lớn. Đây là lý do vì sao hệ IC hiện được cho là có năng suất xử lý cao nhất; (2) về khía cạnh thiết kế, chế tạo, hệ EGSB đơn giản hơn, hệ IC rất khó thiết kế; (3) IC sử dụng khí sinh ra để khuấy trộn nên giảm được năng lượng phục vụ khuấy trộn, do đó IC là hệ kinh tế nhất trong các hệ nêu trên.

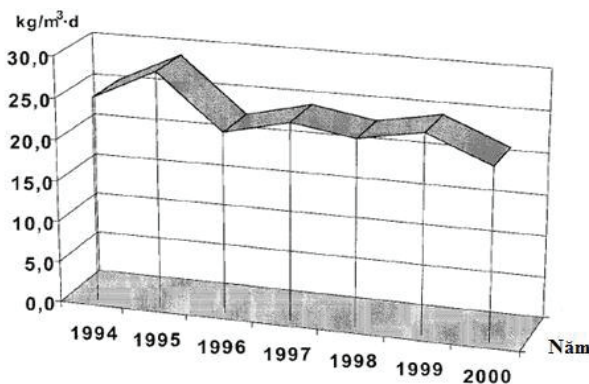
Các đặc trưng công nghệ:

- Tải lượng bùn: do được khuấy trộn mạnh, quá trình chuyển khối thuận lợi nên tải lượng bùn trong kỹ thuật IC cao hơn so với trong kỹ thuật UASB. Giá trị sử dụng để thiết kế nằm trong khoảng 0,55-1,0 kg COD/kg bùn/ngày, trung bình là 0,7-0,8 kg COD/kg bùn/ngày.

- Tải lượng hữu cơ: tải lượng hữu cơ áp dụng trong kỹ thuật IC cao hơn nhiều so với kỹ thuật truyền thống UASB (bảng 1).

Bảng 1: tải hữu cơ tính trên đơn vị thể tích cho ba hệ thống xử lý yếm khí phổ biến [3]

Thiết bị	Tải thể tích - OLR (kg COD/m ³ /ngày)
UASB	4-15
EGSB	5-25
IC	15-30



Hình 4: tải lượng hữu cơ áp dụng trong kỹ thuật IC theo thời gian [22]

Tải lượng hữu cơ áp dụng trong kỹ thuật IC thời gian từ năm 1994 đến năm 2000 có giá trị trung bình 22 kg COD/m³/ngày (hình 4). Giá trị đó khá ổn định trong thời gian dài đã được kiểm nghiệm trong thực tiễn chứng tỏ hiệu quả xử lý cao của hệ IC [22].

Tuy nhiên, giá trị tải lượng 22 kg COD/m³/ngày không phải là một con số cố định đối với mọi nguồn nước thải, nó phụ thuộc vào tính năng sinh hủy của chất ô nhiễm trong dòng thải và các điều kiện kèm theo. Với một vài nguồn thải, tải lượng hữu cơ có thể áp dụng tới 25, thậm chí 30 kg COD/m³/ngày, trong khi đối với một số loại nước thải khác chưa tới 20 kg COD/m³/ngày.

- Tốc độ dòng: trong vùng phản ứng cao tải, tốc độ dòng vào, dòng hồi lưu nội bộ, dòng hồi lưu ngoại vi và dòng khí đóng vai trò quan trọng đối với quá trình chuyển khối trong vùng đó. Tốc độ dòng trong vùng phía trên thường được thiết kế nhỏ hơn 8 m/h nhằm mục đích giữ vi sinh không trôi ra ngoài. Giá trị tốc độ dòng trong khoảng trên từ bảng 2 cho thấy, giá trị vận hành trong thực tế có trường hợp cao hơn đối với dòng thải loãng và hệ hoạt động ổn định. Tốc độ dòng tuần hoàn nội bộ bị khống chế bởi tốc độ hình thành khí, thấp đối với dòng thải loãng, cao đối với dòng thải đặc, có thể dưới 100% và cao có thể đạt tới 1.000%. Tốc độ dòng trong khoảng dưới sử dụng trong thiết kế không vượt quá 20 m/h. Tốc độ thoát khí cần duy trì không vượt quá 12 m/h. Số liệu thu được từ vận hành cho thấy tiêu chuẩn trên đều được thỏa mãn.

Bảng 2: tóm tắt về các đặc trưng của các hệ sử dụng bùn vi sinh dạng hạt có tầng cường khuấy trộn [3]

Kiểu bồn phản ứng	Tên thương mại	Kiểu dòng chảy	Tốc độ nước	Tỷ lệ cao/ đường kính	Cơ cấu khuấy	Đã ứng dụng
BAS	CIRCOCX, Paques (Hà Lan)	Hỗn hợp	0,4-0,8 m/s (tuần hoàn)	4-5	Dùng khí	Nước thải sản xuất bia
EGSB	BIOBED, Biothane (USA)	Từ dưới lên	10-15 m/h	4-5	Dòng nước, biogas	Nước thải sản xuất formalin từ metanol
IC	IC, Paques (Hà Lan)	Hỗn hợp	Vùng dưới: 10-30 m/h Vùng trên: 4-8 m/h	3-6	Biogas	Nước thải sản xuất inuline và fructose từ quả chicory

Chú thích: BAS (biofilm airlift suspension)

- Thời gian lưu thủy lực: bảng 3 cho thấy, tùy theo loại nước thải mà thời gian lưu có thể khác nhau nhưng không quá 9 h. Kết quả này có được do mật độ sinh khối cao, tiếp xúc lỏng/rắn (nước thải/hạt vi sinh) tốt, lưu giữ sinh khối (tách lỏng/rắn - hạt vi sinh/nước thải) và tuần hoàn tốt.

Bảng 3: một số thông số kỹ thuật của hệ IC [21]

Nguồn thải	Tải thể tích, (kg/m ³ /ngày)	Thời gian lưu (h)	Mật độ sinh khối tính theo hữu cơ (kg/m ³)	Tải khối lượng (kg COD/kg bùn/ngày)	Tốc độ dâng nước khoảng trên (m/h)	Mức tuần hoàn (%)	Tốc độ dâng nước khoảng dưới (m/h)	Tốc độ khí trong ống lên (m/h)	COD đầu vào (kg/m ³)	COD đầu ra (kg/m ³)
Insulin (B)	30,3	6,3	32,4	0,94	3,8	420	19,6	9,8	7,9	2,0
Sữa (B)	15,2	2,7	-	-	8,0	60	12,6	2,8	1,7	0,84
Khoai tây (B)	33,4	5,2	30,2	1,10	3,8	420	19,9	9,9	7,2	1,25
Bia (B)	26,0	2,2	27,0	0,96	8,9	140	21,1	7,5	2,4	0,48
Cà phê (A)	28,5	12,6	34,3	0,83	6,3	870	19,8	8,4	15	2,80
Khoai tây (B)	21,0	6,9	37,8	0,56	2,9	350	13,1	6,3	6,0	1,00
Tinh bột (A)	26,4	22,7	47,6	0,55	4,2	1510	19,9	9,7	25	3,70

Chú thích: A: số liệu thiết kế; B: số liệu vận hành

- Mật độ sinh khối: trên cơ sở tốc độ dòng chảy ngược cao, chiều cao của tầng vi sinh được nói rộng đáng kể, dẫn đến mật độ sinh khối trong tầng bùn giảm so với trong kỹ thuật UASB. Mật độ sinh khối trung bình trong tầng bùn đạt 60-90 kg/m³, cao nhất cũng có thể tới 100 kg/m³. Nếu trong thành phần sinh khối không chứa nhiều hợp chất canxi thì thành phần hữu cơ trong hạt vi sinh chiếm 75-90%. Chiều cao của tầng hạt vi sinh chiếm 60-70% của cột nước, với cột nước cao 24 m thì chiều cao của tầng vi sinh nằm trong khoảng 16-17 m. Mật độ sinh khối tính theo phần hữu cơ nằm trong khoảng 30-50 kg/m³, trung bình là 35 kg/m³ (bảng 3).

Kết luận

Thiết bị phản ứng màng vi sinh dạng hạt đã được nghiên cứu và phát triển trong 3 thập kỷ qua cho các ứng dụng xử lý nước thải. Một số thông số kỹ thuật về ứng dụng đã được trình bày trong tổng quan này.

Sự ra đời của các hệ phản ứng kiểu EGSB và IC

đã nâng kỹ thuật xử lý YK lên tầm cao mới. Hai kỹ thuật này có năng suất xử lý gần tương đương nhau, trong đó IC là hệ thống có năng suất xử lý cao nhất và kinh tế nhất.

Tài liệu tham khảo

[1] Cooper P.F (1981), "The use of biological fluidised beds for the treatment of domestic and industrial wastewaters", *Chem. Eng.* 371, 373-376.

[2] Cooper P.F, Sutton P.M (1983), "Treatment of wastewaters using biological fluidized beds", *Chem. Eng.* 392.

[3] David Tshilumba Mutombo (2004), *Internal Circulation Reactor: Pushing the Limits of Anaerobic Industrial Effluents Treatment Technologies*, in Proceedings of the 2004 Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial Conference, 2-6 May 2004, Cape Town, South Africa, ISBN: 1-920-01728-3, pp.608-616.

[4] Eckenfelder W.W, Patoczka J.B and Pulliam C.W (2006), *Anaerobic vs Aerobic Treatment in the USA*, A Ware Incorporated, 227 French Landing, Nashville, TN37228, USA.

[5] Elmitwals T.A, Sayed S (2003), "Decentralised treatment of concentrated sewage at low temperature in a two step anaerobic system: two upflow hybrid septic tanks", *Wat. Sci. Technol.* Vol.48, No.6, 219-226.

[6] Fan L.S, Fujie K, Long T.R, Tang W.T (1986), "Characteristics of draft tube gas - liquid - solid fluidized bed bioreactor with immobilized living cells for phenol degradation", *Biotechnol. Bioeng.* 30, 498-504.

[7] Foresti E (2002), "Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives", *Wat. Sci. Technol.* Vol.45, No.10, 181-186.

[8] Frankin R.J (2001), "Full-scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater", *Wat. Sci. Tech.* 44 (8), 1-6.

[9] Frankin R.J et al (1992), "Application of the Biobed upflow fluidized-bed process for anaerobic waste water treatment", *Water Sci. Technol.* 25, 373-382.

[10] Hulshoff Pol L.W, Euler H, Schroth S, Wittur T & Grohganz D (1998), *GTZ sectoral project "Promotion of anaerobic technology for the treatment of municipal and industrial wastes and wastewater"*, in Proceedings of the Fifth Latin-American Seminar on Anaerobic Wastewater Treatment, Vina del Mar, Chile, October 1998, 27-30.

[11] Kassam Z.A, Yerushalmi L. and Guiot S.R (2003), *A market study on the anaerobic wastewater treatment systems*, Water, Air, and Soil Pollution 143: 179-192, Kluwer Academic Publishers.

[12] Lettinga G (1995), "Anaerobic digestion and wastewater treatment systems", *Antonie van Leeuwenhoek*, Vol.67, Issue 1, pp 3-28.

[13] Singh K.S, Viraraghavan T (2003), "Impact on performance, microbiological, and hydrodynamic aspect of UASB reactor treating municipal wastewater", *Wat. Sci. Technol.* Vol.48, No.6, 211-217.

[14] Srinavas T (2008), *Environmental biotechnology*, New age international (P) limited Publ.

- [15] Sutton P.M, Mishra P.N (1990), *Fluidized bed biological wastewater treatment: effects of scale-up on system performance*, in: P.M. Sutton and Associates, *Biological Fluidized Beds for Water and Wastewater Treatment: a User's Forum*, Conference Proceedings, Ann Arbor, pp. 1-12.
- [16] Tang W.T, Fan L.S (1987), "Steady state phenol degradation in a draft tube gas - liquid - solid fluidized bed bioreactor", *AIChE J*, **33**, 239-249.
- [17] Trinet F, Heim R, Amar D, Chang H.T, Rittmann B.E (1991), "Study of biofilm and fluidization of bioparticles in a three phase liquid fluidized bed reactor", *Water Sci. Technol*, **23**, 1347-1354.
- [18] Van Haandel A.C, Lettinga G (1994), *Anaerobic sewage treatment*, John Wiley & Sons.
- [19] Van Lier J (2007), *Current trends in anaerobic digestion; diversifying from waste(water) treatment to resource oriented conversion techniques*, in: Proceedings of the 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, Plenary Session 4, September 23-26, Brisbane, Australia.
- [20] Vellinga S.H.J (1986), *Anaerobic purification equipment for waste water*, US Patent No. 4,609,460.
- [21] W. Bischofberger N, Dichtl K.H, Rosenwinkel C.F, Seyfried B. Bohnke (Ed) (2005), *Anaerobtechnik 2.*, Vollstaendig Uebersetzte Auflage. Springer.
- [22] Zoutberg G.R, de Been P (1997), "The Biobed EGSB (expanded granular sludge bed) system covers shortcomings of the upflow anaerobic sludge blanket reactor in the chemical industry", *Water Sci. Technol*, **35**, 183-188.
- [23] Zoutberg, G.R, Frankin R (1996), "Anaerobic treatment of chemical and brewery waste water with a new type of anaerobic reactor: the Biobed EGSB reactor", *Water Sci. Technol*, **34**, 375-381.