ỨNG DỤNG PLASMA LẠNH ĐỂ XỬ LÝ NƯỚC: TỔNG HỢP TÀI LIỆU

THE USE OF COLD PLASMA FOR WATER TREATMENT - A REVIEW

Nguyễn Văn Dũng, Đặng Huỳnh Giao

Trường Đại học Cần Thơ; nvdung@ctu.edu.vn

Tóm tắt - Công nghệ plasma lạnh đã được nghiên cứu và ứng dụng thành công trong lĩnh vực xử lý nước trên thế giới và gần đây công nghệ này đã thu hút được sự quan tâm của các nhà khoa học ở Việt Nam. Plasma lạnh thông thường được tạo ra do sự phóng điện ở điện áp cao. Phóng điện màn chắn và phóng điện vầng quang là hai phương pháp khả thi nhất có thể ứng dụng vào thực tế. Công nghệ plasma lạnh cho thấy có khả năng diệt khuẩn cao, phân rã hợp chất hữu cơ và xử lý kim loại nặng. Bài báo này tổng hợp các phương pháp tạo plasma lạnh, sự tương tác giữa plasma và nước cần xử lý, và các kết quả nghiên cứu cũng như tác động phụ của công nghệ này. Ngoài ra, bài báo cũng giới thiệu mô hình sẽ được nghiên cứu và phát triển.

Từ khóa - plasma lạnh; xử lý nước; cao áp; phóng điện màn chắn; phóng điện vầng quang

Abstract - Cold plasma for water treatment has been studied and successfully applied to water treatment in the world and has attracted scientists in Vietnam in recent years. Cold plasma is normally generated with electric discharges in high voltage. Dielectric barrier discharges and pulsed corona discharges are the most feasible methods. Cold plasma technology has shown to efficiently destroy bacteria, decompose organic compound and deal with heavy metals. This paper reviews the methods of generating cold plasma, interaction between cold plasma and water, research achievements as well as unexpected impacts. In addition, this paper also introduces an experimental model being studied and developed in the near future.

Key words - cold plasma; water treatment; high voltage; dielectric barrier discharges; pulsed corona discharges

1. Đặt vấn đề

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) gồm 13 tỉnh và thành phố với tổng số dân gần 18 triệu người, chiếm 20% dân số cả nước, trong đó khoảng 80% dân số sống ở nông thôn. Hiện nay, tại một số vùng nông thôn của ĐBSCL không có nước sinh hoạt đạt quy chuẩn nước sạch. Tỉ lệ người dân chưa có nước sinh hoạt đạt QCVN02:2009/BYT chiếm khoảng 63% [1]. Đa phần các hộ dân sử dụng trực tiếp nguồn nước mặt bị ô nhiễm từ sông và kênh rạch làm nước sinh hoạt sau khi xử lý sơ bộ bằng phèn. Ngoài ra, ở các tỉnh như Bạc Liêu, Cà Mau, Trà Vinh và Sóc Trăng, người dân nông thôn chủ yếu sử dụng nước ngầm. Nguồn nước này thường được sử dụng trực tiếp hoặc chỉ qua xử lý lọc đơn giản nên hầu hết chỉ đạt tiêu chuẩn hợp vệ sinh. Kết quả quan trắc cho thấy nguồn nước mặt trên các sông Tiền và sông Hậu bị nhiễm bẩn chất hữu cơ và vi sinh như BOD, COD, Coliform, *E. coli*, H_2S, NH_4…. Ngoài ra, nước ngầm ở một số tỉnh thuộc ĐBSCL bị ô nhiễm chất hữu cơ (NO_3^-, NH_4^+), kim loại nặng (Fe, As) và vi sinh (Coliform, *E. Coli*). ĐBSCL là vùng trọng điểm của cả nước về sản xuất thủy sản. Các tỉnh ở ĐBSCL hiện đang phát triển mạnh nuôi thủy sản với các hình thức thâm canh và bán thâm canh. Tuy nhiên có đến gần 60% số hộ dân không xử lý nước trước khi cấp vào bể/ao nuôi [2]. Đây chính là điều kiện để mầm bệnh phát triển và lây lan.

Công nghệ plasma lạnh với ưu điểm nổi bật là công nghệ xanh và thân thiện môi trường đã được nghiên cứu từ lâu trên thế giới [3-10] và đã bắt đầu được nghiên cứu ở nước ta trong thời gian gần đây [11-13]. Plasma lạnh cho thấy khả năng diệt khuẩn hiệu quả cũng như khả năng phân rã hợp chất hữu cơ và xử lý kim loại nặng [5, 7, 8, 10-13]. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các hệ thống xử lý kết hợp plasma lạnh với các công nghệ khác như keo tụ - tạo bông và lọc cơ học để xử lý nước sông hoặc nước ngầm thành nước sinh hoạt hoặc nước cấp nuôi trồng thủy sản có ý nghĩa rất thiết thực trong việc nâng cao chất lượng cuộc sống của người dân, cũng như phát triển nuôi trồng thủy sản theo hướng bền vững của vùng ĐBSCL. Bên cạnh yếu tố kỹ thuật, giá thành thiết bị cũng là một yếu tố quan trọng quyết định loại công nghệ plasma lạnh sẽ được nghiên cứu và phát triển để phù hợp với điều kiện kinh tế của người dân vùng nông thôn.

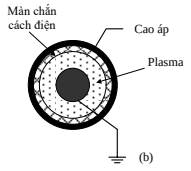
Nghiên cứu này sẽ tổng kết các kết quả đã đạt được trong lĩnh vực ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý nước trên thế giới và ở nước ta. Từ đó giới thiệu mô hình xử lý nước bằng công nghệ plasma lạnh sẽ được nghiên cứu và phát triển.

2. Công nghệ tạo plasma lạnh và kết quả nghiên cứu

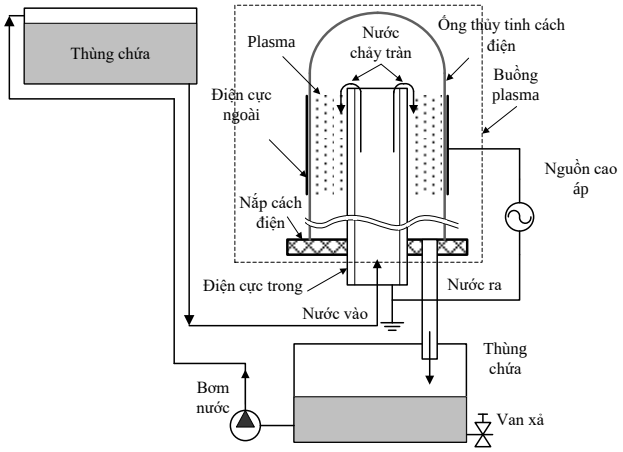
Plasma lạnh có thể được tạo ra từ phóng điện màn chắn, phóng điện ở áp suất thấp, phóng điện vầng quang, phóng điện cảm ứng ở tần số vô tuyến và phóng điện vi sóng … [14]. Tuy nhiên, bài báo này chỉ tập trung vào các kết quả nghiên cứu từ 02 phương pháp tạo plasma lạnh có khả năng ứng dụng vào thực tế nhất.

2.1. Phương pháp phóng điện màn chắn

Phóng điện màn chắn thường được tạo ra từ hệ thống hai điện cực trụ đồng trục bị ngăn cách bởi lớp cách điện như Hình 1. Mô hình xử lý nước bằng công nghệ phóng điện màn chắn điển hình sử dụng hệ thống điện cực trụ đồng trục được trình bày trong nghiên cứu [4] như Hình 2. Các thiết bị phóng điện màn chắn hoạt động ở điện áp 10 - 20 kV với dãy tần số rộng (0,5 - 500 kHz) [9]. Plasma lạnh được tạo thành trong khe hở điện cực do sự phóng điện đồng thời của các tia lửa điện có kích thước nhỏ. Các thông số của tia lửa điện trong khe điện cực có màn chắn ở áp suất khí quyển được trình bày ở Bảng 1.



Hình 1. *Hệ thống điện cực trụ*



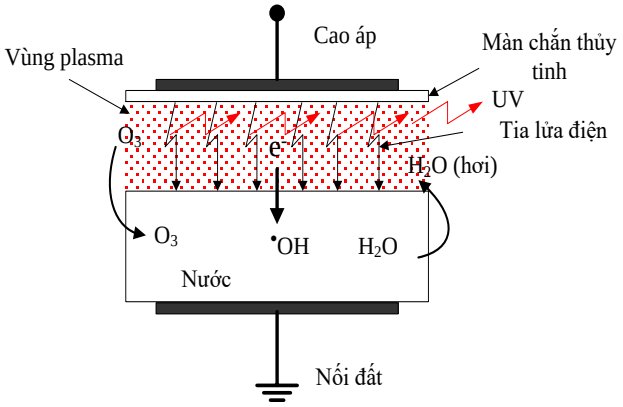
Hình 2. *Mô hình hệ thống xử lý nước điển hình bằng công nghệ phóng điện màn chắn [4]*

Khi plasma hình thành, ghi nhận được sự tồn tại của ozone, tia cực tím (UV) và các phần tử oxy hóa mạnh khác bao gồm cả gốc hydroxyl tự do (•OH) [4, 9]. Tùy theo giá trị điện áp, lưu lượng nước qua hệ thống và thời gian xử lý, nồng độ ozone trong nước có thể đạt đến 10 mg/L [4].

Bảng 1. *Các thông số của tia lửa điện trong hệ thống điện cực có màn chắn [9]*

TT	Thông số	Giá trị
1	Thời gian phóng điện	10^{-9} - 10^{-8} s
2	Bán kính tia lửa	10^{-4} m
3	Biên độ dòng điện	0,1 A
4	Mật độ dòng điện	10^{6} - 10^{7} A/m^2
5	Tổng điện tích	10^{-10} - 10^{-9} C
6	Mật độ điện tử	10^{20} - 10^{21} m^{-3}
7	Năng lượng trung bình của điện tử	1 - 10 eV
8	Nhiệt độ tia lửa	Xấp xỉ nhiệt độ trung bình của khe hở điện cực

Sự tương tác giữa plasma lạnh và nước cần xử lý được trình bày ở Hình 3. Kết quả của sự tương tác này là hình thành nên O_3 và UV trong khe không khí cũng như O, O_3 và •OH trong môi trường nước. Quá trình hình thành các thành phần oxy hóa rất mạnh này (O, O_3 và •OH) được trình bày qua các phương trình bên dưới.



Hình 3. *Tác động của plasma đến nước*

- Quá trình hình thành ozone dưới tác động của tia lửa điện:

$$O_2 + hf \rightarrow O + O \quad (1)$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3 \quad (2)$$

- Quá trình hình thành hydroxyl tự do khi ozone hòa tan trong nước:

$$O_3 + OH^- \rightarrow O_3^{\bullet -} + {}^{\bullet}OH \quad (3)$$

$$O_3^{\bullet -} \rightarrow O^{\bullet -} + O_2 \quad (4)$$

$$O^{\bullet -} + H_2O \Leftrightarrow {}^{\bullet}OH + OH^- \quad (5)$$

- Quá trình hình thành hydroxyl tự do khi các điện tử năng lượng va đập vào phân tử hơi nước:

$$e^- + H_2O \rightarrow {}^{\bullet}OH + H^{\bullet} + e^- \quad (6)$$

- Quá trình hình thành hydroxyl tự do khi các oxy nguyên tử phản ứng với phân tử hơi nước:

$$O + H_2O \rightarrow {}^{\bullet}OH + {}^{\bullet}OH \quad (7)$$

Plasma lạnh có khả năng diệt *E. coli* cao. Sau thời gian xử lý khoảng 90 s, toàn bộ *E. coli* trong 10 ml nước có nồng độ 3 ×10^5 cfu/ml bị bất hoạt [8]. Nguyên lý diệt khuẩn của plasma lạnh là tổng hợp của nguyên lý diệt khuẩn bằng UV và nguyên lý diệt khuẩn bằng chất oxy hóa bậc cao như (O, O_3, •OH…). Đặc biệt một số loại vi khuẩn chỉ có thể bị tiêu diệt khi chịu tác động đồng thời của UV và các chất oxy hóa bậc cao. Plasma lạnh còn có khả năng phân rã các hợp chất hữu cơ được biểu hiện thông qua việc hàm lượng COD và BOD_5 đo được trong nước sau xử lý giảm rất mạnh, cũng như sự đổi màu của nước sau khi xử lý [4]. Ngoài ra, plasma lạnh có thể phân rã dư lượng thuốc kháng sinh sulfadiazine được sử dụng trong chăn nuôi gia súc với hàm lượng 10 mg/L trong vòng 30 phút [5] và phân hủy hiệu quả các chất ô nhiễm có nguồn gốc từ thuốc nhuộm [15]. Hơn nữa, plasma lạnh còn có khả năng phân hủy đến 98% các phân tử dầu mỏ và các chất hoạt động bề mặt cũng như giảm mạnh hàm lượng kim loại nặng như Pb, Cd, Fe và Mn [3].

Tại nước ta, nghiên cứu về ứng dụng của plasma lạnh để xử lý nước chỉ mới bắt đầu trong những năm gần đây, với số lượng công trình nghiên cứu rất hạn chế [11-13]. Plasma lạnh đã được nghiên cứu để xử lý nước thải y tế và nước uống đóng chai [11, 12]. Đối với hệ thống xử lý nước thải y tế, kết quả khảo sát chỉ ra rằng, hiệu suất xử lý BOD_5 là 54%, COD là 51%, nitrate là 50%, phosphate là 60%, coliform là 99,9%, với điện áp 30 kV, dòng điện 4 A và lưu lượng là 500 ml/phút [11]. Đối với hệ thống nước đóng chai, plasma lạnh tiêu diệt hoàn toàn vi khuẩn với lưu lượng nước 0,7 lít/phút/module, điện áp 20 kV và dòng điện 2 A [12]. Ngoài ra công nghệ plasma lạnh đã được bắt đầu nghiên cứu đối với lĩnh vực xử lý nước cấp [13]. Kết quả cho thấy, plasma lạnh diệt khuẩn hiệu quả trong nước sông và nước ngầm và có khả năng phân rã hợp chất thuốc bảo vệ thực vật trong nước thải thuốc bảo vệ thực vật [13].

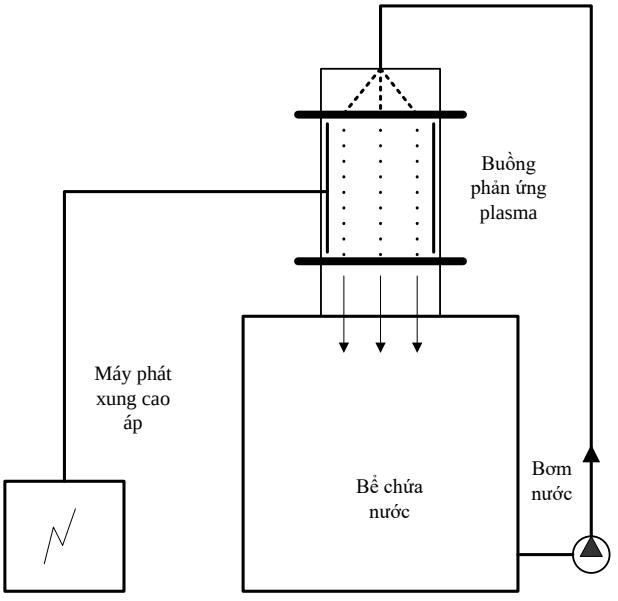
2.2. Phương pháp phóng điện vầng quang

Phương pháp này đã được trình bày trong các nghiên cứu [6, 7, 10]. Nguyên lý chung của phương pháp tạo plasma lạnh theo công nghệ này là tạo điện trường rất không đều giữa các điện cực. Không khí xung quanh các

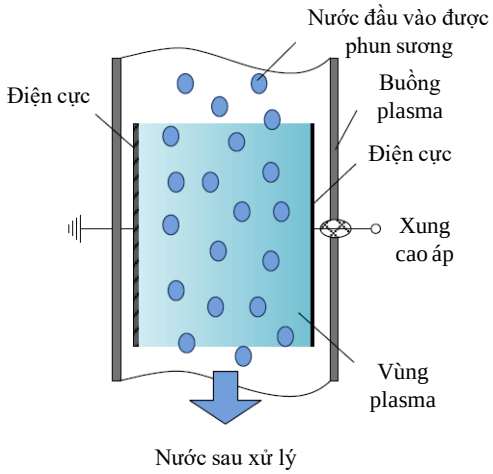
điện cực có điện thế rất lớn bị phóng điện vầng quang tạo môi trường plasma lạnh. Để tạo ra vầng quang trong thể tích không gian lớn đòi hỏi điện áp rất cao giữa các điện cực (25 - 30 kV). Ngoài ra sóng xung điện áp phải có độ rộng rất nhỏ từ vài chục đến vài trăm ns. Nước được cung cấp vào buồng plasma dưới dạng phun sương giữa các điện cực [7, 10] hoặc màng nước chảy trên bề mặt điện cực ngoài [6]. Mô hình nguyên lý của công nghệ phóng điện vầng quang xung điển hình được trình bày ở Hình 4.

Tương tác giữa plasma lạnh và các giọt nước sẽ tiêu diệt được vi khuẩn và phân rã các hợp chất hóa học hữu cơ trong nước (Hình 5). Do toàn bộ diện tích bề mặt giọt nước bị bao phủ bởi plasma nên hiệu quả tác động giữa plasma và nước sẽ rất cao. Kết quả là hiệu quả xử lý nước của plasma lạnh được tạo ra nhờ phóng điện vầng quang xung cao hơn so với các phương pháp khác [15].

Plasma lạnh tạo ra từ phóng điện vầng quang xung có hiệu quả cao trong việc phân rã hợp chất tạo màu thực phẩm indigo carmine [6, 7], phenol [10] và các thành phần dược phẩm trong nước [10]. Dung dịch chứa indigo carmine với hàm lượng 20 mg/L bị khử màu sau 8 phút xử lý ở tần số xung là 50 Hz [6]. Hiệu suất năng lượng khử màu thay đổi từ 120 - 200 J/mg khi tần số xung tăng từ 10 - 50 Hz. Khi oxy được bơm vào buồng plasma thì hiệu suất năng lượng tăng lên rất cao, đạt giá trị 5,6 J/mg. Khi được phun sương, chất tạo màu indigo carmine với nồng độ trong dung dịch như trên (20mg/L) bị phân rã hoàn toàn sau 60 phút xử lý [7]. Sau thời gian xử lý khoảng 20 phút, tỉ lệ khử màu đạt khoảng 70%. Hiệu quả năng lượng khử màu đạt giá trị 9 J/mg và 360 J/mg đối với liên kết chromogenic và liên kết không bão hòa của phân tử màu [7]. Hiệu quả phân rã phenol đã được trình bày chi tiết trong nghiên cứu [10]. Khi buồng plasma hoạt động trong môi trường không khí, năng lượng tiêu thụ khi xử lý phenol đạt 55 g/kWh với tần số xung là 840 Hz và giảm xuống 88 g/kWh khi tần số là 100 Hz. Khi nồng độ oxy trong buồng plasma tăng lên, ghi nhận được hiệu quả xử lý cũng tăng lên.



Hình 4. *Mô hình hệ thống xử lý nước điển hình bằng công nghệ phóng điện vầng quang [10]*



Hình 5. *Tác động của plasma đến nước trong công nghệ phóng điện vầng quang [10]*

3. Thảo luận

3.1. Hiệu quả xử lý nước

Từ các kết quả trình bày ở trên, nhận thấy công nghệ phóng điện màn chắn diệt khuẩn rất hiệu quả và có khả năng xử lý kim loại nặng. Tuy nhiên hiệu quả xử lý các chỉ tiêu này của công nghệ phóng điện vầng quang không được đề cập trong các nghiên cứu đã tổng hợp.

Cả công nghệ phóng điện màn chắn và công nghệ phóng điện vầng quang đều có hiệu quả cao khi sử dụng để phân rã hợp chất hữu cơ. Để so sánh hiệu quả phân rã hợp chất hữu cơ giữa các công nghệ với nhau, chỉ số hiệu suất năng lượng tương đối (REE) được đề xuất tại nghiên cứu [14]. REE càng lớn, hiệu suất phân rã hợp chất hữu cơ càng cao. Kết quả được tóm tắt trong Bảng 2. Từ Bảng 2, thấy rằng hiệu quả phân rã hợp chất hữu cơ sẽ giảm theo thứ tự như sau: (1) điện áp xung > điện áp DC hoặc AC; (2) phóng điện vầng quang xung > phóng điện xung có màn chắn > phóng điện DC; (3) Plasma trong khí oxy > plasma trong không khí > plasma trong dung dịch; (4) nước được phun sương > màng nước > lớp nước. Như vậy phóng điện vầng quang xung trong không khí kết hợp với nước được phun sương sẽ cho hiệu quả xử lý cao nhất. Tuy nhiên công nghệ phóng điện vầng quang xung chỉ hoạt động hiệu quả đối với xung cao áp có biên độ rất lớn (25 - 30 kV) và độ rộng xung rất nhỏ (10 - 100 ns) [6, 7, 10]. Bộ nguồn xung kiểu này hiện không có trên thị trường trong nước nên phải nhập khẩu và có giá thành rất đắt. Mặc dù có hiệu suất xử lý thấp hơn công nghệ phóng điện vầng quang xung, phóng điện màn chắn hoạt động hiệu quả với bộ nguồn xung cao áp có dạng sóng gần sin với tần số cao (20 - 30 kHz) và biên độ điện áp có giá trị từ 10 kV đến 20 kV. Bộ nguồn xung tần số cao kiểu này hiện sẵn có trên thị trường với giá thành thấp nên thích hợp để phát triển các hệ thống xử lý nước bằng plasma lạnh theo kiểu phóng điện màn chắn có quy mô hộ gia đình với giá thành phù hợp nhu cầu người dân.

3.2. Tác động phụ

Mặc dù có hiệu quả cao trong diệt khuẩn và phân rã hợp chất hóa học trong nước như trình bày ở phần trên, nhưng công nghệ phóng điện màn chắn vẫn gây ra tác động không mong muốn đối với nước sau khi xử lý, đó là làm giảm độ

pH, tăng độ dẫn điện và gia tăng rất mạnh nồng độ NO_x^- khi thời gian xử lý đủ dài [5, 8, 13]. Nguyên nhân của sự sụt giảm nồng độ pH có thể giải thích là do sự tương tác giữa plasma với nước sẽ làm tăng nồng độ H^+, acid nitric, acid nitrous, H_2O_2 và O_2^- [5, 8]. Sự tăng độ dẫn điện có thể là do sự tăng mạnh nồng độ các ion trong nước sau khi xử lý, chẳng hạn như H^+, H_3O^+, NO_3^-, NO_2^- [5]. Nguồn gốc xuất hiện các acid nitric và acid nitrous trong nước sau xử lý là do quá trình phóng điện tia lửa trong khe hở không khí ẩm giữa các điện cực sẽ hình thành các oxide nitơ NO_x (NO, NO_2). Khi NO_x kết hợp với nước/hơi nước sẽ tạo thành acid nitric và acid nitrous.

Tác động phụ của công nghệ phóng điện vầng quang xung vẫn chưa được đề cập trong các nghiên cứu đã tổng hợp.

4. Mô hình xử lý nước nghiên cứu

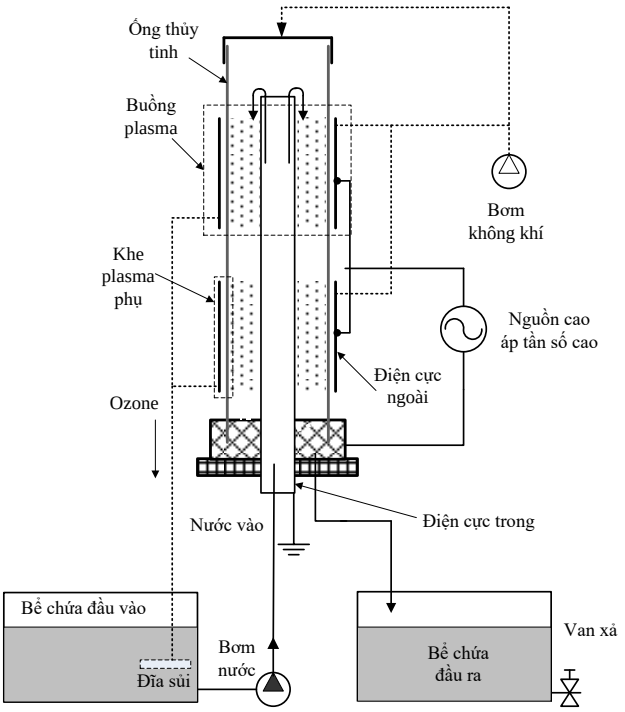
Như đã trình bày ở phần thảo luận, xuất phát từ yêu cầu cần phát triển các hệ thống xử lý nước bằng plasma lạnh có quy mô hộ gia đình với giá thành hợp lý, công nghệ phóng điện màn chắn sẽ được nghiên cứu. Mô hình hệ thống xử lý nước bằng công nghệ phóng điện màn chắn được trình bày ở Hình 6. Mô hình này được phát triển dựa trên cơ sở các kết quả ở nghiên cứu [4, 13]. Tuy nhiên, khe plasma phụ được thiết kế thêm ở bên ngoài ống thủy tinh dùng để tạo ozone xử lý sơ bộ nguồn nước đầu vào. Hơn nữa khe plasma phụ này còn có tác dụng giảm tác động của sự méo dạng ống thủy tinh đến sự hình thành và ổn định của plasma bên trong ống thủy tinh. Hiệu quả của khe plasma phụ đã được khảo sát và sẽ trình bày ở nghiên cứu tiếp theo. Mô hình này sẽ được kết hợp thêm với các bộ phận lắng lọc cơ học hoặc/và keo tụ-tạo bông tùy theo loại nguồn nước đầu vào và chất lượng yêu cầu của nước đầu ra để tăng hiệu quả xử lý.

Bảng 2. *Hiệu suất năng lượng tương đối (REE) của các công nghệ tạo plasma lạnh [14]*

TT	Công nghệ	REE
1	Phóng điện phát sáng trên bề mặt dung dịch điện phân	0,07
2	Phóng điện màng ngăn	0,7
3	Phóng điện vầng quang xung trong nước; Phóng điện vầng quang xung trong không khí trên bề mặt nước; Phóng điện phát sáng trong dung dịch điện phân; Phóng điện hồ quang trượt	1
4	Phóng điện vầng quang xung trong nước có tạo bọt khí; Phóng điện ở dải tần số vô tuyến	2
5	Phóng điện vầng quang xung ghép nối tiếp; Phóng điện vi sóng	3
6	Phóng điện bề mặt xung trong nước; Phóng điện hồ quang trượt AC trong khí oxy với nước được phun sương	4
7	Phóng điện vầng quang xung trong nước có tạo bọt oxy	5
8	Phóng điện vầng quang xung có thổi oxy qua lỗ điện cực; Phóng điện xung kiểu màng ngăn có tạo bọt khí	10
9	Phóng điện bề mặt xung trong nước có tạo bọt khí; Phóng điện vầng quang xung trên bề mặt nước trong môi trường Ar hoặc oxy; UV và ozone từ phóng điện màn chắn trong không khí	20
10	Phóng điện vầng quang xung ghép nối tiếp + tiền xử lý	50
11	Phóng điện DC trong không khí trên bề mặt màng nước	100
12	Phóng điện xung có màn chắn trong không khí trên bề mặt màng nước; Phóng điện hồ quang trượt trong khí oxy với nước được phun sương	400
13	Phóng điện vầng quang xung trong không khí trên bề mặt màng nước	1000
14	Phóng điện vầng quang xung trong không khí kết hợp nước được phun sương; Phóng điện vầng quang xung trong khí oxy trên bề mặt màng nước; Phóng điện xung có màn chắn trong khí oxy với nước được phun sương	2000

5. Kết luận

Tổng hợp tài liệu về các phương pháp tạo plasma lạnh khả thi và kết quả xử lý nước từ các phương pháp này đã hoàn thành. Các kết quả thí nghiệm cho thấy rằng plasma lạnh được tạo ra từ công nghệ phóng điện vầng quang và phóng điện màn chắn có hiệu quả cao trong xử lý nước. Cụ thể, plasma lạnh có thể xử lý hiệu quả coliform, *E. coli*, chất hóa học hữu cơ và các ion kim loại. Tuy nhiên, công nghệ plasma lạnh cần kết hợp với các công đoạn phụ khác như keo tụ - tạo bông và/hoặc lắng lọc cơ học để tăng hiệu quả xử lý. Nhược điểm cố hữu của công nghệ tạo plasma lạnh từ hiện tượng phóng điện màn chắn là làm tăng đáng kể hàm lượng nitrite và nitrate, tăng độ dẫn điện và giảm độ pH. Do đó cần phải tìm biện pháp để hạn chế các tác động phụ này. Ngoài ra mô hình thiết bị của công nghệ xử lý nước bằng phương pháp phóng điện màn chắn có khe tạo plasma phụ được giới thiệu.



Hình 6. *Mô hình hệ thống xử lý nước bằng công nghệ phóng điện màn chắn có khe tạo plasma phụ*

Lời cám ơn

Nghiên cứu này được tài trợ từ Chương trình phát triển bền vững vùng Tây Nam Bộ trong đề tài mã số 12/2015/HĐ-KHCN-TNB.ĐT/14-19/C02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đoàn Thu Hà, "Đánh giá hiện trạng cấp nước nông thôn vùng Đồng bằng sông Cửu Long và đề xuất giải pháp phát triển", *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, Số 43, 2013, trang 2-9.

[2] Lê Xuân Sinh và Đỗ Minh Chung, "Khảo sát mô hình nuôi cá lóc ở đồng bằng sông Cửu Long", *Kỷ yếu Hội nghị khoa học Thủy sản toàn quốc*, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh, 2009, trang 436-447.

[3] V. I. Grinevich, E. Y. Kvitkova, N. A. Plastinia and V. V. Rybkin, "Application of Dielectric Barrier Discharge for Waste Water Purification", *Plasma Chemistry and Plasma Process*, Vol. 31, 2011, pp. 573-583.

[4] M.M. Kuraica et al., "Application of Coaxial Dielectric Barrier Discharge for Potable and Waste Water Treatment", *Journal of Industrial and Engineering Chemical Research*, Vol. 45, 2006, pp. 882-905.

[5] S. P. Rong, Y. B. Sun and Z. H. Zhao, "Degradation of Sulfadiazine Antibiotics by Water Falling Film Dielectric Barrier Discharge", *Chinese Chemical Letter*, Vol. 25, 2014, pp. 187-192.

[6] T. Yano et al., "Water Treatment by Atmospheric Discharge Produced with Nanosecond Pulsed Power", *Proc. IEEE int. Power Modulators and High Voltage Conference*, 2008, pp. 80-83.

[7] Y. Minamitani et al., "Decomposition of Dye in Water Solution by Pulsed Power Discharge in a Water Droplet Spray", *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 36, 2008, pp. 2586-2591.

[8] N. Shainsky et al., "Plasma Acid: Water Treated by Dielectric Barrier Discharge", *Plasma Processes and Polymers*, Vol. 9, 2012, pp. 1-6.

[9] U. Kogelschatz, B. Eliasson and W. Egli, "Dielectric-Barrier Discharges - Principle and Application", *Journal of Physics IV France*, Vol. 7, 1997, pp. 47-66.

[10] S. Preis et al., "Pulsed Corona Discharge: The Role of Ozone and Hydroxyl Radical in Aqueous Pollutants Oxidation", W*ater Science & Technology*, 2013, pp. 1536-1542.

[11] Trần Ngọc Đảm và Nguyễn Đức Long, "Thiết kế và chế tạo hệ thống xử lý nước thải y tế công suất 5 m^3/ngày bằng công nghệ Plasma", *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh*, Quyển 25, 2013, trang 78-83.

[12] Trần Ngọc Đảm và Nguyễn Đức Long, "Thiết kế và chế tạo hệ thống xử lý nước uống đóng chai công suất 07 m^3/ngày bằng công nghệ lọc trao đổi ion và Plasma", *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh*, Quyển 33, 2015.

[13] Nguyễn Văn Dũng, "Nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý nước", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số, 2017, trang 11-15.

[14] M. A. Malik, "Water Purification by Plasmas: Which Reactors are Most Energy Efficient?", *Plasma Chem Plasma Process*, Vol. 30, 2010, pp. 21-31.

(BBT nhận bài: 15/5/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 03/5/2018)