

Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ  
 Phần A: Khoa học Tự nhiên, Công nghệ và Môi trường

website: [sj.ctu.edu.vn](http://sj.ctu.edu.vn)

DOI:10.22144/ctu.jvn.2018.154

**NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG TẠO GỐC TỰ DO TRONG NƯỚC BẰNG CÔNG NGHỆ PLASMA LẠNH**

Hồ Quốc Phong<sup>1\*</sup>, Nguyễn Văn Dũng<sup>1</sup>, Bùi Thị Hồng Loan<sup>1</sup>, Bùi Thị Trúc Linh<sup>1</sup>, Huỳnh Liên Hương<sup>1</sup>, Đặng Huỳnh Giao<sup>1</sup> và Phạm Văn Toàn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

<sup>2</sup>Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ

\*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Hồ Quốc Phong (email: [hqphong@ctu.edu.vn](mailto:hqphong@ctu.edu.vn))

**Thông tin chung:**

Ngày nhận bài: 03/05/2018

Ngày nhận bài sửa: 22/06/2018

Ngày duyệt đăng: 27/12/2018

**Title:**

Study on generation of radical in aqueous solution by cold plasma technology

**Từ khóa:**

Công nghệ plasma; gốc tự do; phương pháp DPPH; plasma phóng điện màn chắn; xử lý nước

**Keywords:**

DBD plasma, DPPH method, plasma technology, radical, watertreatment

**ABSTRACT**

This study was conducted to investigate factors that affected the free radicals concentration generated in aqueous solution by cold plasma technology. The factors such as solution flow through electrodes (from 1 to 5 L/min), voltage (from 12 kV to 16 kV), plasma irradiation time (from 10 to 60 min), organic compounds and water types were studied. In addition, the study also investigated the effects of indirect plasma and air flow rate on the free radical concentration. The results showed that the concentration of free radical decreased from  $7.57 \times 10^{-2}$  to  $5.41 \times 10^{-2}$  mM when increasing water flow rate from 1 to 5 L/min. Concentration of free radical increased from  $6.89 \times 10^{-2}$  to  $7.77 \times 10^{-2}$  mM when increasing the voltage from 12 to 16 kV. Experiment data also showed that increasing irradiation time (10 to 60 min) would also increase concentration of free radical ( $7.52 \times 10^{-2}$  to  $8.89 \times 10^{-2}$  mM). The highest concentration of free radical was obtained at condition of 1 L/min, 16 kV and 60 min irradiation. Furthermore, the study also found that the presence of organic compounds also strongly affected the free radical concentration.

**TÓM TẮT**

Nghiên cứu này tiến hành khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ gốc tự do sinh ra trong dung dịch nước bằng công nghệ plasma lạnh. Các yếu tố như lưu lượng dung dịch chảy qua điện cực, điện áp, thời gian chiếu xạ plasma, các chất hữu cơ và loại nước được khảo sát. Lưu lượng nước chảy qua hai điện cực được thay đổi từ 1 Lit/Phút (L/P) đến 5 L/P, điện áp thay đổi từ 12 kV đến 16 kV, thời gian xử lý từ 10 phút đến 60 phút. Ngoài ra, nghiên cứu còn tiến hành xem xét sự ảnh hưởng của buồng plasma gián tiếp và lưu lượng không khí bơm vào buồng plasma trực tiếp đến nồng độ gốc tự do. Kết quả nghiên cứu cho thấy nồng độ gốc tự do giảm từ  $7.57 \times 10^{-2}$  xuống  $5.41 \times 10^{-2}$  mM khi tăng lưu lượng nước từ 1 đến 5 L/P. Nồng độ gốc tự do tăng từ  $6.89 \times 10^{-2}$  đến  $7.77 \times 10^{-2}$  mM khi tăng điện áp từ 12-16 kV. Nồng độ gốc tự do chiếm từ  $7.52 \times 10^{-2}$  đến  $8.89 \times 10^{-2}$  mM khi tăng thời gian chiếu xạ từ 10 đến 60 phút. Từ các kết quả trên, nghiên cứu đã xác định được các thông số vận hành để có hàm lượng gốc tự do lớn nhất cho quá trình xử lý là lưu lượng 1 đến 2 L/P, điện áp 16 kV và thời gian chiếu xạ là 60 phút. Hơn nữa, nghiên cứu còn cho thấy sự hiện diện các chất hữu cơ hay loại nước thải cũng ảnh hưởng mạnh đến nồng độ gốc tự do.

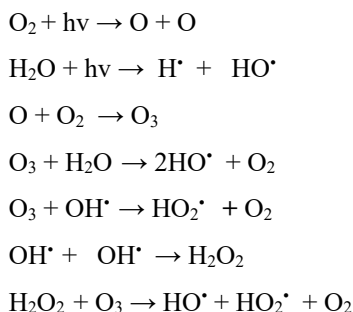
Trích dẫn: Hồ Quốc Phong, Nguyễn Văn Dũng, Bùi Thị Hồng Loan, Bùi Thị Trúc Linh, Huỳnh Liên Hương, Đặng Huỳnh Giao và Phạm Văn Toàn, 2018. Nghiên cứu khả năng tạo gốc tự do trong nước bằng công nghệ plasma lạnh. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ. 54(9A): 1-7.

### 1 GIỚI THIỆU

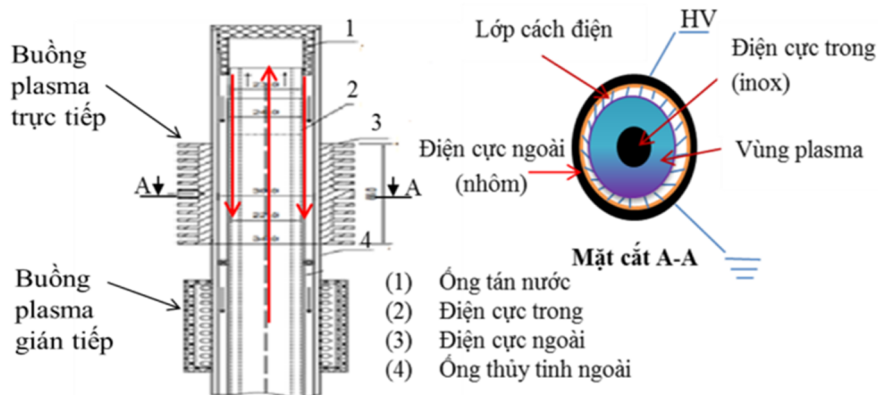
Plasma, trạng thái thứ tư của vật chất bao gồm các ion, điện tử, nguyên tử/phân tử trung tính và các phân tử bị kích thích, UV. Kèm theo sự hình thành plasma là sự xuất hiện của UV và ozone trong môi trường khí. Trong đó, plasma phi nhiệt hay còn gọi là plasma lạnh chứa các điện tử có nhiệt độ rất lớn Te trong khi nhiệt độ của ion Ti và của các phân tử còn lại xấp xỉ nhiệt độ môi trường. Những năm gần đây plasma lạnh đã được nghiên cứu để xử lý nước. Plasma lạnh xử lý hơn 90% nồng độ các hợp chất hữu cơ độc hại như chloroform (Krugly *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016), 2-naphthol (Krugly *et al.*, 2015), hexachlorobenzene, pentachlorobenzene (Zhang *et al.*, 2007), phenol, toluene (Marotta *et al.*, 2012), 4-chlorophenol (Dojčinović *et al.*, 2008) và một số hợp chất thuốc trừ sâu như dichlorvos, malathion và endosulfan (Sarangapani *et al.*, 2016).

Bên cạnh khả năng xử lý các hợp chất hữu cơ bền và độc hại thì plasma lạnh còn có khả năng xử lý nhiều hợp chất màu chủ yếu trong ngành nhuộm như atrazon, realan, lanaset và optilan (Tichonovas *et al.*, 2013). Ngoài ra, plasma lạnh còn cho thấy rất hiệu quả trong xử lý các hợp chất màu phổ biến như phenol red (PR), methyl orange (MO), diamine green B (DGB), pyrogallol red (PYR), bromocresol green (BCG), bromochlorophenol blue (BCB), naphthol green B (NGB) và crystal violet (CV) (Mohammadi & Ashkarran, 2016). Plasma lạnh còn được ứng dụng trong bảo quản nông sản như xử lý các vi khuẩn hiếu khí mesophilic, nấm men và nấm mốc trên dâu tây (Misra *et al.*, 2014), vi khuẩn có

hại trên bắp cải, rau diếp (Lee *et al.*, 2015), khử trùng rau (Pasquali *et al.*, 2016). Plasma lạnh có khả năng xử lý được hầu hết chất hữu cơ, hợp chất màu cũng như diệt khuẩn hiệu quả là nhờ sự xuất hiện của UV, các chất oxy hóa mạnh (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>), gốc tự do sinh ra trong quá trình tạo plasma lạnh cũng như tương tác giữa plasma lạnh và dung dịch cần xử lý. Trong đó, sự hình thành gốc tự do được giải thích dựa trên cơ chế như sau (Kuraica *et al.*, 2006; Tendero *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2016):



Hiện nay, plasma lạnh được tạo bằng các công nghệ như phóng điện cảm ứng ở tần số vô tuyến (RF, radio frequency) (Lee *et al.*, 1997), phóng điện màn chắn (DBD, dielectric barrier discharge) (Liu *et al.*, 2004), phóng điện vi sóng, phóng điện hồ quang, phóng điện DC, phóng điện ở áp suất thấp (Matsumoto *et al.*, 2012) và phóng điện vầng quang (corona) (Scholtz *et al.*, 2015). Trong đó, công nghệ phóng điện màn chắn và công nghệ phóng điện vầng quang để tạo plasma lạnh ngày càng được quan tâm mạnh mẽ do có hiệu quả cao trong xử lý vi sinh vật, chất màu và thuốc bảo vệ thực vật...



**Hình 1: Kết cấu hệ thống tạo plasma lạnh**

Kết cấu hệ thống điện cực tạo plasma lạnh từ phóng điện màn chắn và phóng điện vầng quang được cho ở Hình 1. Tại buồng plasma trực tiếp, hệ thống điện cực trụ đồng trục có màn chắn cách điện được sử dụng để tạo ra plasma lạnh bên trong ống thủy tinh cách điện. Tại đây plasma lạnh tương tác

trực tiếp với dung dịch cần xử lý thông qua điện tử năng lượng cao, O<sub>3</sub>, UV và nhiệt độ cao của tia lửa điện. Tại buồng plasma gián tiếp, plasma lạnh được tạo ra ở bên ngoài ống thủy tinh cách điện do phóng điện vầng quang và tương tác với dung dịch cần xử lý thông qua UV và O<sub>3</sub> được dẫn xuống đáy thùng chứa dung dịch. Khi hoạt động xử lý thì dung dịch

được bơm từ dưới lên trong ống điện cực và sẽ chảy tràn ra phía ngoài của thành ống điện cực, tiếp xúc với plasma khi đi xuống theo chiều mũi tên như trong Hình 1.

Như đã nêu trên, gốc tự do đóng vai trò rất quan trọng trong công nghệ plasma lạnh vì thế nghiên cứu tiến hành khảo sát những yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ gốc tự do được tạo ra trong nước dưới tác động của plasma lạnh.

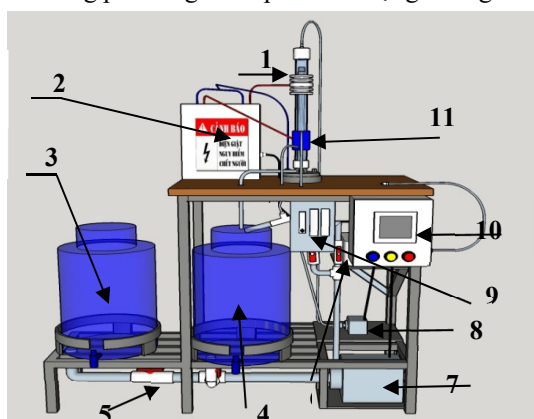
## 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1 Hóa chất

Hợp chất 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, Sigma, Mỹ) được sử dụng để xác định nồng độ gốc tự do. Các hợp chất như glycerol, Tween 80 và nước giềng khoan được sử dụng để tạo môi trường ảnh hưởng đến nồng độ gốc tự do.

### 2.2 Mô hình xử lý nước bằng công nghệ plasma lạnh

Nghiên cứu sử dụng mô hình xử lý nước bằng plasma lạnh được mô tả như trong Hình 2. Trong đó, bộ phận tạo plasma được mô tả chi tiết như trong Hình 1. Mô hình hoạt động với điện áp 220V-50 Hz. Không khí được bơm từ trên xuống với lưu lượng 7,5 L/P và bơm vào buồng plasma gián tiếp với lưu lượng 5 L/P. Nước từ thùng chứa 4 được bơm tuần hoàn giữa buồng plasma trực tiếp, gián tiếp và thùng chứa. Sau thời gian xử lý nhất định, nước được lấy mẫu để xác định nồng độ gốc tự do. Sau khi mô hình hoạt động ổn định (khoảng 1 phút) sẽ tiến hành khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ gốc tự do như lưu lượng dòng chảy, điện áp, thời gian chiếu xạ, hợp chất hữu cơ, loại nước, cùng với sự ảnh hưởng của buồng plasma gián tiếp và lưu lượng không khí.



**Hình 2: Mô hình xử lý nước bằng plasma lạnh: bộ phận tạo plasma trực tiếp (1), nguồn cao áp (2), thùng chứa dung dịch (3) và (4), van nước (5), máy biến áp (6), máy bơm nước (7), máy bơm khí (8), cụm lưu lượng kế (9), tủ điện (10) và buồng plasma gián tiếp (11)**

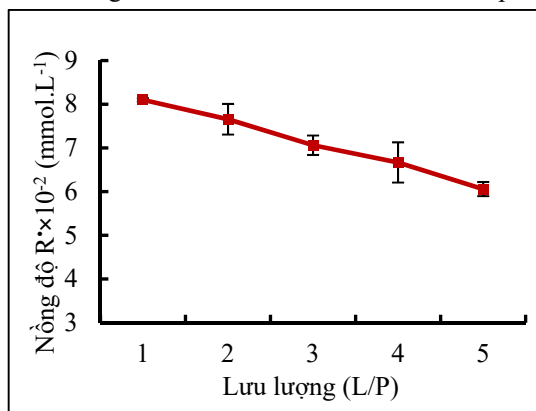
### 2.3 Phương pháp phân tích nồng độ gốc tự do

Nồng độ gốc tự do được xác định bằng phương pháp phổ biến là sử dụng hợp chất bắt gốc tự do 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Williams *et al.*, 1995; Kumaran *et al.*, 2006; Sharma *et al.*, 2009; Hardy *et al.*, 2015). Trong đó, nồng độ gốc tự do được tính trên sự biến đổi nồng độ của DPPH khi phản ứng với dung dịch sau khi được xử lý bằng plasma lạnh. Nồng độ gốc tự do được tính theo công thức  $C_{R\bullet} = \frac{n_{DPPH \cdot pu}}{V_{mẫu}} (M)$ . Giả sử phản ứng giữa DPPH và gốc tự do trong dung dịch xảy ra theo tỉ lệ mol 1:1 như sau:  $DPPH\bullet + R\bullet \rightarrow DPPH-R$  (với  $R\bullet$  là gốc tự do).

## 3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1 Ảnh hưởng của lưu lượng nước đến nồng độ gốc tự do

Để đánh giá sự ảnh hưởng của lưu lượng nước đến đối với nồng độ gốc tự do trong nước, đồng thời xác định được mức lưu lượng thích hợp cho quá trình tạo gốc tự do. Thí nghiệm được tiến hành ở điều kiện tốc độ dòng chảy của dung dịch nước thay đổi từ 1 đến 5 L/P. Các yếu tố khác như điện áp đầu ra và thời gian cố định lần lượt là 16 kV và 30 phút.



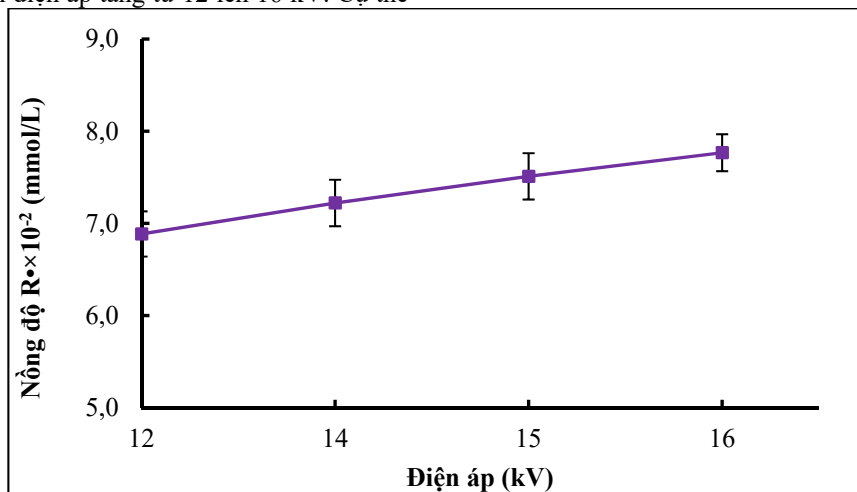
**Hình 3: Đồ thị biểu diễn sự ảnh hưởng của lưu lượng dòng chảy đến nồng độ gốc tự do (U=16 kV, t = 30 phút)**

Kết quả thí nghiệm trình bày ở Hình 3 cho thấy nồng độ gốc tự do giảm khi tăng lưu lượng của dòng chảy. Ở tốc độ dòng chảy 1 L/P nồng độ gốc tự do sinh ra là lớn nhất đạt  $7.60 \times 10^{-2}$  mM và giảm khoảng 30% về  $5.56 \times 10^{-2}$  mM khi lưu lượng dòng chảy tăng đến 5 L/P. Điều này cho thấy khi tăng lưu lượng thì thời gian tương tác giữa plasma lạnh và dung dịch giảm xuống dẫn đến giảm nồng độ gốc tự do.

### 3.2 Ảnh hưởng của điện áp đến nồng độ gốc tự do

Điện áp tạo plasma được thay đổi từ 12 đến 16 kV để khảo sát ảnh hưởng của chúng đến nồng độ gốc tự do sinh ra. Trong thí nghiệm này các yếu tố khác được cố định như thời gian chiếu xạ là 30 phút và lưu lượng là 2 L/P. Kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Hình 4 và thấy rằng nồng độ gốc tự do tăng tuyến tính khi điện áp tăng từ 12 lên 16 kV. Cụ thể

ở mức điện áp 12 kV nồng độ gốc tự do đạt  $6.89 \times 10^{-2}$  mM và nồng độ này sẽ tăng khoảng 12% đến giá trị  $7.77 \times 10^{-2}$  mM tại điện áp 16 kV. Điều này phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đây (Krugly *et al.*, 2015), sự gia tăng của nồng độ gốc tự do khi điện áp gia tăng có thể được giải thích bằng sự gia tăng mật độ cũng như năng lượng của điện tử tự do khi điện trường tăng và sự gia tăng nồng độ ozone trong khe hở điện cực.

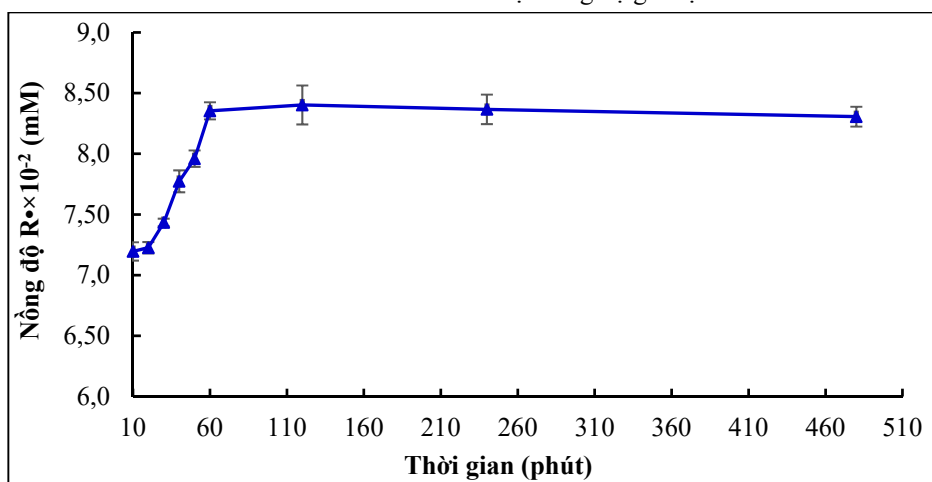


Hình 4: Đồ thị biểu diễn sự ảnh hưởng của điện áp đến nồng độ gốc tự do ( $Q=2$  L/P,  $t=30$  phút)

### 3.3 Ảnh hưởng của thời gian xử lý đến nồng độ gốc tự do

Thí nghiệm được tiến hành với thời gian xử lý được thay đổi từ 10 đến 480 phút tại điện áp 16 kV và lưu lượng nước là 2 L/P. Sự thay đổi giá trị nồng độ gốc tự do trong nước ứng với sự thay đổi thời gian xử lý được thể hiện ở đồ thị Hình 5. Kết quả

cho thấy nồng độ gốc tự do tăng mạnh từ  $7.20 \times 10^{-2}$  mM đến  $8.35 \times 10^{-2}$  mM khi thời gian chiếu xạ plasma tăng từ 10 phút đến 60 phút. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng thời gian chiếu xạ thì nồng độ gốc tự do có xu hướng bão hòa. Điều này có thể được giải thích là do khí hàm lượng gốc tự do sinh ra tăng cao, chúng có thể kết hợp với nhau làm suy giảm ngược lại nồng độ gốc tự do.

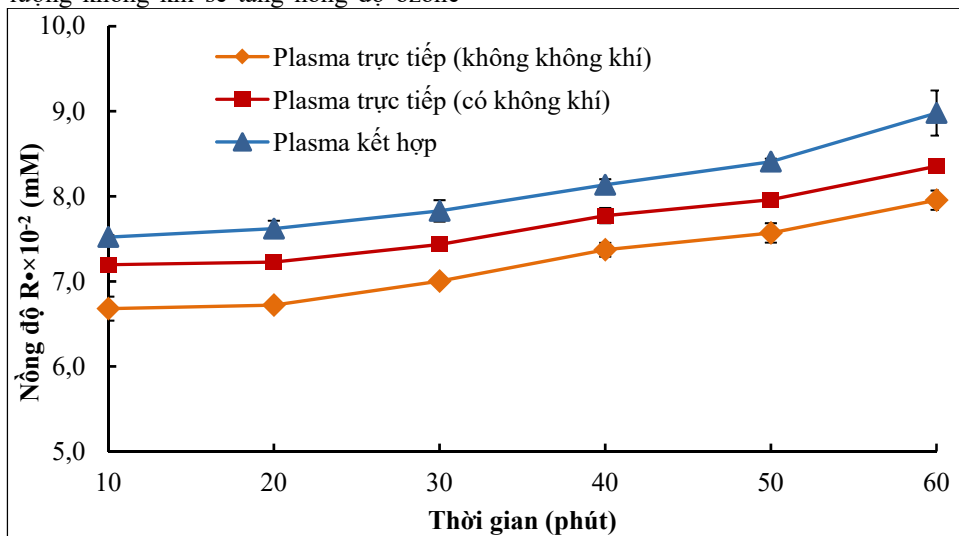


Hình 5: Đồ thị biểu diễn sự ảnh hưởng của thời gian xử lý đến nồng độ gốc tự do ( $U=16$  kV,  $Q=2$  L/P)

### 3.4 Ảnh hưởng của lưu lượng đến nồng độ gốc tự do

Ảnh hưởng của lưu lượng không khí đến nồng độ gốc tự do được khảo sát trong hai trường hợp có bơm không khí (7,5 L/P) và không bơm không khí (0 L/P). Kết quả thí nghiệm cho thấy bơm không khí vào buồng plasma sẽ tăng nồng độ gốc tự do khoảng 10% (Hình 6). Kết quả này được giải thích là do sự tăng lưu lượng không khí sẽ tăng nồng độ ozone

trong khe hở điện cực cũng như hàm lượng ozone hòa tan trong nước dẫn đến nồng độ gốc tự do sẽ tăng theo (Kuraica *et al.*, 2006; Nguyễn Văn Dũng và *ctv.*, 2017;). Hình 6 cũng cho thấy buồng plasma gián tiếp sẽ tăng nồng độ gốc tự do khoảng 15-20%. Do buồng plasma gián tiếp tạo ra ozone từ hiện tượng phóng điện vàng quang nên nồng độ ozone trong nước sẽ tăng lên dẫn đến sự gia tăng hàm lượng gốc tự do.

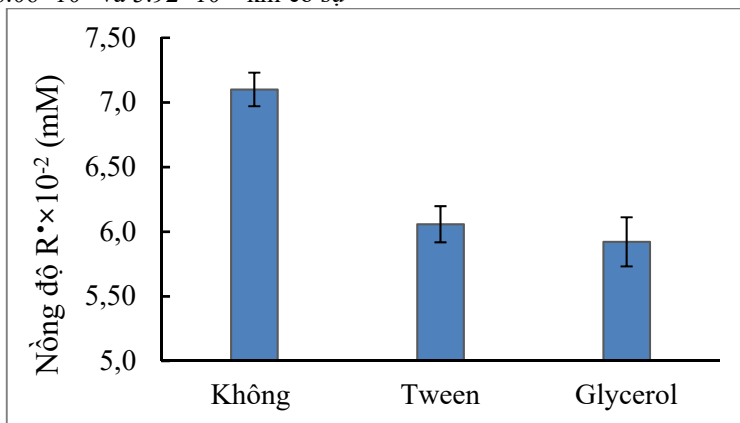


Hình 6: Đồ thị biểu diễn sự ảnh hưởng lưu lượng không khí và buồng plasma gián tiếp đến nồng độ gốc tự do (U = 16 kV, Q= 2L/P)

### 3.5 Ảnh hưởng của lưu lượng đến nồng độ gốc tự do

Ảnh hưởng của tween 80 và glycerol đến nồng độ gốc tự do được trình bày ở đồ thị Hình 7. Kết quả thí nghiệm cho thấy nồng độ gốc tự do giảm mạnh từ  $7.1 \times 10^{-2}$  xuống  $6.06 \times 10^{-2}$  và  $5.92 \times 10^{-2}$  khi có sự

tồn tại của tween 80 (0,012 M) và glycerol (1 M). Điều này có thể được giải thích là gốc tự do sinh ra đã tiếp xúc và tác dụng với tween 80 và glycerol có trong dung dịch làm giảm nồng độ gốc tự do (Liang *et al.*, 2015). Điều đó cho thấy plasma lạnh có khả năng xử lý các hợp chất hoạt động bề mặt.

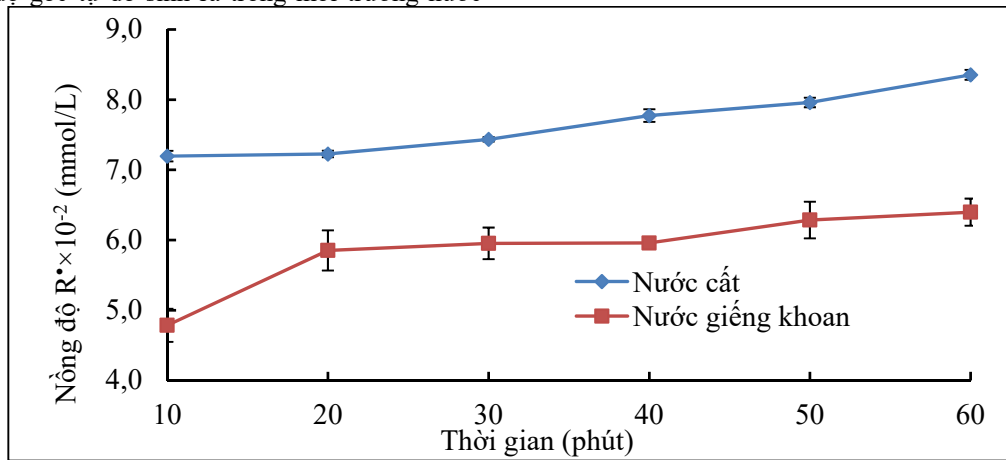


Hình 7: Ảnh hưởng của chất hữu cơ đến nồng độ gốc tự do (U = 16 kV, Q= 2 L/P)

### 3.6 Ảnh hưởng của loại nước đến nồng độ gốc tự do

Ảnh hưởng của nước giếng đến nồng độ gốc tự do cũng được tiến hành khảo sát và kết quả cho thấy nồng độ gốc tự do sinh ra trong môi trường nước

giếng khoan thấp hơn khoảng 15-20% so với nồng độ gốc tự do sinh ra trong môi trường nước cất (Hình 8). Điều này được dự đoán là do sự hiện diện của các ion trong nước giếng khoan đã phản ứng với gốc tự do (Scholtz *et al.*, 2015).



Hình 8: Đồ thị biểu diễn của nước giếng đến gốc tự do (U = 16 kV, Q= 2L/P)

## 4 KẾT LUẬN

Kết quả thí nghiệm chứng minh rằng plasma lạnh có khả năng tạo gốc tự do trong nước xử lý. Nồng độ gốc tự do tăng khi giảm lưu lượng, tăng điện áp và thời gian xử lý. Khi kết hợp với bơm không khí và buồng plasma gián tiếp, nồng độ gốc tự do sẽ cao hơn. Nghiên cứu kế tiếp cần khảo sát ảnh hưởng của phản ứng fenton, xác định mối liên hệ giữa độ dẫn điện đến nồng độ gốc tự do sinh ra cũng như tính toán hiệu quả năng lượng tạo gốc tự do.

## LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin cảm ơn Chương trình phát triển bền vững vùng Tây Nam Bộ đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. Mã số chương trình: 12/2015/HĐ-KHCN-TNB.ĐT/14-19/C02

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

W. Brand-Williams, M.E. Cuvelier and C. Berset. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.

B.P. Dojčinović, D. Manojlović, G.M. Roglić, B.M. Obradović, M.M. Kuraica and J. Purić. 2008. Plasma assisted degradation of phenol solutions. *Vacuum*, 83(1), 234-237.

N.V. Dũng, N.T. Loan và P.V. Toàn. 2017. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý nước. *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 1(110).

J.-M. Hardy, O. Levasseur, M. Vlad, L. Stafford and B. Riedl. 2015. Surface free radicals detection using molecular scavenging method on black

spruce wood treated with cold, atmospheric-pressure plasmas. *Applied Surface Science*, 359, 137-142.

E. Krugly, D. Martuzevicius, M. Tichonovas, D. Jankunaite, I. Rumskaitė, J. Sedlina, V. Racys and J. Baltrusaitis. 2015. Decomposition of 2-naphthol in water using a non-thermal plasma reactor. *Chemical Engineering Journal*, 260, 188-198.

A. Kumaran and R. Joel karunakaran. 2006. Antioxidant and free radical scavenging activity of an aqueous extract of Coleus aromaticus. *Food Chemistry*, 97(1), 109-114.

M. Kuraica, B. Obradović, D. Manojlović, D. Ostojić and J. Purić. 2006. Application of coaxial dielectric barrier discharge for potable and waste water treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 882-905.

H. Lee, J.E. Kim, M.-S. Chung and S.C. Min. 2015. Cold plasma treatment for the microbiological safety of cabbage, lettuce, and dried figs. *Food Microbiology*, 51, 74-80.

S.D. Lee, M. Sarmadi, F. Denes and J.L. Shohet. 1997. Surface modification of polypropylene under argon and oxygen-RF-plasma conditions. *Plasmas and Polymers*, 2(3), 177-198.

J. Li, K. Liu, S. Yan, Y. Li and D. Han. 2016. Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: An overview. *Waste Management*.

P. Liang, W. Jiang, L. Zhang, J. Wu, J. Zhang and D. Yang. 2015. Experimental studies of removing typical VOCs by dielectric barrier discharge reactor of different sizes. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 380-384.

C. Liu, N. Cui, N.M.D. Brown and B.J. Meenan. 2004. Effects of DBD plasma operating

- parameters on the polymer surface modification. *Surface and Coatings Technology*, 185(2-3), 311-320.
- Y. Liu, J.C. Crittenden, L. Wang and P. Liu. 2016. Dechlorination and decomposition of chloroform induced by glow discharge plasma in an aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 308, 84-90.
- E. Marotta, E. Ceriani, M. Schiorlin, C. Ceretta and C. Paradisi. 2012. Comparison of the rates of phenol advanced oxidation in deionized and tap water within a dielectric barrier discharge reactor. *Water Research*, 46(19), 6239-6246.
- T. Matsumoto, D. Wang, H. Akiyama and T. Namihira. 2012. Non-thermal plasma technic for air pollution control. INTECH Open Access Publisher.
- N. Misra, S. Patil, T. Moiseev, P. Bourke, J. Mosnier, K. Keener and P. Cullen. 2014. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries. *Journal of Food Engineering*, 125, 131-138.
- B. Mohammadi and A.A. Ashkarran. 2016. Cold atmospheric plasma discharge induced fast decontamination of a wide range of organic compounds suitable for environmental applications. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 195-200.
- F. Pasquali, A.C. Stratakos, A. Koidis, A. Berardinelli, C. Cevoli, L. Ragni, R. Mancusi, G. Manfreda and M. Trevisani. 2016. Atmospheric cold plasma process for vegetable leaf decontamination: A feasibility study on radicchio (red chicory, *Cichorium intybus* L.). *Food Control*, 60, 552-559.
- C. Sarangapani, N. Misra, V. Milosavljevic, P. Bourke, F. O'Regan and P. Cullen. 2016. Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 225-232.
- V. Scholtz, J. Pazlarova, H. Souskova, J. Khun and J. Julak. 2015. Nonthermal plasma — A tool for decontamination and disinfection. *Biotechnology Advances*, 33(6, Part 2), 1108-1119.
- O.P. Sharma, T.K. Bhat. 2009. DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chemistry*, 113(4), 1202-1205.
- C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison and P. Leprince. 2006. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2-30.
- M. Tichonovas, E. Krugly, V. Racys, R. Hippler, V. Kauneliene, I. Stasiulaitiene and D. Martuzevicius. 2013. Degradation of various textile dyes as wastewater pollutants under dielectric barrier discharge plasma treatment. *Chemical Engineering Journal*, 229, 9-19.
- J. Zhang, Z. Zheng, J. Luan, G. Yang, W. Song, Y. Zhong and Z. Xie. 2007. Degradation of hexachlorobenzene by electron beam irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 431-436.