

## NGHIÊN CỨU VỀ ĐẶC TÍNH PHÓNG ĐIỆN CỦA BUỒNG PLASMA LẠNH

Nguyễn Văn Dũng<sup>1</sup> và Nguyễn Hồng Nhanh<sup>1</sup>

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

**Thông tin chung:**

Ngày nhận: 11/09/2014

Ngày chấp nhận: 29/12/2014

**Title:**

*A study on breakdown characteristics of the cold plasma chamber*

**Từ khóa:**

*Plasma, điện áp phóng điện, cách điện, điện cực, cao áp*

**Keywords:**

*Plasma, breakdown voltage, insulation, electrodes, high voltage*

**ABSTRACT**

*This study presented breakdown characteristics and investigated the magnitude of the voltage forming plasma at frequency of 50 Hz. The breakdown characteristics were studied with volume and surface breakdown. Experimental results revealed that the volume breakdown strength of air was only about 1-1,5 kV<sub>rms</sub>/mm. Tap water was quite good conductive and only withstood the voltage magnitude of 1,5 kV<sub>rms</sub>. The volume breakdown strength of a glass tube was higher than 18 kV<sub>rms</sub>/mm. However, the dry surface breakdown strength was around 0,48 kV<sub>rms</sub>/mm. When the surface of the glass tube was moistened with injection, the surface breakdown strength reduced to 0,44 kV<sub>rms</sub>/mm. When the applied voltage reached a value of around 9 kV<sub>rms</sub>, the appearance of cold plasma was observed. However, the complete breakdown through the glass tube thickness did not occurred. This showed that the plasma was successfully sustained. The length of surface insulation of a glass tube was calculated based on experimental data.*

**TÓM TẮT**

*Nghiên cứu này trình bày đặc tính phóng điện của buồng plasma lạnh và khảo sát điện áp tạo plasma ở tần số 50 Hz. Đặc tính phóng điện được khảo sát thông qua các thí nghiệm về phóng điện đánh thủng và phóng điện bề mặt. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng độ bền điện thể tích của không khí chỉ đạt khoảng 1-1,5 kV<sub>rms</sub>/mm. Nước máy dẫn điện khá tốt và chỉ chịu được điện áp tác dụng khoảng 1,5 kV<sub>rms</sub>. Độ bền điện thể tích của thủy tinh lớn hơn 18 kV<sub>rms</sub>/mm. Tuy nhiên, độ bền điện bề mặt khô của thủy tinh chỉ đạt khoảng 0,48 kV<sub>rms</sub>/mm. Khi bề mặt ống thủy tinh được phun ẩm dạng sương thì độ bền điện bề mặt giảm còn 0,44 kV<sub>rms</sub>/mm. Khi điện áp tác dụng đạt giá trị khoảng 9 kV<sub>rms</sub>, quan sát được sự xuất hiện của plasma lạnh. Tuy nhiên, sự phóng điện đánh thủng bề dày của thành ống thủy tinh đã không xảy ra và kết quả là plasma đã được duy trì. Chiều dài cách điện bề mặt của ống thủy tinh đã được tính toán dựa trên các số liệu thí nghiệm.*

**1 GIỚI THIỆU**

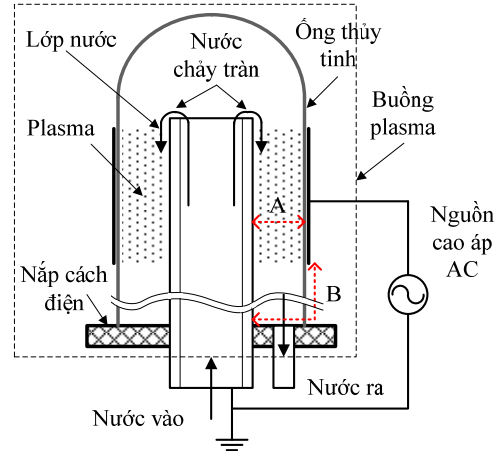
Công nghệ xử lý nước bằng plasma lạnh đã được nghiên cứu trong thời gian gần đây để thay thế các phương pháp truyền thống như chlorine, ozone, UV và sinh học (Rezai, 2011; Velázquez et

al., 2013; Taran et al., 2013; Akiyama et al., 2007). Plasma là trạng thái thứ tư của vật chất được hình thành khi chất khí bị ion hóa. Tùy theo mức độ ion hóa của chất khí mà plasma được xem như “lạnh” hoặc “nhiệt”. Plasma lạnh được tạo thành khi chỉ có vài phần trăm chất khí bị ion hóa. Do đó

chỉ có các điện tử là mang nhiệt độ rất cao trong khi các phần tử còn lại có nhiệt độ xấp xỉ nhiệt độ môi trường. Phương pháp đơn giản và tin cậy nhất để tạo plasma lạnh là gây phóng điện tia lửa giữa các điện cực kim loại có màn chắn trong môi trường không khí. Trong môi trường plasma lạnh, cùng với điện trường cao, nhiệt độ cao của bản thân tia lửa điện, ozone, UV và các phân tử mang điện tích bất thường khác cũng được tạo ra. Nhờ vào các thành phần này mà plasma có khả năng diệt khuẩn hiệu quả cao hơn so với các phương pháp khác (Ma *et al.*, 2008; Glover *et al.*, 1982; Wangner *et al.*, 2003). Ngoài ra, công nghệ plasma có thể diệt các vi sinh vật và oxi hóa các chất hóa học hữu cơ cũng như vô cơ với chi phí vận hành thấp nhưng thân thiện với môi trường (Dors, Mizeraczyk and Mok, 2006; Kuraica *et al.*, 2006). Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh để xử lý nước là rất cần thiết.

Sơ đồ mô hình của hệ thống xử lý nước bằng plasma được cho ở Hình 1. Khi điện áp đặt lên các điện cực đủ lớn, plasma sẽ hình thành do phóng điện tia lửa trong không khí từ bề mặt ngoài của lớp nước đến mặt trong của ống thủy tinh (Kuraica *et al.*, 2006). Cùng với sự xuất hiện của plasma là sự hình thành ozone và tia cực tím (UV) (Kuraica *et al.*, 2006; Lackmann *et al.*, 2013; Bernard *et al.*, 2006). Tương tác của plasma và ozone với các phân tử nước sẽ sinh ra các thành phần ôxy hóa rất mạnh như  $\text{OH}^{\bullet}$ ,  $\text{H}^{\bullet}$  và  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Majeed *et al.*, 2012; Rong *et al.*, 2014). Nhờ vào tác động tổng hợp của ozone, UV và các chất ôxy hóa mạnh mà plasma có hiệu quả cao trong việc diệt hoặc bất hoạt vi khuẩn và các vi sinh vật khác cũng như tác động vào các hợp chất hữu cơ và vô cơ trong nước (Kuraica *et al.*, 2006; Rong *et al.*, 2014; Majeed *et al.*, 2012). Hệ thống này bao gồm hai bộ phận quan trọng nhất là buồng plasma và bộ nguồn cao áp. Từ hình 1, thấy rằng phóng điện có thể xảy ra theo kênh A hoặc B khi buồng plasma hoạt động. Để thiết kế cách điện cho buồng plasma, thì đặc tính phóng điện trên kênh A và B phải được khảo sát. Với A là kênh phóng điện đánh thủng xuyên qua lớp nước, khe không khí và bề dày của thành ống thủy tinh. Do độ bền điện của thủy tinh rất lớn nên chỉ cần khảo sát sự phóng điện đánh thủng trong không khí và nước. Tuy nhiên, ống thủy tinh cần phải được thử nghiệm khả năng chịu đựng điện áp khi plasma được tạo ra. B chính là kênh phóng điện trên bề mặt ống thủy tinh và nắp cách điện. Do chiều dài phóng điện dọc theo nắp cách điện ngắn hơn rất nhiều so với tổng chiều dài phóng điện bề mặt nên chỉ cần khảo sát phóng điện trên bề mặt ống thủy

nh. Do đó, nghiên cứu này khảo sát sự phóng điện đánh thủng trong môi trường nước, sự phóng điện đánh thủng trong môi trường không khí, sự phóng điện trên bề mặt ống thủy tinh và kiểm tra khả năng chịu đựng điện áp của ống thủy tinh. Ngoài ra, điện áp nhỏ nhất để tạo ra plasma cũng được xác định và chiều dài cách điện bề mặt được tính toán dựa trên số liệu thí nghiệm.



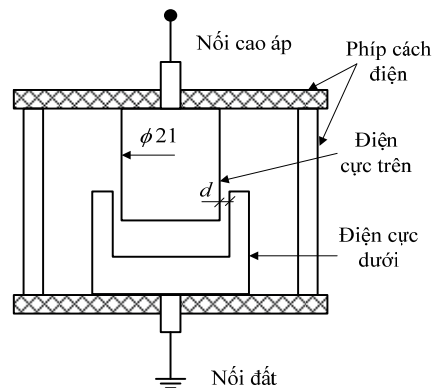
**Hình 1: Mô hình hệ thống xử lý nước bằng plasma (Kuraica *et al.*, 2006)**

## 2 HỆ THỐNG ĐIỆN CỰC VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

### 2.1 Hệ thống điện cực

#### 2.1.1 Phóng điện đánh thủng thể tích

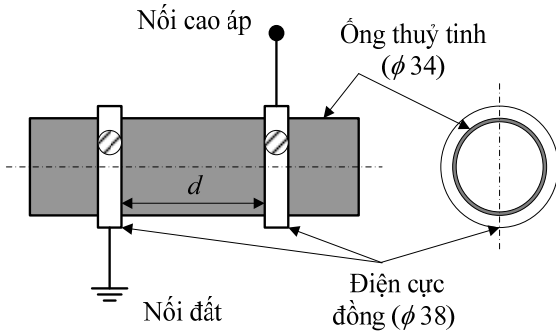
Hình 2 trình bày hệ thống điện cực trụ đồng trục được sử dụng để đo điện áp đánh thủng trong môi trường nước và không khí. Khe hở điện cực  $d$  được thay đổi lần lượt là 1; 2; 5; 10 và 15 mm bằng cách thay đổi lần lượt điện cực bên dưới. Khi thực hiện phóng điện trong môi trường nước, toàn bộ hệ thống điện cực được đặt chìm trong một thùng chứa nước máy.



**Hình 2: Hệ thống điện cực trụ đồng trục**

2.1.2 Phóng điện đánh thủng bề mặt

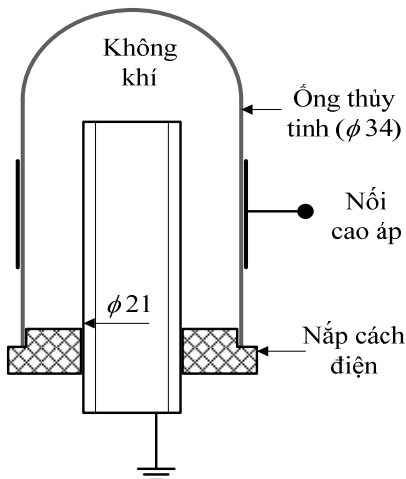
Phóng điện trên bề mặt của ống thủy tinh được thực hiện với hệ thống điện cực vòng như Hình 3. Khe hở điện cực  $d$  được thay đổi lần lượt là 1; 2,5; 5; 7,5 và 10 cm trong hai trường hợp bề mặt ống thủy tinh khô và ướt. Trong quá trình hoạt động của hệ thống xử lý nước (Hình 1), bề mặt ống thủy tinh có thể bị ẩm ướt do ẩm độ của môi trường hoặc do ẩm độ trong khu vực xử lý nước tăng cao. Do đó, để tăng độ an toàn cho hệ thống, sự phóng điện trên bề mặt ống thủy tinh bị ẩm cần phải được khảo sát. Để tạo ẩm, bề mặt ống thủy tinh được phun nước máy dạng sương.



Hình 3: Hệ thống điện cực vòng-vòng

2.1.3 Điện áp tạo plasma

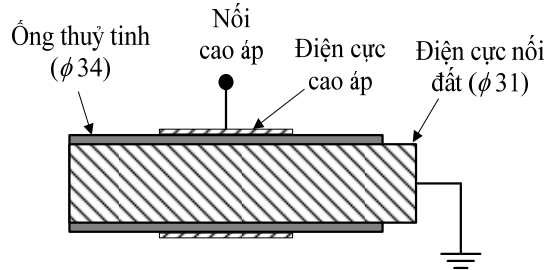
Thí nghiệm xác định điện áp tạo plasma sử dụng hệ thống điện cực có màn chắn là ống thủy tinh như Hình 4. Bề dày của thành ống thủy tinh là 1,5 mm. Hệ thống này có kết cấu giống như hệ thống điện cực ở mô hình xử lý nước (Hình 1) nhưng không chứa nước. Không khí chiếm toàn bộ thể tích bên trong của hệ thống điện cực.



Hình 4: Hệ thống điện cực có màn chắn thủy tinh

2.1.4 Thử nghiệm điện áp chịu đựng của ống thủy tinh

Hình 5 biểu diễn hệ thống điện cực trụ đồng trục được dùng để thử nghiệm điện áp chịu đựng của ống thủy tinh. Ống thủy tinh được chế tạo từ vật liệu Borosilicate có khả năng chịu sốc nhiệt tốt. Thí nghiệm chỉ được thực hiện với một bề dày của thành ống thủy tinh là 1,5 mm. Đây cũng chính là bề dày của thành ống thủy tinh được sử dụng ở mô hình hệ thống điện cực có màn chắn (Hình 4).



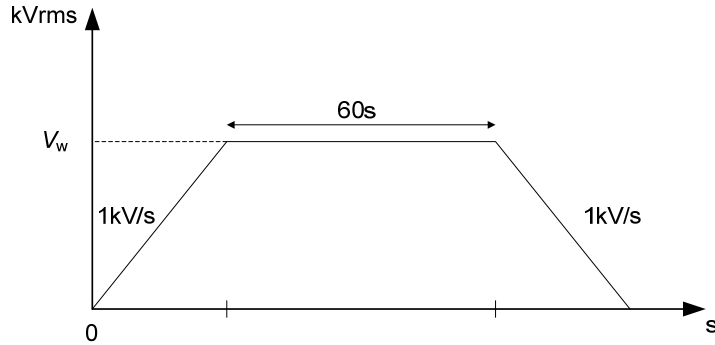
Hình 5: Hệ thống điện cực trụ đồng trục

2.2 Phương pháp thí nghiệm

Tất cả các thí nghiệm đều được thực hiện ở điện áp AC-50Hz. Đối với thí nghiệm phóng điện đánh thủng, điện áp đặt lên hệ thống điện cực được tăng từ 0 cho đến khi cho đến khi phóng điện xảy ra với tốc độ tăng điện áp là 1 kV<sub>rms</sub>/s theo tiêu chuẩn IEC 60060-1. Tại mỗi giá trị khe hở điện cực, thí nghiệm được lặp lại 10 lần và thời gian nghỉ giữa hai lần lặp lại thí nghiệm liên tiếp là 2 phút.

Đối với thí nghiệm xác định điện áp tạo plasma, điện áp được tăng từ 0 cho đến khi xuất hiện plasma với tốc độ tăng điện áp cũng là 1 kV<sub>rms</sub>/s. Sự xuất hiện của plasma được quan sát thông qua sự xuất hiện của các tia lửa điện và sự phát ra ánh sáng màu xanh nhạt trong khe hở điện cực khi trời tối.

Đối với thí nghiệm thử nghiệm điện áp chịu đựng của ống thủy tinh, điện áp đặt lên ống được thay đổi theo qui trình như ở Hình 6. Điện áp tác dụng được tăng từ 0 đến  $V_w$  với tốc độ 1 kV<sub>rms</sub>/s.  $V_w$  là giá trị điện áp chịu đựng được xác định từ điện áp tạo plasma ( $V_p$ ) theo tiêu chuẩn IEC 60071-1. Sau đó điện áp tác dụng được giữ ở giá trị  $V_w$  trong 60 s. Cuối cùng điện áp tác dụng được giảm về 0 cũng với tốc độ 1 kV<sub>rms</sub>/s. Thí nghiệm được lặp lại 3 lần và thời gian nghỉ giữa hai lần thí nghiệm liên tiếp là 5 phút. Nếu trong cả 3 lần thí nghiệm đều không xảy ra phóng điện đánh thủng thì ống thủy tinh chịu được điện áp  $V_p$  trong thời gian lâu dài.



Hình 6: Qui trình thử nghiệm khả năng chịu đựng điện áp của ống thủy tinh

### 3 KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

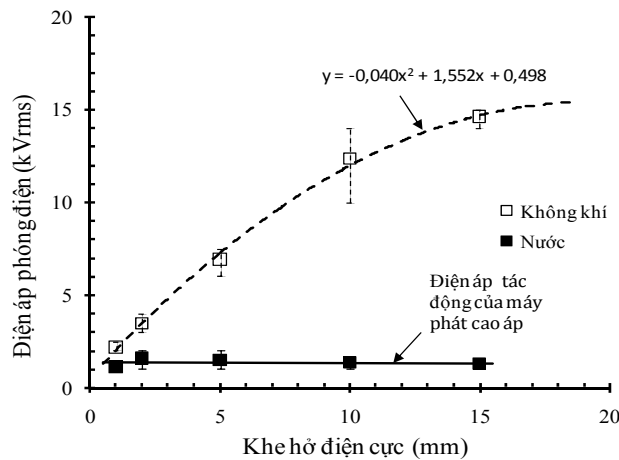
#### 3.1 Đặc tính phóng điện đánh thủng trong không khí và nước

Hình 7 trình bày quan hệ giữa điện áp phóng điện đánh thủng  $V_B$  và khe hở điện cực  $d$  trong môi trường không khí.  $V_B$  thay đổi không tuyến tính theo  $d$ . Khi  $d$  nhỏ ( $d \leq 5$  mm),  $V_B$  tăng nhanh theo  $d$  với tốc độ khoảng 1,5 kV<sub>rms</sub>/mm. Khi  $d$  lớn ( $d \geq 15$  mm),  $V_B$  tăng chậm lại với tốc độ khoảng 1 kV<sub>rms</sub>/mm và có xu hướng bão hòa. Điều này có thể giải thích bằng sự tăng độ không đều của điện trường giữa hai điện cực khi khe hở điện cực  $d$  tăng dẫn đến sự hình thành phóng điện vàng quang trước khi phóng điện đánh thủng diễn ra. Quan hệ giữa  $V_B$  (kV<sub>rms</sub>) và  $d$  (mm) có thể biểu diễn bằng phương trình 1.

$$V_B = -0,04d^2 + 1,552d + 0,498 \quad (1)$$

Khi môi trường giữa hai điện cực là nước,

không đo được điện áp phóng điện đánh thủng. Lý do là nước sử dụng trong điều kiện thí nghiệm được lấy từ nguồn nước máy có thể chứa nhiều ion kim loại hoặc/và có lẫn các tạp chất khác nên có độ dẫn điện lớn. Độ dẫn điện tính được từ việc đo điện trở của nước là  $3,31 \cdot 10^{-5}$  S/m. Giá trị này lớn gấp 6 lần so với độ dẫn điện của nước tinh khiết ( $5,5 \cdot 10^{-6}$  S/m). Do có độ dẫn điện lớn nên thực tế chỉ với điện áp tác dụng khoảng 1,5 kV<sub>rms</sub> đặt lên hệ thống điện cực đã tạo nên dòng điện dẫn đủ lớn khoảng 20 mA chạy trong nước để tác động lên hệ thống bảo vệ ngắn mạch của máy phát cao áp. Nguồn nước dùng để xử lý trong thực tế là nước thải sẽ có độ dẫn điện lớn hơn nước máy bởi vì nước thải có nồng độ tạp chất cao hơn. Do đó, xem như nước thải dẫn điện và sự hình thành lớp nước chảy trên bề mặt điện cực ở Hình 1 sẽ làm tăng đường kính hiệu dụng của điện cực dẫn đến tăng cường độ điện trường trung bình giữa hai điện cực và tăng khả năng tạo plasma giữa hai điện cực.



Hình 7: Quan hệ giữa điện áp đánh thủng và khe hở điện cực

**3.2 Đặc tính phóng điện bề mặt ống thủy tinh**

Hình 8 trình bày quan hệ giữa điện áp phóng điện bề mặt  $V_F$  và khe hở điện cực  $d$ .  $V_F$  tăng tuyến tính khi  $d$  tăng. Điều này cho thấy đặc tính bề mặt của thủy tinh có ảnh hưởng đến  $V_F$  lớn hơn so với ảnh hưởng của hình dạng điện trường giữa hai điện cực.  $V_F$  của bề mặt ướt nhỏ hơn  $V_F$  của bề mặt khô khoảng 11%. Điều đó có nghĩa là hơi ẩm xúc tiến quá trình phóng điện bề mặt dẫn đến làm giảm đáng kể  $V_F$ . Độ bền điện bề mặt khô trung bình tính

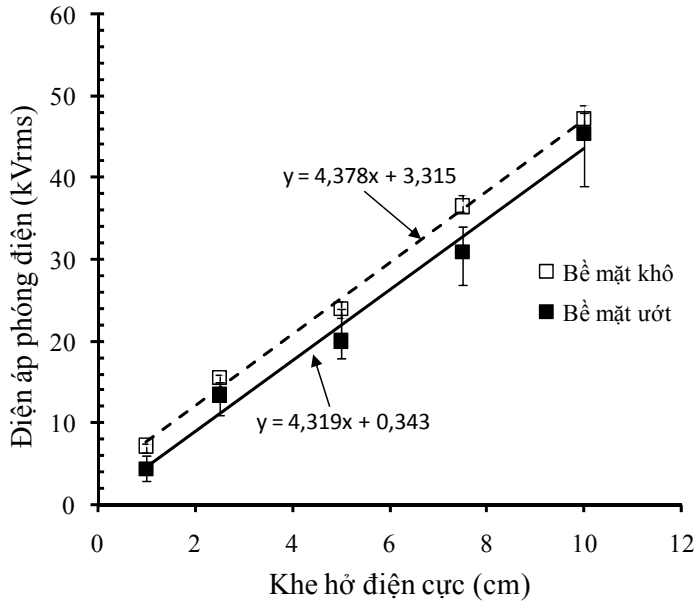
toán được là 4,8 kV<sub>rms</sub>/cm trong khi độ bền điện bề mặt ướt trung bình là 4,4 kV/cm. Quan hệ giữa  $V_F$  (kV<sub>rms</sub>) và  $d$  (cm) có thể biểu diễn bằng các phương trình sau:

– Bề mặt khô  

$$V_F = 4,378d + 3,315 \tag{2}$$

– Bề mặt ướt  

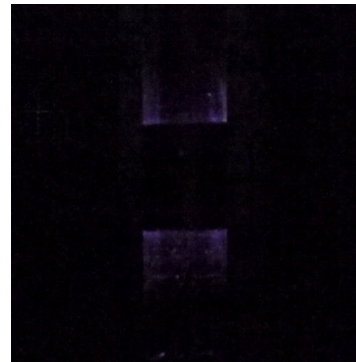
$$V_F = 4,319d + 0,343 \tag{3}$$



**Hình 8: Quan hệ giữa điện áp phóng điện bề mặt và khe hở điện cực**

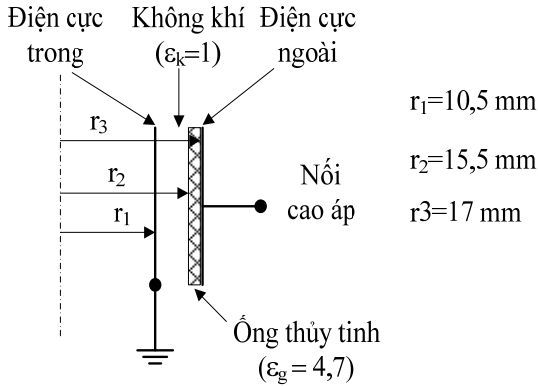
**3.3 Điện áp tạo plasma**

Khi tăng điện áp đến giá trị 9 kV<sub>rms</sub>, quan sát được sự xuất hiện của các tia lửa điện và ánh sáng màu xanh nhạt ở một số vị trí trong môi trường không khí giữa hai điện cực cũng như nghe được âm thanh của phóng điện văng quang. Tăng điện áp đến 12 kV<sub>rms</sub>, quan sát được sự gia tăng nhanh số lượng các tia lửa điện đồng thời toàn bộ không gian giữa hai điện cực đều phát ra ánh sáng màu xanh nhạt (Hình 9). Điều này chứng tỏ rằng plasma đã chiếm toàn bộ thể tích giữa hai điện cực. Tăng điện áp quá 12 kV<sub>rms</sub> có thể gây vỡ ống thủy tinh do phóng điện nhiệt hoặc do tương tác của các điện tích với bề mặt ống thủy tinh.



**Hình 9: Sự xuất hiện của plasma trong ống thủy tinh tại 12 kV<sub>rms</sub>**

Điện trường trong không khí và trong lớp thủy tinh của mô hình (Hình 4) được tính toán với điện áp tạo plasma  $V_p$  lần lượt là 9 và 12 kV<sub>rms</sub>. Sơ đồ chi tiết dùng để tính toán điện trường của mô hình (Hình 4) được cho ở Hình 10. Điện trường trong không khí giữa hai điện cực được tính theo công thức 4 trong khi điện trường trong lớp thủy tinh được tính theo công thức 5.



**Hình 10: Sơ đồ tính toán điện trường**

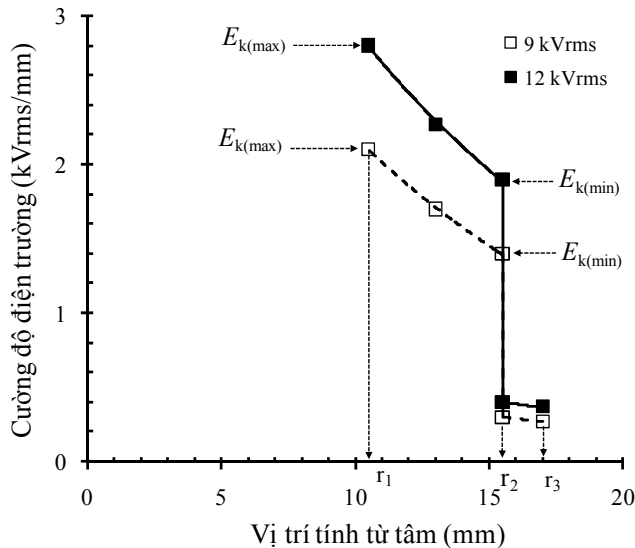
– Điện trường trong không khí

$$E_{k(r)} = \frac{V}{r \left( \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_g} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} (kV_{rms} / mm) \quad (4)$$

– Điện trường trong thành ống thủy tinh

$$E_{g(r)} = \frac{V}{r \left( \epsilon_g \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} (kV_{rms} / mm) \quad (5)$$

Sự phân bố điện trường của hệ thống điện cực ở Hình 10 được biểu diễn ở Hình 11. Đối với  $V_p = 9$  kV<sub>rms</sub>, điện trường cực đại trong không khí  $E_{k(max)}$  là 2,1 kV<sub>rms</sub>/mm và điện trường cực tiểu  $E_{k(min)}$  là 1,4 kV<sub>rms</sub>/mm. Khi tăng  $V_p$  đến 12 kV<sub>rms</sub>, điện trường cực đại và cực tiểu trong không khí đạt giá trị lần lượt là 2,8 kV<sub>rms</sub>/mm và 1,9 kV<sub>rms</sub>/mm. So sánh với độ bền điện thể tích của không khí được xác định ở mục 3.1 là  $1 \div 1,5$  kV<sub>rms</sub>/mm, cường độ điện trường tính toán được trong cả hai trường hợp đều lớn hơn. Như vậy, với điện áp tác dụng từ 9 kV<sub>rms</sub> trở lên hoàn toàn có khả năng tạo ra plasma trong môi trường không khí giữa hai điện cực có màn chắn. Kết quả này phù hợp với số liệu thí nghiệm ở mục 3.3.



**Hình 11: Phân bố điện trường của hệ thống điện cực ở Hình 10**

### 3.4 Thử nghiệm điện áp chịu đựng của ống thủy tinh

Mục 3.2 đã xác định được điện áp để plasma chiếm toàn bộ khe hở điện cực là 12 kV<sub>rms</sub>. Khi plasma xuất hiện và trong trường hợp kèm an toàn nhất xem như toàn bộ không khí bên trong ống

thủy tinh trở nên dẫn điện. Do đó lúc này ống thủy tinh sẽ chịu toàn bộ điện áp 12 kV<sub>rms</sub>. Theo qui định ống thủy tinh cần phải được thử nghiệm khả năng chịu đựng điện áp trong 60 s ở một mức cao hơn ( $V_w$ ) để đảm bảo ống hoạt động bình thường trong thời gian dài ở mức 12 kV<sub>rms</sub>. Từ giá trị  $V_p = 12$  kV<sub>rms</sub>, tra theo tiêu chuẩn IEC 60071-1 được  $V_w$

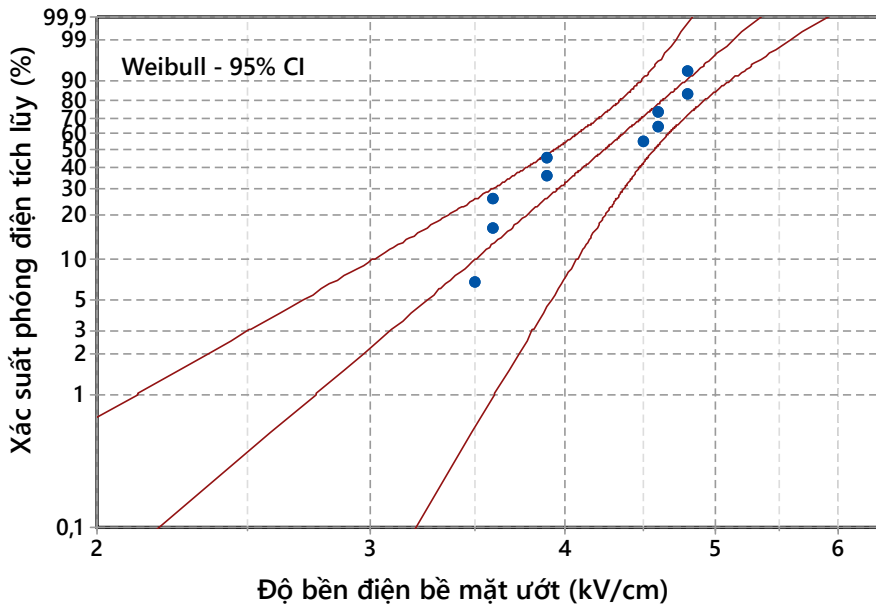
là 28 kV<sub>rms</sub>. Phương pháp thử nghiệm khả năng chịu đựng điện áp  $V_w$  của ống thủy tinh đã được giới thiệu ở mục 2.2. Cả 3 lần thử nghiệm ở điện áp 28 kV<sub>rms</sub> đều không gây ra phóng điện đánh thủng ống thủy tinh. Điều đó chứng tỏ rằng ống thủy tinh có độ bền điện lớn hơn 18 kV<sub>rms</sub>/mm và chịu được điện áp 12 kV<sub>rms</sub> trong thời gian dài.

**3.5 Chiều dài cách điện bề mặt ống thủy tinh**

Từ Hình 8 thấy rằng điện áp phóng điện bề mặt  $V_F$  tăng tuyến tính khi khe hở điện cực  $d$  tăng. Do đó, độ bền điện bề mặt được tính bằng thương số giữa  $V_F$  và  $d$  là một giá trị không đổi. Vì vậy, hoàn toàn có thể chọn dữ liệu về điện áp phóng điện bề

mặt tại  $d = 10$  cm để vẽ đồ thị Weibull của độ bền điện bề mặt. Để tăng độ an toàn cho ống thủy tinh, điện áp phóng điện bề mặt ướt được chọn.

Thông thường khi tính toán chiều dài cách điện, độ bền điện cực tiểu ( $E_m$ ) được xác định tại xác suất phóng điện tích lũy là 0%. Có nghĩa là khi ứng suất điện trường thiết kế bằng với độ bền điện cực tiểu thì sẽ không gây ra phóng điện. Tuy nhiên đối với đồ thị Weibull chỉ có thể xác định  $E_m$  ở giá trị xác suất nhỏ nhất là 0,1% bởi vì ở giá trị xác suất nhỏ hơn 0,1%, đồ thị Weibull không còn chính xác. Từ đồ thị Weibull ở Hình 12 xác định được  $E_m$  ứng với xác suất tích lũy 0,1% là 2,19 kV<sub>rms</sub>/cm.



**Hình 12: Đồ thị Weibull của độ bền điện**

Chiều dài cách điện bề mặt được tính theo công thức 5 (Kwag *et al.*, 2005), với  $V_w = 28$  kV<sub>rms</sub> là điện áp chịu đựng của ống thủy tinh,  $k = 1,45$  là hệ số an toàn. Chiều dài cách điện bề mặt ống thủy tinh tính toán được là 18,5 cm.

$$L = \frac{V_w k}{E_m} (cm) \tag{6}$$

**4 KẾT LUẬN**

Đặc tính phóng điện của buồng plasma lạnh đã được khảo sát chi tiết. Điện áp phóng điện đánh thủng không khí tăng không tuyến tính trong khi điện áp phóng điện bề mặt ống thủy tinh tăng tuyến tính với khe hở điện cực. Điều đó chứng tỏ rằng độ không đồng đều của điện trường giữa hai điện cực sẽ quyết định điện áp đánh thủng của không khí

trong khi đặc tính bề mặt sẽ ảnh hưởng mạnh đến điện áp phóng điện bề mặt. Điện áp tạo plasma trong khe không khí ( $d = 5$  mm) của hệ thống điện cực có màn chắn đã được xác định. Với điện áp tác dụng là 9 kV<sub>rms</sub>, plasma bắt đầu được tạo ra. Khi điện áp tăng lên 12 kV<sub>rms</sub>, plasma chiếm toàn bộ khe không khí. Các kích thước cơ bản của buồng plasma và chiều dài cách điện bề mặt của ống thủy tinh đã được xác định. Đây là các số liệu cần thiết để thiết kế hệ thống xử lý nước bằng plasma trong nghiên cứu kế tiếp.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. C. Bernard *et al.*, 2006. Validation of cold plasma treatment for protein inactivation: a surface plasmon resonance-based biosensor

- study. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39: 3470-3478.
2. D.S. Kwag *et al.*, 2005. A study on the composite dielectric properties for an HTS cable. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 15: 1731-1734.
  3. H. Akiyama *et al.*, 2007. Industrial applications of pulsed power technology. *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. 14: 1051-1064.
  4. H.E. Wangner *et al.*, 2003. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. *Vacuum*, 71: 417-436.
  5. J.L. Glover, P.J. Bendick, W.J. Link and R.J. Plunkett, 1982. The plasma scalpel: A new thermal knife. *Journal of Lasers in Surgery and Medicine*. 2: 101-106.
  6. J.W. Lackmann *et al.*, 2013. Photons and particles emitted from cold atmospheric-pressure plasma inactivate bacteria and biomolecules independently and synergistically. *Journal of the Royal Society Interface*. 10: 1-12.
  7. M. Dors, J. Mizeraczyk and Y.S. Mok, 2006. Phenol oxidation in aqueous solution by gas phase corona discharge. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. 9: 139-143.
  8. M.M. Kuraica *et al.*, 2006. Application of coaxial dielectric barrier discharge for potable and waste water treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemical Research*. 45: 882-905.
  9. R.F. Rezaei (editor), 2011. *Biomedical Engineering-Frontier and Challenges*. Intech. 374 pp.
  10. S.P. Rong, Y.B. Sun and Z.H. Zhao, 2014. Degradation of sulfadiazine antibiotics by water falling film dielectric barrier discharge. *Chinese Chemical Letter*. 25: 187-192.
  11. V.E.Q. Velázquez *et al.*, 2013. Pulsed power supply and coaxial reactor applied to E. coli elimination in water by PDBD. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 29: 25-31.
  12. V.S. Taran, V.V. Krasnyj, A.S. Lozina and O.M. Shvets, 2013. Investigation of pulsed barrier discharge in water-air gap. *Journal of Atomic Science and Technology (BAHT)*. 83: 249-251.
  13. W.S.A. Majeed *et al.*, 2012. Application of cascade dielectric barrier discharge plasma atomizers for waste water treatment. *Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*. American science press.
  14. Y. Ma, G. Zhang, X. Shi, G. Xu and Y. Yang, 2008. Chemical mechanisms of bacterial inactivation using dielectric barrier discharge plasma in atmospheric air. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 36: 1615-1619.