

## NGHIÊN CỨU CƠ BẢN VỀ BỘ LỌC DẦU TĨNH ĐIỆN KIỂU PHUN ĐIỆN TÍCH

A STUDY OF CHARGE INJECTION TYPE OF ELECTROSTATIC OIL FILTER

**Trần Khánh Dương**

Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

Email: [duong.trankhanh@hust.edu.vn](mailto:duong.trankhanh@hust.edu.vn)

### TÓM TẮT

*Bài báo đề xuất một cấu trúc bộ lọc dầu tĩnh điện mới và trình bày kết quả thực nghiệm đánh giá hiệu suất lọc của bộ lọc loại mới. Điện tích được cưỡng bức phun vào môi chất bằng cách đặt một điện áp một chiều cao thế lên hệ điện cực, từ đó gia tăng mật độ điện tích trên các hạt tạp chất trong dầu, qua đó nâng cao tốc độ lọc. Hệ lọc này bao gồm một điện cực phát có mật độ cao các mũi nhọn trên cả hai phía và hai điện cực đối diện có bề mặt nhẵn.*

*Thí nghiệm được thực hiện trên bốn loại dầu thủy lực mà trong đó có bổ sung bột thử với nồng độ xác định. Kết quả cho thấy tốc độ lọc được cải thiện rõ rệt hoặc ở mức đáng kể đối với đa số mẫu dầu. Đáng chú ý, đối với phần lớn các trường hợp, cực tính điện của các hạt bột có thể bị đảo chiều trong khoảng từ vài chục phần trăm đến gần như hoàn toàn khi thực hiện phun điện tích có cực tính ngược với trạng thái điện hóa ban đầu của chúng.*

**Từ khóa:** Lọc dầu tĩnh điện; Phun điện tích; Dầu bôi trơn; Dầu tái chế.

### ABSTRACT

*This study proposes a novel electrostatic oil filter and reports experimental validation. To enhance contaminant charging and thereby improve filtration efficiency, electric charges are forcibly injected into the oil using a high DC voltage applied to a composite electrode system comprising a projection-type emitter electrode and two smooth electrodes.*

*Filtration tests were conducted on 4 lubricating oils containing a fixed concentration of test powder. Results demonstrate a significant or moderate increase in filtration rate for most oils. Additionally, charge injection with opposite polarity reverses the electrification polarity of a substantial fraction (tens to 100%) of particles.*

**Keywords:** Electrostatic filter; Charge injection; Lubricating oil; Reuse.

## 1. GIỚI THIỆU

Bộ lọc dầu tĩnh điện có khả năng loại bỏ các chất ô nhiễm kích thước dưới micromet, chẳng hạn như các sản phẩm oxy hóa của các chất phụ gia từ dầu. Nhờ đặc tính này, thiết bị góp phần kéo dài tuổi thọ của dầu bôi trơn, giảm lượng dầu thải cũng như hạn chế các hỏng hóc của máy móc, bao gồm cả các hệ thống thủy lực [1], [2]. Nguyên lý lọc của bộ lọc dầu tĩnh điện dựa trên thực tế là các hạt rắn trong chất lỏng thường tích điện dương hoặc âm do sự hấp phụ ưu tiên các ion trong chất lỏng và sự phân ly của các nhóm phân ly trên bề mặt hạt [3]. Bằng cách đặt một điện áp một chiều (DC) cao giữa các điện cực nơi dầu chảy qua, các hạt bẩn tích điện trong dầu sẽ bị thu hút và bị bẫy trên bề mặt của các điện cực và một phần từ lọc (thường gọi là bộ thu - collector) được đặt giữa các điện cực, làm bằng vật liệu không dẫn điện như giấy. Tuy nhiên, không phải tất cả các hạt bẩn đều được tích điện đầy đủ.

Như đã biết, ngay cả những hạt không tích điện cũng có thể được tách ra khỏi dầu bằng cách tận dụng lực gây ra bởi điện trường không đều [4]-[6], được gọi là lực điện di (dielectrophoretic force). Lực điện di tỷ lệ thuận với gradient của bình phương cường độ điện trường và chỉ có thể trở nên mạnh hơn tại các vùng có sự tập trung đường sức điện trường cực mạnh. Do đó, phần lớn không gian giữa các điện cực không thể được sử dụng hiệu quả để thu hút và bẫy các hạt. Ngoài ra, lực điện di tỷ lệ thuận với thể tích của hạt, khiến việc bẫy các hạt ô nhiễm cực nhỏ trở nên khó khăn. Vì vậy, các hạt bẩn (đặc biệt là các hạt cực nhỏ) có điện tích nhỏ hoặc không tích điện sẽ không dễ dàng bị loại bỏ, dẫn đến việc dầu không thể được làm sạch triệt để.

Nếu lượng điện tích trên các hạt bẩn được gia tăng, tốc độ lọc có thể được nâng cao

nhờ gia tăng lực Coulomb. Lực Coulomb tác dụng lên một hạt được biểu diễn bằng tích của cường độ điện trường và lượng điện tích trên hạt đó. Lượng điện tích trên một hạt phụ thuộc vào đường kính của hạt [7], chứ không phụ thuộc vào diện tích bề mặt hay thể tích. Do đó, lực Coulomb có hiệu quả trong việc bẫy các hạt bẩn bất kể kích thước của chúng.

Việc phun điện tích vào các chất lỏng điện môi bằng cách đặt một điện trường lớn sử dụng cấu hình điện cực kim-phẳng (needle-plate) là một hiện tượng đã được biết đến rộng rãi và ứng dụng trong các lĩnh vực như bơm điện di (ion drag pumping), tăng cường truyền nhiệt, hoặc bộ truyền động vi mô. Nếu lượng điện tích trên bề mặt hạt bẩn được gia tăng bởi các điện tích được phun vào, độ lớn của lực Coulomb tác dụng lên chúng sẽ lớn hơn, giúp chúng dễ dàng bị bẫy hơn. Trong nghiên cứu này, một loại bộ lọc dầu tĩnh điện kiểu phun điện tích mới được đề xuất nhằm gia tăng tốc độ bẫy và lọc hạt bẩn trong dầu. Phương pháp này cho đến nay vẫn chưa được áp dụng vào việc lọc dầu tĩnh điện và hiện vẫn chưa có nghiên cứu nào đánh giá liệu các điện tích được phun có được hấp phụ hết lên bề mặt hạt bẩn hay không.

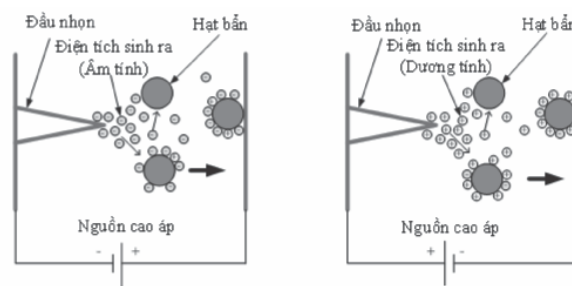
Mục đích chính của nghiên cứu này là kiểm tra khả năng tăng tốc độ lọc bằng cách phun điện tích vào dầu. Các thí nghiệm được tiến hành trên nhiều loại dầu cho ba trường hợp: (1) phun điện tích dương, (2) phun điện tích âm và (3) không phun điện tích. Kết quả thí nghiệm cho thấy việc phun điện tích giúp gia tăng tốc độ lọc của bộ lọc dầu tĩnh điện.

## 2. SỰ PHUN ĐIỆN TÍCH

Như được thể hiện trong Hình 1, khi đặt một điện áp một chiều (DC) cao giữa một điện cực có các đầu nhọn, gọi là điện cực phát,

và một điện cực phẳng, một vùng có cường độ điện trường cực cao sẽ hình thành tại vùng gần đỉnh của đầu nhọn. Các điện tích có thể được tạo ra tại vùng gần đỉnh và đỉnh của đầu nhọn này. Nhìn chung, có một số nguyên nhân có khả năng dẫn đến việc tạo điện tích trong các chất lỏng điện môi dưới cường độ điện trường cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng quá trình tạo điện tích ở cường độ điện trường cao được kiểm soát bởi các hiện tượng bề mặt tiếp giáp (điện cực/chất lỏng) và các hạt tải (carriers) mới được tạo ra, chúng được phun vào chất lỏng sau khi nhận điện tích từ chính điện cực thông qua một số quá trình điện tử hóa. Quá trình tạo điện tích như vậy được gọi là phun điện tích (charge injection), và các điện tích được phun có cùng cực tính với điện cực phát. Việc phun điện tích không chỉ được kiểm soát duy nhất bởi điện trường. Có giả thuyết cho rằng các ion vốn có sẵn trong chất lỏng và/hoặc được tạo ra do sự phân ly của các phân tử dưới tác động của điện trường cao đóng vai trò thiết yếu trong việc kích hoạt các hiện tượng tại bề mặt tiếp giáp (điện cực/chất lỏng) [8].

Nếu một lượng lớn điện tích âm được phun vào (như sơ đồ Hình 1a), lượng điện tích trên các hạt bản vốn đã tích điện âm có thể tăng lên, trong khi đối với các hạt vốn tích điện dương, lượng điện tích có thể giảm đi. Tuy nhiên, nếu lượng điện tích âm được hấp phụ lên hạt bản nhiều hơn lượng điện tích dương ban đầu trên bề mặt hạt, cực tính của hạt có thể bị đảo ngược sang cực âm và hầu hết các hạt sẽ bị đẩy trên điện cực dương phẳng, bất kể cực tính ban đầu của chúng là gì. Ngoài ra, nếu lượng điện tích được hấp phụ có dấu ngược với cực tính ban đầu của hạt lớn hơn nhiều so với lượng điện tích ban đầu, tốc độ lọc có thể được gia tăng đáng kể.



(a) Sự phun điện tích âm (b) Sự phun điện tích dương  
Hình 1. Mô tả nguyên lý sự phun điện tích

### 3. THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

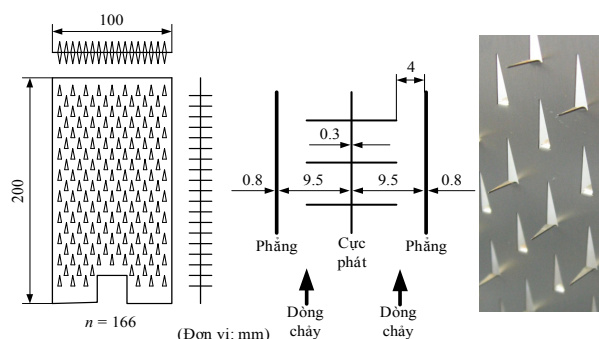
Trong các loại dầu bị nhiễm bẩn thực tế, chúng bao gồm cả các hạt bản không dẫn điện (như sản phẩm oxy hóa của phụ gia) và các hạt bản dẫn điện (như mạt sắt từ quá trình mài mòn kim loại). Để loại bỏ cả hai loại này, cần phải chèn một phần tử lọc vào giữa cặp điện cực. Điều này là do các hạt bản dẫn điện không thể bị loại bỏ nếu thiếu phần tử lọc, trong khi các hạt bản không dẫn điện có thể bị loại bỏ chỉ bằng cặp điện cực. Trong nghiên cứu này, bước đầu để làm rõ ảnh hưởng của hiện tượng phun điện tích lên tốc độ lọc, một mô hình bộ lọc tĩnh điện chỉ bao gồm các điện cực đã được sử dụng. Các loại dầu thử nghiệm đã được chủ động hòa thêm hạt bột không dẫn điện như một loại hạt bản được sử dụng để lọc bằng mô hình này. Các loại hạt bột dẫn điện sẽ được xem xét đến trong nghiên cứu sau, khi bổ sung thêm phần tử lọc. Do các loại dầu thử có độ dẫn điện rất thấp, như thể hiện trong Bảng 1, và thông qua một vài phép đo sơ bộ cho thấy cường độ dòng điện qua bộ lọc là rất thấp, chỉ độ một vài chục micro-Ampe, do đó trong nghiên cứu này cũng chưa xem xét đến công suất điện tiêu thụ của bộ lọc. Thí nghiệm được tiến hành lặp lại một vài lần đối với mỗi một loại dầu và mỗi một điều kiện thí nghiệm khác nhau, các kết quả cuối cùng sẽ là trung bình cộng kết quả của tất cả các lần thí nghiệm thu được tương ứng.

### 3.1. Mô hình bộ lọc tĩnh điện kiểu mới

Hình 2 trình bày sơ đồ các điện cực được chế tạo và ảnh chụp các mũi nhọn hình tam giác của điện cực phát. Điện cực phát và hai điện cực phẳng được làm bằng thép không gỉ và được lắp đặt song song trong vỏ bằng nhựa polycarbonate. Kích thước của mỗi điện cực là 100mm × 200mm. Khoảng cách giữa đỉnh các mũi nhọn của điện cực phát và điện cực phẳng là 4mm. Qua các thử nghiệm sơ bộ, cấu hình điện cực phát trong Hình 2 được xác định là tối ưu nhất để phun điện tích vào dầu. Các mũi nhọn hình tam giác cân được gia công bằng tia laser với chiều dài đáy 2mm và chiều cao 5,5mm. Bán kính cong trung bình của đỉnh mũi nhọn xấp xỉ 25 μm. Tổng cộng có 166 mũi nhọn trên điện cực phát (83 mũi mỗi mặt). Để so sánh, một điện cực tấm phẳng không có mũi nhọn cũng được sử dụng thay thế cho điện cực phát.

### 3.2. Dầu thí nghiệm

Bốn loại dầu thủy lực có hòa hạt bột đã được sử dụng. Một loại bột thử nghiệm (đất mùn Kanto, đường kính hạt trung bình = 1,6 ÷ 2,3 μm) [9] được trộn vào dầu với nồng độ cố định là 1g/l. Bảng 1 hiển thị tên, cấp độ nhớt và độ dẫn điện của các loại dầu thử nghiệm ở nhiệt độ T = 40°C.



Hình 2. Cấu hình điện cực được sử dụng

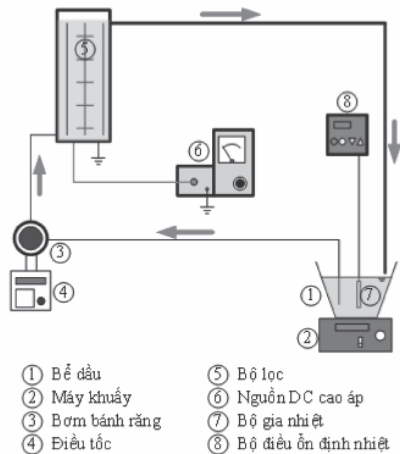
Bảng 1. Các loại dầu thử nghiệm và cấp độ nhớt ở nhiệt độ 40°C

| Dầu số | Hãng sản xuất, Tên loại dầu, cấp độ nhớt             | Độ dẫn điện $\sigma$ (S/m) |
|--------|------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1      | Nippon Oil Corp., Super Hyrando PTF, 26              | $6,58 \times 10^{-11}$     |
| 2      | Japan Energy Corp., Hydlux, 46                       | $4,71 \times 10^{-13}$     |
| 3      | Nippon Oil Corp., Super Hyrando, 22                  | $1,35 \times 10^{-10}$     |
| 4      | Nippon Quaker Chemical Ltd. Quintolubric 822-200, 40 | $3,76 \times 10^{-9}$      |

### 3.3. Thí nghiệm lọc

Sơ đồ thiết bị thí nghiệm được trình bày trong Hình 3. Dầu bản từ bể chứa (1) được đưa vào mô hình bộ lọc (5) bằng bơm bánh răng (3) và quay trở lại bể chứa. Dầu được khuấy liên tục bằng máy khuấy từ (2) để tránh sự lắng đọng do trọng lực của bột. Dòng chảy trong hệ thống thí nghiệm là một vòng khép kín và không có sự lắng đọng của bột thí nghiệm nên lượng bột thu được trong mỗi lần lấy mẫu có thể coi chính là nồng độ khối lượng bột còn lại trong dầu sau những khoảng thời gian lọc nhất định. Nghiên cứu này chưa xem xét đến ảnh hưởng của sự thay đổi điện áp lên tốc độ lọc của bộ lọc và điện áp được giữ cố định ở mức 10 kV, cung cấp bởi bộ nguồn DC cao thế (6). Lưu lượng (flow rate) được điều chỉnh ở mức  $Q = 3 \text{ cm}^3/\text{s}$  thông qua bộ điều tốc (4). Nhiệt độ dầu được giữ ổn định ở  $T = 40^\circ\text{C}$  nhờ bộ gia nhiệt (7) và bộ điều khiển nhiệt (8). Nồng độ khối lượng của bột trong các mẫu dầu lấy theo định kỳ được xác định bằng phương pháp lọc tách với dung môi hexane và màng lọc có kích thước lỗ 0,8 μm [10]. Sau khi thí nghiệm, toàn bộ hệ thống lọc, bao gồm bộ lọc, các điện cực, đường ống, bể dầu đều được rửa sạch sơ bộ bằng dung môi hexane sau đó được rửa sạch

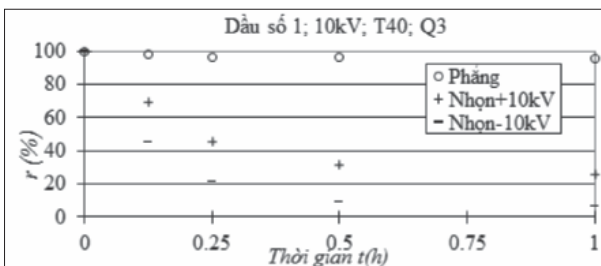
hoàn toàn trong máy rửa siêu âm bằng dung dịch tẩy rửa chuyên dụng. Các chi tiết sau rửa được làm khô bằng phương pháp thăng hoa trong bình hút chân không.



Hình 3. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm

#### 4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

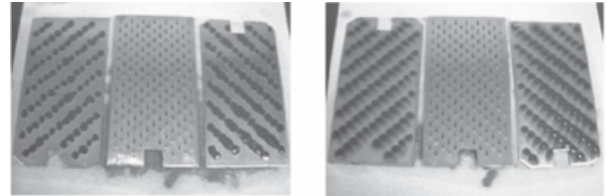
Các kết quả thí nghiệm lọc cho từng loại mẫu dầu thí nghiệm được thể hiện từ Hình 4 đến Hình 7. Trong các hình này, trục tung  $r(\%)$  là tỉ lệ phần trăm khối lượng còn lại của bột bần tại các thời điểm lấy mẫu  $t(h)$  khác nhau so với khối lượng bột bần ban đầu được hòa vào trong dầu. Các hình (a) biểu diễn sự thay đổi của tỷ lệ phần trăm nồng độ khối lượng,  $r(\%)$ , bột đất mùn theo thời gian lọc ( $t$ ), và các hình (b), (c) là ảnh chụp các hạt bột bị bẫy trên điện cực tại thời điểm  $t = 1h$ .



Nồng độ % bột bần còn lại trong dầu theo thời gian lọc

| t(h)      | 0        | 0.125    | 0.25     | 0.5      | 1        |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Phẳng     | 100.0000 | 97.7779  | 96.7337  | 96.1317  | 95.9286  |
| Nhọn+10kV | 100      | 69.0403  | 45.26424 | 31.55526 | 26.24514 |
| Nhọn10kV  | 100      | 44.79555 | 20.68761 | 8.690531 | 6.332435 |

(a)

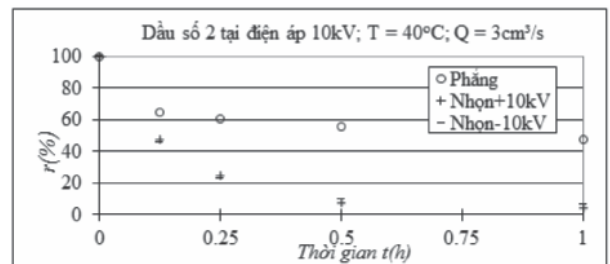


(b)

(c)

Hình 4. Nồng độ hạt bần còn lại trong dầu tại các thời điểm lấy mẫu của dầu số 1

Trong tất cả các ảnh, điện cực phát (emitter electrode) được đặt ở giữa và được nối với cực âm (-) của nguồn cao áp (với trường hợp hình b) và nối với cực dương (+) của nguồn cao áp (với trường hợp hình c); hai điện cực phẳng sẽ được nối với cực còn lại của nguồn DC cao áp trong từng trường hợp tương ứng.

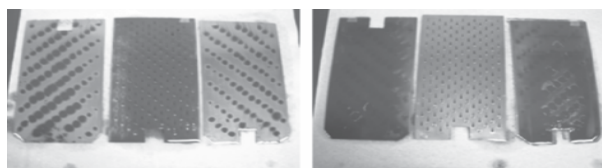


Nồng độ % bột bần còn lại trong dầu theo thời gian lọc

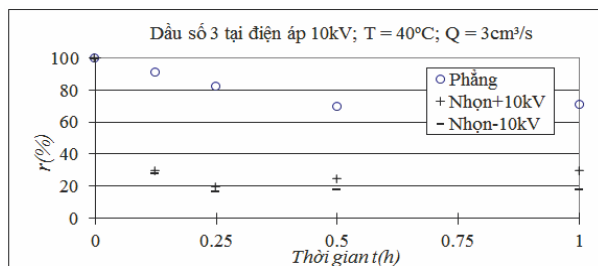
| t(h)      | 0   | 0.125 | 0.25  | 0.5   | 1     |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Phẳng     | 100 | 64.39 | 60.70 | 55.38 | 47.74 |
| Nhọn+10kV | 100 | 47.59 | 24.66 | 7.38  | 4.72  |
| Nhọn10kV  | 100 | 45.47 | 21.88 | 9.54  | 6.03  |

(a)





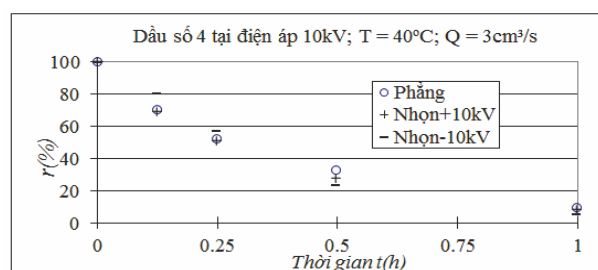
Hình 5. Nồng độ hạt bẩn còn lại trong dầu tại các thời điểm lấy mẫu của dầu số 2



Nồng độ % bột bẩn còn lại trong dầu theo thời gian lọc

| t(h)      | 0   | 0.125 | 0.25  | 0.5   | 1     |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Phẳng     | 100 | 91.18 | 81.83 | 69.81 | 70.85 |
| Nhọn+10kV | 100 | 29.13 | 19.50 | 24.32 | 28.90 |
| Nhọn10kV  | 100 | 28.06 | 17.22 | 18.16 | 18.17 |

Hình 6. Nồng độ hạt bẩn còn lại trong dầu tại các thời điểm lấy mẫu của dầu số 3



Nồng độ % bột bẩn còn lại trong dầu theo thời gian lọc

| t(h)      | 0   | 0.125 | 0.25  | 0.5   | 1    |
|-----------|-----|-------|-------|-------|------|
| Phẳng     | 100 | 70.63 | 52.17 | 32.47 | 9.83 |
| Nhọn+10kV | 100 | 69.02 | 50.47 | 26.97 | 7.47 |
| Nhọn10kV  | 100 | 81.11 | 57.46 | 23    | 5.47 |

Hình 7. Nồng độ hạt bẩn còn lại trong dầu tại các thời điểm lấy mẫu của dầu số 4

Từ kết quả thí nghiệm có thể nhận thấy rằng tốc độ lọc hạt bẩn đối với tất cả các loại dầu thí nghiệm hầu hết đều tăng lên đáng kể khi sử dụng điện cực phát có các mũi nhọn so với trường hợp chỉ sử dụng bản phẳng. Đối với loại dầu số 1, tốc độ lọc khi phun điện tích âm (-) (trường hợp kết nối điện cực phát mũi nhọn với cực âm của nguồn cao áp) cao hơn tốc độ lọc khi phun điện tích dương (+) (trường hợp kết nối điện cực phát mũi nhọn với cực dương của nguồn điện DC cao áp). Điều đó chứng tỏ các hạt bẩn nhiễm điện ban đầu trong dầu số 1 hầu hết đang nhiễm điện tích âm và khi phun điện tích dương sẽ mất một khoảng thời gian để đảo cực tính của các hạt bẩn.

Trong khi đó, đối với loại dầu thứ 2, kết quả thí nghiệm cho thấy các hạt bẩn tích điện ban đầu trong dầu hầu hết có cực tính dương (+) và không dễ dàng bị thay đổi cực tính sang âm (-) kể cả khi phun điện tích âm vào. Vì vậy mà hạt bẩn hầu như luôn bị bẫy bám vào điện cực nào đang được nối với cực âm của nguồn DC cao áp. Chỉ một phần hạt bẩn bị biến đổi cực tính sang âm và bám vào điện cực dương như thể hiện trên ảnh (b), Hình 5.

Đối với loại dầu số 3, ban đầu tốc độ lọc rất cao và không phụ thuộc vào cực tính của điện cực phát, nhưng đến thời điểm cuối quá trình lọc nồng độ hạt bẩn trong dầu lại bị tăng lên. Điều đó thể hiện đã có một phần hạt bẩn sau khi bám vào điện cực thì lại bị bật ra và hòa trở lại dòng dầu. Hiện tượng này có thể giải thích là giữa mũi nhọn của cực phát và tấm phẳng đã xuất hiện một dòng chảy điện di hướng về phía tấm phẳng, dòng chảy này nếu đủ lớn thì sẽ làm cho các hạt bẩn bám yếu trên bề mặt phẳng bị bong ra và hòa lẫn ngược trở lại với dòng dầu. Nhưng đây mới chỉ là phỏng đoán và cần phải có những nghiên cứu thêm để có thể đưa ra kết luận.



Với loại dầu số 4, tốc độ lọc đã khá cao ngay cả khi không phun điện tích và không chênh lệch quá nhiều với khi có phun điện tích. Hạt bẩn trong loại dầu này khá dễ dàng hấp phụ các điện tích lên bề mặt hạt bụi, nhưng khả năng hấp phụ điện tích có thể đã đạt đến trạng thái bão hòa và không gia tăng thêm nữa ngay cả khi có phun thêm điện tích.

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này thực hiện các thí nghiệm ban đầu nhằm đánh giá ảnh hưởng của hiện tượng phun điện tích đến tốc độ lọc của bộ lọc dầu tĩnh điện, thí nghiệm sử dụng 4 loại dầu thủy lực có bổ sung hạt bụi đất mùn. Kết quả cho thấy tốc độ lọc tăng ở các mức khác nhau tùy theo loại dầu, chứng tỏ điện tích phun có khả năng hấp phụ lên bề mặt hạt bụi và cải thiện hiệu quả lọc. Tuy nhiên, hiện tượng bão hòa điện tích có thể xảy ra ở một số loại dầu, làm hạn chế hiệu ứng gia tăng này; do đó cần tiếp tục khảo sát trên nhiều mẫu dầu hơn để đánh giá toàn diện. ❖

Ngày nhận bài: 05/6/2026

Ngày phản biện: 15/6/2026

### Tài liệu tham khảo:

[1]. Tobisu, T., “*Separation technology - electrostatic oil cleaner (in Japanese)*”. Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, Vol.29, No.12 (1984), pp.881-884.

[2]. Sasaki, A., Sasaoka, M., Tobisu, T., Uchiyama, S., and Sasaki, T., “*The use of electrostatic liquid cleaning for contamination control of hydraulic oil*”. Lubrication Engineering, Vol.44, No.3 (1988), pp.251-256.

[3]. Kitahara, A. and Watanabe, A., “*Electrical phenomena at interfaces. fundamentals, measurements, and applications*”. Marcel Dekker, Inc. (1984), pp.124.

[4]. Pohl, H. A., “*The motion and precipitation of suspensions in divergent electric fields*”. Journal of Applied Physics, Vol.22, No.7 (1951), pp.869-871.

[5]. Pohl, H. A., “*Some effects of nonuniform fields on dielectrics*”. Journal of Applied Physics, Vol.29, No.8 (1958), pp.1182-1188.

[6]. Pohl, H. A. and Schwar, J. P., “*Factors affecting separations of suspensions in nonuniform electric fields*”. Journal of Applied Physics, Vol.30, No.1 (1959), pp.69-73.

[7]. Kitahara, A. and Watanabe, A., “*Electrical phenomena at interfaces. fundamentals, measurements, and applications*”. Marcel Dekker, Inc. (1984), pp.128-130.

[8]. Felici, N. J., “*D.C. conduction in liquid dielectrics - A survey of recent progress (part I)*”. Direct Current, Vol.2, No.3 (1972), pp.90-99.

[9]. Japanese Industrial Standard, “*Test powders and test particles*”, JIS Z8901 (1995).

[10]. ASTM Standards, “*Standard test method for insoluble contamination of hydraulic fluids by gravimetric analysis*”, F313 (1983).