

NGHIÊN CỨU DÒNG KHÍ XOÁY TUẦN HOÀN TỰ TẠO TRONG KHÔNG GIAN HẸP ỨNG DỤNG ĐO CHUYỂN ĐỘNG QUAY

STUDY ON CIRCULATORY SELF-GENERATED VORTEX FLOW IN A CONFINED SPACE TO MEASURE ROTATION

Phan Thanh Hòa^{1*}, Bùi Như Phong², Vũ Trung Kiên²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.247>

TÓM TẮT

Để phát hiện chuyển động quay, cảm biến vận tốc góc được sử dụng. Nguyên lý làm việc của cảm biến vận tốc góc kích thước nhỏ cỡ MEMS dựa trên sự dịch chuyển của phần tử tham chiếu - khối nặng hoặc dòng khí do hiệu ứng Coriolis sinh ra từ chuyển động quay. Bài báo này trình bày nghiên cứu về dòng xoáy tuần hoàn tốc độ cao ứng dụng đo chuyển động quay của cảm biến vận tốc góc dạng dòng khí. Dòng xoáy được tạo ra ngay trong thân thiết bị bởi dao động của màng áp điện PZT thông qua một mạng lưới kết nối tuần hoàn từ buồng bơm, qua vòi chỉnh lưu, kênh dẫn, tới buồng chứa dòng xoáy và quay ngược lại kênh dẫn. Dòng khí sẽ tuần hoàn với vận tốc cao hơn sau mỗi chu kỳ dao động của màng áp điện để tạo thành dòng xoáy ổn định trong buồng đo. Với thiết kế như trên, dòng xoáy được phân tích và mô phỏng số bằng OpenFOAM. Một số kết quả của mô phỏng được sử dụng để thiết lập thí nghiệm trên mẫu thử của cảm biến trong đó đặc tính của dòng xoáy được kiểm nghiệm bằng phần tử cảm biến - dây nhiệt điện trở bằng nguyên tắc đối lưu nhiệt. Ngoài ra, khả năng đo vận tốc góc của thiết bị được thử nghiệm thành công trên bàn xoay.

Từ khóa: Dòng xoáy, cảm biến vận tốc góc, dây nhiệt điện trở, PZT, vòi chỉnh lưu.

ABSTRACT

To detect rotation, an angular velocity sensor is used. The working principle of the small-sized MEMS angular velocity sensor is based on the displacement of the reference element - a mass or gas flow due to the Coriolis effect generated from rotation. This article presents research on high-speed circulating vortex flow using rotation measurement of an airflow angular velocity sensor. Vortex flow is created in the device body by oscillation of the PZT piezoelectric membrane through a cyclic connection network from the pump chamber, through the rectifier gap, the channel, to the vortex chamber and back to the channel. The gas flow will circulate at a higher velocity after each oscillation cycle of the piezoelectric membrane to form a stable vortex in the measurement chamber. With the above design, the vortex flow is analyzed and numerically simulated using OpenFOAM. Some of the results of the simulation are used to set up an experiment on a sensor prototype in which the vortex flow characteristics are tested using the sensor element - hotwire based on the principle of thermal convection. Additionally, the device's ability to measure angular velocity is successfully tested on a turntable.

Keywords: Vortex flow, gyroscope, hotwire, PZT, rectifying nozzle.

¹Viện Công nghệ HaUI, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: phanthanhhoa@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/8/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2023

1. GIỚI THIỆU

Dòng xoáy cung cấp một giải pháp hiệu quả để tạo ra các xoáy vi mô là một kỹ thuật tiềm năng để vận chuyển và sau đó tập trung các hạt vi mô vào một vị trí xác định trước và tăng cường sự trộn lẫn của các hạt [1, 2]. Ví dụ, dòng xoáy dựa trên gió ion và dòng không đối xứng được tạo ra có thể được áp dụng để tăng nồng độ mẫu sinh học, rút ngắn thời gian nuôi cấy và phát hiện các tính chất vật lý của dòng [3-6]. Các dòng xoáy được tạo ra bên trong các buồng được sử dụng để bẫy, thu thập và thao tác với tế bào quý hiếm [7, 8].

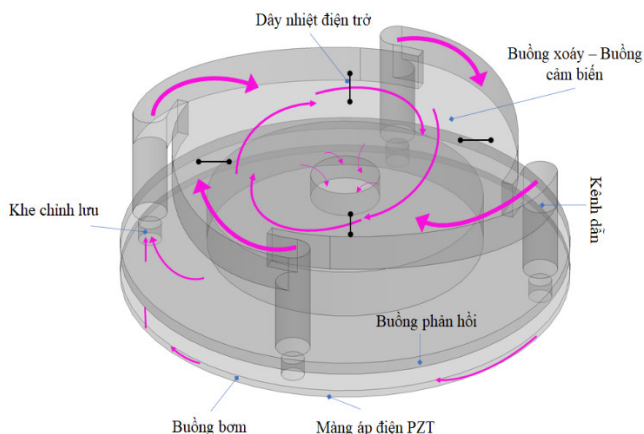
Như chúng ta đã biết, dòng chảy trong một hệ thống khép kín có một số ưu điểm, chẳng hạn như giảm thiểu số lượng mẫu được phân tích và không bị nhiễm bẩn một phần/hoàn toàn do các biến đổi của môi trường [9-13]. Với sự ra đời của dòng tuần hoàn, việc tích hợp và thu nhỏ các hệ thống đo lường sẽ nâng cao đáng kể khả năng và tác động của các hệ thống vi lỏng [14-16]. Dòng tuần hoàn trong một không gian hạn chế được áp dụng chủ yếu trong cảm biến quán tính và đặc biệt là cảm biến vận tốc góc trong đó ưu điểm của hệ vi bơm không van khép kín giúp giảm nguy cơ hư hỏng như trường hợp của các cảm biến dạng cơ khí [17-26]. Tuy nhiên, các nghiên cứu được đề cập ở trên về dòng xoáy chưa cho thấy sự phù hợp cho cảm biến vận tốc góc dòng xoáy. Gần đây, đã có một số nghiên cứu cảm biến quán tính nhiều trục sử dụng chuyển động dòng xoáy; tuy nhiên, cơ chế tạo dòng xoáy chưa được mô tả đầy đủ [27, 28]. Theo hiểu biết của chúng tôi, bên cạnh việc sử dụng bơm ngoài cổng kênh và đặt tiến để tạo ra dòng xoáy, các kỹ thuật khác chưa được trình bày đầy đủ. Do đó, bài báo này đưa ra và phân tích cơ chế tạo dòng xoáy tốc độ cao ngay trong thân thiết bị và có thể ứng dụng làm cảm biến vận tốc góc lưu chất dạng dòng xoáy. Dòng xoáy được chứng minh bằng mô phỏng số và kiểm chứng bằng thực nghiệm trên mẫu thử nghiệm của thiết bị.

2. THIẾT KẾ CỦA CẢM BIẾN VÀ NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC

2.1. Thiết kế và nguyên lý làm việc

Thiết kế của cảm biến được đề xuất dựa trên cơ chế dòng chảy tốc độ cao được tổng hợp bởi hệ thống vi bơm bao gồm một khoang được bịt kín ở một đầu và có vòi phun ở đầu kia. Kỹ thuật này thường được biết đến là kỹ thuật tạo dòng khí tốc độ cao nơi dòng chảy được điều chỉnh bằng

một chuỗi xoáy phía sau mép của vòi phun [14-19]. Theo cách tiếp cận này, màng áp điện PZT thông thường được sử dụng để kích hoạt một dòng chảy tuần hoàn bên trong một hệ thống khép kín. Với dao động rung của màng PZT, luồng không khí di chuyển qua vòi chỉnh lưu tạo ra một lưới dòng chảy nhỏ trong các kênh dẫn ở mỗi chu kỳ [20]. Nói cách khác, quá trình dao động rung của màng PZT tạo ra một tia tổng hợp của lưới dòng chảy lan truyền theo sự tuần hoàn hướng dẫn tới một buồng phản hồi rồi quay trở lại buồng xoáy để tạo nên một xoáy tốc độ cao tại đây. Ưu điểm của chùm tia tổng hợp tạo nên xoáy tốc độ cao so với dòng xoáy thông thường là nó có thể được tạo ra bởi luồng không khí ngay bên trong thiết bị. Do đó, chùm tia tổng hợp tốc độ cao có thể truyền động lượng tuyến tính cho dòng chảy liên tục theo thời gian mà không cần bất kỳ cơ cấu phun nào từ bên ngoài [21]. Hơn nữa, dòng xoáy được tạo ra trong hệ thống bởi dòng chảy tuần hoàn có vận tốc có thể được kiểm soát bởi biên độ rung động của màng PZT.



Hình 1. Thiết kế của cảm biến và nguyên lý dòng xoáy tự tạo bên trong

Dựa vào nguyên lý tạo dòng xoáy như trên, thiết kế của cảm biến vận tốc góc dòng xoáy có cấu hình như mô tả trong hình 1. Cấu hình của cảm biến gồm màng rung PZT gắn trên buồng bơm, có nhiệm vụ tạo ra luồng khí đi qua bốn vòi chỉnh lưu để tạo nên lưới các dòng chảy nhỏ trong kênh dẫn ở mỗi một chu kỳ dao động. Quá trình này tạo nên bốn dòng chảy tổng hợp tốc độ cao trong bốn kênh dẫn truyền dẫn về phía buồng cảm biến nơi các chuyển động tiếp tuyến của chúng tạo ra một xoáy theo chiều kim đồng hồ. Tại trung tâm của buồng cảm biến, dòng xoáy chìm xuống và rời khỏi buồng trước khi được điều chỉnh trở lại các kênh dẫn. Thân cảm biến dạng hình trụ có đường kính 20mm và dày 5,5mm gồm hai nửa đục cái lắp ghép với nhau, một nửa là buồng bơm và nửa còn lại là buồng chứa dòng xoáy hay buồng cảm biến. Khoảng dòng xoáy nối với buồng bơm sâu 0,3mm bằng bốn kênh dẫn có đường kính mỗi kênh là 1,5mm tại phía rìa ngoài cùng của hình trụ. Tại trung tâm buồng xoáy, kênh phản hồi có đường kính 3mm liên kết ngược lại với bốn kênh dẫn để tạo thành bốn vòi chỉnh lưu. Buồng bơm hoạt động nhờ sự rung động của màng PZT dưới tác động của điện áp, thể tích của buồng bơm bị co lại và nở ra do rung động của màng PZT. Không khí bên trong

buồng được đẩy ra ngoài và bị hút vào trong mỗi chu kỳ rung động. Do sự điều chỉnh của vòi phun, một lưới dòng chảy được tạo ra bên trong các kênh truyền động trong mỗi chu kỳ. Lưới dòng chảy này di chuyển vào khoang xoáy, tuần hoàn và sau đó di chuyển trở lại vòi chỉnh lưu thông qua kênh phản hồi. Dòng chảy tuần hoàn cùng với động lượng của nó khuếch đại đáng kể hiệu ứng chỉnh lưu của vòi phun. Sau một số vòng tuần hoàn nhất định, vận tốc và động lượng của dòng chảy đạt giá trị đủ cao để tạo ra một dòng xoáy bên trong buồng xoáy.

Khi cảm biến chịu tác động quay, lực Coriolis sinh ra làm lệch khối dòng xoáy bên trong buồng cảm biến. Để phát hiện độ lệch này, bốn dây nhiệt điện trở được đặt vuông góc với nhau cách đều ra kênh dẫn 4,5mm như thể hiện trong hình 1. Dựa trên hiệu ứng đối lưu nhiệt, khi dòng xoáy bị lệch do tác động của vận tốc góc, gió do dòng xoáy bị lệch làm thay đổi nhiệt lượng sinh ra trên dây nhiệt điện trở bị đốt nóng, dẫn tới điện trở của dây thay đổi, do đó, điện áp đầu ra đo được sẽ thay đổi theo. Điện áp ra đo được trên dây nhiệt điện trở sẽ phản ánh tốc độ quay mà cảm biến đo được.

2.2. Mô phỏng dòng xoáy bên trong thân cảm biến

Vi không khí bị giữ lại và lưu thông bên trong một thiết bị kín nên dòng chảy được tự tạo ra bằng bơm rung mà không có bất kỳ đầu vào hoặc đầu ra nào. Dòng tuần hoàn bên trong kênh dẫn được thể hiện bởi các phương trình sau:

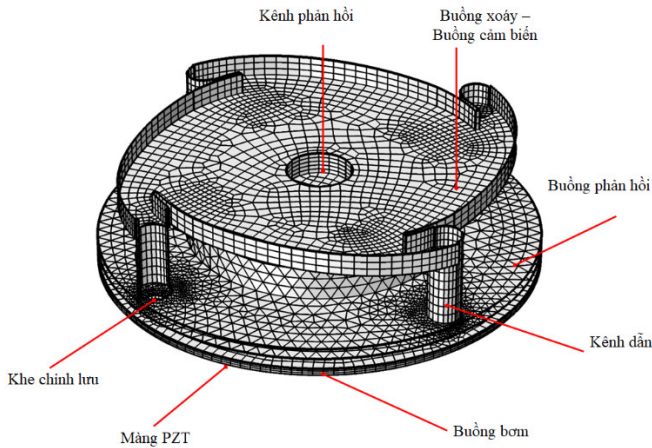
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho \vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) - 2\rho \vec{\omega} \times \vec{u} \tag{2}$$

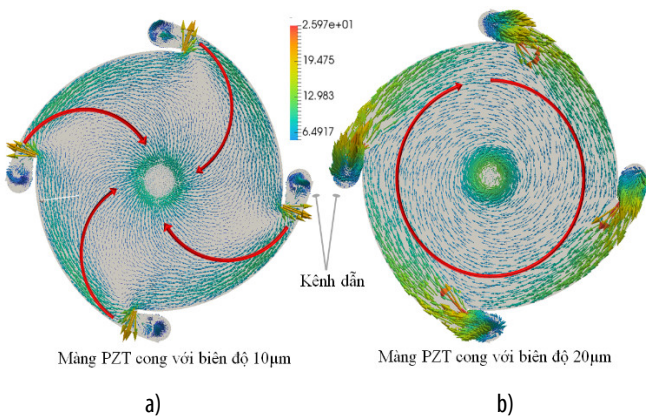
$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho c_p T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \tag{3}$$

Trong đó $2\rho \vec{\omega} \times \vec{u}$ thể hiện gia tốc Coriolis của khung quay với vận tốc góc ω ; \vec{u} , p , và T lần lượt là vectơ vận tốc, áp suất và nhiệt độ của dòng chảy; $\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{Pas}$, $\rho = 1,2041 \text{kgm}^{-3}$, $\lambda = 2,42 \times 10^{-3} \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ và $c_p = 1006,43 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ lần lượt là độ nhớt động, mật độ, độ dẫn nhiệt và nhiệt dung riêng của khí. Vì khí sử dụng là không khí, mối quan hệ giữa áp suất và mật độ được tính theo phương trình trạng thái của chất khí lý tưởng $p = \rho R_u T / M_w$, trong đó $R_u = 8,314 \text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ là hằng số chất khí và $M_w = 28,96 \text{gmol}^{-1}$ là khối lượng phân tử.

Hình 2 thể hiện cấu trúc 3D của cảm biến và chia lưới cấu trúc của cảm biến để phục vụ cho tính toán mô phỏng. Đối với dao động của màng rung PZT, biến dạng theo thời gian của một vị trí r trên màng được thể hiện bởi công thức $z(r, t) = Z(t)\varphi(r)$, trong đó $Z(t)$ là độ lệch phần trung tâm của màng áp điện, $\varphi(r)$ là hình dạng biến dạng. Khi điện áp hình sin có tần số f tác động lên màng áp điện thì độ lệch phần trung tâm của màng áp điện được thể hiện theo công thức $Z(t) = \delta \sin(2\pi ft)$ với δ là biên độ độ lệch Điều kiện biên thiết lập cho màng PZT được lấy từ tốc độ rung của màng: $v(\vec{r}, t) = 2\pi f Z \cos(2\pi ft) \varphi(\vec{r})$, trong đó $\varphi(r)$ là hàm biến dạng được cho bởi công thức $\varphi(r) = (1 - (r/a)^2)^2$, với a là bán kính màng, Z dịch chuyển trung tâm màng PZT và tần số $f = 5,1 \text{kHz}$ là tần số dao động được lấy từ thí nghiệm.



Hình 2. Chia lưới cấu trúc cảm biến dùng cho mô phỏng



Hình 3. Mô phỏng dòng xoáy trong thân cảm biến với biên độ rung khác nhau của màng PZT

Các kết quả mô phỏng số trong hình 3 mô tả trường vận tốc của dòng xoáy được tạo ra bên trong buồng cảm biến với độ cong màng PZT theo trục Z lần lượt là 10µm và 20µm. Với độ lệch màng PZT là 10µm như thể hiện trong hình 3(a), đường vận tốc dòng chảy cho thấy dòng chảy bị hút ngược về buồng phản hồi qua kênh phân hồi và do đó không tạo ra xoáy quay, tức là độ lệch của màng PZT không đủ lớn. Trong khi đó, với độ cong của màng PZT lên đến 20µm, hình 3(b) cho thấy có một dòng xoáy tròn được tạo ra trong buồng cảm biến.

Như vậy, từ kết quả mô phỏng trên, cho thấy rằng biên độ rung của màng PZT là 20µm đối với cấu hình hiện tại là đủ để tạo ra một dòng xoáy tốt trong buồng cảm biến. Nếu màng ngăn PZT rung với biên độ nhỏ hơn 10µm thì không thể quan sát được dòng xoáy xuất hiện và do đó dòng chảy sơ cấp hoạt động như một bồn chứa trong buồng cảm biến.

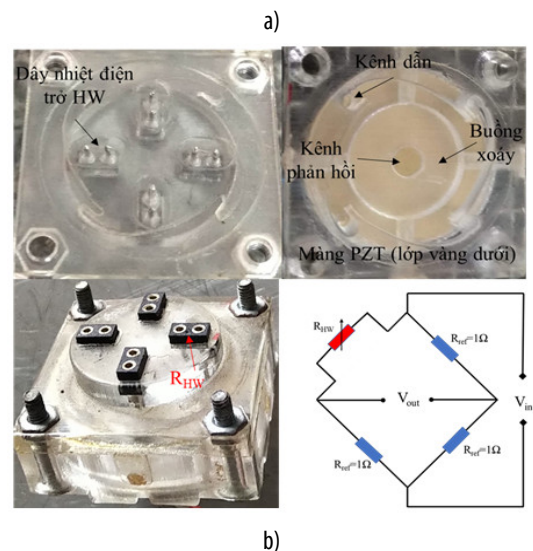
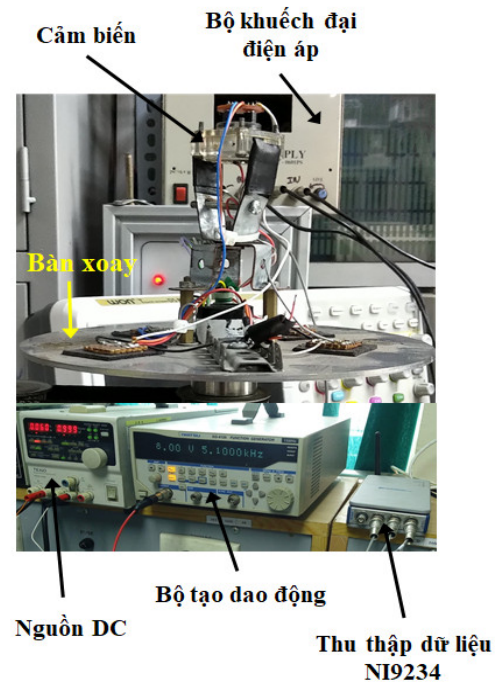
3. THÍ NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

3.1. Thiết lập thí nghiệm

Các kết quả mô phỏng ở trên được kiểm nghiệm bằng các thí nghiệm cho mẫu thực của cảm biến dòng xoáy được chế tạo với thiết kế như phần 1, có dây nóng vonfram được lắp đặt bên trong buồng xoáy và đặt trên bàn xoay. Bố trí thí nghiệm được mô tả trong hình 4(a). Cảm biến được thử nghiệm trên bàn xoay tự chế tạo và tốc độ quay được điều

khiến bởi động cơ một chiều tích hợp encoder (Tsukasa Electric Ltd.) cho phép điều chỉnh tốc độ quay. Mạch đo cho cảm biến được nối với mạch ngoài thông qua slipring để đảm bảo truyền và nhận tín hiệu ngay cả khi đĩa đang xoay. Để phân tích tín hiệu đo theo thời gian, dữ liệu được máy tính ghi và giám sát liên tục trên phần mềm NI Signal Express (National Instrument Ltd.) thông qua thiết bị thu thập dữ liệu NI9234 có tốc độ lấy mẫu 25,6kHz.

Như được thể hiện trong hình 4(b), mạch cầu Wheatson được sử dụng để đo sự thay đổi điện trở của dây nhiệt điện trở HW (hotwire). Điện áp đầu ra V_{out} do vận tốc góc tác động làm thay đổi giá trị điện trở dây nhiệt điện trở chính là điện áp đầu ra của cảm biến.

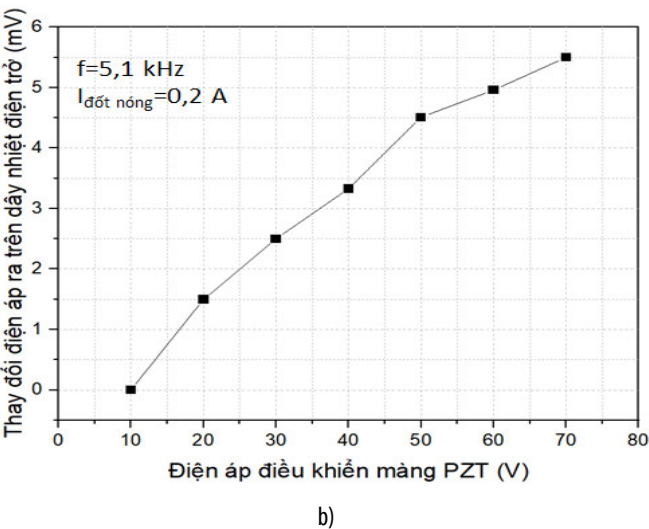
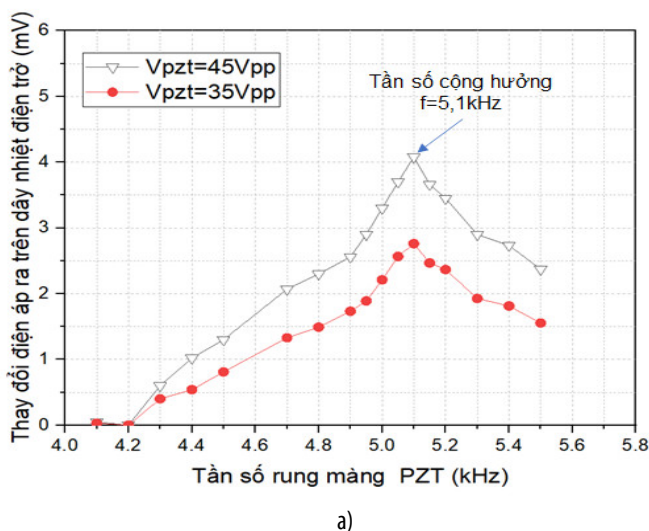


Hình 4. Thí nghiệm phân tích hoạt động của cảm biến: a) Thiết lập thí nghiệm; b) Mẫu cảm biến được chế tạo và mạch cầu Wheatson dùng để đo điện áp ra trên dây nhiệt điện trở

3.2. Kết quả và thảo luận

Trước hết, do dòng xoáy được tạo ra trong cảm biến nhờ dao động rung của màng PZT nên tần số làm việc và độ lớn điện áp tác động lên PZT là tham số quan trọng tác động tới sự xuất hiện của dòng xoáy.

Khi màng PZT rung, một luồng không khí được tạo ra và dây nhiệt điện trở đang nóng bởi dòng điện một chiều sẽ được làm mát bằng đối lưu cưỡng bức. Điện áp tương đối trên dây nhiệt điện trở có thể được xác định trực tiếp bằng $V_{HW} = I\Delta R_{HW} = I\alpha\Delta T$ với α là hệ số nhiệt độ của dây nhiệt điện trở, ΔR_{HW} và ΔT lần lượt là sự thay đổi điện trở và nhiệt độ dây nhiệt điện trở.



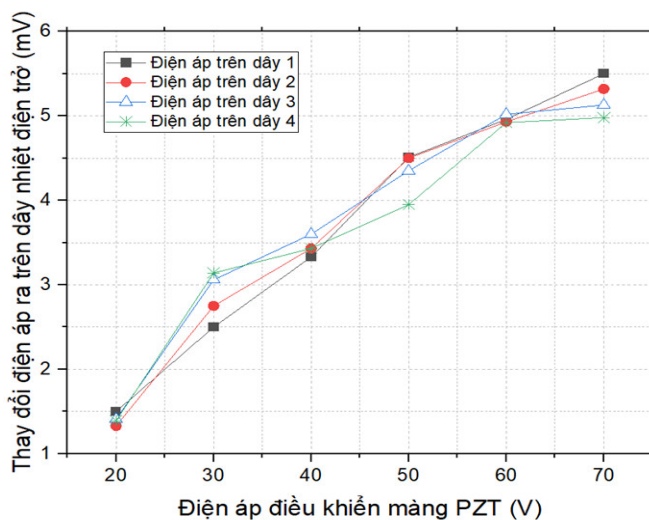
Hình 5. Kết quả thí nghiệm với cảm biến không quay, dây nhiệt điện trở được làm nóng với dòng điện một chiều $I_{đốt nóng} = 0,2A$: a) mô tả quan hệ giữa tần số của điện áp kích thích rung màng PZT với điện áp ra trên dây nhiệt điện trở (tần số cộng hưởng đạt tại $f = 5,1kHz$); b) quan hệ giữa điện áp kích thích màng PZT và điện áp ra trên dây cảm biến tại tần số cộng hưởng

Quan hệ giữa điện áp ra trên dây nhiệt điện trở và tần số của điện áp điều khiển tác động lên màng PZT được vẽ trong hình 5(a). Với giá trị điện áp đỉnh - đỉnh 45V tác động trên màng PZT và dây nhiệt điện trở được làm nóng bằng dòng

điện 0,2A, kết quả thí nghiệm thể hiện rằng điện áp đầu ra trên dây nhiệt điện trở tăng dần khi tăng tần số kích hoạt của PZT. Điện áp đầu ra giảm nhanh sau khi đạt cực đại tại tần số 5,1kHz. Tần số $f = 5,1kHz$ được coi là tần số cộng hưởng của vi bơm màng PZT trong cảm biến vận tốc góc dòng xoáy của chúng tôi. Ngoài ra, hình 5(b) chỉ ra mối quan hệ giữa điện áp đầu ra trên dây nhiệt điện trở ($I_{đốt nóng}$) và điện áp điều khiển của PZT khi cảm biến đang hoạt động ở tần số cộng hưởng 5,1kHz và dây cảm biến được làm nóng bằng dòng điện 0,2A. Kết quả cho thấy điện áp ra của dây cảm biến tăng cùng với sự tăng của điện áp điều khiển của PZT. Điều này có thể được giải thích là do biến dạng lớn hơn của màng PZT khi điện áp kích thích mạnh lên nên tạo ra tốc độ dòng chảy cao hơn [22].

Hình 5(b) cũng cho thấy rằng nếu điện áp kích thích màng PZT nhỏ hơn 10V, dòng xoáy trong buồng cảm biến sẽ không tồn tại, thể hiện ở giá trị điện áp đầu ra bằng 0V.

Ngoài ra, điện áp đầu ra đo được trên bốn dây nhiệt điện trở được đặt trong buồng cảm biến (hình 4(b)) thay đổi theo điện áp kích thích cho màng PZT tại tần số cộng hưởng của vi bơm bằng 5,1kHz và dòng điện đốt nóng bằng 0,2A gần như giống nhau như thể hiện trong hình 6. Kết quả này chứng minh, dòng chảy qua bốn dây nhiệt điện trở có vận tốc gần bằng nhau và đồng dạng với nhau.

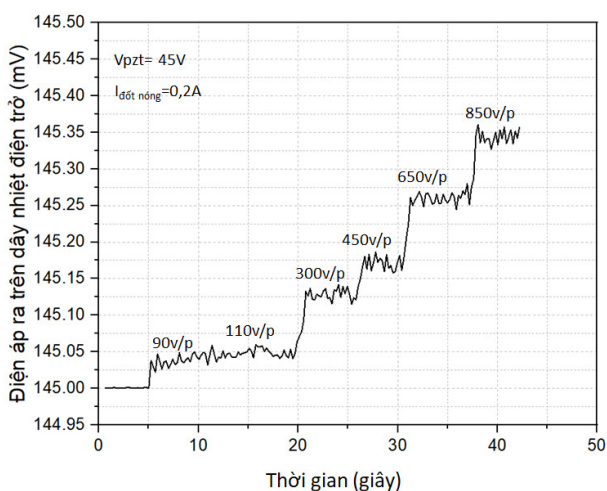


Hình 6. Điện áp trên bốn dây nhiệt điện trở thay đổi theo điện áp điều khiển màng rung PZT tại tần số cộng hưởng 5,1kHz và dòng điện đốt nóng 0,2A

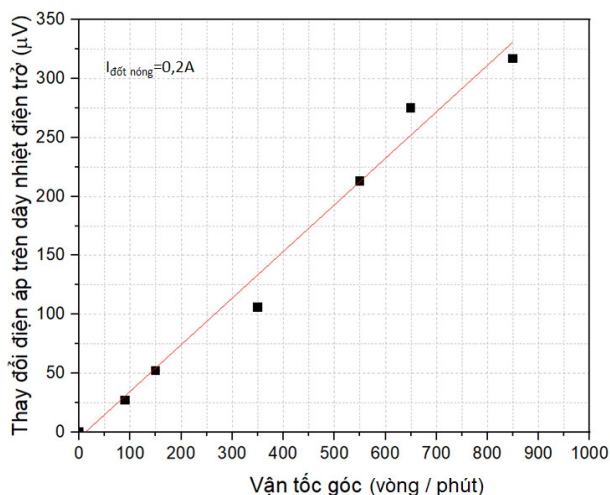
Để kiểm tra khả năng đo độ quay của cảm biến dòng xoáy, cảm biến được đặt tại trung tâm đĩa xoay của bàn xoay với trục Z của cảm biến trùng với trục Z của đĩa xoay. Dây nhiệt điện trở được đốt nóng với các giá trị dòng điện khác nhau. Khi bàn xoay quay, dòng xoáy trong buồng cảm biến bị lệch đi. Điều này dẫn tới nhiệt sự thay đổi nhiệt độ của dây cảm biến và sự thay đổi này được phát hiện nhờ điện áp thay đổi trên dây cảm biến.

Hình 7 thể hiện sự thay đổi theo thời gian của điện áp đầu ra trên dây nhiệt điện trở khi tốc độ bàn xoay tăng dần từ trạng thái nghỉ đến tốc độ 850 vòng/phút. Kết quả thí nghiệm cho thấy điện áp trên dây nhiệt điện trở thay đổi

tăng từ 145,03 đến 145,35mV tương ứng với tốc độ quay tăng từ 90 vòng/phút lên tới 850 vòng/phút. Quan sát thí nghiệm này cho thấy điện áp đầu ra lặp lại ở mỗi bước. Điều này thể hiện rõ hơn trong hình 8 về mối quan hệ giữa sự thay đổi vận tốc góc dẫn tới điện áp đầu ra thay đổi. Mặc dù, kết quả thí nghiệm không được tuyến tính do tạp âm trên mạch điện, và in 3D của cấu trúc cảm biến không thật hoàn chỉnh, gồ ghề, tuy nhiên kết quả mối quan hệ giữa điện áp đầu ra và vận tốc góc gần như tuyến tính với hệ số $R^2 = 0,98$ như mô tả trong hình 8. Kết quả thí nghiệm về quan hệ giữa điện áp đầu ra và vận tốc góc tuân theo mô hình hồi quy tuyến tính $\Delta V_{out} = -7,76 + 0,39 * \omega$ (trong đó: ΔV_{out} (μV) - thay đổi điện áp ra trên dây nhiệt điện trở; ω - vận tốc góc (vòng/phút)). Ví dụ chuyển động quay có vận tốc góc là 350 vòng/phút, điện áp đầu ra trên dây nhiệt điện trở thay đổi vào khoảng 128,74 μV .



Hình 7. Kết quả thí nghiệm cảm biến dòng xoáy đặt trên bàn xoay - vận tốc góc đo bởi dây nhiệt điện trở khi tốc độ quay tăng dần theo thời gian



Hình 8. Kết quả thí nghiệm về quan hệ giữa vận tốc góc và điện áp thay đổi trên dây nhiệt điện trở

Như vậy, với những kết quả mô phỏng và thí nghiệm trên đây, có thể thấy rằng thiết kế cảm biến vận tốc góc dòng xoáy do chúng tôi đề xuất đã tạo ra được dòng xoáy ổn định

do chính hệ thống vi bơm PZT trong thân cảm biến tạo ra và dòng xoáy này có thể dùng để đo vận tốc góc.

4. KẾT LUẬN

Báo cáo này trình bày về nghiên cứu phát triển dòng khí xoáy tự tạo trong thân cảm biến ứng dụng để đo vận tốc góc. Dòng xoáy được tạo ra do sự dao động của màng PZT trên một hệ thống buồng bơm, kênh dẫn, buồng xoáy, kênh phản hồi kết hợp với vòi chỉnh lưu làm cho dòng khí được lưu chuyển tuần hoàn và tạo ra dòng xoáy tốc độ cao ổn định mà không cần tới bất kỳ đầu vào và đầu ra nào. Trong cảm biến này, dòng xoáy bị lệch bởi lực quán tính Coriolis sinh ra do chuyển động quay được đo bởi dây nhiệt điện trở nhúng trong buồng dòng xoáy. Các kết quả thí nghiệm trên mẫu thật của cảm biến đã khẳng định dòng xoáy tồn tại với tần số kích thích cho bơm màng PZT là 5,1kHz và độ lớn của điện áp kích thích này lớn hơn 20V. Khả năng bước đầu để đo vận tốc góc của chuyển động quay đã được chứng minh qua các kết quả thí nghiệm.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu là chuẩn hóa các mạch đo và phát triển đo vận tốc góc đa trục.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2019.19

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. J. Liu, H. H. Wei, S. H. Hwang, H. C. Chang, 2010. *Dynamic particle trapping, release, and sorting by microvortices on a substrate*. Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys., vol. 82, no. 2.
- [2]. S. J. Williams, A. Kumar, N. G. Green, S. T. Wereley, 2009. *A simple, optically induced electrokinetic method to concentrate and pattern nanoparticles*. Nanoscale, vol. 1, no. 1, pp. 133–137.
- [3]. L. Y. Yeo, J. R. Friend, 2014. *Electrohydrodynamic Flow for Microfluidic Mixing and Microparticle Manipulation*. in International Symposium on Electrohydrodynamics (ISEHD), Buenos Aires Argentina, no. December, pp. 4–7.
- [4]. L. Y. Yeo, D. Hou, S. Maheshwari, H. C. Chang, 2006. *Electrohydrodynamic surface microvortices for mixing and particle trapping*. Appl. Phys. Lett., vol. 88, no. 23, pp. 1–4.
- [5]. T. T. Bui, T. X. Dinh, C. D. Tran, T. C. Duc, V. T. Dau, 2017. *Computational and experimental study on ion wind scheme based aerosol sampling for biomedical applications*. in 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), pp. 560–563.
- [6]. D. Hou, S. Maheshwari, H. C. Chang, 2007. *Rapid bioparticle concentration and detection by combining a discharge driven vortex with surface enhanced Raman scattering*. Biomicrofluidics, vol. 1, no. 1.
- [7]. D. Di Carlo, D. Irimia, R. G. Tompkins, M. Toner, 2007. *Continuous inertial focusing, ordering, and separation of particles in microchannels*. Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 104, no. 48, pp. 18892–18897.
- [8]. T. Hayakawa, S. Sakuma, F. Arai, 2015. *On-chip 3D rotation of oocyte based on a vibration-induced local whirling flow*. Microsystems Nanoeng., vol. 1, no. March, p. 15001.

- [9]. K. D. Dorfman, M. Chabert, J. H. Codarbox, G. Rousseau, P. de Cremoux, J. L. Viovy, 2005. *Contamination-free continuous flow microfluidic polymerase chain reaction for quantitative and clinical applications*. *Anal. Chem.*, vol. 77, no. 11, pp. 3700–4.
- [10]. V. T. Dau, T. X. Dinh, T. T. Bui, 2015. *Jet flow generation in a circulatory miniaturized system*. *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 223, pp. 820–826.
- [11]. Tung Thanh Bui, Thien Xuan Dinh, Phan Thanh Hoa, Van Thanh Dau, 2015. *Study on the PZT diaphragm actuated multiple jet flow in a circulatory miniaturized system*. in 2015 IEEE Sensors, pp. 1–4.
- [12]. T. X. Dinh, D. B. Lam, C. D. Tran, T. T. Bui, P. H. Pham, V. T. Dau, 2017. *Jet flow in a circulatory miniaturized system using ion wind*. *Mechatronics*, vol. 47, no. September, pp. 126–133.
- [13]. L. B. Dang, T. X. Dinh, T. T. Bui, T. C. Duc, H. T. Phan, V. T. Dau, 2017. *Ionic JET flow in a circulatory miniaturized system*. in 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), pp. 2099–2102.
- [14]. V. T. Dau, T. X. Dinh, 2015. *Numerical study and experimental validation of a valveless piezoelectric air blower for fluidic applications*. *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 221, pp. 1077–1083.
- [15]. L. Y. Yeo, H. C. Chang, P. P. Y. Chan, J. R. Friend, 2011. *Microfluidic devices for bioapplications*. *Small*, vol. 7, no. 1, pp. 12–48.
- [16]. Y. H. Seo, H. J. Kim, W. K. Jang, B. H. Kim, 2014. *Development of active breathing micro PEM fuel cell*. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 101–106.
- [17]. V. T. Dau, D. V. Dao, T. Shiozawa, H. Kumagai, S. Sugiyama, 2005. *A Single-Axis Thermal Convective Gas Gyroscope*. *Sensors Mater.*, vol. 17, no. 8, pp. 453–463, 2005.
- [18]. V. T. Dau, D. V. Dao, T. Shiozawa, H. Kumagai, S. Sugiyama, 2006. *Development of a dual-axis thermal convective gas gyroscope*. *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 16, no. 7, pp. 1301–1306.
- [19]. V. T. Dau, T. X. Dinh, D. V. Dao, S. Sugiyama, 2008. *Design and Simulation of a Novel 3-DOF MEMS Convective Gyroscope*. *IEEJ Trans. Sensors Micromachines*, vol. 128, no. 5, pp. 219–224.
- [20]. S. Liu, R. Zhu, 2017. *Micromachined Fluid Inertial Sensors*. *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 367.
- [21]. H. Cao, H. Li, J. Liu, Y. Shi, J. Tang, C. Shen, 2016. *An improved interface and noise analysis of a turning fork microgyroscope structure*. *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 70–71, pp. 1209–1220.
- [22]. H. Cao, et al., 2018. *Sensing mode coupling analysis for dual-mass MEMS gyroscope and bandwidth expansion within wide-temperature range*. *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 98, pp. 448–464.
- [23]. V. T. Dau, T. Otake, T. X. Dinh, D. V. Dao, S. Sugiyama, 2008. *A multi axis fluidic inertial sensor*. in Proceedings of IEEE Sensors, vol. 1, pp. 666–669.
- [24]. P. T. Hoa, T. X. Dinh, V. T. Dau, 2015. *Design Study of Multidirectional Jet Flow for a Triple-Axis Fluidic Gyroscope*. *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 7, pp. 4103–4113.
- [25]. Dzung Viet Dao, S. Okada, Van Thanh Dau, T. Toriyama, S. Sugiyama, 2004 *Development of a 3-DOF silicon piezoresistive micro accelerometer*. in Micro-Nanomechatronics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society, pp. 1–6.
- [26]. R. Amarasinghe, D. V Dao, V. T. Dau, S. Sugiyama, 2009. *Ultra miniature novel three-axis micro accelerometer*. in Proceedings of IEEE Sensors, 2009.
- [27]. H. Chang, P. Zhou, X. Gong, J. Xie, W. Yuan, 2013. *Development of a tri-axis vortex convective gyroscope with suspended silicon thermistors*. in 2013 IEEE Sensors, pp. 1–4.
- [28]. H. Chang, P. Zhou, Z. Xie, X. Gong, Y. Yang, W. Yuan, 2013. *Theoretical modeling for a six-DOF vortex inertial sensor and experimental verification*. *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 22, no. 5, pp. 1100–1108, Oct. 2013.

AUTHORS INFORMATION**Phan Thanh Hoa¹, Bui Nhu Phong², Vu Trung Kien²**¹HaUI Institute of Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam²Faculty of Electronic Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam