

NGHIÊN CỨU MÁY VI TRỘN XOÁY CHO HỆ THỐNG PHÂN TÍCH VI MÔ INVESTIGATION OF VORTEX MICROMIXER FOR MICRO-TOTAL-ANALYSIS-SYSTEMS

BÙI GIA THỊNH

Khoa Điện - Cơ, Trường Đại học Hải Phòng

Email liên hệ: thinhbg@dhhp.edu.vn

Tóm tắt

Các thiết bị phân tích thí nghiệm ngày càng được thu nhỏ để mang lại nhiều lợi thế như giảm chi phí phần cứng, tiêu hao nguyên liệu, tốc độ phân tích nhanh hơn và khả năng vận hành để đạt được hiệu suất cao. Hệ thống vi chất lỏng đang trở thành một công nghệ quan trọng trong các ứng dụng của quá trình phân tích hóa học và sinh học trong hệ thống phân tích tổng thể vi mô (Micro total analysis system (μ -TAS)). Trong bài báo này trình bày nghiên cứu một vi trộn hoạt động xoáy ba chiều (three-dimensional (3-D)) sử dụng màng dẫn động bằng khí nén để tạo ra dòng chảy xoáy trong buồng trộn để có hiệu suất trộn nhanh chóng. Máy vi trộn được chế tạo bằng công nghệ hệ thống vi cơ điện tử (Micro-electro-mechanical system (MEMS)). Mô phỏng tính toán động lực học chất lỏng (Computational-fluid-dynamics (CFD)) cũng được sử dụng để khảo sát cơ chế trộn và khảo sát các thông số dòng chảy. Vi trộn kiểu xoáy 3-D được sử dụng để tạo ra trường dòng chảy xoáy và để chứng minh hiệu suất trộn đáng kể tới 95,0% trong một khoảng thời gian ngắn. Các mô phỏng và các quan sát thực nghiệm chỉ ra rằng hiệu suất trộn tăng khi tần suất tăng lên và thời gian trộn hoàn toàn giảm. Những kết quả đem lại cho thấy rằng vi trộn xoáy được đề xuất hoàn toàn có thể trộn hai mẫu thích hợp sử dụng trong các hệ thống vi cơ điện tử ứng dụng trong phân tích sinh học và hóa học.

Từ khóa: Hệ thống phân tích tổng thể vi mô, vi trộn, hệ thống vi cơ điện tử.

Abstract

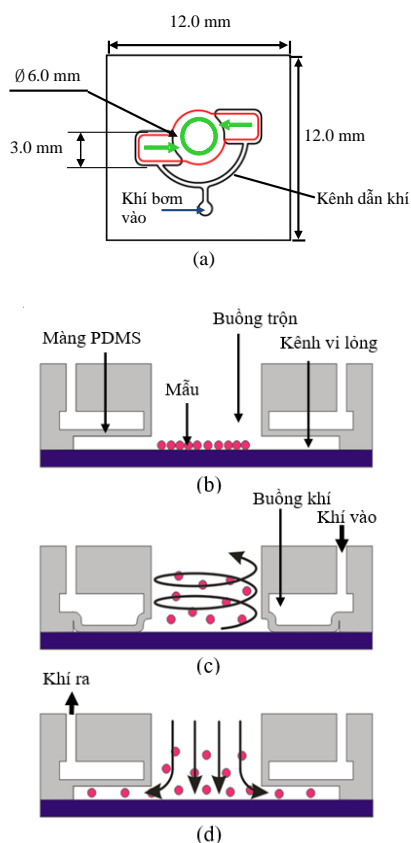
Laboratory analyzers are increasingly being miniaturized to offer many advantages including reduced hardware costs, material consumption, faster analysis speeds, and the ability to operate for high performance. Microfluidic systems are becoming an important technology in chemical and biological process applications. In this paper,

a three-dimensional (3-D) vortex-operated micromixer is presented that using a pneumatically driven diaphragm to create a vortex flow in the mixing chamber for rapid mixing performance. The micromixer is fabricated using microelectromechanical system (MEMS) technology. Computational fluid dynamics (CFD) simulations are also used to investigate the mixing mechanism and investigate the flow parameters. The 3-D vortex micromixer is used to generate a vortex flow field and to demonstrate a remarkable mixing efficiency of up to 95.0% in a short period of time. Simulations and experimental observations indicate that the mixing efficiency increases as the driving frequency increases and the complete mixing time decreases. The results show that the proposed vortex micromixer can completely mix the two samples suitable for use in micromechanical systems applied in biological and chemical analysis.

Keywords: μ -TAS, micromixer, MEMS.

1. Mở đầu

Với sự xuất hiện của công nghệ micro và nano, việc nghiên cứu dòng chất lỏng và sự kiểm soát của nó ở quy mô cực nhỏ đã thu hút được sự chú ý đáng kể trong hai thập kỷ qua. Nhu cầu về các hệ thống phân tích sinh hóa trên chip, thường được gọi là μ -TAS hoặc Lab-on-a-Chip đang tăng lên nhanh chóng, điều đó sẽ giúp cho việc xét nghiệm dễ dàng, nhanh chóng, hiệu quả và có chi phí thấp. Hầu hết các quá trình phản ứng hóa học và sinh học được thực hiện trong chất lỏng, sự phát triển của μ -TAS về bản chất có liên quan đến sự phát triển của các thiết bị vi lỏng. Để cải thiện thông lượng, tức là lượng mẫu có thể xử lý và phân tích trong một khoảng thời gian ngắn, bộ trộn phải trộn nhanh các mẫu trước khi hỗn hợp đến cảm biến. Do đó, một máy vi trộn hiệu quả và nhanh chóng là rất quan trọng cho một hệ thống cảm biến sinh học thông lượng cao trên chip.



Hình 1. (a) Mặt cắt hình chiếu bằng cấu tạo của máy trộn. (b) Mẫu thử được đưa vào. (c) Khí nén được bơm vào để làm lệch màng PDMS tạo ra dòng xoáy. (d) Khí nén được giải phóng để màng PDMS về vị trí ban đầu

Nhìn chung, các máy trộn vi mô hiện có được chia thành hai loại, đó là máy trộn chủ động và máy trộn thụ động. Máy trộn thụ động không có bộ phận chuyển động và trộn chỉ nhờ cấu trúc hoặc cấu trúc liên kết của chúng. Máy trộn chủ động trộn bằng năng lượng đầu vào từ bên ngoài. Máy trộn thụ động đã được nghiên cứu rộng rãi vì có ưu điểm là giá thành rẻ, dễ chế tạo và không cần thêm nguồn đầu vào. Sử dụng cấu trúc thụ động, các chất lỏng buộc phải thay đổi hướng, tách ra hoặc tái hợp; cần phải tăng diện tích tiếp xúc của các dòng con [1, 2]. Một cơ chế quay đã được giới thiệu để tăng diện tích tiếp xúc bằng cách sử dụng vi kênh ngoằn ngoèo 3-D [3, 4] và các cấu trúc giảm phân cực [5]. Quá trình trộn trong một vi kênh cũng có thể được tăng cường thông qua sự đối lưu hỗn loạn [6], làm thúc đẩy sự khuếch tán và dẫn đến việc trộn nhanh hơn. Mặc dù hiệu quả trộn cao ở tốc độ dòng chảy lớn, nhưng cấu trúc 3-D phức tạp rất khó chế tạo và cũng tạo ra trở kháng dòng chảy lớn.

Một vi trộn thụ động quay 3-D tự toàn hoàn đã được báo cáo về tính hiệu quả của khả năng trộn. Hiệu quả của nó cao hơn nếu tốc độ dòng vào cao hơn được đưa vào để tạo ra dòng xoáy [7]. Mặc dù thiết kế đã được chứng minh là có hiệu quả, nhưng cấu trúc 3-D rất phức tạp. Một vi trộn khác đã tạo được dòng xoáy nhanh cho các phản ứng hóa học tốc độ cao [8]. Mặc dù dòng xoáy có thể được tạo ra để đạt được sự trộn hiệu quả, tốc độ đầu vào và áp suất của mẫu tương ứng là 10ms^{-1} và 10bar, điều này rất khó cung cấp cho ứng dụng của hệ thống vi lỏng. Tương tự, các vi trộn thụ động kiểu xoáy đa đầu vào sử dụng hiệu ứng tự quay đã được báo cáo [9, 10]. Các máy vi trộn khác nhau đã được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng vi lỏng, chẳng hạn như tổng hợp hóa học, phản ứng hóa học, quy trình phân tích sinh học và các quy trình khác [11]. Một số máy vi trộn mới hoạt động, có chi phí thấp và chế tạo đơn giản, đã được phát triển thành công để thực hiện trộn hiệu quả [12, 13, 14].

Trong nghiên cứu này, máy vi trộn hoạt động với dòng xoáy 3-D sử dụng màng khí nén để nâng cao hiệu quả bơm được giới thiệu. Các thiết bị được chế tạo dễ dàng bằng cách sử dụng công nghệ MEMS và máy CNC (Computer-numerical-control). Các mô phỏng và kết quả thực nghiệm sẽ cho thấy rằng các mẫu có thể được trộn hoàn chỉnh nhanh chóng bằng máy trộn trong một khoảng thời gian ngắn. Ngoài ra, một mô phỏng đã được sử dụng để khảo sát các thông số dòng chảy và cơ chế trộn. Việc nghiên cứu máy vi trộn hoạt động với dòng xoáy 3-D có thể cung cấp một công cụ mạnh mẽ để tích hợp vào hệ thống vi lỏng.

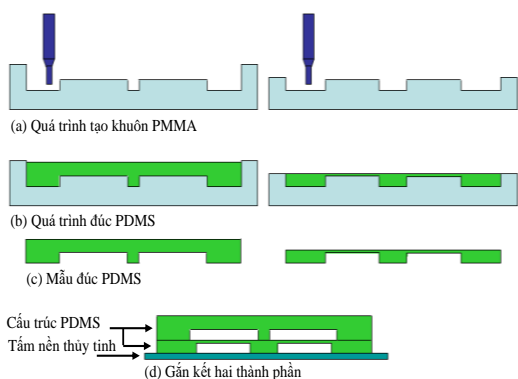
2. Thiết kế

Đóng góp chính của nghiên cứu này là thiết kế và chế tạo máy vi trộn kiểu xoáy 3-D điều khiển bằng khí nén có khả năng trộn nhanh và hiệu quả. Hình 1. (a) là mặt cắt hình chiếu bằng mô tả cấu tạo của máy trộn bao gồm hai lớp PDMS (Polydimethylsiloxane) và tấm nền thủy tinh. Máy trộn có kích thước chiều rộng, chiều dài và chiều cao tương ứng lần lượt là $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 5\text{mm}$. Lớp PDMS phía trên có cấu trúc tạo buồng khí với các kênh dẫn khí. Chiều rộng và chiều cao của các kênh dẫn khí tương ứng là $300\mu\text{m}$ và $500\mu\text{m}$. Lớp PDMS phía dưới bao gồm một buồng trộn với hai kênh chất lỏng. Đường kính của buồng trộn là $6,0\text{mm}$. Chiều rộng, chiều dài và chiều cao của buồng chất lỏng lần lượt là $3000\mu\text{m}$, $5000\mu\text{m}$ và $600\mu\text{m}$. $80\mu\text{l}$ nước đã khử ion (Deionized-water (DI)) và các hạt vi cầu có đường kính $60\mu\text{m}$ được đưa vào buồng trộn để quan sát dòng xoáy như thể hiện trong Hình 1 (b, c, d). Khi khí nén được cung cấp cho hai

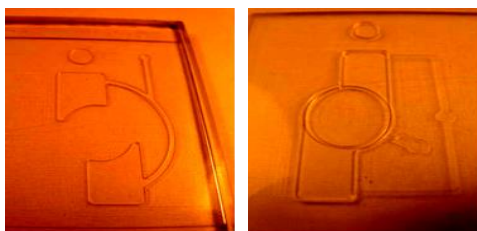
buồng khí thông qua các kênh dẫn khí kết nối, các màng PDMS (dày 100 μ m) tuân tự bị lệch và sẽ tạo ra trường dòng xoáy bên trong buồng trộn tròn.

3. Quy trình chế tạo

Hình 2 mô tả quy trình chế tạo vi trộn. Máy trộn bao gồm đế thủy tinh và cấu trúc PDMS, cấu trúc PDMS hai lớp bao gồm một lớp dày và một lớp mỏng. Lớp dày (4500 μ m) được thiết kế có khoang khí kết nối với nguồn áp suất bên ngoài và lớp mỏng (600 μ m) là để dễ biến dạng. Khuôn có cấu tạo bằng hợp chất polymethylmethacrylate (PMMA) được tạo ra bằng cách sử dụng máy CNC như Hình 2 (a). Sau đó, quá trình đúc PDMS để tạo thành các buồng khí như Hình 2 (b) và quy trình để tạo ra mẫu đúc của kênh chất lỏng như Hình 2 (c). Cuối cùng, các cấu trúc PDMS và đế thủy tinh được liên kết với nhau bằng cách sử dụng công nghệ plasma để tạo thành máy vi trộn hoàn chỉnh như Hình 2 (d).



Hình 2. Quy trình chế tạo vi trộn



(a) Kênh dẫn (b) Buồng khí

Hình 3. Hình ảnh của khuôn PMMA



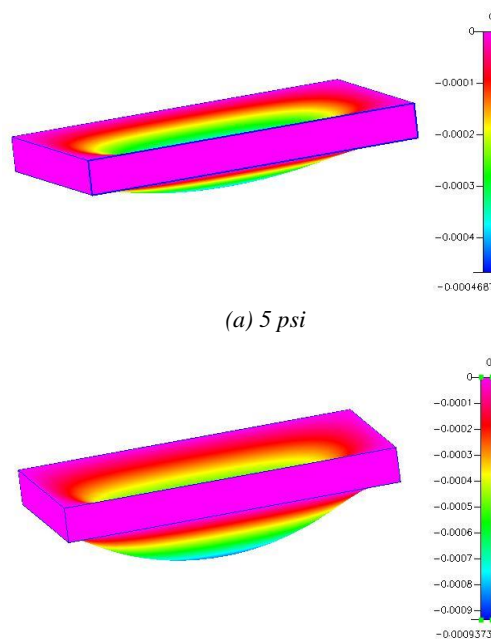
Hình 4. Hình ảnh của máy vi trộn tạo dòng xoáy 3-D

Hình 3 (a) và (b) cho thấy hình ảnh của khuôn PMMA cho buồng khí và kênh chất lỏng được tạo ra bằng kỹ thuật gia công CNC. Hình 4 là hình ảnh chế tạo thành công của máy vi trộn.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả mô phỏng

Mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán (Computational Fluid Dynamics - CFD) được thực hiện để khảo sát các trường dòng chảy và kết quả sự phân bố nồng độ mẫu trong chất lỏng. Bên cạnh đó sự biến dạng của cấu trúc màng chuyển động dưới áp suất vận hành khác nhau cũng được nghiên cứu.



(a) 5 psi

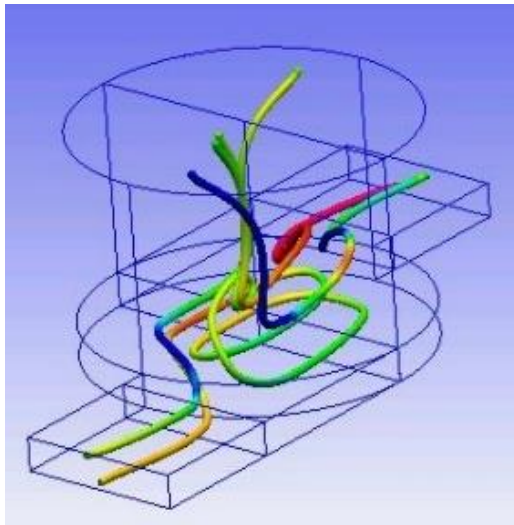
(b) 10 psi

Hình 5. Sự biến dạng của màng PDMS đối với áp suất không khí lần lượt là (a) 5psi và (b) 10psi

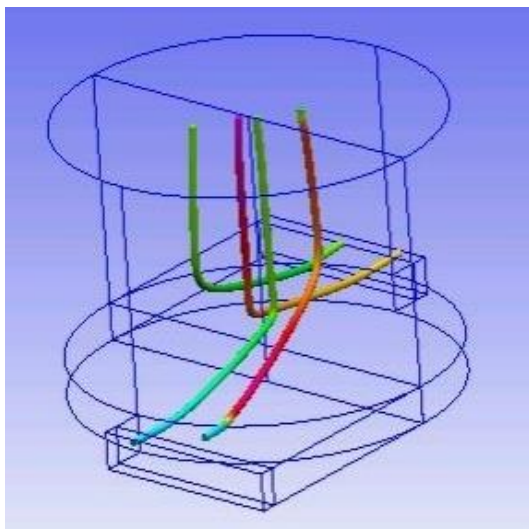
Hình 5 thể hiện sự biến dạng của màng chuyển động điều khiển bằng áp suất không khí. Độ biến dạng lớn nhất là 468,8 μ m và 937,3 μ m khi điều khiển với áp suất tương ứng 5psi và 10psi. Trong thiết kế này, độ sâu của kênh chất lỏng được thiết kế là 600 μ m. Áp suất không khí bên ngoài được thiết lập 10psi để đạt được thể tích stoke tối đa.

Các dòng chất lỏng được mô phỏng trong quá trình chuyển động của màng ở $t = 0,083$ giây được thể hiện trong Hình 6 (a) với tần số truyền là 6Hz. Có thể thấy rõ ràng một dòng chảy xoáy đã được tạo ra, do đó tăng cường hiệu quả trộn. Khi quá trình phục hồi màng xảy ra, chất lỏng bị kéo trở lại và hướng dòng chảy đảo ngược. Tuy nhiên, trường dòng không xoáy như trong

quá trình lệch màng. Quá trình phục hồi màng được thể hiện trong Hình 6 (b) tại thời điểm $t = 0,167$ giây ở cùng một tần số dẫn động đối với màng PDMS.



(a) Quá trình làm lệch màng



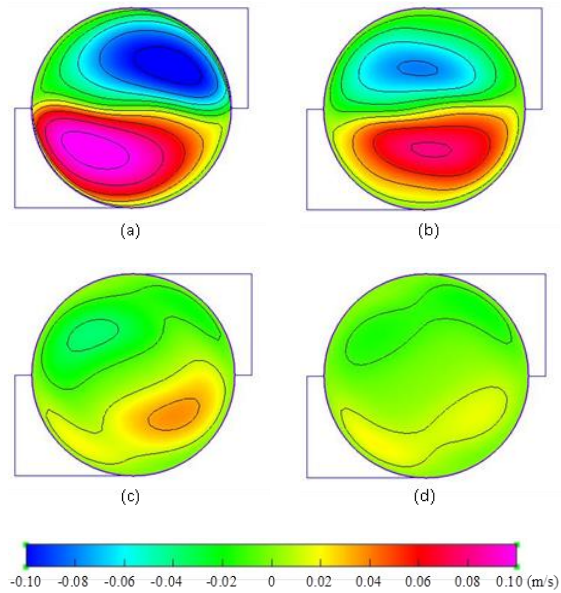
(b) Quá trình màng phục hồi

Hình 6. Mô phỏng dòng chất lỏng

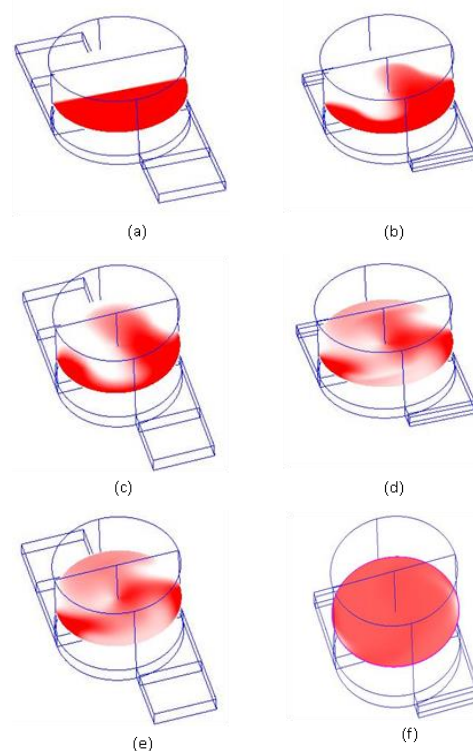
Hình 7 thể hiện các đường đẳng tốc ở các độ cao khác nhau (lần lượt là 600, 1000, 2000 và 3000 μm) tại thời điểm $t = 0,083$ giây, là thời điểm kết thúc của quá trình làm lệch màng với tần số truyền 6Hz. Vận tốc cực đại được tìm thấy ở các vị trí khác nhau đối với các độ cao khác nhau. Điều này cho thấy rằng trường dòng xoáy tồn tại cho trường hợp này. Và có thể thấy điểm cực đại của đường đẳng tốc đã lệch nhiều hơn so với tâm của buồng trộn, do đó cho thấy máy trộn có hiệu ứng xoáy mạnh hơn.

Hình 8 cho thấy mô phỏng sự phân bố nồng độ trong máy vi trộn, với độ cao của chất lỏng là 2000 μm

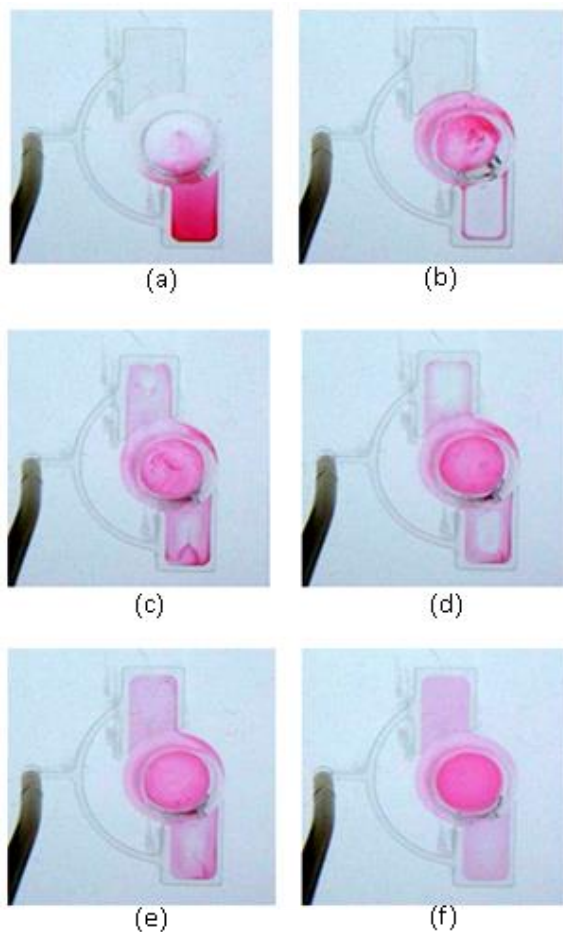
được đo từ đáy của buồng trộn. Ban đầu, dòng chảy là tĩnh vì hai mẫu được tách biệt rõ ràng và bất kỳ sự trộn lẫn nào chỉ là do sự khuếch tán phân tử.



Hình 7. Đường đẳng tốc của máy vi trộn tạo dòng xoáy 3-D ở các độ cao khác nhau: (a) 600 μm ; (b) 1000 μm ; (c) 2000 μm ; (d) 3000 μm .



Hình 8. Mô phỏng quá trình trộn sau thời gian: (a) 0 giây; (b) 0,1 giây; (c) 0,2 giây; (d) 0,3 giây; (e) 0,5 giây và (f) 0,7 giây

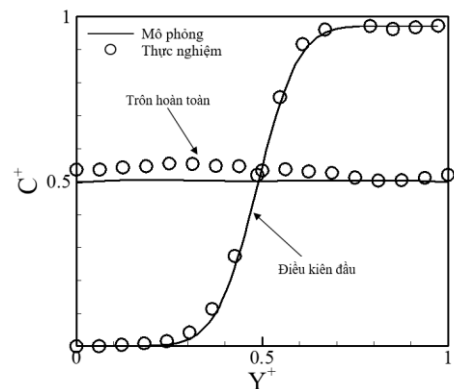


Hình 9. Hình ảnh cho thấy quá trình trộn sau thời gian a) 0 giây, b) 0,1 giây, c) 0,2 giây, d) 0,3 giây, e) 0,5 giây và f) 0,7 giây.

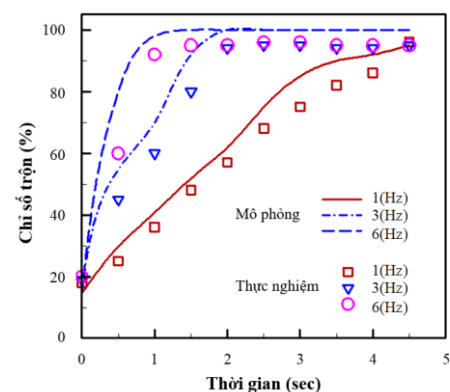
Khi cấu trúc màng được kích hoạt bằng khí nén và di chuyển xuống dưới, chất lỏng được đẩy vào buồng trộn. Dưới tác động của dòng xoáy, chất lỏng được trộn nhanh chóng. Khi màng phục hồi về vị trí ban đầu, nồng độ đã có sự thay đổi. Quá trình được lặp đi lặp lại, chất lỏng được trộn hoàn toàn sau 0,7 giây, như thể hiện trong Hình 8 (f).

4.2. Kết quả thực nghiệm

Hình 9 cho hình ảnh chụp vi trộn kiểu xoáy 3-D tại các thời điểm khác nhau. Máy hoạt động ở tần số 6Hz và áp suất không khí áp dụng là 10psi. Hình 9 (a) cho thấy ban đầu chất lỏng bị ứ đọng trong buồng trộn và không quan sát thấy sự trộn lẫn. Khi các màng được làm lệch bằng khí nén, một dòng chảy xoáy được tạo ra để nâng cao hiệu suất trộn như trong Hình 9 (c). Khi các màng phục hồi về vị trí ban đầu, các kênh chất lỏng được lấp đầy bởi các chất lỏng hỗn hợp (mực đỏ). Điều này cho thấy rằng một dòng chảy ngược được tạo ra bởi quá trình phục hồi màng. Tuy nhiên, xoáy



Hình 10. Biểu đồ mô tả nồng độ trộn của máy vi trộn xoáy 3-D



Hình 11. So sánh các chỉ số trộn trong mô phỏng và thực nghiệm ở các tần số tác động khác

ngược không mạnh bằng xoáy tạo ra bởi quá trình tác động của màng. Những quan sát thực nghiệm này phù hợp với kết quả mô phỏng và hai chất lỏng trộn lẫn hoàn toàn sau 0,7 giây.

4.3. Đánh giá mô phỏng và thử nghiệm

Biểu đồ nồng độ chuẩn hóa trong buồng trộn được thể hiện trong Hình 10, trong đó Y^+ là vị trí chuẩn hóa (Y/D) được đo qua tâm của buồng trộn (đường $x'-x$). Thời gian trộn, áp suất đặt vào và tần số truyền lần lượt là 0,7 giây, 10psi và 6Hz.

Chỉ số trộn trong điều kiện ban đầu được tính là 21% do tính khuếch tán phân tử. Đúng như dự đoán, kết quả thực nghiệm cho thấy nồng độ chuẩn hóa là 0,5 (trộn hoàn toàn) bên trong buồng trộn. Hiệu suất trộn đạt được là 95%. Kết quả thí nghiệm này cho thấy máy vi trộn xoáy 3-D có hiệu suất trộn rất hiệu quả.

Tần số dẫn động của màng PDMS đóng một vai trò quan trọng trong việc trộn và do đó cũng được

ngiên cứu bằng thực nghiệm. Hiệu quả trộn của máy được thể hiện trong Hình 11. Hiệu suất trộn tăng lên khi tần số tác động ngày càng tăng. Việc trộn cũng tăng lên theo tổng thời gian hoạt động.

Các mẫu có thể được trộn hoàn toàn trong vòng 0,7 giây khi tần số tác động là 6Hz. Ta thấy rằng hiệu suất trộn của máy trộn kiểu xoáy phụ thuộc trực tiếp vào cường độ của trường dòng xoáy và tần số tác động cao hơn tạo ra vận tốc dòng xoáy cao. Khi tần số truyền động quá cao (khoảng 10Hz), hiệu suất trộn bắt đầu giảm do đáp ứng tần số cơ học của màng không thể theo tần số cao, dẫn đến độ lệch màng nhỏ hơn.

Các chỉ số trộn từ các mô phỏng cho các độ cao của bề mặt chất lỏng khác nhau tương ứng là 600 μ m, 1000 μ m, 2000 μ m và 3000 μ m. Kết quả tính toán chỉ ra rằng các chỉ số trộn giảm khi chiều cao tăng lên do vận tốc tuần hoàn giảm. Kết quả mô phỏng số cũng được so sánh với dữ liệu thực nghiệm cho ba trường hợp thay đổi tần số tác động là 1Hz, 3Hz và 6Hz. Kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm thấp hơn một chút so với kết quả mô phỏng, có thể là do thể tích chất lỏng bơm vào trong thực nghiệm ít hơn so với trường hợp mô phỏng và chất lỏng có thể bị đẩy sang cả hai phía trong quá trình lệch của màng. Một số chất lỏng cũng có thể sót lại trong kênh do vấn đề thể tích chết. Do đó, vận tốc bơm vào có thể vượt quá dự đoán trong mô phỏng.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã chứng minh thành công việc thiết kế và chế tạo máy vi trộn kiểu xoáy sử dụng màng dẫn động bằng khí nén để trộn chất lỏng trong một buồng chứa. Máy vi trộn được chế tạo dễ dàng và đơn giản bằng công nghệ gia công CNC và MEMS. Máy vi trộn đã đạt được chỉ số trộn cao tới 95,0% trong thời gian ngắn. Các mô phỏng tương ứng cho thấy rằng các dòng trộn được tạo ra để nâng cao hiệu quả trộn và phù hợp với các quan sát thực nghiệm. Máy vi trộn này tiêu thụ hàm lượng mẫu thử thấp, hiệu quả trộn cao và có tính di động dễ dàng. Đồng thời nó cũng có thể dễ dàng tích hợp với các thiết bị vi lỏng khác. Hơn nữa, vi trộn kiểu xoáy còn có thể sử dụng để làm sạch mẫu virus và tổng hợp các hạt nano. Trong tương lai, máy vi trộn này có thể ứng dụng một cách mạnh mẽ trong các sản phẩm thí nghiệm hóa học hoặc sinh học.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bessoth, Fiona G., Andrew J. deMello, and Andreas Manz. (1999), *Microstructure for efficient continuous flow mixing*, Analytical communications, Vol.6, pp.213-215.
- [2] Losey, Matthew W., et al. (2002), *Design and fabrication of microfluidic devices for multiphase mixing and reaction*, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.11, Issue.6, pp.709-717.
- [3] Liu, Robin H., et al. (2000), *Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel*. Journal of microelectromechanical systems, Vol.9, Issue.2, pp.190-197.
- [4] Park, Sung-Jin, et al. (2003), *Rapid three-dimensional passive rotation micromixer using the breakup process*, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.14, Issue.1:6.
- [5] Stroock, Abraham D., et al. (2002), *Chaotic mixer for microchannels*, Science, Vol.295, No.5555, pp.647-651.
- [6] Beebe, David J., et al. (2001), *Passive mixing in microchannels: Fabrication and flow experiments*, Mécanique & industries, Vol.2, Issue.4, pp.343-348.
- [7] Kim, Dong Sung, et al. (2004), *A barrier embedded Kenics micromixer*, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.14, Issue.10, 1294.
- [8] Böhm, Sebastian, et al. (2001), *A rapid vortex micromixer for studying high-speed chemical reactions*, Micro Total Analysis Systems. Springer, Dordrecht.
- [9] Lin, Che-Hsin, Chien-Hsiung Tsai, and Lung-Ming Fu. (2005), *A rapid three-dimensional vortex micromixer utilizing self-rotation effects under low Reynolds number conditions*, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.15, Issue.5: 935.
- [10] Chung, Yung-Chiang, et al. (2004), *Design of passive mixers utilizing microfluidic self-circulation in the mixing chamber*, Lab on a Chip Vol.4, Issue.1, pp.70-77.
- [11] Lee, C. Y., Fu, L. M. (2018), *Recent advances and applications of micromixers*, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.259, pp.677-702.
- [12] Annabestani, Mohsen, et al. (2019), *Active microfluidic micromixer design using ionic polymer-metal composites*, 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE.

- [13] Annabestani, Mohsen, et al. (2020), *Multiphysics analysis and practical implementation of a soft μ -actuator-based microfluidic micromixer*, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.29, Issue.2, pp.268-276.
- [14] Weng, Chen-Hsun, et al. (2022), *Paper-Based Microfluidics Perform Mixing Effects by Utilizing Planar Constricted-Expanded Structures to Enhance Chaotic Advection*, Sensors, Vol.22, Issue.3: 1028.

Ngày nhận bài:	07/11/2022
Ngày nhận bản sửa:	18/11/2022
Ngày duyệt đăng:	23/11/2022