

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ



KHẢO SÁT HOẠT ĐỘNG CỦA VI BƠM ÁP ĐIỆN

Giảng viên:

TS. Phạm Ngọc Thảo

Sinh viên thực hiện:

Vũ Thị Lan Nhi – 20021565

Nguyễn Thu Trang – 20021589

Nguyễn Quang Thịnh – 21021639

Lê Tấn Phát - 21021623

Hoàng Thị Phương Anh – 20021484

Nguyễn Thị Trang – 20021588

Nguyễn Thị Thu Nguyệt – 20021563

1. Tổng quan (Abstract)

Trong hệ thống vi lỏng, vi bơm (micropump) là một thiết bị quan trọng có nhiều ứng dụng khác nhau như phân phối thuốc, hệ thống làm mát điện tử, ... Một yếu tố chính để đánh giá hiệu suất của một vi bơm là tốc độ dòng chảy. Trong vi bơm áp điện (piezoelectric micropump), tốc độ dòng chảy được tạo ra dựa trên áp suất ngược được tạo ra trong khoang bơm do tác động của bộ truyền động. Báo cáo này đề xuất một mô hình vi bơm áp điện có bộ truyền động dạng đĩa gồm nhiều lớp giúp tăng điện áp được tạo ra, từ đó tăng áp suất và tốc độ dòng chảy. Mô hình này được mô phỏng trên COMSOL Multiphysics 6.1 và cho thấy, tốc độ dòng chảy tăng lên đáng kể so với mô hình ban đầu.

2. Mở đầu (Introduction)

Công nghệ vi lưu (microfluidics) là một công nghệ đặc trưng bởi việc điều khiển chất lỏng ở quy mô dưới mức milimet, có khả năng thay đổi đáng kể cách thức hoạt động của sinh học hiện đại [1]. Khả năng xử lý mẫu nhanh và kiểm soát chính xác lượng chất lỏng trong thí nghiệm chỉ với một lượng nhỏ thể tích thuốc thử cùng với thời gian phản ứng ngắn khiến công nghệ này trở thành ứng cử viên đầy hứa hẹn để thay thế các phương pháp truyền thống.

Với tầm quan trọng ngày càng tăng của hệ gen, việc vận chuyển chất lỏng một cách có kiểm soát ở quy mô vi mô trở thành một nhiệm vụ quan trọng và cốt yếu. Có thể thấy, hầu hết các ứng dụng của công nghệ vi lưu đều yêu cầu sử dụng bơm để di chuyển chất lỏng qua hệ thống [2]. Cách tiếp cận đầu tiên trong việc thiết kế vi bơm là thu nhỏ các nguyên lý cơ học từ quy mô vĩ mô và tiếp theo là áp dụng các nguyên lý mới hiệu quả hơn ở quy mô vi mô. Dựa theo nguyên lý bơm, vi bơm được chia thành vi bơm cơ học (mechanical micropump) và vi bơm phi cơ học (non-mechanical micropump). Theo các nghiên cứu, vi bơm cơ học thích hợp hơn so với vi bơm phi cơ học, đặc biệt là cho các ứng dụng y sinh vì các phương pháp truyền chất lỏng trong vi bơm phi cơ học có thể làm thay đổi tính chất hóa học của thuốc [3]. Vi bơm áp điện (piezoelectric micropump) là một vi bơm cơ học được sử dụng phổ biến trong các ứng dụng y sinh do khả năng kiểm soát chính xác việc đo lường thể tích rất nhỏ. Báo cáo này sẽ tìm hiểu và mô phỏng chi tiết về hoạt động của vi bơm áp điện.

3. Các lý thuyết liên quan

Sự chuyển đổi biến dạng cơ học thành tín hiệu điện và ngược lại được gọi là hiệu ứng áp điện. Cấu trúc tinh thể của vật liệu có tính chất áp điện thường không có tâm đối xứng. Vì vậy, khi có một ứng suất tác dụng lên các vật liệu sẽ làm thay đổi khoảng cách giữa nguyên tử điện tích dương và nguyên tử điện tích âm, dẫn đến sự phân cực điện trên bề mặt và sinh ra một điện trường ứng với hiệu điện thế được tạo ra trong các vật liệu đó. Vi bơm áp điện (piezoelectric micropump) được điều khiển bằng điện áp dựa trên đặc tính cơ điện của vật liệu áp điện bị biến dạng trước điện áp đặt vào. Đĩa áp điện

được gắn vào màng (membrane) gây ra sự chênh lệch của màng do bộ truyền động bên ngoài, do đó làm giãn nở và co lại của khoang bơm [4]. Biến dạng này dẫn đến việc thay đổi áp suất trong khoang bơm, từ đó tạo ra dòng chảy vào và ra của chất lỏng. Tốc độ của dòng chảy được kiểm soát bởi giới hạn phân cực của vật liệu và điện áp được đặt vào vật liệu áp điện. So với các nguyên lý truyền động khác, truyền động điện cho phép lượng chất lỏng vận chuyển qua mỗi chu kỳ lớn hơn, lực truyền động cao và phản ứng cơ học nhanh, tuy nhiên yêu cầu điện áp truyền động tương đối cao và quy trình lắp đặt gốm điện (piezo ceramic) phức tạp [5].

Điện trường được tạo ra giữa các vật liệu áp điện được tính theo công thức

$$E = \frac{V}{d}$$

Trong đó: E là điện trường được đặt trên PZT

V là điện áp được cung cấp

d là độ dày các lớp PZT

Lớp màng của vi bơm áp điện chuyển động linh hoạt gây ra sự chênh lệch áp suất, tạo ra dòng chảy trong khoang bơm. Dòng chảy này được dịch chuyển dựa vào các bộ phận chỉnh lưu như van một chiều. Lượng chất lỏng qua mỗi chu kỳ được ước tính cho màng tròn là:

$$y(r) = y_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2$$

Trong đó y_0 là độ lệch tâm của màng, R là bán kính của màng.

Các thông số quan trọng trong một máy bơm vi lượng có thể kể đến là tốc độ dòng chảy tối đa, áp suất ngược tối đa, công suất bơm và hiệu suất. Tốc độ dòng chảy tối đa, Q_{max} là thể tích chất lỏng được bơm vận chuyển trên một đơn vị thời gian tại áp suất ngược bằng 0. Áp suất ngược tối đa là áp suất tối đa mà bơm có thể hoạt động được. Ở áp suất này, tốc độ dòng chảy của bơm bằng 0. Dựa trên tốc độ dòng chảy tối đa, áp suất ngược tối đa có p_{max} , công suất bơm P_{pump} có thể tính theo công thức:

$$P_{pump} = \frac{p_{max} Q_{max}}{2}$$

Hiệu suất bơm η được định nghĩa là

$$\eta = \frac{P_{pump}}{P_{actuator}}$$

Trong đó $P_{actuator}$ là công suất của bộ truyền động.

Vi bơm sử dụng van một chiều là loại máy bơm phổ biến nhất ở quy mô vĩ mô, vì vậy những nỗ lực đầu tiên để thiết kế hệ thống vi bơm cơ học là sử dụng van một chiều [6].

Một máy bơm có van một chiều bao gồm một bộ truyền động, một màng bơm di chuyển lên xuống linh hoạt tạo ra thể tích chất lỏng được vận chuyển ΔV , một khoang bơm với thể tích không đổi V_0 , và 2 van kiểm tra đảm bảo chất lỏng vận chuyển theo một chiều và được mở khi chênh lệch áp suất là Δp_{crit} . Bơm sử dụng van một chiều hoạt động trong điều kiện tỷ số nén nhỏ và áp suất bơm cao [7]. Tỷ số nén ψ là tỷ số giữa thể tích chất lỏng vận chuyển trong mỗi chu kỳ và thể tích khoang bơm:

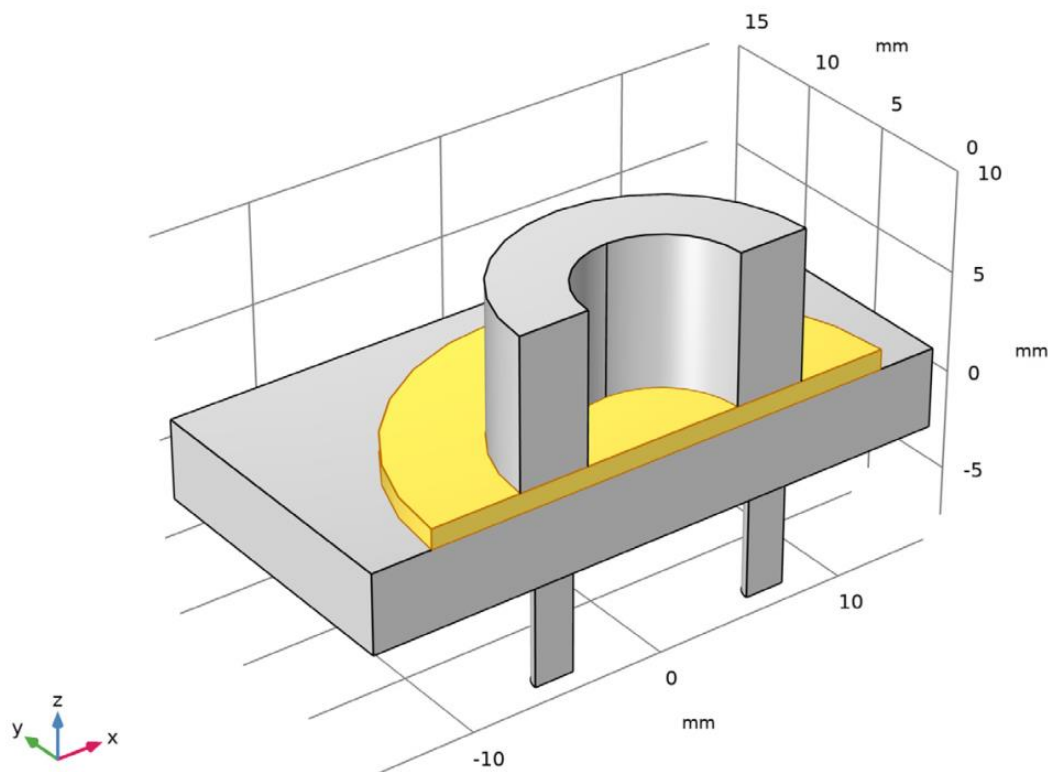
$$\psi = \frac{\Delta V}{V_0}$$

4. Mô phỏng

4.1. Mô hình hệ thống

Theo Harris N. R. và cộng sự [8], cấu trúc nhiều lớp của vật liệu áp điện cho phép tạo ra các dịch chuyển lớn hơn so với một lớp duy nhất có cùng độ dày. Từ đó cho thấy, khi tăng số lớp áp điện của bộ truyền động, áp suất ngược tạo ra lớn hơn dẫn đến tốc độ dòng chảy cao hơn.

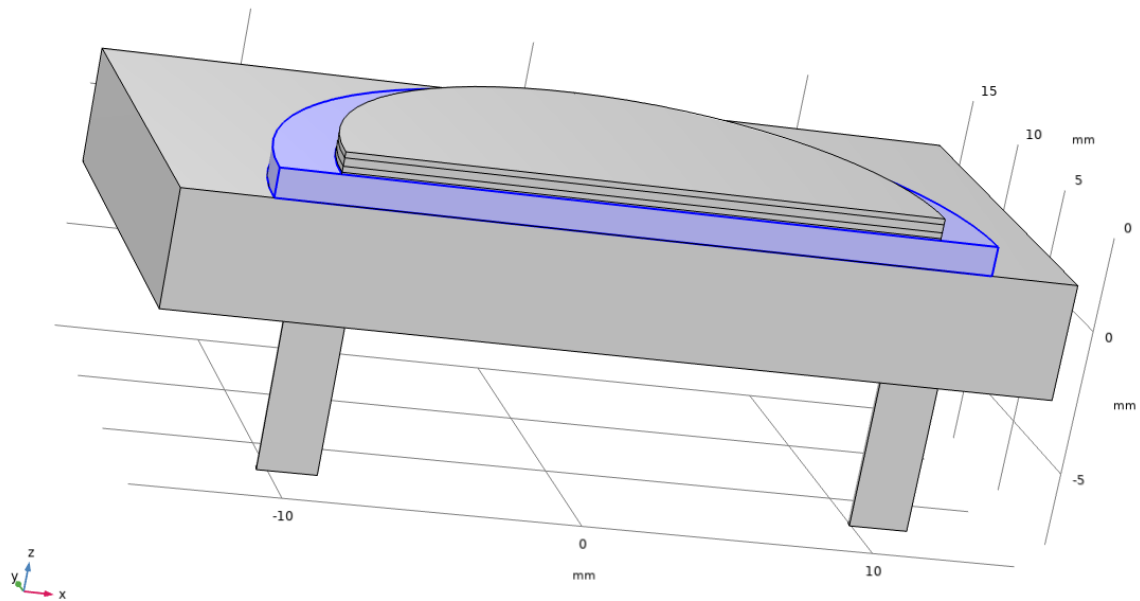
Mô hình ban đầu được biểu diễn trong hình 1 với bộ truyền động áp điện dạng khayên trên miền chất lỏng được kết nối với một lớp màng linh hoạt.



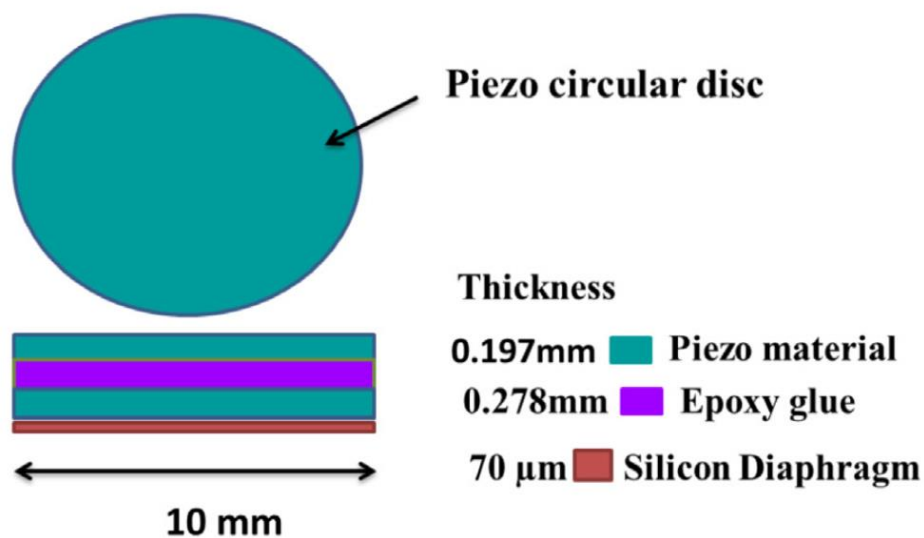
Hình 1. Mô hình vi bơm áp điện ban đầu

Mô hình đề xuất được biểu diễn trong hình 2. Mô hình này bao gồm một bộ truyền động dạng đĩa gồm bốn lớp: dưới cùng là một màng silicon, tiếp theo là hai lớp áp điện được

gắn với nhau bởi một lớp epoxy glue, bộ truyền động này được đặt lên trên một lớp màng mỏng linh hoạt (membrane), khoang chứa chất lỏng cùng với lối vào (inlet), lối ra (outlet). Chất lỏng chảy ra khi có điện áp và bộ truyền động giãn nở. Chu vi của lớp màng này được cố định khi bộ truyền động di chuyển và tác dụng một lực lên chất lỏng ở phía dưới, bơm chất lỏng vào từ lối vào và đẩy chất lỏng ra khỏi lối ra. Do tính đối xứng của mô hình, chỉ cần biểu diễn nửa mặt phẳng để tiện quan sát.



Hình 2. Mô hình vi bơm áp điện đề xuất với lớp màng được đánh dấu



Hình 3. Mô hình bộ truyền động dạng đĩa [9]

4.2. Các tham số đầu vào

Hình 4 dưới đây biểu diễn các tham số đầu vào của mô hình. Các tham số được giữ nguyên so với mô hình ban đầu để so sánh hiệu suất giữa hai mô hình. Khoang bơm được thiết kế là một hình chữ nhật có kích thước $30 \times 30 \times 5\text{mm}$ là nơi chứa chất lỏng. Lối vào và lối ra là một khối hình trụ có bán kính 1mm và cao 5mm . Lớp màng được thiết kế có độ dày 1mm và bán kính 12mm được đặt ngay trên khoang bơm. Phía trên lớp màng là bộ truyền động dạng đĩa có bán kính 10mm gồm bốn lớp: lớp màng silicon dày $70\mu\text{m}$, hai lớp piezo dày 0.197mm và lớp epoxy glue dày 0.278mm . Vật liệu piezo được sử dụng trong mô phỏng là Lead Zirconate Titanate (PZT – 5H). Tần số của bộ truyền động là 60Hz và điện áp được áp dụng là 1500V , giống với mô hình ban đầu.

Name	Expression	Value	Description
w_block	30 [mm]	0.03 m	Width of base
depth_blo...	30 [mm]	0.03 m	Depth of base
h_block	5 [mm]	0.005 m	Base thickness
h_exit	5*r_inlet	0.005 m	Height of Inlet/Outlet
h_memb	1 [mm]	0.001 m	Height of the Membrane
AD	20 [mm]	0.02 m	Disc actuator diameter
r_inlet	1 [mm]	0.001 m	Fluid Inlet Radius
r_memb	12 [mm]	0.012 m	Radius of the Membrane
r_outlet	1 [mm]	0.001 m	Fluid Outlet Radius
t0	0.197 [mm]	1.97E-4 m	Piezo layer
t1	0.278 [mm]	2.78E-4 m	Epoxy glue layer
t2	70 [um]	7E-5 m	Silicon Diaphragm
V0	1500 [V]	1500 V	Applied voltage
frequency	60[Hz]	60 Hz	Frequency of piston actu...
high_stress	5e3	5000	Boundary Stress (High)
low_stress	1e-1	0.1	Boundary Stress (Low)

Hình 4. Tham số đầu vào của mô hình mô phỏng

Tính chất của các vật liệu được sử dụng được thể hiện trong bảng sau

Vật liệu	Khối lượng riêng [kg/m^3]	Hệ số Poisson	Young's Modulus [GPa]
Silicon	2329	0.30	168.3
Epoxy Glue	1400	0.30	2.478
Membrane	2320	0.45	0.2

Bảng 1. Tính chất vật liệu được sử dụng

Vì bơm áp điện (piezoelectric micropump) được điều khiển bởi điện áp hình sin có dạng

$$V_0 \times \sin(2\pi ft) \times rm1 \times (tf \times \frac{4}{3})$$

Trong đó $rm1$ là một hàm ramp có độ dốc 1.2.

4.3. Điều kiện biên

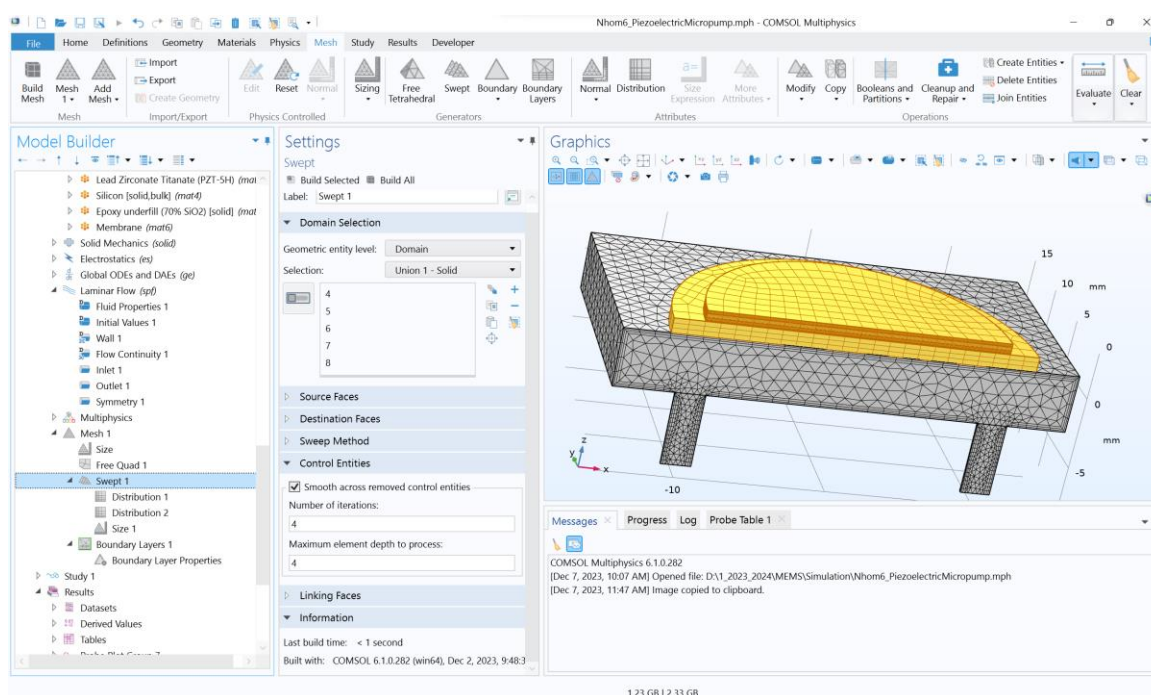
Lối vào và lối ra hoạt động bằng cách sử dụng van để đảm bảo dòng chảy là một chiều. Trong mô hình thiết kế, van được thể hiện bằng một điều kiện biên đơn giản dựa trên tổn thất đường ống hệ số K, trong đó tổn thất cao khi chạy ngược chiều với van và thấp khi chảy theo hướng hoạt động. Áp suất ngược do van tạo ra được biểu diễn bằng phương trình:

$$p = A\rho u_{av}^2$$

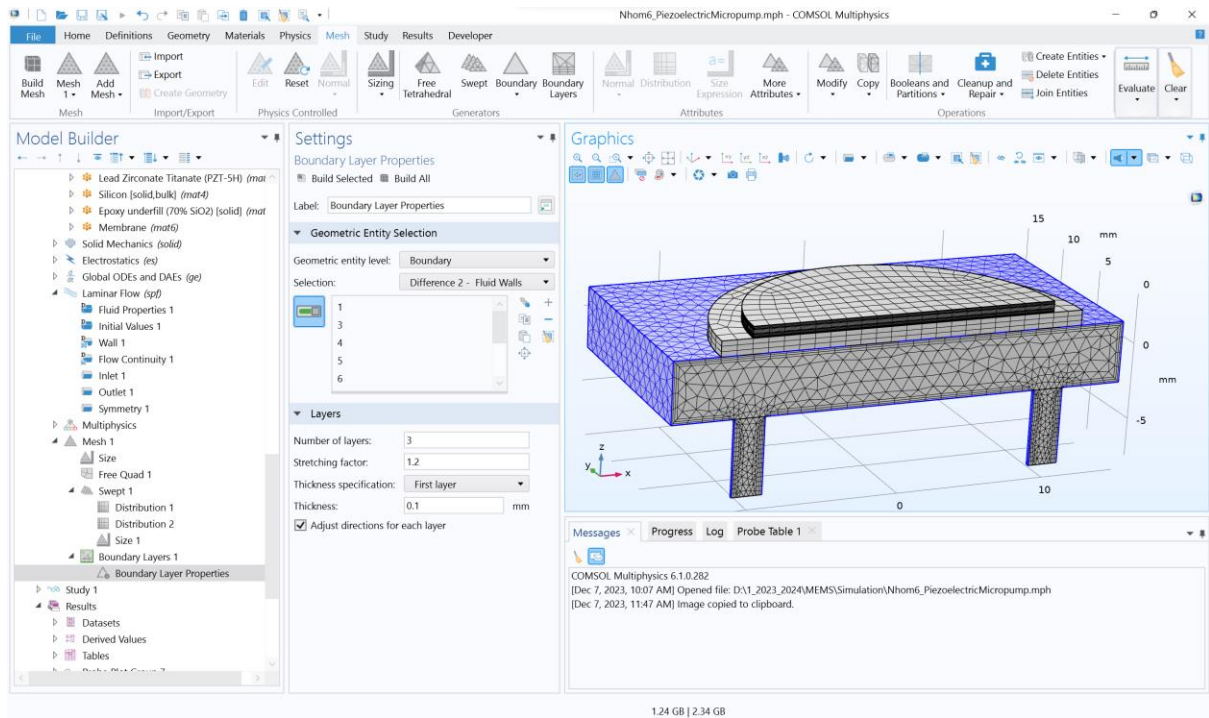
Trong đó u_{av} là vận tốc trung bình của chất lỏng vuông góc với biên, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng và A là hằng số không thứ nguyên (không có đơn vị) thay đổi độ lớn theo dấu của u_{av} . Áp suất ngược được áp dụng như một áp suất bình thường tại cuối đoạn ống có chiều dài ngắn, điều này đảm bảo dòng chất lỏng trong miền là thực tế, bất chấp điều kiện biên gần đúng này. Điều kiện biên này có thể được sử dụng để biểu diễn một van chất lỏng đơn giản. Các hằng số được sử dụng cho ranh giới đầu ra được đảo ngược so với các hằng số được sử dụng ở đầu vào, thể hiện hướng khác của một van tương tự. Điều này làm cho dòng chảy qua máy bơm theo hướng mong muốn. Để biểu thị van điện trở thấp, đặt A thành 5000 cho điều kiện van đóng và 0.1 cho điều kiện van mở.

4.4. Quá trình chia lưới (mesh)

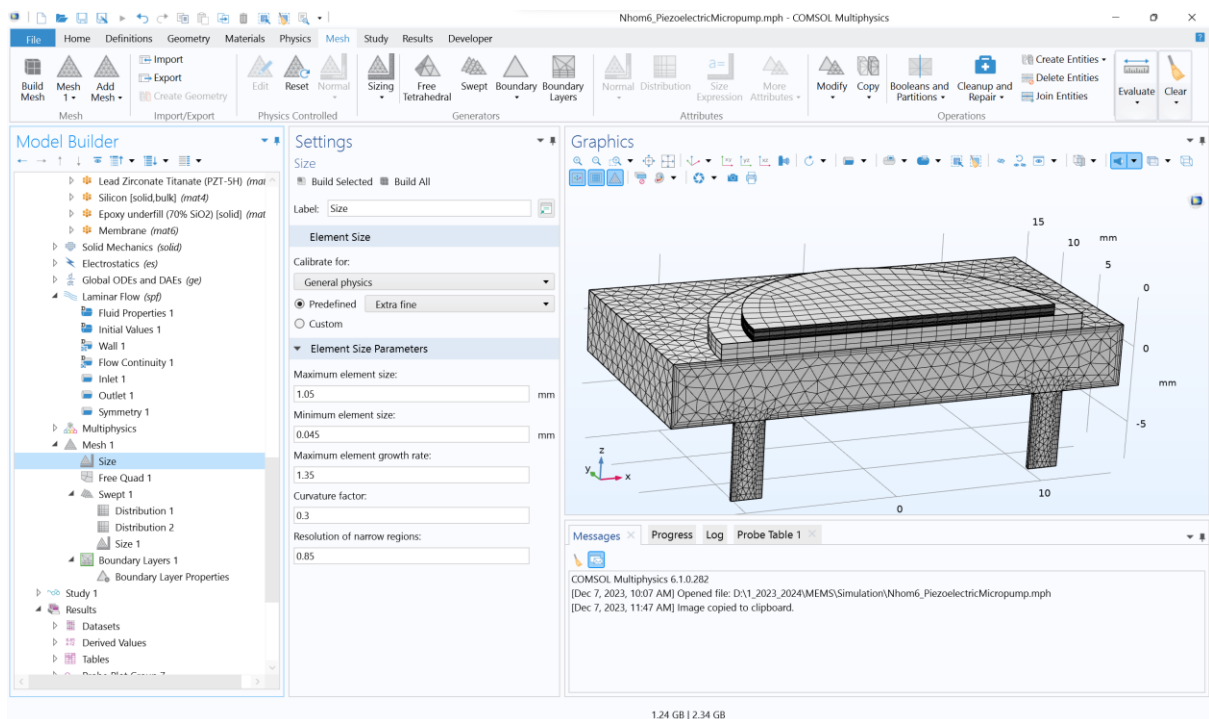
Sau khi mô hình và các thông số được xây dựng, lưới sẽ được tạo để tính toán các thông số. Đầu tiên là tạo lưới quét (swept mesh – Hình 5) cho miền rắn và lưới ranh giới (boundary layer mesh – Hình 6) cho các miền chất lỏng. Kết quả của quá trình chia lưới được biểu diễn ở hình 8.



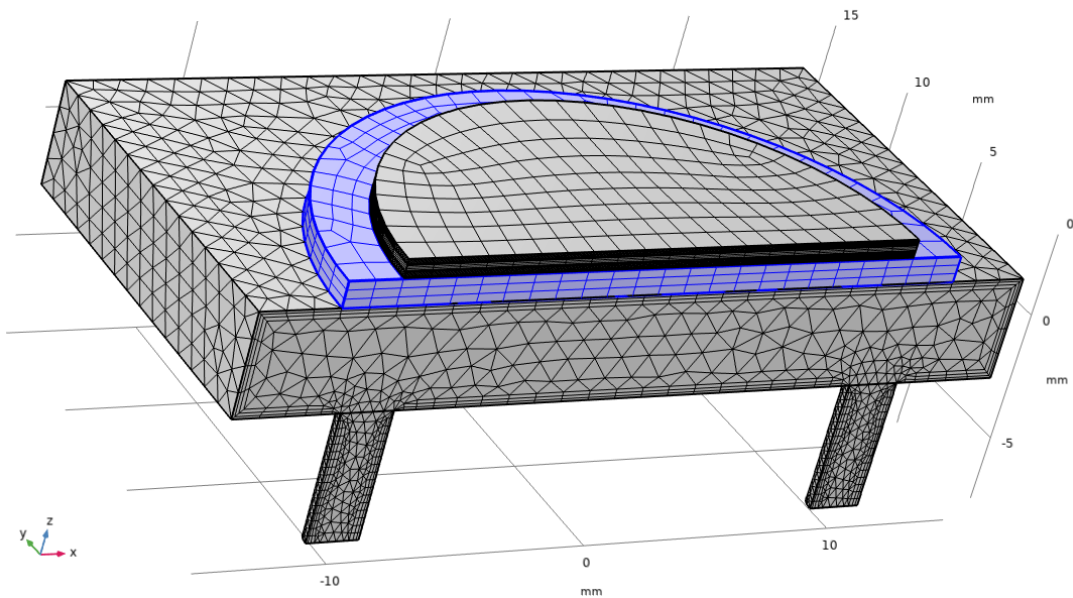
Hình 5. Swept mesh



Hình 6. Boundary layer mesh



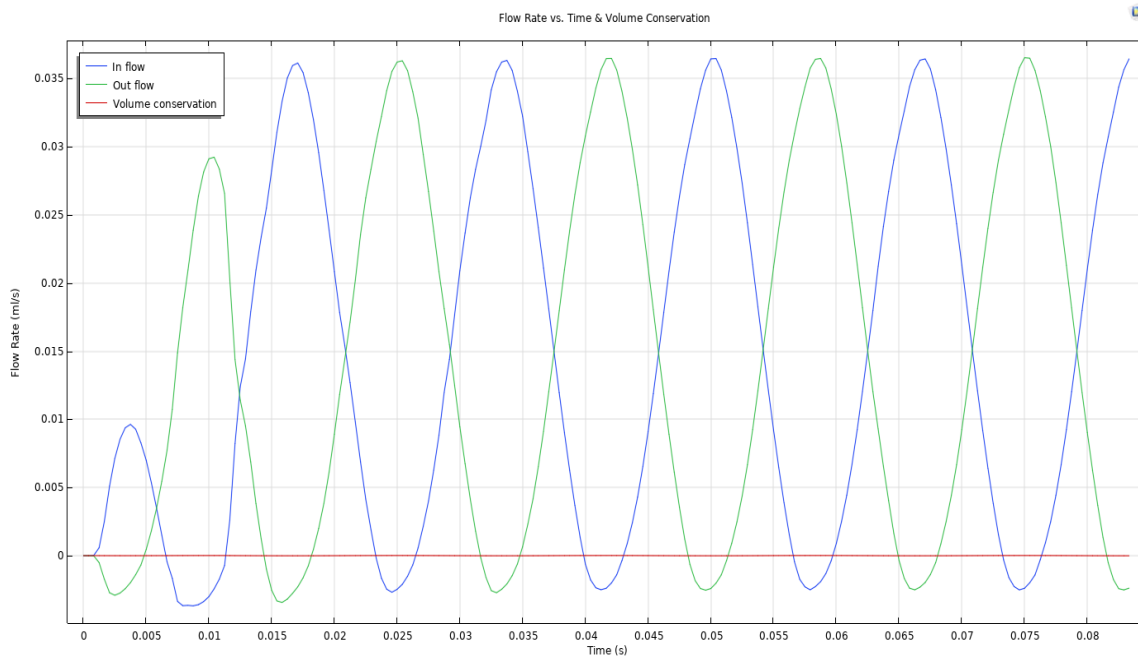
Hình 7. Kích thước của lưới



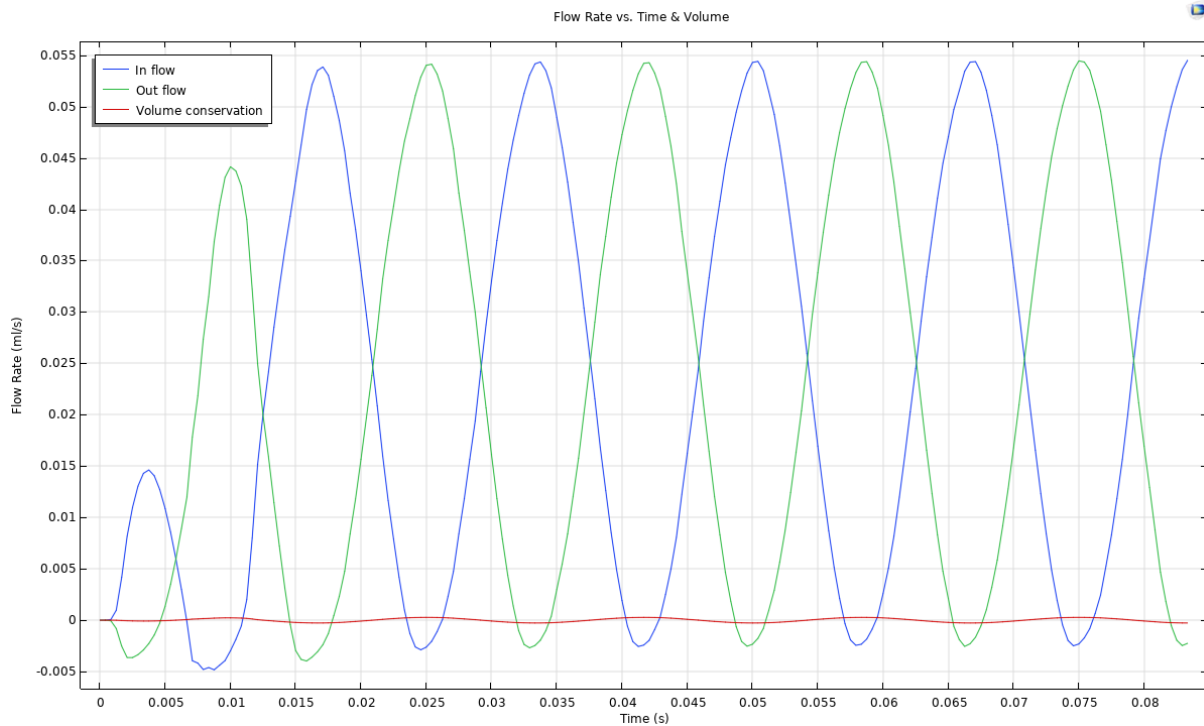
Hình 8. Lưới được sử dụng trong mô hình

5. Kết quả và thảo luận

Hình 9 biểu diễn tốc độ dòng chảy (flow rate) theo thời gian của mô hình ban đầu và mô hình đề xuất. Có thể thấy, với mô hình được đề xuất, tốc độ chất lỏng đã tăng đáng kể lên 0.054 ml/s so với mô hình ban đầu là 0.35 ml/s. Tốc độ chất lỏng tăng vọt trong 3/4 chu kỳ đầu và nhanh chóng ổn định ở các chu kỳ tiếp theo. Sự chênh lệch giữa dòng vào và dòng ra ở lõi vào và lõi ra giống với thể tích của chất lỏng bị dịch chuyển bởi membrane do hiện tượng áp điện chứng minh cho sự bảo toàn thể tích.

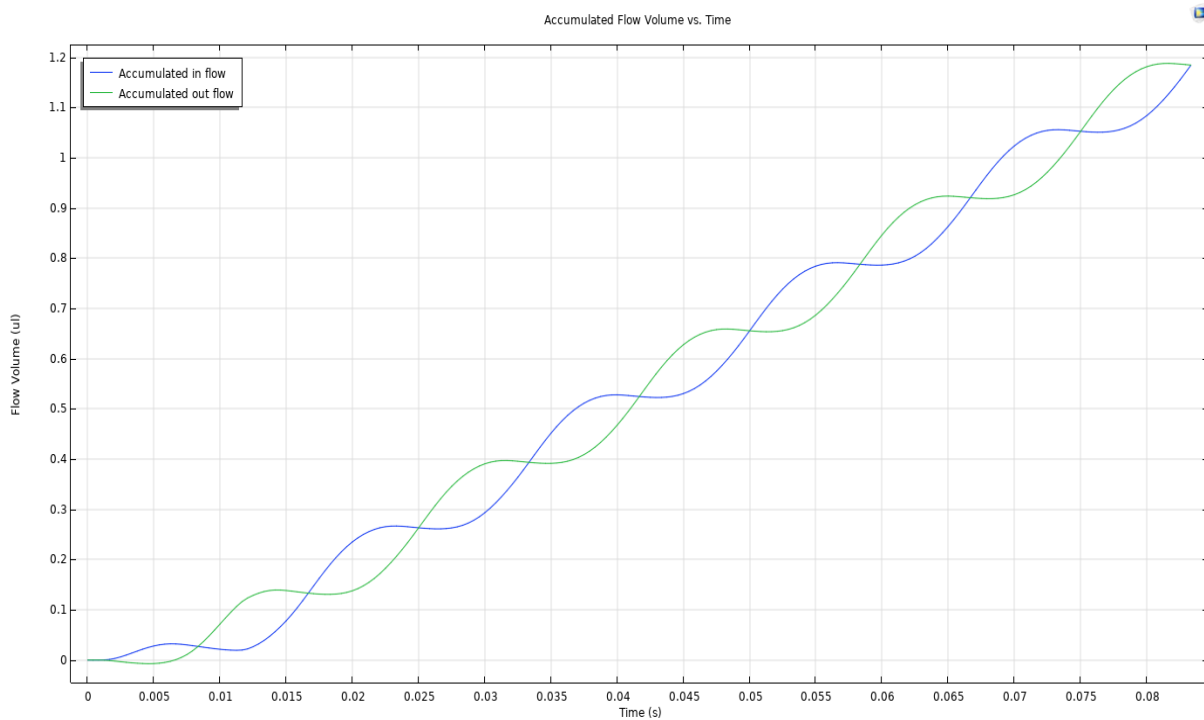


a.

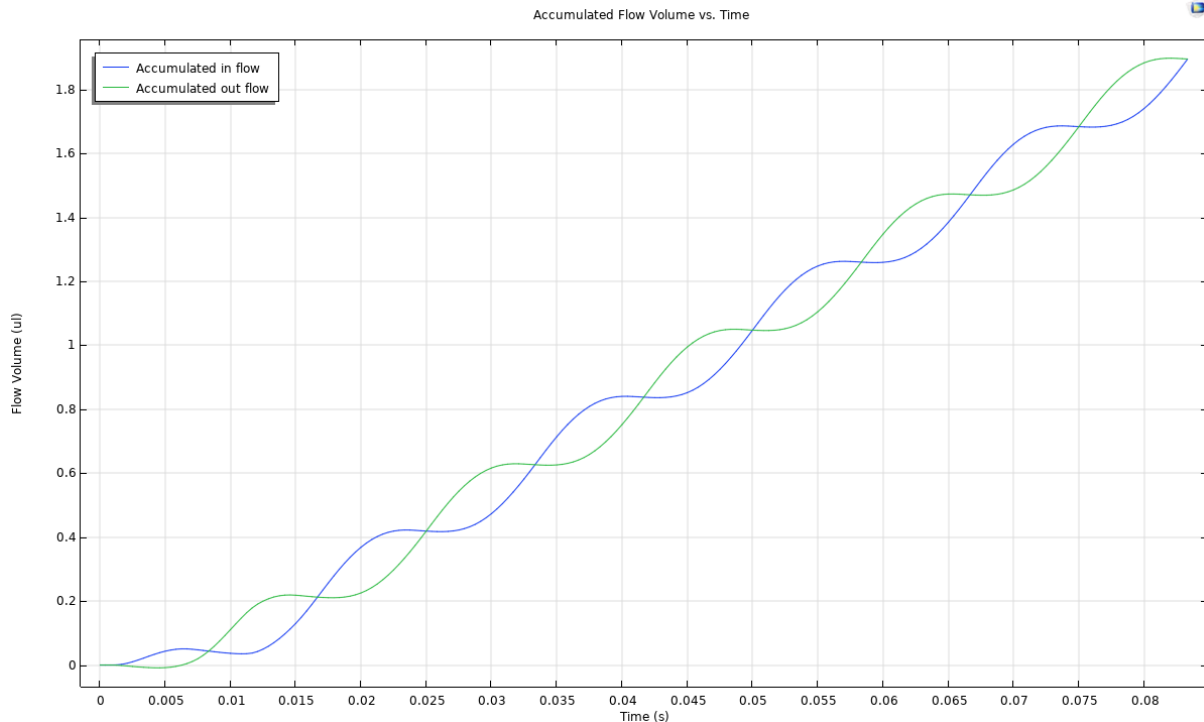


b.

Hình 9. Đồ thị biểu diễn tốc độ dòng chảy theo thời gian của a. Mô hình mẫu COMSOL và b. Mô hình đề xuất



a.

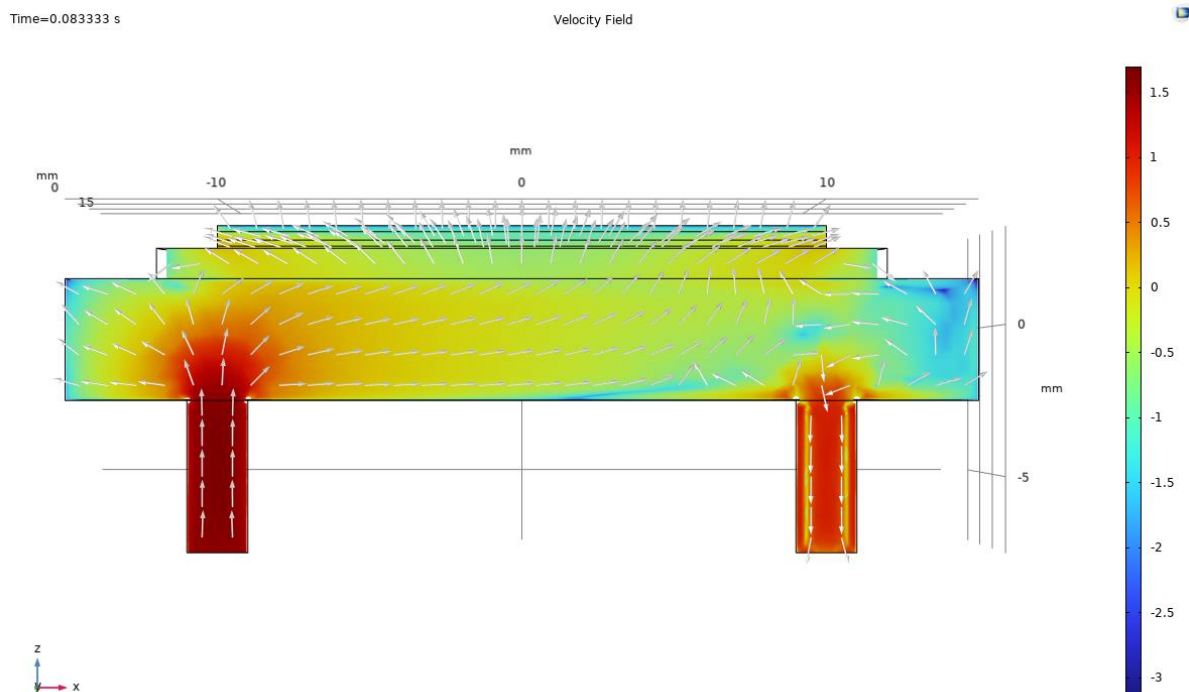


b.

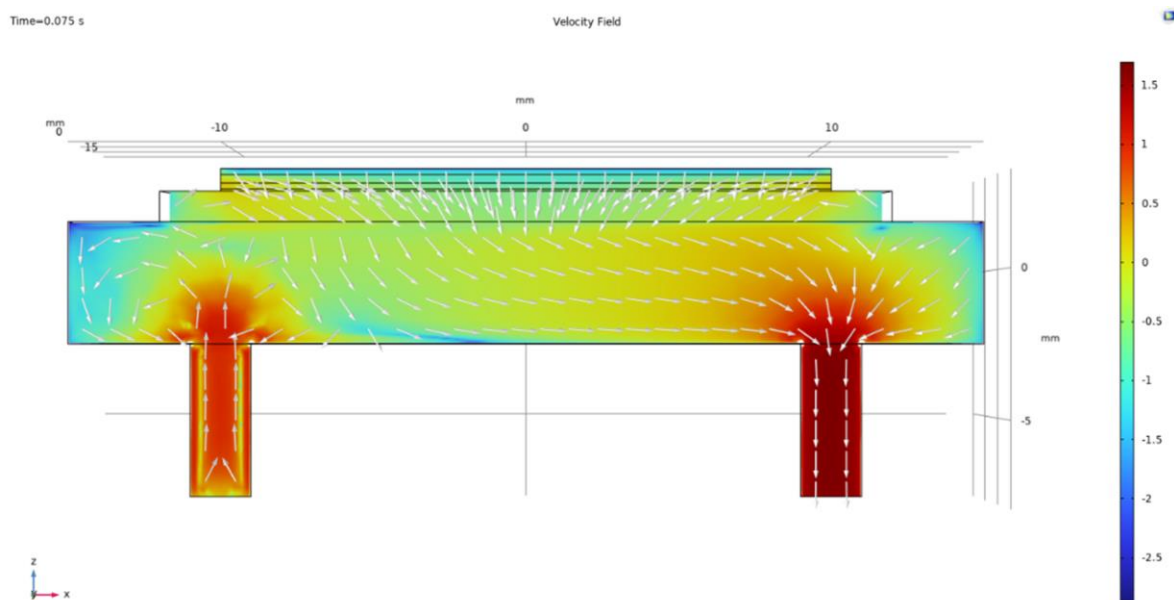
Hình 10. Lưu lượng chất lỏng tích lũy theo thời gian của a. Mô hình mẫu COMSOL và b. Mô hình đề xuất

Hình 10 biểu diễn lưu lượng chất lỏng tích lũy theo thời gian của mô hình ban đầu và mô hình đề xuất. Cùng với sự tăng lên của lưu lượng dòng chảy, lượng chất lỏng tích lũy cũng tăng lên. So với 1.73 ml/min của mô hình ban đầu, lưu lượng tích lũy này ở mô hình được đề xuất là 2.52 ml/min tại thời điểm 0.05s.

Hình 11 biểu diễn vận tốc dòng chảy dựa trên logarit cơ số 10 qua lõi vào và lõi ra khi chất lỏng được đẩy vào trong khoang bơm trong khi hình 12 biểu diễn trường hợp chất lỏng được bơm ra ngoài. Có thể thấy trong hình 11, bộ truyền động tác động lên lớp màng làm lớp màng này di chuyển lên, áp suất giảm. Sự giảm áp suất này tạo ra sự chênh lệch áp suất giữa khoang bơm và môi trường xung quanh, tạo điều kiện cho chất lỏng được hút vào buồng qua lõi vào. Trong hình 12, bộ truyền động tác động lên lớp màng làm cho lớp màng này di chuyển xuống, áp suất tăng lên làm cho chất lỏng được đẩy ra ngoài theo đường outlet.

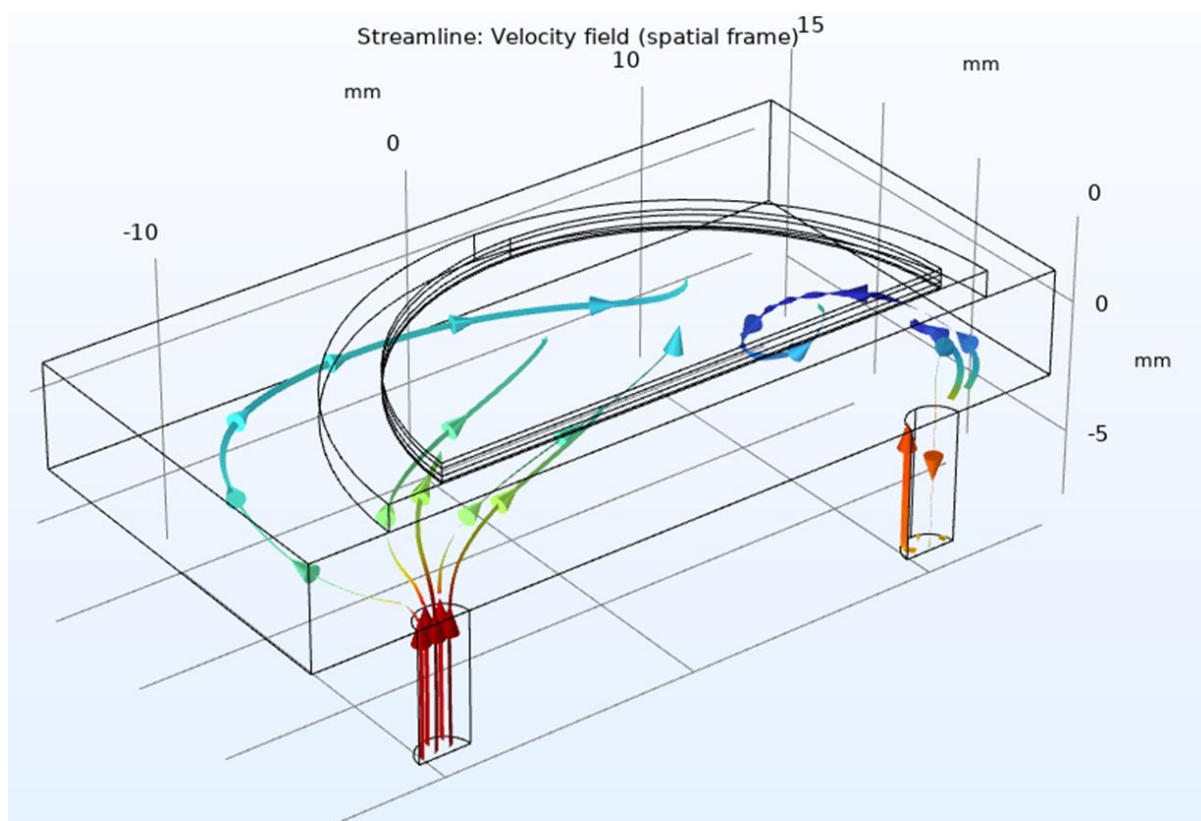


Hình 11. Vận tốc khi chất lỏng qua inlet (dựa trên thang logarit cơ số 10 theo mm/s)

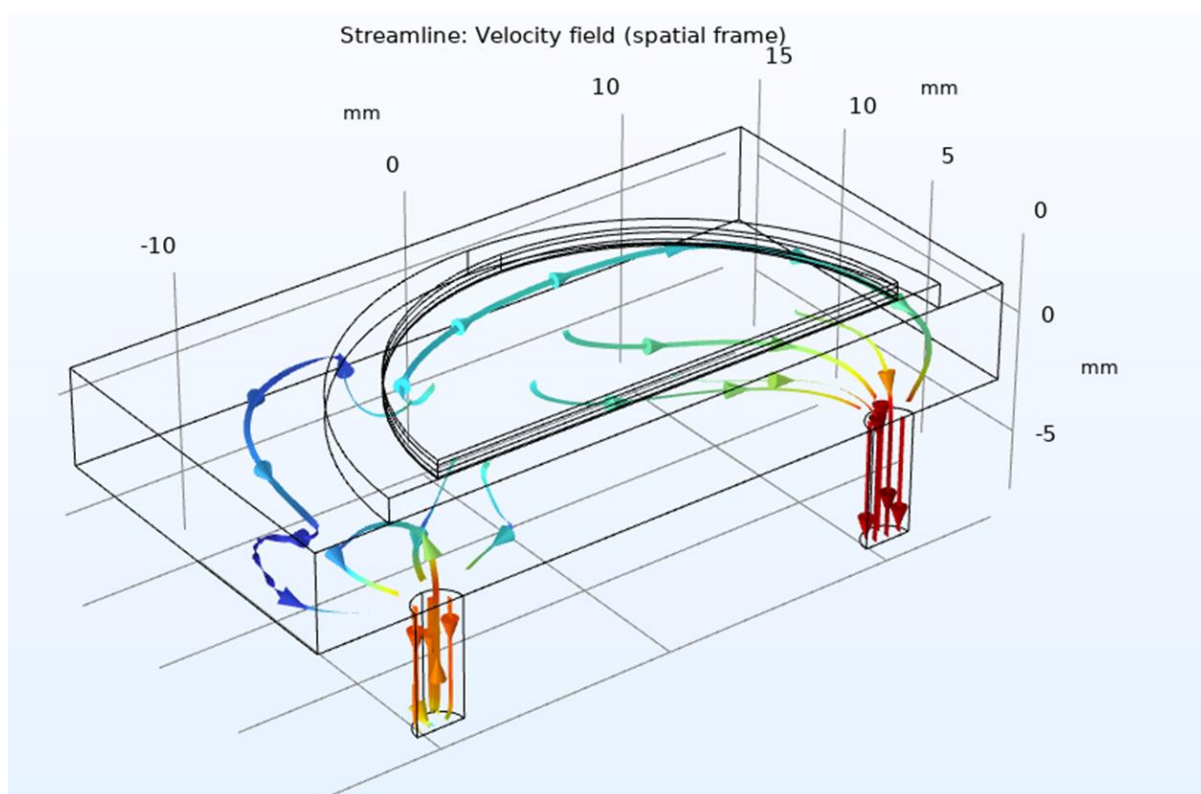


Hình 12. Vận tốc khi chất lỏng qua outlet (dựa trên thang logarit cơ số 10 theo mm/s)

Hình 13 và hình 14 biểu diễn hướng của dòng chảy trong các trường hợp tương ứng.



Hình 13. Dòng chảy khi chất lỏng qua inlet



Hình 14. Dòng chảy khi chất lỏng qua outlet

6. Kết luận

Trong báo cáo này, các lý thuyết liên quan và nguyên lý hoạt động của vi bơm áp điện đã được trình bày. Mô hình đề xuất đã được mô phỏng trên phần mềm COMSOL Multiphysics 6.1 cho thấy các kết quả đã được cải thiện so với mô hình ban đầu chứng tỏ rằng, bộ truyền động hình đĩa gồm nhiều lớp áp điện mang lại hiệu suất tốt hơn so với bộ truyền động hình khuyên.

7. Tài liệu tham khảo

- [1] David J. Beebe, Glennys A. Mensing, and Glenn M. Walker, “Physics and Applications of Microfluidics in Biology”, *Annual Review*, 2002.
- [2] Juan J. Rojas, Jose E. Morales, “Design and Simulation of a Piezoelectric Actuated Valveless Micropump” in *COMSOL Conference*, 2015.
- [3] Hamid Asadi Dereshgi, Huseyin Dal, Mustafa Zahid Yildiz, “Piezoelectric micropumps: state of the art review”, *Microsystem Technologies*, 2020.
- [4] D. J. Laser, J. G. Santiago, “A review of micropumps”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 6, April 2004.
- [5] Peter Woias, “Micropumps – past, progress, and future prospects”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 105, February 2005.
- [6] Nam-Trung Nguyen, Steven T. Wereley, “Fundamentals and applications of microfluidics”, Second Edition.
- [7] M. Richter, R. Linnemann, P. Woias, “Robust design of gas and liquid micropumps”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 68, June 1988.
- [8] Harris N. R., Hill M., Torah R., Townsend R., Beedy S., White N.M., Ding J., “A Multilayer Thick-film PZT Actuator for MEMs Applications”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 132, November 2006.
- [9] Rakesh Kumar Haldkar, Abhay Khalatkar, Vijay Kumar Gupta, Tanuja Sheorey, “New piezoelectric actuator design for enhance the micropump flow”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, 2021.