

Nghiên cứu mô phỏng sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt thuận và nghịch của giọt lưu chất trong vi kênh

Nguyễn Hữu Khương^{1,2}, Lê Thanh Long^{1,2,3,*}

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM, Việt Nam

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³PTN Trọng điểm ĐKS và KTHT (DCSELab), Trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM, Việt Nam

Liên hệ

Lê Thanh Long, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM, Việt Nam

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

PTN Trọng điểm ĐKS và KTHT (DCSELab), Trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM, Việt Nam

Email: ltlong@hcmut.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 04-8-2020
- Ngày chấp nhận: 07-12-2020
- Ngày đăng: 31-12-2020

DOI : 10.32508/stdjet.v3i4.753



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Trong bài báo này, sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt thuận và nghịch của lưu chất trong kênh dẫn micro (vi kênh) được nghiên cứu bằng phương pháp số. Cả hai bên trên và dưới của vi kênh được thiết lập bằng nhiệt độ môi trường. Hai nguồn nhiệt laser hoạt động theo chu kỳ với công suất 40 mW được đặt bên trái và bên phải của giọt chất lỏng trong vi kênh. Khi nguồn nhiệt laser được sử dụng, có một cặp dòng xoáy đối lưu nhiệt xuất hiện bên trong giọt chất lỏng. Những đường đẳng nhiệt bên trong giọt chất lỏng bị uốn cong mạnh do đối lưu mao dẫn nhiệt gây ra. Sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt thuận và nghịch gây ra độ biến thiên động lượng mao dẫn nhiệt làm cho giọt chất lỏng dịch chuyển từ vùng nhiệt độ cao của vi kênh đến vùng nhiệt độ thấp hơn. Độ biến thiên nhiệt độ tại bề mặt phân cách phía nguồn nhiệt hoạt động luôn luôn nhỏ hơn phía không có nguồn nhiệt hoạt động. Vận tốc của giọt chất lỏng ban đầu tăng nhanh và sau đó giảm dần trong các giai đoạn nguồn nhiệt hoạt động. Góc tiếp xúc động của giọt nước chịu ảnh hưởng lớn bởi sự dịch chuyển thuận và nghịch của dòng dầu và độ biến thiên động lượng mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng. Góc tiếp xúc động này thay đổi do sự chênh lệch áp suất tác dụng lên bề mặt phân cách giữa hai lưu chất trong suốt quá trình chuyển động.

Từ khoá: Mô phỏng số, chuyển động mao dẫn nhiệt, sức căng bề mặt, vi kênh

GIỚI THIỆU

Gần đây, công nghệ vi lưu đã và đang phát triển rất mạnh bởi vì những ứng dụng đa dạng của nó trong các thiết bị điện tử, vi mạch Lab-on-a Chip (LOC), các hệ thống cơ điện Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) hoặc trong lĩnh vực tổng hợp protein phục vụ y học¹⁻³. Do đó, việc nghiên cứu sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt của lưu chất trong các thiết bị sử dụng vi kênh có ý nghĩa quan trọng. Một số nghiên cứu khoa học đã lý giải cơ chế chuyển động của lưu chất trong vi kênh hoặc hiện tượng biến dạng của giọt chất lỏng trong quá trình nó chuyển động trong vi kênh dưới ảnh hưởng của nhiệt⁴⁻⁸. Kết quả nghiên cứu của Brochard⁴ cho thấy góc tiếp xúc của giọt chất lỏng ở trạng thái cân bằng, góc tiếp xúc tĩnh, thay đổi thành góc tiếp xúc động khi giọt chất lỏng di chuyển trên bề mặt rắn do biến thiên nhiệt độ gây ra. Sự chênh lệch giữa góc tiếp xúc trước và sau chịu ảnh hưởng lớn bởi biến thiên nhiệt độ ở hai bên giọt chất lỏng. Ford và Nadim⁵ đã sử dụng lý thuyết về điều kiện trượt để nghiên cứu vận tốc chuyển động của giọt chất lỏng đặt trên bề mặt rắn. Kết quả nghiên cứu của họ chỉ ra rằng độ dài trượt của lưu chất ảnh hưởng lớn bởi đường tiếp xúc động. Các kết quả mô phỏng mới nhất của Le và nhóm nghiên cứu của mình⁶⁻⁸ cho thấy sự chuyển động của giọt chất lỏng trong vi kênh hay ống

mao dẫn là do sự biến thiên nhiệt độ từ hai phía của giọt chất lỏng đã gây ra lực mao dẫn nhiệt và áp lực do chênh lệch áp suất trong vi kênh hay ống mao dẫn tác động vào giọt chất lỏng và làm cho nó di chuyển. Đối với các ứng dụng trong thiết bị điện tử LOC, giọt chất lỏng trong vi kênh có thể được điều khiển hướng di chuyển một cách linh hoạt. Vicent⁹ đã làm thực nghiệm để nghiên cứu ứng suất mao dẫn nhiệt trên bề mặt phân cách của những giọt chất lỏng đang di chuyển trong kênh dẫn do nguồn nhiệt từ laser tạo nên. Kết quả thực nghiệm cho thấy những giọt chất lỏng di chuyển trong kênh dẫn có thể thay đổi theo hướng di chuyển và phân loại rõ ràng bởi nguồn nhiệt laser. Do đó, sử dụng nguồn nhiệt laser hoạt động theo chu kỳ để thay đổi sự chênh lệch nhiệt độ trong kênh dẫn là một ý tưởng điều khiển lưu chất chuyển động trong kênh dẫn hiệu quả hơn so với cách dùng bề mặt rắn biến thiên nhiệt độ như trong các nghiên cứu trước đó⁶⁻⁸. Ngoài ra, việc sử dụng các phương pháp số để nghiên cứu sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt thuận và nghịch của lưu chất trong vi kênh và kiểm chứng thực nghiệm vẫn chưa được nghiên cứu hoàn chỉnh.

Trong nghiên cứu này, các phương pháp số trong các nghiên cứu trước đó của Le⁶⁻⁸ và phần mềm Comsol Multiphysics sẽ được sử dụng để mô phỏng sự chuyển

Trích dẫn bài báo này: Khương N H, Long L T. Nghiên cứu mô phỏng sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt thuận và nghịch của giọt lưu chất trong vi kênh. *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 3(4):500-507.

động của dòng thuận và nghịch của giọt chất lỏng trong vi kênh dưới tác dụng của nguồn nhiệt phát ra từ laser. Phương pháp bảo toàn định mức và kỹ thuật Lagrangian – Eulerian (ALE) dựa trên nền tảng phần tử hữu hạn được sử dụng để xác định vị trí và quỹ đạo dịch chuyển của giọt chất lỏng trong vi kênh dưới tác dụng của nguồn nhiệt laser.

MÔ HÌNH VẬT LÝ VÀ PHƯƠNG PHÁP SỐ

Mô hình vật lý

Mô hình trong nghiên cứu này là một vi kênh có tiết diện là H x W. Bên trong có đặt một giọt nước có dạng nửa hình cầu với góc tiếp xúc là θ , chiều cao lớn nhất là h_m , chiều dài giọt chất lỏng là L (Hình 1). Cả nhiệt độ ở biên trên và biên dưới của mô hình đều bằng nhiệt độ môi trường. Biên dạng của bề mặt giọt nước được mô tả bằng phương trình $z = S(x)$. Ở đây chúng ta bỏ qua ảnh hưởng của trọng lượng giọt chất lỏng vì kích thước giọt chất lỏng rất nhỏ. Tính chất vật lý của nước và dung môi Hexadecane (dầu) được mô tả như trong Bảng 1.

Bảng 1: Tính chất vật lý của nước và dung môi Hexadecane (dầu) tại nhiệt độ 298K¹⁰.

Tham số	Nước	Dầu (C ₁₆ H ₃₄)
ρ (kg/m ³)	998,23	775
σ (N/m)		$52,5 \times 10^{-3}$
γT (mN/m.K)		0,06
μ (Pa.s)	9×10^{-4}	0,003
α (m ² /s)	$1,458 \times 10^{-7}$	$3,976 \times 10^{-7}$
k (W/m.K)	0,6084	0,154
CP (J/kg.K)	4181,3	499,72

Để đơn giản bài toán, phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng đối với lưu chất Newton không nén được (nước và dầu) được viết lại trong hệ tọa độ Oxz như sau:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \rho_i \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \right]_i = 0, \quad (1)$$

$$\rho_i \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right]_i = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_i \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]_i + F_z, \quad (2)$$

$$\rho_i \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right]_i = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_i \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]_i + F_z, \quad (3)$$

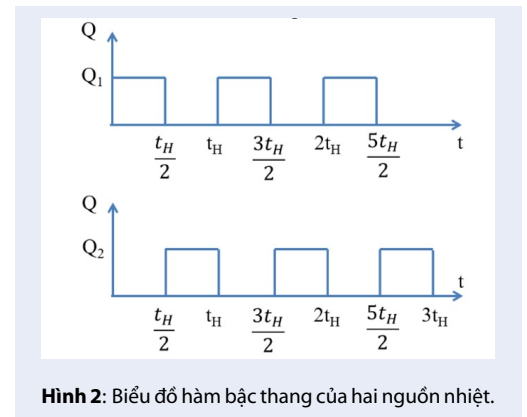
$$\rho_i C_{pi} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right]_i = k_i \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_i + Q_s, \quad (4)$$

trong đó u_i và v_i là vận tốc của lưu chất theo phương x và z; p là áp suất và ρ_i khối lượng riêng của lưu chất; μ_i là độ nhớt của lưu chất; C_{pi} là nhiệt dung riêng; k_i là độ dẫn nhiệt; T là nhiệt độ. Ký tự $i = "w"$ và $i = "o"$ để chỉ nước và dầu. F_x và F_z lần lượt là lực căng bề mặt theo phương x và z. Q_s là nguồn nhiệt laser. Hai nguồn nhiệt hoạt động theo chu kỳ được bố trí phía trước và phía sau giọt chất lỏng và thỏa mãn theo quy luật như sau:

$$Q_{1n} = \begin{cases} Q_1, & 0 < t^* \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \frac{1}{2} \leq t^* < 1 \end{cases}; \quad (5)$$

$$Q_{2n} = \begin{cases} 0, & 0 < t^* \leq \frac{1}{2} \\ Q_2, & \frac{1}{2} \leq t^* < 1 \end{cases}$$

trong đó $t^* = \frac{t}{(2n-1)t_H}$ là thời gian không thứ nguyên, n là số chu kỳ, t_H là thời gian của 1 chu kỳ. Hàm bậc thang của hai nguồn nhiệt được biểu diễn như trong Hình 2.



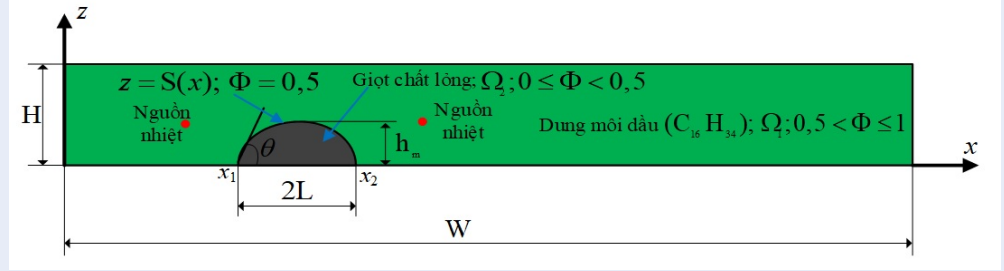
Hình 2: Biểu đồ hàm bậc thang của hai nguồn nhiệt.

Phương pháp xác định lực căng bề mặt của giọt chất lỏng được Brackbill¹¹ sử dụng để giải quyết ứng suất căng tại bề mặt đó. Trong phương pháp này, lực căng bề mặt được xác định là:

$$F = \sigma \kappa \delta n, \quad (6)$$

trong đó σ là sức căng bề mặt; δ là hàm Dirac delta; n là vector pháp tuyến của bề mặt; và κ là biên dạng bề mặt. Ở đây, sức căng bề mặt là một hàm tuyến tính theo nhiệt độ¹²:

$$\sigma = \sigma_{ref} - \gamma_T (T - T_{ref}), \quad (7)$$



Hình 1: Mô hình vật lý của vi kênh có chứa giọt nước. Giá trị của hàm định mức tại mặt phân cách giữa hai pha nước – dầu bằng 0,5. Giá trị của hàm định mức trong dầu (miền Ω₁) và nước (miền Ω₂) lần lượt là 0,5 < Φ ≤ 1 và 0 ≤ Φ < 0,5.

trong đó σ_{ref} là sức căng bề mặt tại nhiệt độ môi trường T_{ref} và $\gamma_T = -\partial\sigma/\partial T$ là hệ số sức căng bề mặt

Điều kiện biên của lưu chất di chuyển trong vi kênh được xác định như sau:

$$p = p_0; \frac{\partial u_0}{\partial x} = 0; \frac{\partial T_0}{\partial x} = 0, \text{ if } x = 0 \text{ and } x = W, \quad (8)$$

$$u_0 = v_0 = 0; T_0 = T_{ref} \text{ if } 0 < x < W, z = H, \quad (9)$$

$$u_0 = v_0 = 0 \text{ if } 0 < x < x_1 \text{ and } x_2 < x < W, z = 0, \quad (10)$$

$$T_i = T_{ref} \text{ if } 0 \leq x \leq W, z = 0, \quad (11)$$

trong đó x_1 và x_2 là vị trí 2 điểm tiếp xúc của giọt nước. Điều kiện trượt Navier được gán vào đường phân cách nước – rắn, dầu – rắn trong kênh dẫn và có phương trình là:

$$u_\tau = b_s \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (12)$$

trong đó b_s là hệ số trượt. Giá trị của hệ số trượt b_s phụ thuộc vào độ nhám bề mặt và loại lưu chất sử dụng^{13,14}. Tại mặt phân cách giữa nước – dầu phải thỏa mãn điều kiện dòng chảy liên tục và nhiệt độ liên tục như sau:

$$V_w \cdot \nabla S = V_0 \cdot \nabla S, T_0 = T_w, \quad (13)$$

trong đó $V = ui + vj$.

Trước khi bắt đầu dùng nguồn nhiệt laser, giọt nước được đặt ở vị trí $x=3H$ tại thành dưới của kênh dẫn và có nhiệt độ bằng nhiệt độ môi trường. Vì vậy, điều kiện ban đầu của mô hình vật lý là:

$$V_w(X, 0) = V_0(X, 0) = 0, \quad (14)$$

$$T_{sub}(x, 0, 0) = T_{ref}, \quad (15)$$

$$T_w(X, 0) = T_0(X, 0) = T_{ref}, \quad (16)$$

trong đó $X = xi + zj$. T_{sub} là nhiệt độ của thành dưới của kênh dẫn.

Phương pháp số

Trong nghiên cứu này, phương pháp bảo toàn định mức^{15,16} được sử dụng để giải quyết vấn đề biến dạng của bề mặt phân cách giữa 2 lưu chất khác nhau. Đối với phương pháp số này, bề mặt phân cách giữa hai lưu chất $S(x)$ có hàm định mức $\phi = 0,5$ sẽ tách miền khảo sát thành 2 miền là miền dầu Ω_1 và miền giọt nước Ω_2 . Giá trị của hàm định mức sẽ liên tục từ 0 đến 1 trong đó $0 \leq \phi < 0,5$ đối với miền giọt nước và $0,5 < \phi \leq 1$ đối với miền dầu (Hình 1). Giá trị của hàm định mức thỏa mãn phương trình sau:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + V_i \cdot \nabla \phi = \lambda \nabla \cdot \left[\varepsilon \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right], \quad (17)$$

trong đó λ chỉ giá trị tham số khởi tạo, ε là độ dày của bề mặt phân cách của hai lưu chất và V_i là vận tốc của lưu chất.

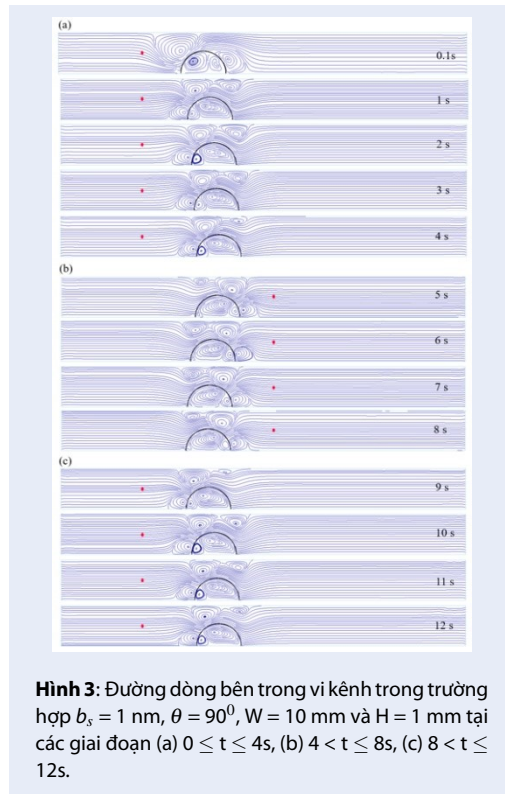
Ngoài ra, để đảm bảo sự chính xác của kết quả mô phỏng ta còn dùng phương pháp hằng số Lagrangian Eulerian mà trong đó phương pháp phần tử hữu hạn là nền tảng. Phương pháp này giúp mô hình lưới di chuyển liên tục và đồng thời với bề mặt phân cách giữa dầu và nước. Đối với mô hình vật lý trong nghiên cứu này, số phần tử hữu hạn (N_E) là 20432 và số bậc tự do (N) là 308574. Kích thước lưới ở bề mặt phân cách của giọt chất lỏng là $1,25 \times 10^{-8}$ m và kích thước lưới bên trong và bên ngoài giọt chất lỏng là $1,8 \times 10^{-8}$ m. Các giá trị trên được lựa chọn để đảm bảo độ hội tụ của mô hình toán và sự chính xác của phương pháp số.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

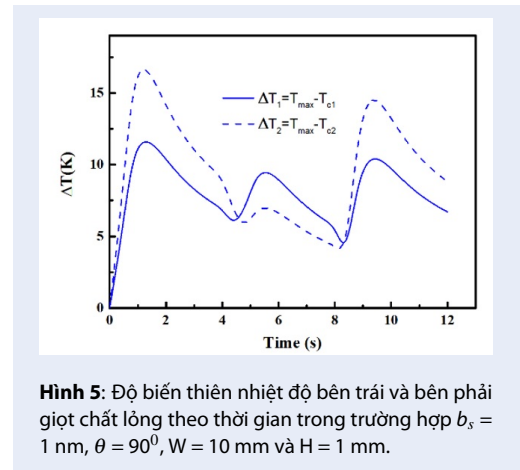
Giọt chất lỏng ban đầu được đặt trong vi kênh có góc tiếp xúc $\theta = 90^\circ$, $T_{ref} = 298$ K, $L = 0,55$ mm và $h_m = 0,55$ mm. Hình 3 thể hiện sự biến hóa của những đường dòng theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1$ nm, $W = 10$ mm và $H = 1$ mm. Ở đây, nhiệt độ ở cả biên trên và biên dưới của mô hình vật lý được thiết lập bằng với nhiệt độ môi trường bên ngoài. Hai nguồn nhiệt có công suất 40 mW được đặt tại vị trí cách vị trí ban đầu của giọt nước bên trái một khoảng 1 mm và bên phải một khoảng 1,5 mm. Trong giai đoạn $0 \leq t \leq 4$ s, nguồn nhiệt Q_1 được sử dụng và nguồn nhiệt Q_2 không sử dụng. Sự cân bằng sức căng bề mặt dọc bề mặt phân cách giữa hai pha lưu chất tạo nên hai dòng xoáy bên trong và bên ngoài giọt chất lỏng (Hình 3). Sức mạnh tổng hợp của những dòng xoáy bên phía nhiệt độ cao (bên trái) lớn hơn những dòng xoáy bên phía nhiệt độ thấp (bên phải) bởi vì ở bên trái của giọt chất lỏng có nhiệt độ cao hơn. Sự dịch chuyển mao dẫn nhiệt thuận trong vi kênh gây ra sự chênh lệch động lượng mao dẫn nhiệt làm cho giọt chất lỏng dịch chuyển từ vùng có nhiệt độ cao đến vùng nhiệt độ thấp hơn. Ngoài ra, sự dịch chuyển thuận của dòng dầu cũng ảnh hưởng mạnh đến khả năng dịch chuyển của dòng nước. Dòng dầu dịch chuyển bằng qua giọt nước từ bên trái kênh dẫn đến bên phải. Ở thời điểm ban đầu, dòng xoáy mao dẫn nhiệt phía trước giọt nước có kích cỡ và cường độ nhỏ. Nó sẽ lớn dần khi thời gian tăng lên. Sự biến hóa của đường đẳng nhiệt theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1$ nm, $W = 10$ mm và $H = 1$ mm được thể hiện trong Hình 4. Sự phân bố nhiệt độ trong miền dầu là những vòng tròn đồng tâm khuếch tán nhiệt đến giọt chất lỏng và bị uốn cong khi nó chạm vào giọt chất lỏng. Năng lượng nhiệt được truyền từ nguồn nhiệt Q_1 đến giọt chất lỏng. Những đường đẳng nhiệt phân bố bên trong giọt chất lỏng bị uốn cong mạnh do sự đối lưu mao dẫn nhiệt gây ra (Hình 4). Nhiệt độ cao nhất của giọt chất lỏng xuất hiện trên bề mặt phân cách gần nguồn nhiệt. Hình 5 mô tả biến thiên nhiệt độ tại bề mặt phân cách lượt lượt bên phía nguồn nhiệt Q_1 và bên phía nguồn nhiệt Q_2 . Biến thiên nhiệt độ tại bề mặt phân cách bên phía nguồn nhiệt Q_1 và Q_2 được định nghĩa lần lượt là $\Delta T_1 = T_{max} - T_{c1}$ và $\Delta T_2 = T_{max} - T_{c2}$. Trong đó, T_{max} là nhiệt độ cao nhất của giọt chất lỏng, T_{c1} và T_{c2} là nhiệt độ của điểm tiếp xúc bên trái và bên phải của chất lỏng. Kết quả mô phỏng cho thấy biến thiên nhiệt độ của giọt chất lỏng tăng nhanh trong giai đoạn đầu và sau đó giảm liên tục. Điều này có nghĩa là sự đối lưu mao dẫn nhiệt tác động đến chất lỏng sẽ tăng mạnh trong giai đoạn đầu và sau đó giảm nhanh khi thời gian tăng lên một

giá trị nhất định. Biến thiên nhiệt độ bên trong giọt chất lỏng ở phía trái luôn luôn nhỏ hơn bên phía phải trong suốt giai đoạn $0 \leq t \leq 4$ s. Hình 6(a) thể hiện sự thay đổi vị trí của giọt chất lỏng trong kênh dẫn theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1$ nm, $W = 10$ mm và $H = 1$ mm. Tính chất của vật tốc chuyển động của giọt chất lỏng được thể hiện trong Hình 6(b). Theo đó, vận tốc của giọt chất lỏng tăng rất nhanh trong giai đoạn đầu và sau khi đạt vận tốc lớn nhất thì nó giảm dần. Số không thứ nguyên Maragoni (Ma) đặc trưng cho cường độ đối lưu mao dẫn nhiệt và nó tỉ lệ với sự chênh lệch nhiệt độ bên trong giọt chất lỏng. Vì thế số Ma sẽ tăng nhanh trong giai đoạn đầu và giảm dần ở một thời gian nhất định. Hình 7 biểu diễn sự chênh lệch áp suất ($\Delta P = p_w - p_o$) ở hai bên giọt chất lỏng và sự thay đổi góc tiếp xúc động trong suốt quá trình giọt chất lỏng chuyển động trong vi kênh. Sự chênh lệch áp suất ở bên trái (ΔP_1) và bên phải giọt chất lỏng (ΔP_2) lần lượt đạt giá trị âm và dương (Hình 7b). Kết quả mô phỏng cho thấy góc tiếp xúc động thay đổi trong suốt quá trình giọt chất lỏng chuyển động trong vi kênh (Hình 7b). Sự thay đổi góc tiếp xúc động phụ thuộc lớn vào sự chênh lệch áp suất tác dụng lên bề mặt phân cách của giọt chất lỏng. Góc tiếp xúc bên trái (θ_1) giảm mạnh ở giai đoạn đầu và sau đó sẽ tăng nhanh. Trong khi đó, góc tiếp xúc bên phải (θ_2) lại tăng nhanh ở giai đoạn đầu và giảm đều theo thời gian. Góc θ_2 luôn luôn lớn hơn góc θ_1 do độ lớn của ΔP_2 nhỏ hơn độ lớn của ΔP_1 . Vì $\theta_2 > 90 > \theta_1$ và $\sigma_1 > \sigma_2$ nên $\sigma_2 \cos \theta_2 - \sigma_1 \cos \theta_1 < 0$. Do đó, lực mao dẫn nhiệt cản trở chuyển động của giọt chất lỏng trong trường hợp này. Đối với giai đoạn $4 < t \leq 8$ s, nguồn nhiệt Q_1 không được sử dụng và chỉ sử dụng nguồn nhiệt Q_2 . Không giống giai đoạn trước, kích cỡ và sức mạnh của vòng xoáy mao dẫn nhiệt ở bên phải (gần nguồn nhiệt Q_2) thì nhỏ hơn bên trái. Sự chênh lệch động lượng mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng và sự dịch chuyển nghịch của dòng dầu bằng qua giọt chất lỏng làm đẩy giọt chất lỏng di chuyển ngược lại từ bên phải (vùng nhiệt độ cao) đến bên trái của kênh dẫn (vùng nhiệt độ thấp hơn). Trong giai đoạn này, nhiệt năng được truyền từ nguồn nhiệt Q_2 đến giọt chất lỏng. Đường đẳng nhiệt bên trong giọt chất lỏng bị uốn cong mạnh bởi đối lưu mao dẫn nhiệt. Nhiệt độ cao nhất của giọt chất lỏng xuất hiện trên bề mặt phân cách gần nguồn nhiệt Q_2 . Biến thiên nhiệt độ bên trong giọt chất lỏng bên phía phải luôn luôn nhỏ hơn bên phía trái trong suốt quá trình giọt chất lỏng di chuyển ngược. Giống như tính chất chuyển động của giọt chất lỏng trong giai đoạn trước, vận tốc của giọt chất lỏng tăng nhanh ở giai đoạn đầu và giảm dần sau khi nó đạt giá trị lớn nhất. ΔP_1 mang giá trị dương trong khi ΔP_2 mang giá trị âm (Hình 7a). Ở giai đoạn

này, góc θ_2 luôn luôn nhỏ hơn góc θ_1 do độ lớn của ΔP_2 lớn hơn độ lớn của ΔP_1 . Đối với giai đoạn $8 < t \leq 12s$, hiện tượng vật lý của sự di chuyển mao dẫn thuận của giọt chất lỏng tương tự với giai đoạn đầu ($0 \leq t \leq 4s$). Kết quả mô phỏng cho thấy giọt chất lỏng lần lượt dịch chuyển thuận, nghịch và thuận trong ba giai đoạn khác nhau của nguồn nhiệt. Trong khi đó, kết quả thực nghiệm của Jiao¹⁷ cho thấy giọt chất lỏng trong vi kênh dịch chuyển theo quỹ đạo một vòng kín quay trở lại phía vị trí ban đầu bởi sự thay đổi cách thức hoạt động của nguồn nhiệt. Điều này chứng tỏ kết quả mô phỏng số về cơ chế chuyển động của giọt chất lỏng phù hợp với kết quả thực nghiệm.



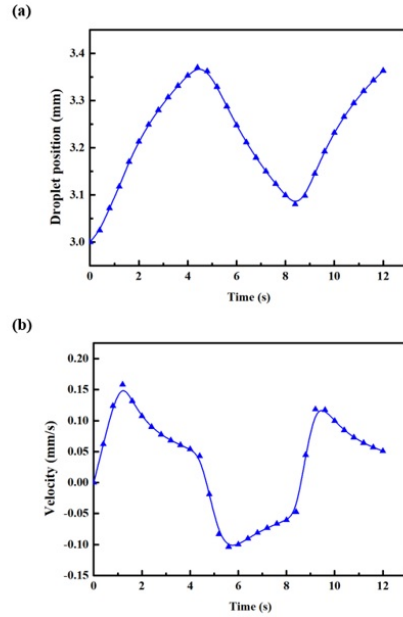
Hình 4: Đường đẳng nhiệt bên trong vi kênh trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$ tại các giai đoạn (a) $0 \leq t \leq 4s$, (b) $4 < t \leq 8s$, (c) $8 < t \leq 12s$.



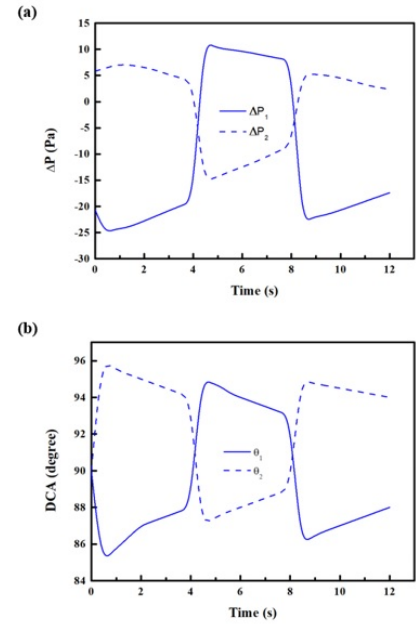
KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, các phương pháp số và phần mềm Comsol Multiphysic đã được sử dụng để mô phỏng sự di chuyển mao dẫn nhiệt thuận và nghịch của lưu chất trong vi kênh. Cả nhiệt độ biên trên và biên dưới ban đầu được thiết lập bằng với nhiệt độ của môi trường. Kết quả mô phỏng cho thấy độ chênh lệch động lượng mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng do biến thiên nhiệt độ gây ra và sự dịch chuyển của dòng dầu bằng qua giọt chất lỏng sẽ ảnh hưởng lớn đến tính chất chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn. Vận tốc của giọt chất lỏng ban đầu sẽ tăng

tốc để đạt giá trị vận tốc lớn nhất. Sau đó, vận tốc giảm dần theo thời gian. Đối với giai đoạn $0 \leq t \leq 4s$ và $8 < t \leq 12s$, vòng xoáy mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng bên phía trái luôn luôn nhỏ hơn bên phải. Ngược lại, vòng xoáy mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng bên phía trái lớn hơn bên phải trong giai đoạn $4 < t \leq 8s$. Đường đẳng nhiệt bên trong giọt chất lỏng bị uốn cong mạnh do sự đối lưu mao dẫn nhiệt gây ra. Độ biến thiên nhiệt độ bên trong giọt chất lỏng bên phía trái thì luôn luôn nhỏ hơn bên phía phải trong các giai đoạn $0 \leq t \leq 4s$ và $8 < t \leq 12s$ nhưng đối với giai đoạn $4 < t \leq 8s$ thì ngược lại. Góc tiếp xúc động của



Hình 6: (a) Vị trí và (b) vận tốc của giọt chất lỏng theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$



Hình 7: (a) Độ chênh lệch áp suất bên trái và bên phải giọt chất lỏng và (b) góc tiếp xúc động của giọt chất lỏng theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$

giọt chất lỏng thay đổi liên tục trong suốt quá trình giọt chất lỏng chuyển động trong kênh dẫn bởi vì sự chênh lệch áp suất tác dụng lên giọt chất lỏng.

XUNG ĐỘNG LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xác nhận không có xung đột lợi ích liên quan đến công trình nghiên cứu.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu dựa trên mô phỏng số để giải thích cơ chế chuyển động của lưu chất trong kênh dẫn vi lưu. Các thành viên đều có đóng góp như nhau trong nghiên cứu này.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh (VNU-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số C2020-20-03. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Haeberle S, Zengerle R. Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications, *Lab Chip*. 2007;7:1094–1110. PMID: 17713606. Available from: <https://doi.org/10.1039/b706364b>.
2. Abbasnejad B, Thorby W, Razmjou A, Jin D, Asadnia M, Warkiani ME. MEMS piezoresistive flow sensors for sleep apnea therapy. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;279:577–585. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.038>.
3. Wang L, Sun K, Hu X, Li G, Jin Q, Zhao J. A centrifugal microfluidic device for screening protein crystallization conditions by vapor diffusion, *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015;219:105–111. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.105>.
4. Brochard F. Motions of droplets on solid surfaces induced by chemical or thermal gradients, *Langmuir*. 1989;5:432–438. Available from: <https://doi.org/10.1021/la00086a025>.
5. Ford ML, Nadim A. Thermocapillary migration of an attached drop on a solid surface, *Phys. Fluids*. 1994;6:3183–3185. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.868096>.
6. Le TL, et al. Numerical investigation of the thermocapillary actuation behavior of a droplet in a microchannel, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2015;83:721–730. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.056>.
7. Le TL, et al. Numerical study of the migration of a silicone plug inside a capillary tube subjected to an unsteady wall temperature gradient, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016;97:439–449. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.098>.
8. Le TL, Chen JC, Nguyen HB. Numerical study of the thermocapillary droplet migration in a microchannel under a blocking effect from the heated wall, *Appl. Thermal Eng.* 2017;122:820–830. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.073>.
9. Vincent MRS, Wunenburger R, Delville JP. Laser switching and sorting for high speed digital microfluidics, *Applied Physics Letters*. 2008;92:154105. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.2911913>.
10. Verneuil E, Cordero ML, Gallaire F, Baroud CN. Laser-induced force on a microfluidic drop: Origin and magnitude, *Langmuir*. 2009;25(9):5127–5134. PMID: 19358521. Available from: <https://doi.org/10.1021/la8041605>.
11. Brackbill JU, Kothe DB, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension, *J. Comp. Phys.* 1991;100:335–354. Available from: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y).
12. Chen JC, Kuo CW, Neitzel GP. Numerical simulation of thermocapillary nonwetting, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2006;49:4567–4576. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.04.033>.
13. Tabeling P. Investigating slippage, droplet breakup, and synthesizing microcapsules in microfluidic system. *Phys. Fluids*. 2010;22:021302. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.3323086>.
14. Koplik J, Banavar JR, Willemsen JF. Molecular dynamics of fluid flow at solid surfaces. *Phys. Fluids A*. 1989;1:781–794. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.857376>.
15. Olsson E, Kreiss G. A conservative level set method for two phase flow. *J. Comput. Phys.* 2005;210:225–246. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2005.04.007>.
16. Olsson E, Kreiss G, Zahedi S. A conservative level set method for two phase flow II. *J. Comput. Phys.* 2007;225:785–807. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.12.027>.
17. Jiao ZJ, Huang XY, Nguyen NT. Manipulation of a droplet in a planar channel by periodic thermocapillary actuation. *J. Micromech. Microeng.* 2008;18:045027. Available from: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/4/045027>.