

Nghiên cứu mô phỏng sự chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro dưới tác dụng của nguồn nhiệt laser

Numerical Study of a Liquid Droplet Movement in a Microchannel under Laser Heat Source

Huỳnh Kim Thạch¹, Lê Thanh Long^{1,2,*}, , Bùi Trọng Hiếu¹

¹ Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM, 268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Tp. HCM, Việt Nam

² PTN Trọng điểm Quốc gia về ĐKS và KTHT (DCSELAB), 268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Tp. HCM, Việt Nam
Đến Tòa soạn: 13-11-2018; chấp nhận đăng: 27-9-2019

Tóm tắt

Trong bài báo này, các phương pháp số được sử dụng để mô phỏng sự di chuyển của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro bởi hiện tượng mao dẫn nhiệt. Nguồn nhiệt từ laser 40 mW được đặt ở vị trí cách vị trí ban đầu của giọt chất lỏng khoảng 1 mm. Để xác định được vị trí chính xác của giọt chất lỏng trong kênh dẫn cũng như quan sát rõ sức căng bề mặt của giọt chất lỏng trong quá trình di chuyển, phương pháp phân tử hữu hạn kết hợp với kỹ thuật định mức (level set technique) giữa hai pha khác nhau đã được sử dụng. Điều kiện biên ở thành trên và bề mặt dưới của kênh dẫn được sử dụng ở nhiệt độ môi trường. Khi nguồn nhiệt từ laser được sử dụng, có một cặp dòng xoáy đối lưu nhiệt xuất hiện bên trong giọt chất lỏng. Chính lực tạo ra bởi cặp dòng xoáy này (lực mao dẫn nhiệt) cùng với lực đẩy do chênh lệch áp suất làm cho giọt chất lỏng di chuyển trong kênh dẫn micro. Kết quả mô phỏng cho thấy sự biến thiên nhiệt độ trong kênh dẫn micro do nguồn nhiệt phát ra từ laser sẽ ảnh hưởng đến tính chất chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro. Vận tốc của giọt chất lỏng ban đầu tăng nhanh rồi sau đó giảm dần. Góc tiếp xúc động của giọt chất lỏng chịu ảnh hưởng lớn bởi sự di chuyển của dòng dầu trong kênh dẫn và chênh lệch moment mao dẫn nhiệt trong giọt chất lỏng. Góc tiếp xúc phía trước của giọt chất lỏng luôn luôn lớn hơn góc tiếp xúc phía sau trong quá trình giọt chất lỏng chuyển động trong kênh dẫn micro.

Từ khóa: Mô phỏng số, chuyển động mao dẫn nhiệt, sức căng bề mặt, nguồn nhiệt, kênh dẫn micro.

Abstract

In this study, the numerical methods are used to simulate the liquid droplet migration in a microchannel. 40mW heat source is placed at the distance of 1 mm from the initial position of a water droplet. To determine the exact position of a liquid droplet in a microchannel and clearly observe the surface tension of a droplet during the actuation process, we employed the finite element method with the two-phase level set technique. Both the upper wall and the bottom wall of the microchannel are set to be an ambient temperature. When the heat source is turned on, a pair of asymmetric thermocapillary convection vortices is formed inside the droplet. The thermocapillary force caused by the temperature gradient inside the droplet and the capillary force caused by the pressure gradient drive the droplet to move in a microchannel. The numerical results show the temperature gradient inside a microchannel due to laser heat source affects the behavior of a droplet movement. The actuation velocity of the water droplet first increases significantly, and then decreases continuously. The dynamic contact angle is strongly affected by the oil flow motion and the net thermocapillary momentum inside the droplet. The advancing contact angle is always larger than the receding contact angle during the actuation process.

Keywords: Numerical simulation, thermocapillary migration, surface tension, heat source, microchannel.

1. Giới thiệu

Gần đây, các nhà nghiên cứu trên thế giới rất quan tâm đến công nghệ vi chất lỏng bởi sự ứng dụng rộng rãi của nó trong các thiết bị điện tử, vi mạch Lab-on-a Chip, các hệ thống cơ điện Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) hoặc sự tổng hợp protein ứng dụng trong y học... [1-3]. Trong đó việc

nghiên cứu sự di chuyển mao dẫn nhiệt của vi chất lỏng trong các thiết bị có kênh dẫn vi lưu thì rất quan trọng. Một số kết quả nghiên cứu của các nhà khoa học đã tập trung lý giải cơ chế chuyển động của vi chất lỏng hoặc hiện tượng biến dạng của giọt chất lỏng trong quá trình di chuyển dưới ảnh hưởng của nhiệt [4-10]. Kết quả nghiên cứu của Brochard [4] cho thấy giọt chất lỏng từ trạng thái cân bằng trên bề mặt rắn di chuyển bởi sự biến thiên nhiệt độ ở phía trước và sau giọt chất lỏng. Sự chênh lệch góc tiếp xúc trước và sau của giọt chất lỏng phụ thuộc vào độ

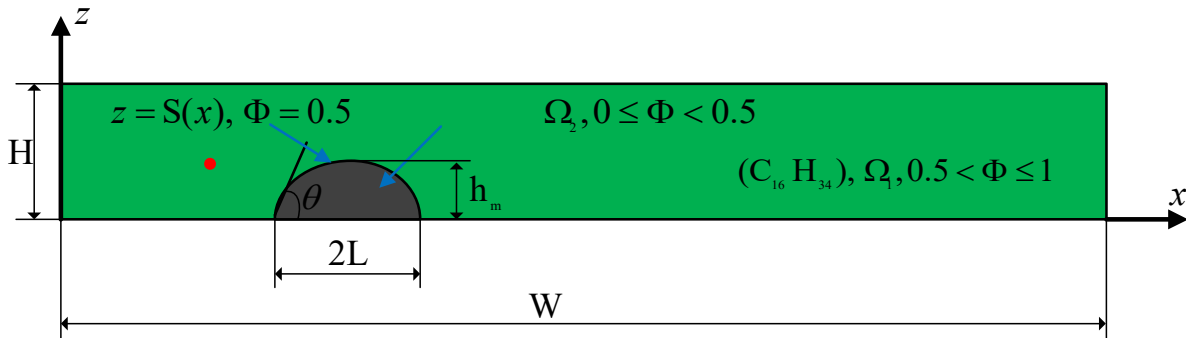
* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 972.204.110
Email: ltlong@hcmut.edu.vn

biến thiên nhiệt độ hai bên của giọt chất lỏng. Anantharaju [5] đã làm thực nghiệm để khảo sát chất thay đổi hình dạng của giọt chất lỏng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng bề mặt tại nơi có đường tiếp xúc ba pha gián đoạn, góc tiếp xúc của giọt chất lỏng phụ thuộc vào phần diện tích trống trên bề mặt rắn nhưng ngược lại góc tiếp xúc này lại gần như không phụ thuộc vào phần diện tích trống trên bề mặt có đường tiếp xúc ba pha liên tục. Lý thuyết điều kiện trượt của Navier đã được Ford và Nadim [6] sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của hệ số trượt đến hiện tượng chuyển động của góc tiếp xúc của giọt chất lỏng. Các kết quả mô phỏng mới nhất của Le và nhóm nghiên cứu của mình [7-9] cho thấy sự chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro 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 kênh dẫn micro hay ống mao dẫn tác động vào giọt chất lỏng và làm cho nó di chuyển. Ngoài ra có một số thực nghiệm, người ta đã dùng nguồn laser để điều khiển linh hoạt hướng chuyển động hay vận tốc di chuyển của giọt chất lỏng trong các thiết bị vi chất lỏng hoặc trong các kênh dẫn micro [10]. Vì vậy, việc sử dụng phương pháp số để nghiên cứu quá trình chuyển động của giọt chất lỏng bằng cách dùng nguồn nhiệt phát ra từ laser là rất khả quan.

Trong nghiên cứu này, các phương pháp số trong các nghiên cứu trước đó của Le và phần mềm Comsol Multiphysics sẽ được sử dụng để mô phỏng sự chuyển động của động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro 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 quãng đường dịch chuyển của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro dưới tác dụng của nguồn nhiệt laser.

2. Mô hình vật lý và phương pháp số

Mô hình được nghiên cứu ở đây là một kênh dẫn micro có tiết diện là $H \times W$. 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). Nhiệt độ ở thành trên và thành dưới 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.



Hình 1. Mô hình vật lý của kênh dẫn micro 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 Ω_1) và nước (miền Ω_2) lần lượt là $0,5 < \Phi \leq 1$ và $0 \leq \Phi < 0,5$.

Bảng 1. Tính chất vật lý của nước và dung môi Hexadecane (dầu) tại nhiệt độ 298K [11].

Tham số	Nước	Dầu ($C_{16}H_{34}$)
ρ (kg/m ³)	998,23	775
σ (N/m)	$71,8 \times 10^{-3}$	$28,12 \times 10^{-3}$
γ_T (mN/m.K)	0,1514	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
C_p (J/kg.K)	4181,3	499,72

Phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng đối với lưu chất Newton không nén được (nước và dầu) là:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \right]_i = 0, \tag{1}$$

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

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

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

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.

Phương pháp xác định lực căng bề mặt của giọt chất lỏng được Brackbill [12] sử dụng để giải quyết ứng suất căng tại bề mặt đó. Trong phương pháp này, lực căng bề mặt được xác định là:

$$F = \sigma \kappa \delta n, \quad (5)$$

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 độ [13]:

$$\sigma = \sigma_{ref} - \gamma_T (T - T_{ref}), \quad (6)$$

trong đó σ_{ref} là sức căng bề mặt tại nhiệt độ môi trường T_{ref} và $\gamma_T = -\frac{\partial \sigma}{\partial T}$ là hệ số sức căng bề mặt. Trong nghiên cứu này, giá trị của hệ số sức căng bề mặt giữa nước và dầu là $51 \times 10^{-3} \text{N/m}$.

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

$$p = p_o; \frac{\partial u_o}{\partial x} = 0; \frac{\partial T_o}{\partial x} = 0 \text{ tại } x = 0 \text{ và } x = W, \quad (7)$$

$$u_o = v_o = 0; T_o = T_{ref} \text{ tại } 0 < x < W, z = H, \quad (8)$$

$$u_o = v_o = 0 \text{ tại } 0 < x < x_1 \text{ và } x_2 < x < W, z = 0, \quad (9)$$

$$T_i = T_{ref} \text{ tại } 0 \leq x \leq W, z = 0, \quad (10)$$

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:

$$u_\tau = b_{is} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (11)$$

trong đó b_{is} là hệ số trượt. Các ký tự $\dot{i} = "w"$, $\dot{i} = "o"$, và s để chỉ giọt nước, dung môi dầu, bề mặt rắn. Giá trị của hệ số trượt b_{is} phụ thuộc vào độ nhám bề mặt và loại lưu chất sử dụng [14, 15]. Tại mặt phân cách giữa nước – dầu phải thỏa mãn điều kiện dòng chảy và nhiệt độ liên tục như sau:

$$V_w \cdot \nabla S = V_o \cdot \nabla S, T_o = T_w \quad (12)$$

trong đó $V = ui + vj$.

Trước khi bắt đầu dùng nguồn nhiệt laser, giọt nước được đặt ở vị trí $x = 2.5H$ 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:

$$V_w(X, 0) = V_o(X, 0) = 0, \quad (13)$$

$$T_{sub}(x, 0, 0) = T_{ref}, \quad (14)$$

$$T_w(X, 0) = T_o(X, 0) = T_{ref}, \quad (15)$$

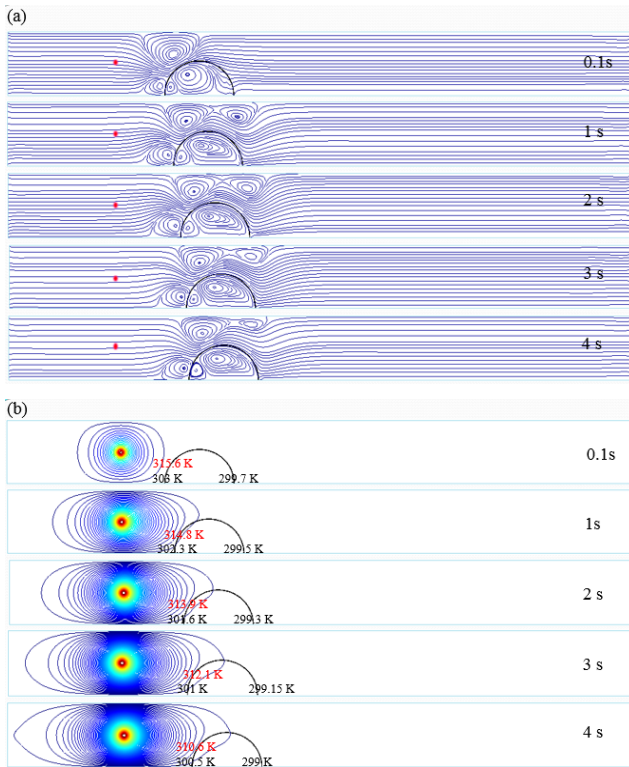
trong đó $X = xi + zj$.

Trong đề tài này, phương pháp bảo toàn định mức [16, 17] được sử dụng để giải quyết vấn đề biến dạng của bề mặt phân cách giữa 2 lưu chất khác nhau. Ngoài ra, để đảm bảo sự chính xác của phương pháp số 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 $1,25 \times 10^{-8} \text{m}$ và kích thước lưới bên trong và bên ngoài giọt chất lỏng là $1,8 \times 10^{-8} \text{m}$.

3. Sự chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro

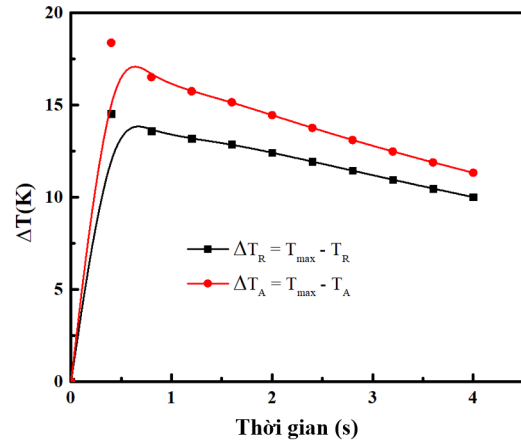
Giọt nước ban đầu được đặt trong kênh dẫn micro có góc tiếp xúc $\theta = 90^\circ$, $T_a = 298 \text{K}$, $L = 0.55 \text{mm}$ và $h_m = 0.55 \text{mm}$. Hình 2 thể hiện sự biến hóa của những đường dòng và đường đẳng nhiệt theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1 \text{nm}$, $W = 10 \text{mm}$ và $H = 1 \text{mm}$. 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. Nguồn nhiệt với công suất 40 mW được đặt tại vị trí cách vị trí ban đầu của giọt nước khoảng 1 mm. 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. 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 độ biến thiên nhiệt độ cao hơn. Sự chênh lệch động lượng mao dẫn nhiệt bên trong giọt nước làm cho giọt nước dịch chuyển từ vùng nhiệt độ cao đến vùng nhiệt độ thấp. Ngoài ra, sự dịch chuyển dòng dầu bên trong kênh dẫn cũng ảnh hưởng mạnh đến khả năng dịch chuyển của giọt nước. Ở thời điểm ban đầu, dòng xoáy mao dẫn nhiệt phía trước giọt nước có kích cỡ và cường độ nhỏ. Năng lượng nhiệt phát ra từ nguồn nhiệt sẽ truyền từ vị trí đặt nguồn nhiệt đến tác động vào giọt nước. Khi thời gian tăng lên, kích cỡ và cường độ của dòng xoáy mao dẫn nhiệt bên trái lớn dần lên. Nhưng ngược lại, kích cỡ và cường độ của

dòng xoáy mao dẫn nhiệt giảm dần ở bên phải. Đường đẳng nhiệt bên trong giọt nước bị uốn cong do hiện tượng đối lưu mao dẫn nhiệt. Sự phân bố nhiệt độ trong vùng dầu gần nguồn nhiệt là những vòng tròn đồng tâm và khuếch tán đến vùng giọt nước. Đường đẳng nhiệt sẽ bị bẻ cong khi nó chạm vào giọt nước. Nhiệt độ cao nhất của giọt nước luôn luôn xuất hiện bên trên bề mặt phân cách giữa nước và dầu trong suốt quá trình chuyển động của giọt nước trong kênh dẫn.

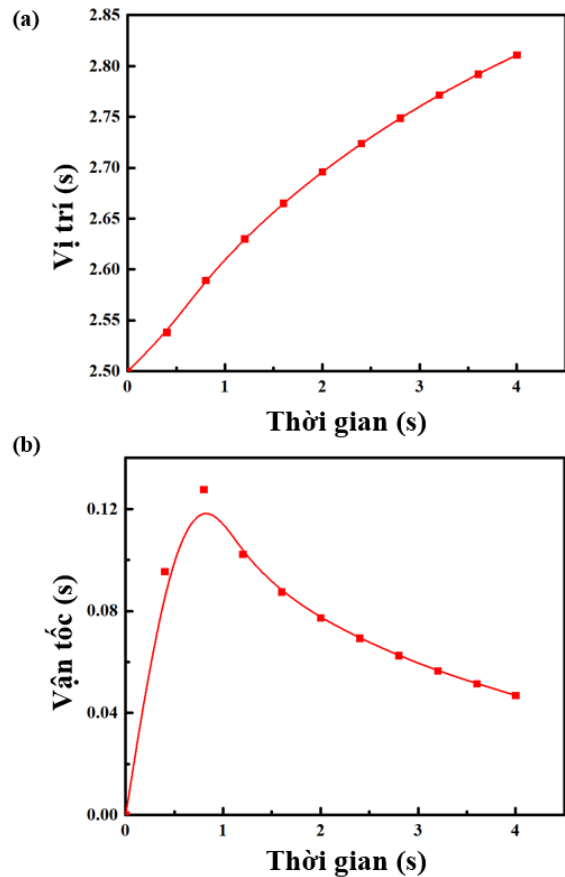


Hình 2. (a) Đường dòng và (b) đường đẳng nhiệt bên trong kênh dẫn micro trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$.

Độ biến thiên nhiệt độ phía trước (ΔT_R) và sau (ΔT_A) bên trong giọt chất lỏng được thể hiện trong hình 3. Độ biến thiên nhiệt độ phía trước là $\Delta T_R = T_{\max} - T_R$, độ biến thiên nhiệt độ phía sau là $\Delta T_A = T_{\max} - T_A$. Trong đó, T_{\max} là nhiệt độ lớn nhất của giọt nước, T_R và T_A là nhiệt độ phía trước và phía sau tại điểm tiếp xúc của giọt nước. Kết quả cho thấy độ biến thiên nhiệt độ tăng nhanh trong giai đoạn ban đầu và sau đó giảm dần theo thời gian. Vì thế, ảnh hưởng của đối lưu mao dẫn nhiệt đến giọt nước cũng tăng trong giai đoạn đầu và giảm liên tục theo thời gian. Độ biến thiên nhiệt độ phía trước luôn luôn nhỏ hơn độ biến thiên độ biến thiên nhiệt độ phía sau giọt chất lỏng. Vì vậy, lực mao dẫn nhiệt sẽ có tác động đẩy giọt chất lỏng di chuyển trong kênh dẫn micro.



Hình 3. Độ biến thiên nhiệt độ phía trước và sau bên trong giọt chất lỏng trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$.

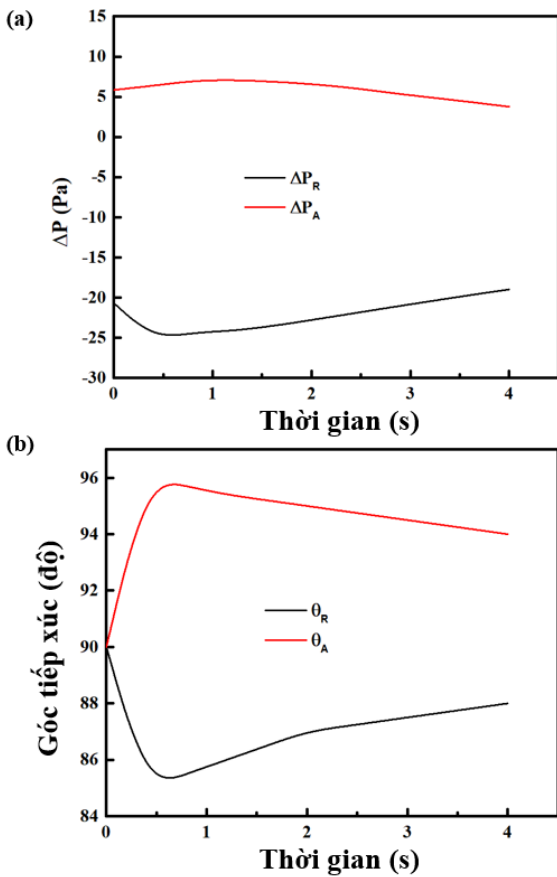


Hình 4. (a) Vị trí và (b) vận tốc giọt chất lỏng trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$.

Sự thay đổi vị trí của giọt nước trong kênh dẫn theo thời gian trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$ được thể hiện trong hình 4a. Trong khi đó, hình 4b thể hiện quy luật chuyển động của giọt chất lỏng theo thời gian. Kết quả mô phỏng

cho thấy vận tốc giọt chất lỏng tăng đáng kể trong giai đoạn đầu và sau đó giảm mạnh theo thời gian. Theo nghiên cứu của Le và nhóm nghiên cứu [7-9] thì tính chất chuyển động của giọt chất lỏng phụ thuộc vào sự chênh lệch động lượng mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng. Số Marangoni (Ma) được dùng để đánh giá ảnh hưởng của sự đối lưu mao dẫn nhiệt đến tính chất chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn vi lưu và số Ma được định nghĩa như sau: $Ma = \frac{\gamma_T \Delta T L}{\mu \alpha}$. Nếu số Ma càng lớn thì ảnh

hưởng của sự đối lưu mao dẫn nhiệt đến giọt chất lỏng càng lớn do biến thiên nhiệt độ bên trong nó sẽ lớn.



Hình 5. (a) Độ chênh lệch áp suất ở phía trước và sau giọt nước; (b) góc tiếp xúc động lực học trong trường hợp $b_s = 1 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, $W = 10 \text{ mm}$ và $H = 1 \text{ mm}$.

Hình 5 biểu diễn sự chênh lệch áp suất ở hai phía của giọt chất lỏng ($\Delta P = p_w - p_o$) và sự thay đổi của góc tiếp xúc giọt chất lỏng trong quá trình dịch chuyển trong kênh dẫn micro. Sự chênh lệch áp suất ở phía trước giọt chất lỏng (ΔP_R) mang giá trị âm nhưng ở phía sau (ΔP_A) lại mang giá trị dương. Góc tiếp xúc động lực học của giọt nước thay đổi liên tục trong quá trình nó dịch chuyển trong kênh dẫn micro. Góc tiếp xúc này phụ thuộc nhiều vào sự chênh lệch áp

suất tác dụng lên bề mặt phân cách của giọt nước. Kết quả cho thấy, góc tiếp xúc phía trước (RCA, θ_R) giảm mạnh trong giai đoạn đầu và sau đó tăng đáng kể trong khi góc tiếp xúc phía sau (ACA, θ_A) thì ngược lại, nghĩa là, góc tiếp xúc phía sau tăng đáng kể trong giai đoạn đầu và sau đó giảm dần theo thời gian. Trong suốt quá trình chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn, góc tiếp xúc phía sau luôn luôn lớn hơn góc tiếp xúc phía trước do độ lớn chênh lệch áp suất phía sau nhỏ hơn độ lớn chênh lệch áp suất phía trước. Bởi vì $\theta_A > 90 > \theta_R$ và $\sigma_A > \sigma_R$, $\sigma_A \cos \theta_A - \sigma_R \cos \theta_R < 0$ nên lực mao dẫn do chênh lệch áp suất sẽ cản trở sự chuyển động của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro. Đó là lý do vì sao vận tốc giọt chất lỏng giảm dần một khi thời gian dịch chuyển đủ lớn.

4. 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 của giọt chất lỏng trong kênh dẫn micro. Giọt chất lỏng sẽ bắt đầu chuyển động một khi ta sử dụng nguồn nhiệt laser phát ra ở vị trí cách giọt chất lỏng 1mm. Kết quả mô phỏng cho thấy 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. Trong quá trình lưu chất chuyển động, có một cặp dòng xoáy mao dẫn nhiệt bên trong giọt chất lỏng và một cặp khác ở bên ngoài gần bề mặt giọt chất lỏng. Đường đẳng nhiệt bên trong giọt chất lỏng có hình dạng uốn cong do sự đối lưu mao dẫn nhiệt. Góc tiếp xúc động lực học của giọt nước thay đổi liên tục trong suốt quá trình nó di chuyển trong kênh dẫn micro do độ chênh lệch áp suất tác dụng lên bề mặt phân cách giữa giọt nước và dung môi dầu. Góc tiếp xúc động lực học phía sau của giọt nước thì luôn luôn lớn hơn góc tiếp xúc phía trước khi giọt nước dịch chuyển do độ chênh lệch áp suất tác dụng lên bề mặt phân cách ở phía sau nhỏ hơn phía trước.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ Đề tài mã số T-CK-2018-01.

Tài liệu tham khảo

- [1]. S. Haeberle and R. Zengerle; Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications, Lab Chip 7 (2007) 1094-1110.
- [2]. N. Damean, P.P.L. Regtien, M. Elwenspoek; Heat transfer in a MEMS for microfluidics; Sensors and Actuators A: Physical 105 (2003) 137-149.
- [3]. H. Song, M.R. Bringer, J.D. Tice, C.J. Gerdtz, R.F. Ismagilov; Experimental test of scaling of mixing by chaotic advection in droplets moving through microfluidic channels; Applied Physics Letter 83 (2003) 4664-4666.

- [4]. F. Brochard; Motions of droplets on solid surfaces induced by chemical or thermal gradients, *Langmuir* 5 (1989) 432-438.
- [5]. N. Anantharaju, M.V. Panchagnula, S. Vedantam; three-phase contact line topology on dynamic contact angle on heterogeneous surface, *Langmuir* 23 (2007) 11673-11676.
- [6]. M. L. Ford, A. Nadim; Thermocapillary migration of an attached drop on a solid surface; *Phys. Fluids* 6 (1994) 3183-3185.
- [7]. T.-L. Le, J.-C. Chen, B.-C. Shen, F.-S. Hwu and H.-B. Nguyen; Numerical investigation of the thermocapillary actuation behavior of a droplet in a microchannel; *Int. J. Heat Mass Transfer* 83 (2015) 721-730.
- [8]. T.-L. Le, J.-C. Chen, F.-S. Hwu and H.-B. Nguyen; 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* 97 (2016) 439-449.
- [9]. T.-L. Le, J.-C. Chen, and H.-B. Nguyen; Numerical study of the thermocapillary droplet migration in a microchannel under a blocking effect from the heated wall; *Appl. Thermal Eng.* 122 (2017) 820-830.
- [10]. M. R. S. Vincent, R. Wunenburger, J. P. Delville; Laser switching and sorting for high speed digital microfluidics; *Applied Physics Letters* 92 (2008) 154105.
- [11]. S. Ramos, A. Tanguy; Pinning-depinning of the contact line on nanorough surfaces; *Eur. Phys. J. E* 19 (2006) 433-440.
- [12]. J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach; A continuum method for modeling surface tension; *J. Comp. Phys.* 100 (1991) 335-354.
- [13]. J.-C. Chen, C.-W. Kuo, G. P. Neitzel; Numerical simulation of thermocapillary nonwetting; *Int. J. Heat Mass Transfer* 49 (2006) 4567-4576.
- [14]. P. Tabeling; Investigating slippage, droplet breakup, and synthesizing microcapsules in microfluidic system, *Phys. Fluids* 22 (2010) 021302.
- [15]. J. Koplik, J. R. Banavar, and J. F. Willemsen; Molecular dynamics of fluid flow at solid surfaces; *Phys. Fluids A* 1 (1989) 781-794.
- [16]. E. Olsson, G. Kreiss; A conservative level set method for two phase flow; *J. Comput. Phys.* 210 (2005) 225-246.
- [17]. E. Olsson, G. Kreiss, and S. Zahedi; A conservative level set method for two phase flow II; *J. Comput. Phys.* 225 (2007) 785-807.