

NGHIÊN CỨU HÌNH DẠNG ỔN ĐỊNH CỦA GIỌT VI CHẤT LỎNG TRONG VI KÊNH THU HẸP HAI PHA

STUDY ON THE STABLE SHAPE OF DROPLETS IN TWO-PHASE CONTRACTION MICROCHANNELS

Nguyễn Thanh Tùng¹, Hoàng Văn Thạnh^{1*}, Trương Lê Bích Trâm², Lưu Đức Bình¹,
Trần Anh Kiệt², Phạm Hồng Vinh³

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

²Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

³Công ty TNHH Cơ khí Xây dựng Du lịch Bách Tùng - Chi nhánh 6, Đà Nẵng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: hvthanh@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 10/10/2023; Sửa bài / Revised: 04/01/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 06/01/2024)

Tóm tắt - Hệ thống vi lưu dựa trên giọt đang ngày càng phát triển và được ứng dụng rộng rãi trong các ngành kỹ thuật phân tích và thí nghiệm. Việc nắm bắt được động lực học của giọt vi chất lỏng là vô cùng quan trọng để điều khiển và thao tác giọt chính xác, qua đó tối ưu hóa thiết kế và hiệu suất của thiết bị. Bài báo này nghiên cứu về ảnh hưởng của các yếu tố tỷ lệ độ nhớt (λ), tỷ lệ thu hẹp (C), và số mao dẫn (Ca) đến tỷ lệ chiều dài (L_d/D) và tỷ lệ chiều cao ($2h/W$) của giọt khi ở trạng thái ổn định trong vi kênh thu hẹp bằng phương pháp mô phỏng số ba chiều (3D). Kết quả cho thấy, ba yếu tố trên có mối quan hệ tỷ lệ thuận đến tỷ lệ L_d/D của giọt. Trong khi đó, tỷ lệ $2h/W$ có mối quan hệ tỷ lệ thuận với λ và tỷ lệ nghịch với Ca và C .

Từ khóa - Động lực học giọt; vi kênh thu hẹp; hình dạng giọt; vi lưu dựa trên giọt; mô phỏng số.

1. Đặt vấn đề

Hệ thống vi lưu dựa trên giọt dần trở thành công nghệ mũi nhọn và đang góp phần tạo ra những phương pháp thí nghiệm mới. Với các ưu điểm vượt trội như tốc độ nhanh, tiêu thụ mẫu thấp, dễ dàng vận hành và kiểm soát, qua đó giúp tiết kiệm chi phí và thời gian. Do đó, hệ thống vi lưu được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực y sinh, hóa học, thực phẩm [1]. Nghiên cứu động lực học của giọt đang là mối quan tâm hàng đầu trong việc nghiên cứu phòng thí nghiệm trên chip (Lab-on-a-chip) và hệ phân tích vi mô (microTAS). Hệ thống vi kênh thu hẹp được sử dụng phổ biến cho các ứng dụng như tạo ra giọt nhỏ dạng sữa, phân tích DNA, hay là đo các đặc tính lưu biến của vật liệu polymer [2-6].

Trong những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu chi tiết về động lực học của giọt vi chất lỏng được thực hiện bởi các nhà nghiên cứu. Christafakis and Tsangaris [7] đã nghiên cứu sự ảnh hưởng của hệ số mao dẫn (Ca), hệ số Reynolds (Re), hệ số Weber (We) và tỷ lệ độ nhớt (λ) đến động lực học của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu hẹp. Tương tự, động lực học của giọt trong vi kênh thu hẹp do ảnh hưởng của Ca , Re , λ cũng được điều tra bởi Harvie và cộng sự [8-10]. Các nghiên cứu hầu như sử dụng phương pháp mô

Abstract - The droplet-based microfluidic system is increasingly advancing and widely applied in various fields of analytical techniques and experiments. Understanding the hydrodynamics of liquid droplets is crucial for precise droplet manipulation and control, thus optimizing the design and performance of the devices. This paper investigates the influences of the viscosity ratio (λ), the contraction ratio (C), and the capillary number (Ca) on the length ratio (L_d/D) and the height ratio ($2h/W$) of droplets in a stable state within a contraction microchannel using a 3D simulation method (3D). The results reveal that, these three factors exhibit a positive correlation with the L_d/D ratio of the droplet. Meanwhile, the $2h/W$ ratio demonstrates a positive correlation with λ and a negative correlation with Ca and C .

Key words - Droplet dynamics; droplet-based microfluidic; droplet shape; contraction microchannel; numerical simulation.

phỏng số hai chiều (2D), với các hệ vi kênh không tròn thì việc sử dụng phương pháp mô phỏng số 2D không đạt được độ chính xác cao và có sự chênh lệch với kết quả thực nghiệm [11-13]. Do đó, mô phỏng số ba chiều trở thành phương pháp được ưu tiên trong nhiều nghiên cứu ngày nay [14-15]. Hoang và cộng sự [16-17] sử dụng kỹ thuật mô phỏng số ba chiều để nghiên cứu động lực học của giọt do ảnh hưởng của Ca và hình học vi kênh trong vi kênh thu hẹp.

Hình dạng của giọt trong vi kênh thu hẹp là một trong các yếu tố liên quan đến nghiên cứu động lực học. Ling et al. [18] đã đánh giá ảnh hưởng tỷ lệ chiều cao đến động lực học của giọt trong hệ Hele - Shall. Hay gần đây nhất, Le và cộng sự [19] đã chỉ ra ảnh hưởng của hình học đầu vào và thông số dòng chảy đến biến dạng của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ. Qua các nghiên cứu được tìm hiểu, chưa có đánh giá đầy đủ về hình dạng của giọt vi chất lỏng trong vi kênh thu hẹp do tác động của ba yếu tố tỷ lệ độ nhớt (λ), tỷ lệ thu hẹp (C), và số mao dẫn (Ca). Vì vậy, nghiên cứu này cái nhìn tổng thể về hình dáng của giọt do tác động của các yếu tố nêu trên bằng phương pháp mô phỏng số 3D.

2. Mô hình mô phỏng số

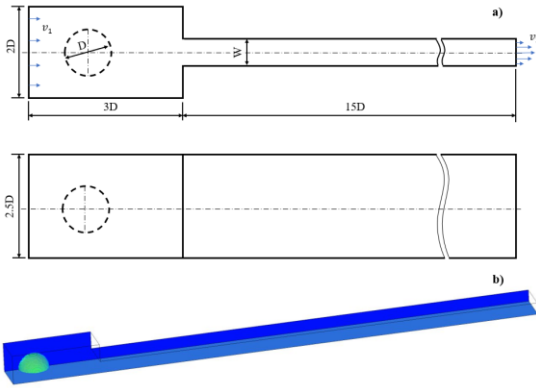
Ta xem xét một hệ thống vi kênh thu hẹp có các thông

¹ The University of Danang - University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Nguyen Thanh Tung, Hoang Van Thanh, Luu Duc Binh)

² The University of Danang, Danang, Vietnam (Truong Le Bich Tram, Tran Anh Kiet)

³ Bach Tung Construction Mechanical Tourism Co., Ltd. - Branch 6, Danang, Vietnam (Pham Hong Vinh)

số hình học được trình bày trong Hình 1a. Hệ thống vi kênh này bao gồm hai phần chính: vi kênh lớn và vi kênh thu hẹp. Chiều dài và chiều cao của vi kênh lớn lần lượt được xác định là $3D$ và $2D$, còn vi kênh thu hẹp có kích thước là $15D$ cho chiều dài và W cho chiều cao. Trong đó, D biểu thị đường kính của giọt chất lỏng. Để tránh ảnh hưởng của biên dạng hai mặt bên đến động lực học của giọt, chiều sâu của kênh được chọn là $2,5D$ [20-22]. Các thông số hình học của mô hình này đã được kiểm chứng và đã được sử dụng rộng rãi trong việc đánh giá biến dạng và động lực học của giọt trong vi kênh thu hẹp [16-17].



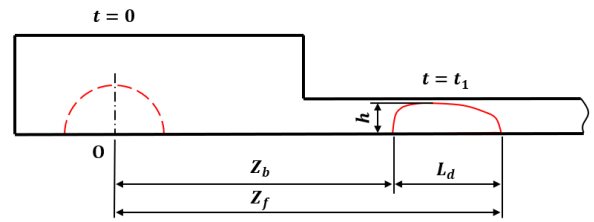
Hình 1. Thông số hình học của vi kênh thu hẹp

Dòng chảy và giọt chất lỏng trong vi kênh tuân theo chất lỏng Newton, với đặc tính dòng chảy tầng, và sự ảnh hưởng của quán tính đã được bỏ qua. Ở vị trí đầu vào của kênh lớn, dòng chảy có vận tốc không đổi là v_1 , còn vận tốc trung bình đặc trưng trong vi kênh thu hẹp được ký hiệu là v_2 . Hệ số đặc trưng cho động lực học của giọt vi chất lỏng là số mao dẫn (Ca), được xác định bằng tỷ lệ giữa vận tốc dòng chảy (v), độ nhớt dòng chảy (μ_m), và sức căng bề mặt giữa giọt và dòng chảy (σ); ta có: $Ca = \mu_m v / \sigma$. Ở đây, Ca_I và Ca_{II} lần lượt ứng với vận tốc v_1 và v_2 trong vi kênh lớn và vi kênh thu hẹp. Tỷ lệ độ nhớt (λ) đặc trưng cho tính chất chất lỏng, là tỷ số giữa độ nhớt của giọt và độ nhớt của dòng chảy; chúng ta định nghĩa $\lambda = \mu_d / \mu_m$.

Trong quá trình mô phỏng, chiều cao của vi kênh nhỏ đã được điều chỉnh để thể hiện các giá trị khác nhau của tỷ lệ thu hẹp ($C = D/W$) từ 1,25 đến 2. Đồng thời, giá trị của σ và μ_d được biến đổi để tương ứng với các giá trị khác nhau của Ca_{II} và λ . Kích thước lưới tính toán đã được thiết lập là $W/30$ để đảm bảo tính chính xác và đồng nhất trong các tỷ lệ C . Tường vi kênh đã được xác định là loại kỵ nước với góc tiếp xúc $\theta = 180^\circ$ và không có sự trượt. Áp suất tại đầu ra là không đổi và bằng không. Do tính đối xứng của mô hình và để giảm thời gian tính toán, mô phỏng đã được thực hiện trên một phần tư của mô hình, được minh họa trong Hình 1b.

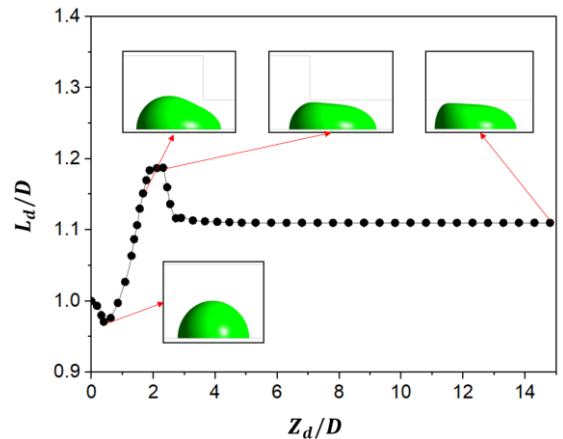
3. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá hình dạng ổn định của giọt trong vi kênh thu hẹp, chúng ta sử dụng hai chỉ số quan trọng: tỷ lệ chiều dài (L_d/D) và tỷ lệ chiều cao ($2h/W$). Chiều dài L_d của giọt được xác định dựa trên khoảng cách từ vị trí trước và vị trí sau của giọt tại thời gian t_i đến vị trí ban đầu của giọt (tâm của trục tọa độ), tương ứng với Z_f và Z_b , do đó $L_d = Z_f - Z_b$ và được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ minh họa các kích thước đánh giá của giọt vi chất lỏng

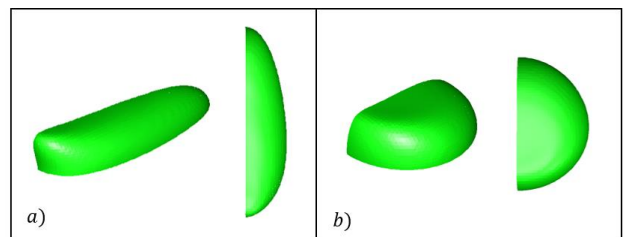
Hình 3 mô tả chi tiết sự biến dạng của giọt tại các vị trí khác nhau trước khi đạt trạng thái ổn định. Ban đầu, giọt ở trạng thái đứng yên, khi chịu tác động đột ngột của dòng chảy, giọt bị ép lại theo chiều dài. Tiếp theo, giọt bắt đầu giãn ra để đi vào vi kênh thu hẹp. Chiều dài của giọt đạt lớn nhất khi nó vừa hoàn toàn đi vào vi kênh thu hẹp. Trong vi kênh thu hẹp, lực bề mặt kéo giọt co lại và đạt chiều dài ổn định. Vị trí mà giọt đạt trạng thái ổn định phụ thuộc vào số mao dẫn và tỷ lệ độ nhớt [19]. Để đảm bảo giọt đã đạt trạng thái ổn định, các thông số được xem xét tại các vị trí $Z_d / D > 10$, trong đó $Z_d = (Z_f + Z_b) / 2$.



Hình 3. Tỷ lệ chiều dài giọt theo các vị trí, với $\lambda = 0,05$, $C = 1,25$ và $Ca_{II} = 0,1$

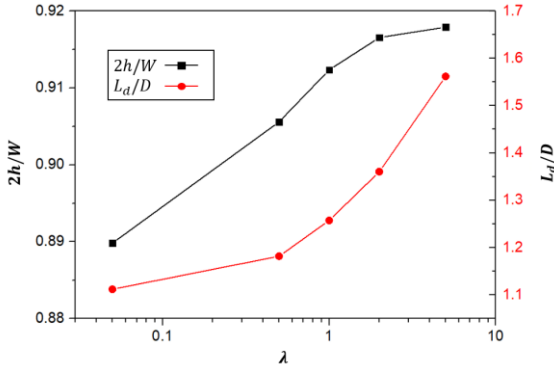
3.1. Ảnh hưởng của tỷ lệ độ nhớt đến hình dạng giọt vi lỏng

Hình 4 minh họa hình dạng 3D của giọt chất lỏng trong vi kênh thu hẹp khi $\lambda = 5$ (Hình 4a) và $\lambda = 0,05$ (Hình 4b) tại $C = 1,43$ và $Ca_{II} = 0,1$. Dễ dàng nhận thấy rằng khi λ lớn, giọt dễ bị biến dạng, xu hướng bị kéo giãn bởi tác động của dòng chảy khiến tỷ lệ chiều dài của giọt tăng lên. Trái lại, khi λ nhỏ, biến dạng ít xảy ra, và giọt hầu như chỉ bị ép lại do tác động của tỷ lệ thu hẹp. Điều này rõ ràng khi hình dạng của giọt gần như tròn, cái mà ta quan sát được theo chiều từ trên xuống.



Hình 4. Hình dạng 3D của giọt vi chất lỏng ở trạng thái ổn định trong vi kênh thu hẹp

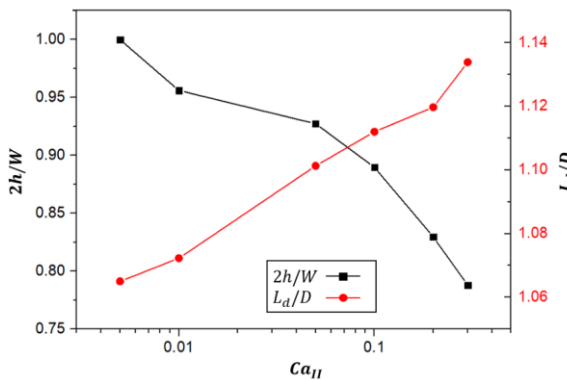
Để đưa ra một đánh giá tổng quan, Hình 5 cung cấp thông tin về tỷ lệ L_d/D và $2h/W$ tương ứng với các giá trị của λ từ 0,05 đến 5 tại $C = 1,25$ và $Ca_{II} = 0,1$. Có thể thấy rằng, khi λ tăng từ 0,05 lên 5, tỷ lệ L_d/D tăng từ 1,112 lên 1,562. Hơn nữa, tỷ lệ $2h/W$ cũng thể hiện xu hướng tăng từ 0,89 lên 0,918 khi λ tăng từ 0,05 lên 5. Với vận tốc phân bố theo trường gradient trong vi kênh khiến cho các giọt có độ nhớt càng lớn càng dễ bị biến dạng và nhô cao ở phần đuôi, như quan sát ở Hình 4, do đó tỷ lệ $2h/W$ tăng lên. Tuy nhiên, tốc độ này giảm dần do sự kéo giãn của giọt tăng lên nhanh chóng khi tăng tỷ lệ độ nhớt, lúc này độ giãn dài bắt đầu chiếm ưu thế hơn so với độ biến dạng theo chiều cao.



Hình 5. Ảnh hưởng của λ đến hình dạng giọt trong vi kênh thu hẹp

3.2. Ảnh hưởng của số mao dẫn đến hình dạng giọt vi lỏng

Ngoài ảnh hưởng của λ đến biến dạng của giọt vi lỏng, hệ số Ca cũng là một trong các yếu tố liên quan đến biến dạng giọt [23]. Để đánh giá ảnh hưởng của Ca , nhóm tác giả đã tiến hành cố định giá trị $C = 1,25$ và $\lambda = 0,05$, và thay đổi giá trị của Ca_{II} từ 0,05 đến 0,3, kết quả về hình dạng của giọt được thể hiện trong Hình 6. Tỷ lệ L_d/D và $2h/W$ thể hiện mối tương quan trái ngược nhau. Trong khi tỷ lệ L_d/D tăng từ 1,065 lên 1,134 thì tỷ lệ $2h/W$ giảm từ 1 xuống 0,788.

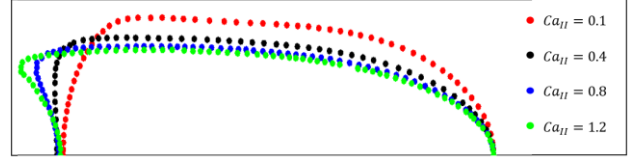


Hình 6. Ảnh hưởng của Ca_{II} đến kích thước giọt trong vi kênh thu hẹp

Hình 7 minh họa sự biến dạng của giọt trong vi kênh thu hẹp dưới ảnh hưởng của các giá trị khác nhau của số mao dẫn lớn. Ở $Ca_{II} = 0,1$, giọt duy trì hình dạng gần như hình cầu khi đi vào vi kênh thu hẹp, biểu thị rằng lực bề mặt chiếm ưu thế và giọt ít bị biến dạng. Khi Ca_{II} tăng lên 0,4, lực bề mặt của giọt bắt đầu mất ưu thế khiến cho giọt bị ép xuống, tức tỷ lệ chiều cao giọt giảm đáng kể, trong khi tỷ lệ chiều dài không có quá nhiều thay đổi. Biên dạng

sau của giọt gần như biểu thị là đường thẳng, khác với biên dạng của giọt tại Ca_{II} thấp hơn 0,4.

Ở $Ca_{II} = 0,8$ và $Ca_{II} = 1,2$, tỷ lệ chiều cao giọt gần như đạt đến giá trị giới hạn, không thấy sự khác biệt quá lớn giữa hay số mao dẫn này. Trong khi đó, phía sau giọt bị biến dạng đáng kể hơn và xuất hiện đuôi giọt. Sự hiện diện của đuôi giọt làm cho tỷ lệ chiều dài giọt tăng đáng kể. Và khi đuôi giọt đạt giá trị đủ lớn, giọt sẽ bị vỡ [16-17].



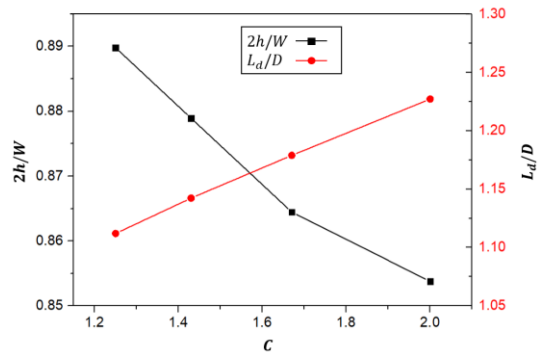
Hình 7. Biên dạng giọt do ảnh hưởng của Ca_{II}

3.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ thu hẹp đến hình dạng giọt vi lỏng

Trong vi kênh thu hẹp, do chiều cao vi kênh bị giới hạn, giọt vi chất lỏng bị ép lại, dẫn đến sự biến dạng đáng kể của giọt. Sự biến dạng này phụ thuộc vào tỷ lệ thu hẹp vi kênh. Khi C tăng lên, vi kênh trở nên hẹp hơn, ảnh hưởng trực tiếp đến hình dạng và kích thước của giọt.

Hình 8 minh họa rõ ràng tác động của hệ số C đến tỷ lệ chiều dài giọt L_d/D và tỷ lệ chiều cao giọt $2h/W$. Khi giá trị C gia tăng từ 1,25 lên 2, tỷ lệ L_d/D tăng từ 1,11 lên 1,23, điều này cho thấy giọt trở nên dài hơn khi vi kênh hẹp hơn. Cụ thể, tại giá trị $Ca_{II} = 0,1$ và $\lambda = 0,05$, sự gia tăng C dẫn đến sự kéo dài của giọt, phản ánh sự gia tăng của lực cản từ dòng chảy và lực bề mặt trong điều kiện vi kênh thu hẹp.

Đồng thời, tỷ lệ chiều cao giọt $2h/W$ cho thấy xu hướng giảm khi hệ số C tăng. Cụ thể, tỷ lệ $2h/W$ giảm từ 0,89 xuống 0,854 khi giá trị C tăng lên, điều này có nghĩa là vi kênh trở nên hẹp hơn và chiều cao tương đối của giọt giảm xuống. Xu hướng này tương tự như tác động của tham số Ca_{II} , thể hiện sự tương tác phức tạp giữa lực bề mặt và lực cản từ dòng chảy trong điều kiện thay đổi kích thước vi kênh.



Hình 8. Ảnh hưởng của C đến hình dạng giọt trong vi kênh thu hẹp

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã làm sáng tỏ sự ảnh hưởng của tỷ lệ độ nhớt (λ), số mao dẫn (Ca), và tỷ lệ thu hẹp (C) đến hình dạng ổn định của giọt chất lỏng trong vi kênh thu hẹp. Kết quả cho thấy khi λ tăng, giọt dễ bị kéo giãn và tỷ lệ chiều dài (L_d/D) tăng lên đáng kể; ngược lại, khi λ giảm, giọt ít bị biến dạng hơn và tỷ lệ chiều cao ($2h/W$) gần như không thay đổi. Số mao dẫn (Ca) tăng dẫn đến tỷ lệ chiều dài giọt

(L_d/D) tăng trong khi tỷ lệ chiều cao giọt ($2h/W$) giảm, cho thấy giọt bị kéo giãn nhiều hơn và chiều cao giảm do lực bề mặt giảm ưu thế. Khi tỷ lệ thu hẹp (C) tăng, vi kênh hẹp lại làm cho giọt bị kéo dài hơn (L_d/D tăng) và chiều cao giọt giảm ($2h/W$ giảm). Đây thể hiện sự tương tác phức tạp giữa lực bề mặt và lực cản từ dòng chảy. Những nghiên cứu này không chỉ cung cấp cái nhìn sâu sắc về động lực học của giọt vi chất lỏng trong vi kênh thu hẹp mà còn có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế và tối ưu hóa các thiết bị vi lưu. Kết quả này giúp tăng khả năng thao tác và điều khiển giọt trong hệ thống vi lưu, từ đó cải thiện hiệu suất và độ chính xác trong các ứng dụng kỹ thuật phân tích và thí nghiệm vi chất lỏng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài có mã số B2022-DNA-02. Ngoài ra, tác giả Nguyễn Thanh Tùng được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2023.ThS.118. Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Giáo sư Jang Min Park từ Trường Kỹ thuật Cơ khí, Đại học Yeungnam, Hàn Quốc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Castillo-León and W. E. Svendsen, *Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems: A Practical Guide*. Springer, 2014.
- [2] S. L. Anna, N. Bontoux, and H. A. Stone, "Formation of dispersions using 'flow focusing' in microchannels", *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 3, pp. 364–366, 2003.
- [3] T. Fu, Y. Wu, Y. Ma, and H. Z. Li, "Droplet formation and breakup dynamics in microfluidic flow-focusing devices: From dripping to jetting", *Chemical Engineering Science*, vol. 84, pp. 207–217, 2012.
- [4] T. Fu and Y. Ma, "Bubble formation and breakup dynamics in microfluidic devices: A review", *Chemical Engineering Science*, vol. 135, pp. 343–372, 2015.
- [5] G. C. Randall, K. M. Schultz, and P. S. Doyle, "Methods to electrophoretically stretch DNA: microcontractions, gels, and hybrid gel-microcontraction devices", *Lab-on-a-Chip*, vol. 6, no. 4, pp. 516–525, 2006.
- [6] C. J. Pipe and G. H. McKinley, "Microfluidic rheometry", *Mechanics Research Communications*, vol. 36, no. 1, pp. 110–120, 2009.
- [7] A. N. Christafakis and S. Tsangaris, "Two-Phase Flows of Droplets in Contractions and Double Bends", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 2, no. 3, pp. 299–308, 2008.
- [8] D. J. E. Harvie, M. R. Davidson, J. J. Cooper-White, and M. Rudman, "A parametric study of droplet deformation through a microfluidic contraction", *The ANZIAM Journal*, vol. 46, 2004, pp. 150–166, 2004.
- [9] D. J. E. Harvie, M. R. Davidson, J. J. Cooper-White, and M. Rudman, "A parametric study of droplet deformation through a microfluidic contraction: Low viscosity Newtonian droplets", *Chemical Engineering Science*, vol. 61, no. 15, pp. 5149–5158, 2006.
- [10] D. J. E. Harvie, M. R. Davidson, J. J. Cooper-White, and M. Rudman, "A parametric study of droplet deformation through a microfluidic contraction: Shear thinning liquids", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 33, no. 5, pp. 545–556, 2007.
- [11] I. L. Ngo, T. D. Dang, C. Byon, and S. W. Joo, "A numerical study on the dynamics of droplet formation in a microfluidic double T-junction", *Biomicrofluidics*, vol. 9, no. 2, pp. 024107, 2015.
- [12] D. J. E. Harvie, J. J. Cooper-White, and M. R. Davidson, "Deformation of a viscoelastic droplet passing through a microfluidic contraction", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 155, no. 1, pp. 67–79, 2008.
- [13] C. Galusinski and P. Vignaux, "On stability condition for bifluid flows with surface tension: Application to microfluidics", *Journal of Computational Physics*, vol. 227, no.12, pp. 6140–6164, 2008.
- [14] Z. Zhang, J. Xu, B. Hong, and X. Chen, "The effects of 3D channel geometry on CTC passing pressure—towards deformability-based cancer cell separation", *Lab on a Chip*, vol. 14, no.14, pp. 2576–2584, 2014.
- [15] H. Liu and Y. Zhang, "Modelling thermocapillary migration of a microfluidic droplet on a solid surface", *Journal of Computational Physics*, vol. 280, pp. 37–53, 2015.
- [16] V. T. Hoang, J. Lim, C. Byon, and J. M. Park, "Three-dimensional simulation of droplet dynamics in planar contraction microchannel", *Chemical Engineering Science*, vol. 176, pp. 59–65, 2018.
- [17] V. T. Hoang, V. D. Le, J. M. Park, L. B. T. Truong, "Effect of entry geometry on droplet dynamics in contraction microchannel", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 167, 104543, 2023.
- [18] Y. Ling, J. M. Fullana, S. Popinet, and C. Josserand, "Droplet migration in a Hele-Shaw cell: Effect of the lubrication film on the droplet dynamics", *Physics of Fluids*, vol. 28, 062001, 2016.
- [19] V. D. Le, L. H. T. Do, V. T. Hoang, and Q. B. Tao, "study on effects of entry geometry and fluid parameters on droplet dynamic in contraction microchannel", *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 6-10, 2023.
- [20] N. Ioannou, H. Liu, and Y. H. Zhang, "Droplet dynamics in confinement", *Journal of Computational Science*, vol. 17, pp. 463–474, 2016.
- [21] S. G. Marco Villone, "Three-dimensional shape of a drop under simple shear flow", *Journal of Rheology*, vol. 42, no. 2, pp. 395–415, 1998.
- [22] M. R. Kennedy, C. Pozrikidis, and R. Skalak, "Motion and deformation of liquid drops, and the rheology of dilute emulsions in simple shear flow", *Computers & Fluids*, vol. 23, no. 2, pp. 251–278, 1994.
- [23] V. T. Hoang, J. M. Park, "A Taylor analogy model for droplet dynamics in planar extensional flow", *Chemical Engineering Science*, vol. 204, pp. 27–34, 2019.