

NGHIÊN CỨU 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

STUDY ON EFFECTS OF ENTRY GEOMETRY AND FLUID PARAMETERS ON DROPLET DYNAMIC IN CONTRACTION MICROCHANNEL

Lê Văn Dương, Đỗ Lê Hưng Toàn*, Hoàng Văn Thạnh*, Tào Quang Bằng

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam¹

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

(Nhận bài / Received: 20/12/2022; Sửa bài / Revised: 18/3/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 20/3/2023)

Tóm tắt - Hệ vi kênh chất lỏng là một trong lĩnh vực mới của khoa học kỹ thuật, trong đó nghiên cứu về động lực học của vi chất lỏng đang được phát triển mạnh mẽ với những ứng dụng rộng rãi từ hàng không vũ trụ, ô tô và các thiết bị công nghiệp. Thiết kế hình học của hệ vi kênh chất lỏng đóng vai trò rất quan trọng, có ảnh hưởng lớn đến sự chuyển động và kiểm soát biến dạng của vi chất lỏng. Nghiên cứu này nhằm mục đích xem xét động lực học của vi chất lỏng trong dòng chảy tầng bằng kỹ thuật mô phỏng 3 chiều trong 2 hệ vi kênh thu nhỏ có thiết kế góc đầu vào khác nhau, góc 90° và 15°. Bên cạnh đó, sự ảnh hưởng của thông số đặc trưng cho động lực học Ca đến sự biến dạng của vi chất lỏng trong hệ vi kênh cũng được tác giả thực hiện. Kết quả cho thấy, góc đầu vào của hệ vi kênh và hệ số Ca có ảnh hưởng rất lớn đến đặc tính động lực học và biến dạng của vi chất lỏng.

Từ khóa - Vi chất lỏng; động lực học vi chất lỏng; hệ kênh thu nhỏ; mô phỏng số; hệ số mao dẫn

1. Đặt vấn đề

Hệ vi kênh chất lỏng là một thành phần quan trọng trong việc nghiên cứu phòng thí nghiệm trên chip (Lab-on-a-chip) và hệ phân tích vi mô (microTAS), chúng được ứng dụng phổ biến trong các lĩnh vực y sinh, y dược, môi trường và được phát triển mạnh mẽ trong những thập kỷ gần đây [1]. Hệ thống vi chất lỏng có nhiều đặc điểm nổi bật như lượng tiêu thụ mẫu và thuốc thử thấp, phân tích nhanh, khả năng thao tác với các hạt, tế bào nhỏ với chi phí sản xuất thấp. Trong những năm gần đây, công nghệ vi kênh chất lỏng dựa trên giọt nhỏ đã có sự phát triển nhanh chóng trong phân tích hóa học và sinh học [2]. Nhiều nghiên cứu chi tiết về động lực học giọt nhỏ trong hệ vi kênh chất lỏng đã được các nhà nghiên cứu thực hiện trong thời gian qua. Trong những hệ thống này, hai hoặc nhiều chất lỏng không hòa tan vào nhau được đưa vào hệ kênh để tạo ra các giọt nhỏ, sau đó có thể kiểm soát điều chỉnh và thao tác với các hóa chất và thuốc thử chính xác hơn thông qua các công cụ số hóa [3, 4]. Một số tác giả đã thực hiện nghiên cứu chủ đề này bằng cách ứng dụng mô hình kỹ thuật tương tự Taylor để đưa ra phương trình dự đoán và phân tích ảnh hưởng của các hệ số chuyển đổi đến biến dạng của vi chất lỏng trong dòng chảy giãn dài [5, 6].

Hệ vi kênh thu nhỏ được sử dụng phổ biến trong các thiết bị vi chất lỏng với các ứng dụng khác nhau. Điển hình là việc tạo ra các giọt nhỏ trong hệ kênh thu nhỏ đã

Abstract - The microchannels are one of the new fields of science and engineering, while the study of droplet dynamics is being strongly developed with a range of applications in aerospace, automotive and many industrial types of equipment. The geometric design of the microchannel system plays an extremely important role and has a great influence on the movement and deformation control of liquid droplets. The aim of this study is to examine the dynamics of droplet-based microfluidic systems in laminar flow by using 3D simulation techniques for two various entry angles of contraction microchannels, namely 90 degrees and 15 degrees. In addition, the influence of the dynamic's characteristic parameter (Ca) on the droplet's deformation in the contraction microchannel was also done by the authors. The results illustrate that, the entry angle and Ca coefficient have a great influence on the deformation of droplets in the contraction microchannel.

Key words - Droplet dynamics; droplet-based microfluidic; contraction microchannel; numerical simulation; capillary number

được nghiên cứu nhằm mục đích tạo ra giọt nhỏ dạng spha [7–9]. Về phát hiện quang học và phân tích DNA, Randall et al. [10] đã kéo dài phân tử DNA bên trong những giọt nhỏ sử dụng hệ vi kênh thu nhỏ dạng hyperbolic. Sử dụng hệ vi kênh thu nhỏ để đo các đặc tính lưu biến của vật liệu polymer cũng đã được thực hiện bởi Pipe và McKinley [11].

Đã có nhiều nghiên cứu về mô phỏng số và thực nghiệm được thực hiện để giúp hiểu rõ hơn về động lực học của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ. Đại đa số các nghiên cứu mô phỏng số trước đây được thực hiện trên mô hình kích thước hai chiều. Điển hình là Khayat et al. [12] đã sử dụng phương pháp phân tử biên để nghiên cứu tác động của hình học đầu vào lên sự biến dạng của vi chất lỏng. Sau đó, ông cũng đã sử dụng hệ vi kênh hyperbolic hội tụ và phân kỳ để khám phá ảnh hưởng về mặt mô phỏng số và vật lý đến sự biến dạng trượt và giãn dài của vi chất lỏng [13]. Sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn, Chung et al. [14–16] đã phát hiện ảnh hưởng của độ nhớt đến động lực học của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thẳng – thắt – kéo dài có tỉ lệ 5:1:5. Trong một nghiên cứu chuyên sâu hơn, sự ảnh hưởng của hệ số mao dẫn (Ca), hệ số Reynolds (Re), hệ số Weber (We) và tỉ lệ độ nhớt đến động lực học của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ trong không gian kích thước hai chiều đã được thực hiện [17]. Ảnh hưởng của các hệ số Ca, Re và tỉ lệ độ nhớt đến động lực học của giọt nhỏ trong hệ vi kênh thu nhỏ

¹ The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Le Van Duong, Do Le Hung Toan, Hoang Van Thanh, Tao Quang Bang)

không đối xứng cũng đã được thực hiện bởi Harvie et al. [18–20]. Các nghiên cứu thực hiện về phân tích động lực học vi chất lỏng trong không gian ba chiều của hệ vi kênh thu nhỏ còn hạn chế. Zhang et al. [21, 22] đã xây dựng tương trưng những nghiên cứu về kích thước 3 chiều để khám phá về biến dạng của vi chất lỏng dưới các độ thu nhỏ 3 chiều khác nhau. Hoang et al. sử dụng kỹ thuật mô phỏng và phân tích lý thuyết để nghiên cứu động lực học của vi chất lỏng bằng không gian 3 chiều trong dòng chảy tầng của kênh thu nhỏ [23].

Phần lớn các nghiên cứu về mô phỏng số đã được công bố trước đây đều bị hạn chế về hệ vi kênh thu nhỏ chảy tầng trong không gian hai chiều hoặc hệ vi kênh không đối xứng. Những kết quả này có sự khác biệt so với các kết quả thực nghiệm, đặc biệt đối với hệ kênh có tiết diện không phải là hình tròn. Điển hình như các mô hình hai chiều không thể dự đoán đầy đủ quá trình hình thành hoặc biến dạng, biên dạng cong của vi chất lỏng trong các hệ vi kênh không tròn [24–26]. Mô hình thực nghiệm và mô phỏng sự biến dạng của vi chất lỏng trong hệ kênh chữ T đã được thực hiện bởi Garstecki et al. [34]. Để phân tích kỹ hơn, động lực học của vi chất lỏng phải được xem xét trong không gian ba chiều, vì thực tế các hệ vi kênh chất lỏng có tiết diện là hình chữ nhật hoặc hình vuông. Theo sự tìm hiểu mới nhất của nhóm tác giả, chưa có một công trình nào được công bố về ảnh hưởng góc đầu vào khác nhau của một hệ kênh thu nhỏ để thao tác với các giọt nhỏ. Vì vậy, nghiên cứu này nhằm phân tích động lực học của vi chất lỏng trong hệ kênh vi thu nhỏ bằng mô phỏng số 3 chiều, kết quả có thể giúp định hướng về thiết kế vi kênh thu nhỏ có góc đầu vào khác nhau. Từ nghiên cứu này, người đọc cũng có được kiến thức cơ bản về động lực học của giọt nhỏ trong hệ vi kênh.

2. Mô hình nghiên cứu

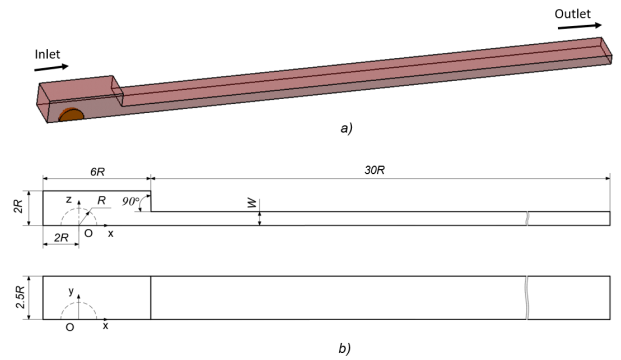
2.1. Mô hình của hệ vi kênh

2.1.1. Mô hình hình học của vi kênh góc 90°

Hình 1 mô tả hình dáng hình học của hệ vi kênh thu nhỏ, với góc đầu vào của vi kênh là 90° . Hình 1a thể hiện một phần tư hình dáng 3D của hệ vi kênh, hình 1b mô tả kích thước chi tiết của vi kênh. Một vi chất lỏng dạng hình cầu, bán kính R có màu cam được đặt ở góc tọa độ của kênh. Hệ vi kênh có chiều sâu kênh là $5R$, chiều cao của hệ kênh là $4R$, chiều dài của phía rộng hơn của kênh là $6R$. Kích thước này thỏa mãn làm giảm ảnh hưởng của giới hạn biên trên và dưới của kênh lên sự biến dạng của giọt nhỏ theo các nghiên cứu trước đây [27–29]. Phần thu nhỏ hơn của vi kênh có kích thước dài, rộng tương ứng là $30R$ và W .

Để ghi lại đầy đủ chuyển động của giọt nhỏ và loại bỏ toàn bộ ảnh hưởng của giới hạn đầu ra, chiều dài của đoạn thu nhỏ lại của hệ kênh là $30R$ đã được chọn càng dài càng tốt, tuy nhiên việc này ảnh hưởng đến thời gian và nguồn tài nguyên thực hiện tính toán [24]. Mức độ thu nhỏ lại của vi kênh được định nghĩa là $C = D/W$, với $D = 2R$ là đường kính của giọt vi chất lỏng, C một hệ số không đơn vị. Trong nghiên cứu này C được chọn là 1,25 [23], vì vậy chiều rộng của vi kênh luôn nhỏ hơn đường kính của giọt nhỏ. Để giảm bớt nguồn tài nguyên cần để sử dụng và thời gian tính toán

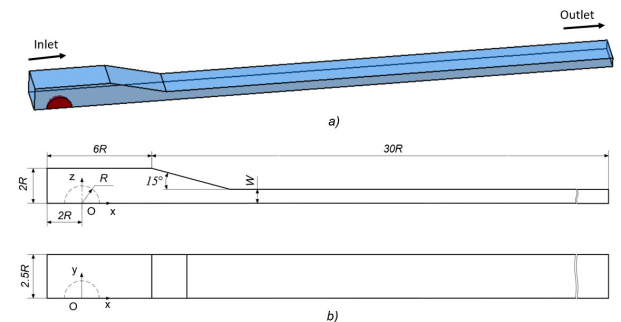
cho máy tính, sau khi cân nhắc tính đối xứng của mô hình tính toán, quá trình mô phỏng được tiến hành trên một phần tư của toàn bộ vi kênh.



Hình 1. Thiết kế hình học của vi kênh thu nhỏ có góc đầu vào là 90°

2.1.2. Mô hình hình học của vi kênh góc 15°

Tương tự, một mô hình kênh với góc đầu vào của hệ kênh là 15° được mô tả ở Hình 2. Với giọt nhỏ hình cầu có bán kính R , màu đỏ được đặt ở góc tọa độ của vi kênh. Một phần tư theo mặt đối xứng trong không gian 3D của vi kênh được thể hiện trên Hình 2a, Hình 2b thể hiện các kích thước còn lại của hệ kênh bằng so với vi kênh có góc đầu vào là 90° . Với sự thay đổi ở góc đầu vào của hệ kênh nhằm đánh giá ảnh hưởng của thiết kế này đến động lực học của vi chất lỏng trong vi kênh thu nhỏ.



Hình 2. Thiết kế hình học của vi kênh thu nhỏ có góc đầu vào là 15°

2.2. Thiết lập mô hình mô phỏng số

Các dòng chảy trong các thiết bị vi chất lỏng thường được đặc trưng bởi hệ số Reynolds thấp, cả giọt vi lỏng và dòng chảy nền đều được xem xét là chất lỏng Newton không nén được và hiệu ứng quán tính được bỏ qua trong quá trình mô phỏng. Một vùng thể tích của mô hình dòng chảy được sử dụng để đặc trưng cho sự tương tác bề mặt giữa giọt vi lỏng và dòng chảy nền, lực trên bề mặt liên tục giữa hai pha được dùng để mô tả lực căng bề mặt như một dạng nội lực của giọt vi lỏng [30]. Điều kiện biên của vi kênh được thiết lập bao gồm, tại đầu vào của vi kênh có giá trị vận tốc của giọt vi lỏng không đổi và tại đầu ra của vi kênh, áp suất bằng 0. Các tường bao của vi kênh theo điều kiện không có sự trượt, góc tương tác giữa giọt vi lỏng và tường của kênh là 180° . Thiết lập giọt vi lỏng minh họa thuộc dạng vật liệu dầu, còn dòng chảy nền là nước, với tỉ số độ nhớt của giọt vi lỏng so với dòng chảy nền là không đổi và bằng 0,15, đây là giá trị đặc trưng cho giọt vi lỏng trong hệ vi kênh. Quá trình mô

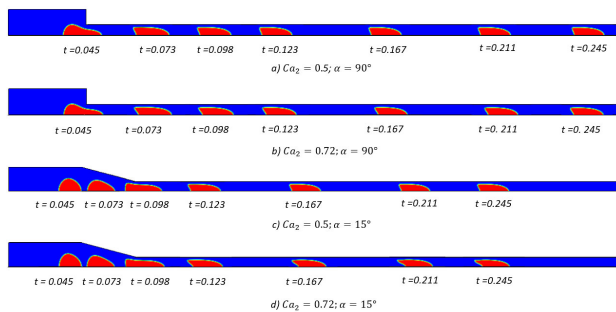
phòng được thực hiện trên phần mềm ANSYS Fluent. Kỹ thuật thực hiện quá trình mô phỏng trong nghiên cứu này bao gồm sử dụng sơ đồ PISO cho sự hợp lại của áp suất – vận tốc, thiết lập chiến lược PRESTO! cho phép kết quả bài toán từ nội suy áp suất, sơ đồ hướng dòng chảy bậc hai cho phương trình bảo toàn động lượng và lược đồ tái cấu trúc hình học để nội suy bề mặt tương tác giữa hai pha [31]. Phần tử lưới dạng khối hộp được sử dụng để rời rạc hóa mô hình tính toán số với kích thước lược là $W/30$, chất lượng lưới tương đương với các nghiên cứu hiện tại [31]. Hệ số Courant là 0,25, bước thời gian là giá trị thay đổi theo kết quả nội suy. Thiết lập mô hình của bài toán mô phỏng đã được kiểm nghiệm so với các nghiên cứu trước đây để đảm bảo tính hợp lý về điều kiện biên cũng như độ tin cậy của kết quả mô phỏng [2, 21, 22, 24, 32, 33].

Hệ số mao dẫn Ca đặc trưng cho động lực học của vi chất lỏng trong chế độ dòng chảy có hệ số Re thấp. Hệ số Ca được xác định bởi $Ca = \mu_m \cdot V / \sigma$; Với μ_m là độ nhớt của pha nền, V là vận tốc của dòng chảy, σ đặc trưng cho sức căng bề mặt giữa hai pha. Trong nghiên cứu này, hệ kênh có hai phần tiết diện khác nhau nên vận tốc dòng chảy trong kênh là không giống nhau, như vậy để đặc trưng cho dòng chảy trên từng đoạn tiết diện là khác nhau, ta có hệ số mao dẫn cho phần rộng của kênh là Ca_1 và vận tốc dòng chảy là V_1 , phía đầu kênh thu nhỏ tương ứng là Ca_2 và V_2 . Trong nghiên cứu này, bên cạnh sự thay đổi về góc đầu vào của 2 vi kênh khác nhau, động lực học của vi chất lỏng có hệ số Ca khác nhau cũng được nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu.

3. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

3.1. Động lực học của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ có góc đầu vào khác nhau

Hình 3 mô tả sự thay đổi hình dáng biến dạng của giọt vi lỏng khi chảy trong hệ kênh khác nhau. Hình 3a, với hệ số $Ca_2 = 0,5, \alpha = 90^\circ$; Hình 3b mô tả biến dạng của giọt nhỏ với $Ca_2 = 0,72, \alpha = 90^\circ$, tương ứng với Hình 3c, 3d khi $\alpha = 15^\circ$ và hệ số Ca_2 lần lượt là 0,5 và 0,72. Nhận thấy, với vi kênh góc đầu vào giống nhau thì hình dáng biến dạng và vị trí tương ứng của giọt nhỏ trong vi kênh gần giống nhau. Kích thước biến dạng của giọt nhỏ có sự khác nhau, điều này được nhóm tác giả trình bày rõ hơn ở Mục 3.2. Với hệ kênh có cùng hệ số Ca nhưng khác nhau về góc đầu vào, ta nhận thấy có sự khác biệt lớn về hình dáng biến dạng cũng như vị trí của giọt nhỏ trong kênh. Với kênh có góc đầu vào càng nhỏ tốc độ dịch chuyển của giọt nhỏ qua vị trí chuyển tiếp của hai tiết diện càng nhỏ dẫn đến sự chênh lệch vị trí này ở 2 loại vi kênh. Khi kênh có góc đầu vào nhỏ thì chiều dài kênh tại vị trí chuyển tiếp càng lớn, giọt nhỏ có xu hướng biến dạng chậm và tăng dần theo xu hướng thu nhỏ dần của vi kênh. Với kênh có góc đầu vào càng nhỏ thì giọt chất lỏng dễ dàng đi qua vị trí thu nhỏ và mức độ biến dạng ít hơn. Ngược lại, với vi kênh có góc đầu vào lớn hơn thì sự biến dạng của vi chất lỏng càng lớn và biến dạng mạnh khi qua vị trí thu nhỏ. Sau quá trình biến dạng tại vị trí thắt lại, vi chất lỏng có xu hướng co lại và đạt trạng thái ổn định.

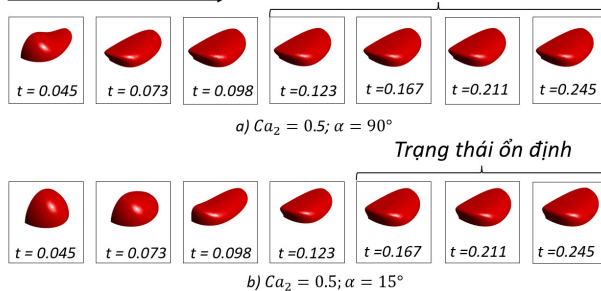


Hình 3. Động lực học của vi chất lỏng trong hệ kênh thu nhỏ có góc và hệ số Ca khác nhau

Hình 4 thể hiện quá trình biến dạng của vi chất lỏng trong không gian kích thước 3 chiều. Tại cùng thời điểm, trước khi qua vị trí thu nhỏ lại của kênh thì biến dạng của vi chất lỏng trong hai hệ loại vi kênh là khác nhau. Bằng kỹ thuật mô phỏng 3D chúng ta có thể quan sát được rõ hơn đặc tính biến dạng, hình dáng của vi chất lỏng và nhận thấy rằng biến dạng của vi chất lỏng theo mặt cắt dọc của hệ vi kênh là không giống nhau. Khi đạt đến trạng thái ổn định thì hình dáng của vi chất lỏng trong hai loại kênh là giống nhau.

Quá trình biến dạng

Trạng thái ổn định



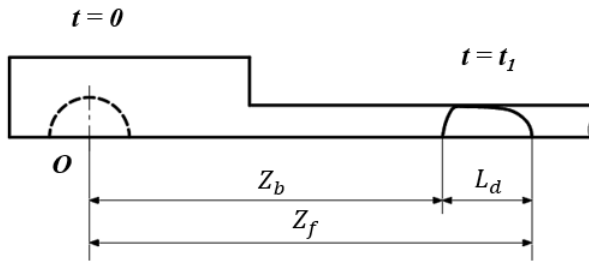
Hình 4. Hình ảnh 3D quá trình biến dạng của vi chất lỏng

3.2. Biến dạng của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ

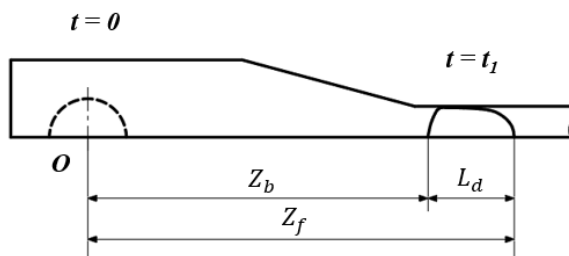
Sơ đồ đánh giá độ biến dạng chi tiết của vi chất lỏng theo dòng chảy trong hệ vi kênh thu nhỏ được thể hiện trên Hình 5 [23]. Trong đó, Hình 5a, b lần lượt biểu diễn cho hệ kênh có góc đầu vào là 90° và 15° theo thời gian. Để đánh giá độ biến dạng, một giá trị chuẩn để xác định chiều dài của vi chất lỏng được định nghĩa bằng L_d/D và vị trí của vi chất lỏng trong hệ kênh so với góc tọa độ ban đầu là Z_d/D , với $Z_d = (Z_b + Z_f)/2$, các tham số L_d, Z_b, Z_f được xác định theo sơ đồ Hình 5 [23].

Hình 6 thể hiện kết quả độ biến dạng của vi chất lỏng trong hệ kênh thu nhỏ. Trong nghiên cứu này, gồm 2 chế độ dòng chảy khác nhau được trình bày trên mỗi hệ vi kênh. Đặc tính đường biến dạng cho thấy, có sự tương đồng so với các nghiên cứu trước đây [23]. Nhận thấy rằng, đối với chế độ dòng chảy có hệ số Ca cao hơn ($Ca_2 = 0,72$), thì độ biến dạng của vi chất lỏng lớn hơn trong cả hai loại kênh, biến dạng cao nhất tại vị trí thắt lại của kênh lần lượt là 1,71 và 1,58 tại các vị trí của vi chất lỏng là 2,75 và 4,99 đối với kênh có góc đầu vào là 90° và 15° . Với chế độ dòng chảy có hệ số Ca thấp hơn ($Ca_2 = 0,5$), giá trị biến dạng là 1,67 và 1,48 tại các vị trí

tương ứng như trên của 2 loại kênh. Kênh có góc đầu vào lớn hơn thì biến dạng lớn hơn và xảy ra sớm hơn, đặc tính của quá trình biến dạng tăng mạnh hơn so với hệ kênh có góc đầu vào nhỏ hơn. Sau quá trình biến dạng tại vị trí thất lại, độ biến dạng của vi chất lỏng giảm dần và đạt đến trạng thái ổn định.

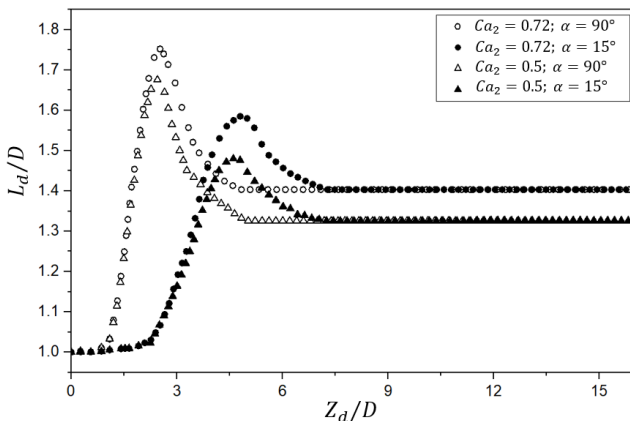


a) Hệ kênh có góc đầu vào $\alpha = 90^\circ$



b) Hệ kênh có góc đầu vào $\alpha = 15^\circ$

Hình 5. Sơ đồ kích thước đánh giá độ biến dạng của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ



Hình 6. Độ biến dạng của vi chất lỏng trong hệ vi kênh thu nhỏ

4. Kết luận

Bài báo này trình bày sự ảnh hưởng của góc đầu vào trong thiết kế hình học và hệ số đặc trưng cho động lực học của vi chất lỏng Ca đến sự biến dạng của vi chất lỏng trong hệ kênh micro. Kết quả cho thấy, góc đầu vào của vi kênh và hệ số Ca có ảnh hưởng rất lớn đến biến dạng của vi chất lỏng. Đối với các vi kênh có góc đầu vào càng lớn thì độ biến dạng của vi chất lỏng càng cao và quá trình biến dạng xảy ra nhanh hơn và đạt trạng thái ổn định sớm hơn. Bên cạnh đó, sự biến dạng của vi chất lỏng phụ thuộc lớn vào hệ số Ca, Ca càng lớn thì biến dạng càng cao. Đối với các hệ kênh thu nhỏ có góc đầu vào khác nhau nhưng chế độ dòng chảy giống nhau thì sau quá trình biến dạng

tại vị trí thu nhỏ, vi chất lỏng đạt đến trạng thái ổn định là giống nhau.

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.

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] Y. Yan, D. Guo, J. Luo, and S. Wen, "Numerical simulation of droplet dynamic behaviors in a convergent microchannel", *BioChip Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 325–334, 2013.
- [3] C. N. Baroud, F. Gallaire, and R. Dangle, "Dynamics of microfluidic droplets", *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 16, pp. 2032–2045, 2010.
- [4] R. Seemann, M. Brinkmann, T. Pfohl, and S. Herminghaus, "Droplet based microfluidics", *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, no. 1, pp. 016601, 2011.
- [5] V. T. Hoang and J. M. Park, "A Taylor analogy model for droplet dynamics in planar extensional flow", *Chemical Engineering Science*, vol. 204, pp. 27–34, 2019.
- [6] H. V. Thanh, L. V. Duong, L. D. Binh, T. M. Sang, D. L. H. Toan, and T. Q. Bang, "The Effects of Convert Factors on the Droplet Deformation of Microchannel System". *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 1–4, 2022.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] T. Fu and Y. Ma, "Bubble formation and breakup dynamics in microfluidic devices: A review", *Chemical Engineering Science*, vol. 135, pp. 343–372, 2015.
- [10] 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.
- [11] C. J. Pipe and G. H. McKinley, "Microfluidic rheometry", *Mechanics Research Communications*, vol. 36, no. 1, pp. 110–120, 2009.
- [12] R. E. Khayat, A. Luciani, and L. A. Utracki, "Boundary-element analysis of planar drop deformation in confined flow. Part 1. Newtonian fluids", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 19, no. 4, pp. 279–289, 1997.
- [13] R. E. Khayat, A. Luciani, L. A. Utracki, F. Godbille, and J. Picot, "Influence of shear and elongation on drop deformation in convergent-divergent flows", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 26, no. 1, pp. 17–44, 2000.
- [14] C. Chung, M. A. Hulsen, J. M. Kim, K. H. Ahn, and S. J. Lee, "Numerical study on the effect of viscoelasticity on drop deformation in simple shear and 5:1:5 planar contraction/expansion microchannel", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 155, no. 1, pp. 80–93, 2008.
- [15] C. Chung, J. M. Kim, M. A. Hulsen, K. H. Ahn, and S. J. Lee, "Effect of viscoelasticity on drop dynamics in 5:1:5 contraction/expansion microchannel flow", *Chemical Engineering Science*, vol. 64, no. 22, pp. 4515–4524, 2009.
- [16] C.-K. Chung, J.-M. Kim, K.-H. Ahn, and S.-J. Lee, "Numerical study on the effect of viscoelasticity on pressure drop and film thickness for a droplet flow in a confined microchannel", *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 59–69, 2009.
- [17] 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.
- [18] 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, pp. C150–C166, 2004.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] C. Galusinski and P. Vigneaux, "On stability condition for bifluid flows with surface tension: Application to microfluidics", *Journal of Computational Physics*, vol. 227, no. 12, pp. 6140–6164, 2008.
- [27] N. Ioannou, H. Liu, and Y. H. Zhang, "Droplet dynamics in confinement", *Journal of Computational Science*, vol. 17, pp. 463–474, 2016.
- [28] S. G. M. Villone, "Three-dimensional shape of a drop under simple shear flow", *Journal of Rheology*, vol. 42, no. 2, pp. 395–415, 1998.
- [29] 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 and Fluids*, vol. 23, no. 2, pp. 251–278, 1994.
- [30] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension", *Journal of Computational Physics*, vol. 100, no. 2, pp. 335–354, 1992.
- [31] X.-B. Li, F.-C. Li, J.-C. Yang, H. Kinoshita, M. Oishi, and M. Oshima, "Study on the mechanism of droplet formation in T-junction microchannel", *Chemical Engineering Science*, vol. 69, no. 1, pp. 340–351, 2012.
- [32] J. S. T. N. Wong, N. T. Nguyen, and L. T. H. Kao, "An investigation on the mechanism of droplet formation in a microfluidic T-junction", *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2011.
- [33] M. Dang, J. Yue, and G. Chen, "Numerical simulation of Taylor bubble formation in a microchannel with a converging shape mixing junction", *Chemical Engineering Journal*, vol. 262, pp. 616–627, 2015.
- [34] P. Garstecki, M. J. Fuerstman, H. A. Stone, and G. M. Whitesides, "Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up", *Lab on a Chip*, vol. 6, no. 3, pp. 437–446, 2006.