

# ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC HỆ SỐ CHUYỂN ĐỔI ĐẾN BIẾN DẠNG CỦA VI CHẤT LỎNG TRONG HỆ KÊNH MICRO

## THE EFFECTS OF CONVERT FACTORS ON THE DROPLET DEFORMATION OF MICROCHANNEL SYSTEM

Hoàng Văn Thạnh<sup>1\*</sup>, Lê Văn Dương<sup>1</sup>, Lưu Đức Bình<sup>1</sup>, Trần Minh Sang<sup>1</sup>, Đỗ Lê Hưng Toàn<sup>1</sup>,  
Trương Lê Duy Bảo<sup>2</sup>, Tào Quang Bằng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup>Đại học Đà Nẵng

\*Tác giả liên hệ: hvthanh@dut.udn.vn; tqbang@dut.udn.vn

(Nhận bài: 17/02/2022; Chấp nhận đăng: 06/5/2022)

**Tóm tắt** - Động lực học của dòng hai pha chất lỏng được ứng dụng rất nhiều trong các lĩnh vực từ hàng không vũ trụ, ô tô đến các thiết bị công nghiệp. Dòng hai pha ở các hệ kênh micro được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu, phân tích sinh hoá hoặc tổng hợp vật liệu. Động lực học của vi chất lỏng ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng xử lý tương tác giữa hai pha. Kỹ thuật tương tự Taylor được phát triển để mô tả động lực học của vi chất lỏng trong những hệ vi kênh như vậy [1]. Nghiên cứu này nhằm mục đích đánh giá ảnh hưởng của các hệ số chuyển đổi trong kỹ thuật tương tự đến sự biến dạng của vi chất lỏng trong dòng hai pha micro. Kết quả cho thấy hệ số cản nhớt, hệ số sức căng bề mặt và hệ số tỉ lệ độ nhớt hai pha có ảnh hưởng rất lớn đến sự biến dạng của vi chất lỏng.

**Từ khóa** - Động lực học; dòng hai pha; vi chất lỏng; hệ vi kênh; dòng chảy tầng

### 1. Đặt vấn đề

Trong những năm qua, công nghệ vi chất lỏng (giọt nhỏ) là một trong những lĩnh vực đã, đang được nghiên cứu và phát triển mạnh. Công nghệ này dần dần từng bước trở thành mũi nhọn với các ứng dụng trong ngành công nghiệp in phun, pin nhiên liệu lỏng, nghiên cứu hóa sinh, phân tích DNA, tổng hợp vật liệu. Quan trọng hơn, vi chất lỏng được biết đến với ứng dụng rộng rãi như một thành phần chính trong lĩnh vực nghiên cứu phòng thí nghiệm trên chip (Lab-on-a-chip) và các hệ thống phân tích vi mô (micro TAS) trong lĩnh vực y sinh, dược phẩm và môi trường [2].

Hệ thống vi chất lỏng có nhiều ưu điểm như tiêu thụ dung tích mẫu thử nhỏ, khả năng phân tích nhanh, khả năng điều khiển các hạt nhỏ, giọt nhỏ và các tế bào với chi phí chế tạo kênh dẫn thấp [3, 4]. Trong một số ứng dụng, dung tích mẫu thử có thể giảm xuống dưới mức nanolit hoặc nhỏ hơn, thời gian phản ứng rất nhanh chỉ còn vài giây. Với những ưu điểm như vậy nên hệ thống vi chất lỏng đã nhanh chóng được phát triển để ứng dụng trong phân tích hóa học và sinh học. Trong các hệ thống này hai hoặc nhiều chất lỏng không thể trộn lẫn được đưa vào hệ vi kênh nhằm tạo ra các giọt nhỏ cũng như kiểm soát và xử lý các mẫu thử chính xác hơn dưới sự hỗ trợ thêm công nghệ vi cơ điện tử [5, 6].

Để hiểu chi tiết hơn về động lực học của vi chất lỏng trong dòng chảy tầng, có nhiều nghiên cứu thực nghiệm, lý

**Abstract** - The dynamics of two-phase fluids are applied in fields from aerospace, automobile to industrial equipment. The two-phase microfluidic systems are widely used in the research, biochemical analysis or materials synthesis. The dynamics of droplets greatly affected the quality of the interactive manipulation between two fluidic phases. A Taylor's analogy model has been developed to describe the droplet dynamics in microchannel [1]. The aim of this study is to describe the effects of conversion factors in the analogy model on the droplet deformation of the two-phase microfluidic. The result has shown that the viscous drag coefficient, the surface tension coefficient and the two-phase viscosity one have a great impact on the droplet deformation.

**Key words** - Dynamics; two-phase flow; droplet; microchannel; laminar flow

thuyết và mô phỏng số học đã được thực hiện bởi các nhà nghiên cứu trên thế giới. Công trình đầu, tiên phong về sự biến dạng và phá vỡ của vi chất lỏng được đưa ra bởi Taylor [7], ông đã tạo ra dòng chảy cắt đơn giản và dòng chảy giãn dài bằng cách sử dụng thiết bị với bốn con lăn được điều khiển quay độc lập. Về sau, đã có nhiều công trình thí nghiệm tương tự được thực hiện để hiểu thêm chi tiết hơn về động lực học của vi chất lỏng với một loạt các điều kiện dòng chảy khác nhau [8, 9]. Nghiên cứu bằng thực nghiệm hình dạng ba chiều của vi chất lỏng ở trạng thái cân bằng và trạng thái phụ thuộc vào thời gian trong hệ chảy tầng cũng đã được thực hiện [10].

Ngày nay, dưới sự phát triển của công nghệ tính toán số, động lực học vi chất lỏng đã được hiểu rõ hơn trong việc thiết kế các hệ kênh vi lưu. Cụ thể là hầu hết các nghiên cứu tập trung vào mô phỏng số sự biến dạng và phá vỡ của một vi chất lỏng phi Newton di chuyển trong môi trường chất lỏng Newton dưới sự xem xét của đặc tính vi chất lỏng cũng như sự đa dạng điều kiện dòng chảy [11].

Về mô hình lý thuyết, có một hướng tiếp cận để mô tả động lực học của vi chất lỏng bằng cách xem xét kỹ thuật tương tự giữa động lực học của vi chất lỏng và hệ khối lượng lò xo giảm chấn. Phương pháp này đã được sử dụng thành công để dự đoán sự phân rã của các vi chất lỏng trong hệ thống phun ở dòng chảy có hệ số Reynolds (Re) rất cao,

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology (Hoang Van Thanh, Le Van Duong, Luu Duc Binh, Tran Minh Sang, Do Le Hung Toan, Tào Quang Bằng)

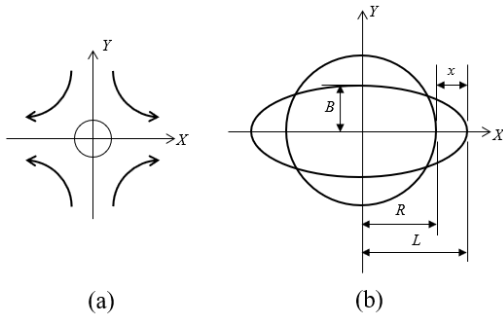
<sup>2</sup> The University of Danang (Trương Lê Duy Bảo)

mô hình này được biết đến với tên gọi là TAB (Taylor Analogy Breakup) [12, 18]. Mô hình TAB có nhiều ưu điểm hơn về tính đơn giản và độ chính xác nên đã được sử dụng trong nhiều ứng dụng [13–16].

Trên cơ sở của mô hình TAB, động lực học của vi chất lỏng trong dòng chảy tầng với hệ số Re rất nhỏ được nghiên cứu bởi nhóm tác giả gần đây [1]. Trong mô hình này, lực cản nhớt được xem như một dạng ngoại lực của hệ. Với mục đích hiểu rõ hơn về kỹ thuật tương tự, nghiên cứu này trình bày sự ảnh hưởng của các hệ số chuyển đổi đến sự biến dạng của vi chất lỏng trong dòng hai pha micro. Ba hệ số cần quan tâm là bao gồm hệ số cản nhớt, hệ số sức căng bề mặt và hệ số tỷ lệ độ nhớt giữa hai pha.

## 2. Nội dung nghiên cứu và khảo sát

### 2.1. Mô hình nghiên cứu



**Hình 1.** a) Sơ đồ mô tả của vi chất lỏng trong dòng chảy tầng  
b) Biến dạng của vi chất lỏng

Dòng hai pha được mô tả bằng một giọt nhỏ chất lỏng có bán kính \$R\$ nằm trong dòng chảy giãn dài như được trình bày ở Hình 1 (a). Hình 1 (b) mô tả sự biến dạng của vi chất lỏng trong dòng với sự dịch chuyển biên vi chất lỏng với các giá trị kích thước \$x\$ và \$B\$ theo hai phương \$X\$ và \$Y\$ tương ứng. Dòng chảy giãn dài có vận tốc được xác định bởi phương trình (1), trong đó tỉ lệ giãn dài được xác định thông qua \$\epsilon\$.

$$v_X = \epsilon X, v_Y = \epsilon Y, v_Z = 0 \quad (1)$$

Với \$x\$ là độ dịch chuyển theo phương ngang được xác định bởi \$L - R\$. Xem xét sự biến dạng của giọt nhỏ bé tương đương với hình dạng của hình elip, thì độ biến dạng \$D\$ đó được xác định như sau [9, 17]:

$$D = \frac{L - B}{L + B} \quad (2)$$

Một số đặc tính về chất lỏng và các hệ số để đánh giá điều kiện dòng chảy như sau: Độ nhớt của vi chất lỏng và pha nền dòng chảy trong hệ micro lần lượt là \$\mu\_d, \mu\_m\$; Khối lượng riêng tương ứng là \$\rho\_d, \rho\_m\$. Hệ số sức căng bề mặt giữa hai pha là \$\sigma\$. Hệ số không thứ nguyên đặc trưng cho động lực học của vi chất lỏng đó là hệ số mao dẫn \$Ca = \mu\_m \epsilon R / \sigma\$ và hệ số Reynolds \$Re = \rho\_m \epsilon R^2 / \mu\_m\$. Ngoài ra, hệ số tỉ lệ độ nhớt giữa hai pha được xác định bởi \$\lambda = \mu\_d / \mu\_m\$ và tỷ số khối lượng riêng \$\kappa = \rho\_d / \rho\_m\$ [9].

### 2.2. Mô hình tương tự Taylor

Mô hình kỹ thuật tương tự Taylor được đề xuất lần đầu tiên để nghiên cứu sự biến dạng của giọt nhỏ bên trong dòng khí tốc độ cao [12, 18]. Theo đó, động lực học của hệ khối lượng lò xo giảm chấn được xem xét như một vi chất

lỏng, trong đó lực lò xo đại diện cho lực căng bề mặt và lực cản được xem như là một ngoại lực tác dụng. Ngoài ra, một thành phần giảm chấn dùng để mô tả đặc tính nhớt của vi chất lỏng hai pha. Hệ khối lượng lò xo giảm chấn này được sử dụng để dự đoán sự phá vỡ của vi chất lỏng trong một bình xịt, được gọi là mô hình phá vỡ tương tự TAB [12].

Trong nghiên cứu này, tác giả đã sử dụng mô hình ứng dụng kỹ thuật tương tự Taylor để mô tả sự biến dạng của giọt nhỏ trong dòng chảy tầng có hệ số Reynolds thấp, đặc biệt lực cản nhớt được xem như một ngoại lực tác dụng và các hệ số kỹ thuật chuyển đổi được xem xét để đánh giá động lực học của vi chất lỏng trong điều kiện dòng chảy tầng [1].

Phương trình của hệ thống giảm chấn lò xo khối lượng được mô tả như sau:

$$m\ddot{x} = F - kx - d\dot{x} \quad (3)$$

Trong đó, \$x\$ là chuyển vị biến dạng của lò xo tương ứng với sự biến dạng của vi chất lỏng thể hiện trong Hình 1 (b), \$F\$ là ngoại lực tác dụng tương ứng với lực cản nhớt, \$k\$ là hệ số lò xo tương ứng với sức căng bề mặt, và \$d\$ là hệ số giảm chấn tương ứng với độ nhớt của hai pha chất lỏng. Để sử dụng kỹ thuật tương tự cho dòng chảy tầng, các thành phần trong phương trình (3) được chuyển đổi theo các phương trình (4), (5), và (6), và phương trình (3) được viết lại như phương trình (7), với \$y = x/R\$.

$$\frac{F}{m} = 1.5 \frac{3\lambda + 2}{\lambda + 1} (1 + C_1 \nu) \frac{\mu_m \nu}{\rho_d R^2} \quad (4)$$

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_d R^3} \quad (5)$$

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_d^0 \mu_m^{1-Q}}{\rho_d R^2} \quad (6)$$

Trong đó, \$C\_1, C\_k, C\_d\$ là các hệ số không đơn vị, \$\nu\$ là vận tốc tương đối giữa dòng chảy nền và vi chất lỏng. Với điều kiện vị trí ban đầu \$y\_0\$ và vận tốc ban đầu \$\dot{y}\_0\$ bằng 0, phương trình (7) được viết lại như phương trình (8) [1]:

$$\ddot{y} = 1.5 \frac{3\lambda + 2}{\lambda + 1} (1 + C_1 \nu) \frac{\mu_m \nu}{\rho_d R^3} - C_k \frac{\sigma}{\rho_d R^3} y - C_d \frac{\mu_d^0 \mu_m^{1-Q}}{\rho_d R^2} \dot{y} \quad (7)$$

$$y(t) = y_s + \frac{y_s}{r_2 - r_1} (r_1 e^{r_2 t} - r_2 e^{r_1 t}) \quad (8)$$

Trong đó \$r\_1, r\_2\$ là các giá trị được xác định theo phép tương tự Taylor, và \$y\_s, C\_a\$ được xác định như sau [1]:

$$y_s = \frac{1}{\frac{C_k}{1.5 \frac{3\lambda + 2}{\lambda + 1} C_a} - C_1}; C_a = \mu_m \nu / \sigma$$

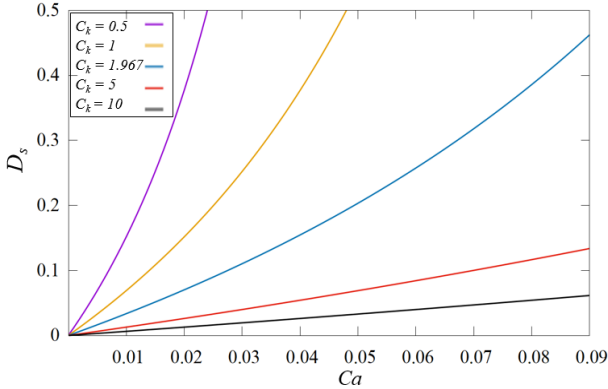
Mô hình lý thuyết (8) đã được kiểm chứng sự chính xác về biến dạng của giọt nhỏ ở trạng thái cân bằng và trạng thái phụ thuộc vào thời gian [1]. Trong nghiên cứu này, sự ảnh hưởng của các hệ số vật lý \$C\_k, C\_1, C\_d\$ đặc trưng lần lượt cho sức căng bề mặt, hệ số cản nhớt và hệ số độ nhớt giữa 2 pha sẽ được xem xét theo thời gian cho đến khi đạt đến trạng thái ổn định của vi chất lỏng.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Sự ảnh hưởng của hệ số sức căng bề mặt (\$C\_k\$) đến sự biến dạng của vi chất lỏng

Ảnh hưởng của hệ số vật lý \$C\_k\$ đặc trưng cho sức căng

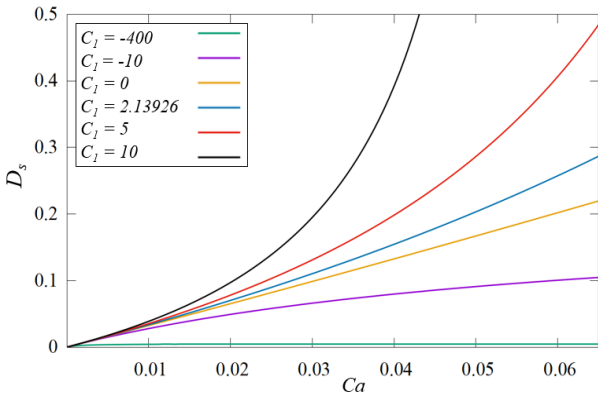
bề mặt của chất lỏng đến sự biến dạng của giọt nhỏ trong hệ hai pha ở trạng thái ổn định được thể hiện qua Hình 2. Với tỉ lệ độ nhớt giữa hai pha  $\lambda = 0,12$  và hệ số  $C_1 = 2,14$  được xác định theo giá trị đã thực nghiệm và theo mô hình đề xuất [1, 9]. Kết quả cho thấy, biến dạng của vi chất lỏng ở trạng thái ổn định tăng mạnh khi  $C_k$  giảm. Điều này có nghĩa là với vi chất lỏng có sức căng bề mặt nhỏ thì sự biến dạng càng lớn xảy ra ở hệ số mao dẫn  $Ca$  càng nhỏ.



Hình 2. Ảnh hưởng của hệ số  $C_k$  đến sự biến dạng của vi chất lỏng

**3.2. Sự ảnh hưởng của hệ số cân nhớt ( $C_1$ ) đến sự biến dạng của vi chất lỏng**

Đồ thị Hình 3 thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số  $C_1$  đến sự biến dạng của vi chất lỏng ở trạng thái ổn định. Ngược lại với hệ số  $C_k$ , với giá trị hệ số  $C_1$  càng lớn thì độ biến dạng càng lớn. Vi chất lỏng càng dễ bị phá vỡ tương ứng với hệ số mao dẫn  $Ca$  tới hạn càng nhỏ khi tăng  $C_1$ . Sự biến dạng càng tăng mạnh khi  $C_1$  càng lớn cũng như sự biến dạng giảm mạnh gần đạt trạng thái bảo hoà khi  $C_1$  rất nhỏ. Lúc này hệ số mao dẫn  $Ca$  tới hạn càng lớn và vi chất lỏng có xu hướng kéo dài thành sợi liên tục, khó bị phá vỡ.

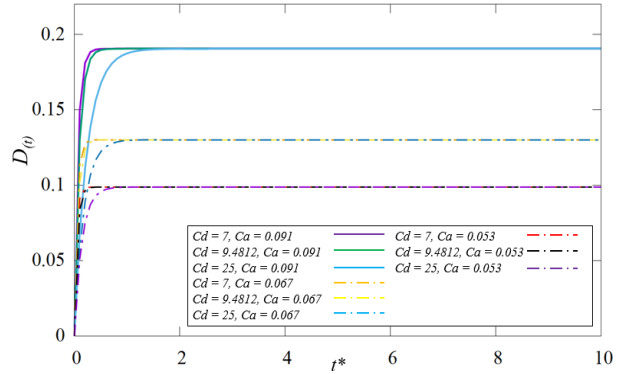


Hình 3. Ảnh hưởng của hệ số  $C_1$  đến sự biến dạng của vi chất lỏng

**3.3. Sự ảnh hưởng của hệ số tỉ lệ độ nhớt ( $Ca$ ) đến sự biến dạng của vi chất lỏng**

Hình 4 là kết quả mô tả sự biến dạng của vi chất lỏng ở trạng thái theo thời gian khi thay đổi giá trị  $Ca$  và hệ số mao dẫn  $Ca$ , ở đây giá trị thời gian được thể hiện dưới dạng không đơn vị và được xác định theo công thức  $t^* = t \cdot \epsilon$ , giá trị  $Q$  được lấy theo mô hình đề xuất [1]. Có thể nhận thấy rằng, với cùng một giá trị  $Ca$ , sự biến dạng ở trạng thái ổn định là như nhau, tuy nhiên khoảng thời gian sự biến dạng đạt trạng thái cân bằng có sự khác biệt lớn đối

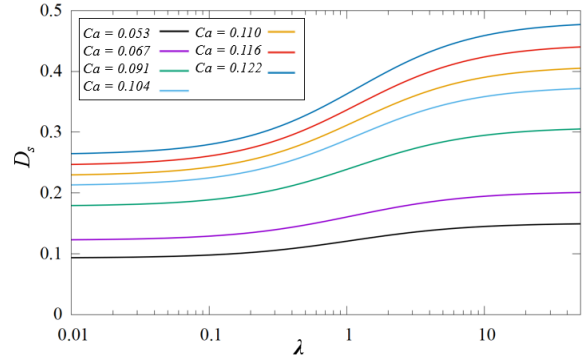
với các giá trị khác nhau của  $Ca$ . Cụ thể, đối với dòng hai pha micro có hệ số tỉ lệ độ nhớt  $Ca$  càng lớn thì khoảng thời gian cần để vi chất lỏng biến dạng đạt đến trạng thái ổn định càng lớn. Nhìn chung, khoảng thời gian vi chất lỏng biến dạng đạt giá trị ổn định phụ thuộc chủ yếu vào hệ số  $Ca$  mà ít phụ thuộc vào giá trị của hệ số  $Ca$ .



Hình 4. Ảnh hưởng của hệ số  $Ca$  đến sự biến dạng của giọt nhỏ

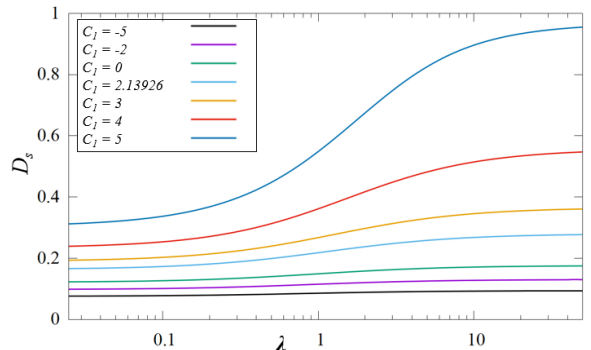
**3.4. Biến dạng của vi chất lỏng ở trạng thái ổn định**

Hình 5 mô tả sự biến dạng của vi chất lỏng ở trạng thái ổn định phụ thuộc vào  $\lambda$  và  $Ca$ . Có thể thấy, sự biến dạng thay đổi mạnh khi  $\lambda$  thay đổi xung quanh giá trị bằng 1 (0,15-6,5). Với các dòng hai pha có hệ số  $Ca$  lớn, tỉ lệ độ nhớt càng cao thì độ biến dạng càng lớn, vi chất lỏng càng dễ bị vỡ.



Hình 5. Sự biến dạng của giọt nhỏ ở trạng thái ổn định theo tỉ số độ nhớt và hệ số  $Ca$

Hình 6 trình bày ảnh hưởng của hệ số  $C_1$  đến sự biến dạng ở trạng thái ổn định khi  $\lambda$  thay đổi và  $Ca = 0,085$ . Nhìn chung, với giá trị  $C_1$  nhỏ thì sự tăng  $\lambda$  làm cho sự biến dạng tăng nhẹ, tuy nhiên khi  $C_1$  lớn thì sự biến dạng tăng rất mạnh khi  $\lambda$  lớn hơn rất nhiều so với 1.



Hình 6. Sự biến dạng của giọt nhỏ ở trạng thái ổn định theo tỉ số độ nhớt và hệ số  $C_1$

#### 4. Kết luận

Bài báo này trình bày về sự ảnh hưởng của các hệ số chuyển đổi vật lý theo mô hình đề xuất dự đoán bằng ứng dụng kỹ thuật tương tự Taylor cho sự biến dạng của vi chất lỏng trong dòng 2 pha micro. Kết quả cho thấy, hệ số cản nhớt, hệ số sức căng bề mặt và hệ số tỉ lệ độ nhớt hai pha có ảnh hưởng rất lớn đến sự biến dạng của vi chất lỏng. Với vi chất lỏng có hệ số sức căng bề mặt càng nhỏ thì biến dạng của vi chất lỏng đó càng lớn, trong khi đó sự biến dạng tỉ lệ thuận với hệ số cản nhớt. Với dòng 2 pha có hệ số tỷ lệ độ nhớt càng cao thì khoảng thời gian vi chất lỏng biến dạng trước khi đạt trạng thái ổn định càng lớn.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số T2022-02-02.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] 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, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.04.015.
- [2] J. S. Castillo-León, *Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems*. Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-08687-3.
- [3] J. M. Park and P. D. Anderson, "A ternary model for double-emulsion formation in a capillary microfluidic device", *Lab on a Chip*, vol. 12, no. 15, pp. 2672–2677, Aug. 2012, doi: 10.1039/c2lc21235h.
- [4] A. T. Brimmo and M. A. Qasaimeh, "Stagnation point flows in analytical chemistry and life sciences", *RSC Advances*, vol. 7, no. 81. Royal Society of Chemistry, pp. 51206–51232, 2017. doi: 10.1039/c7ra11155j.
- [5] C. N. Baroud, F. Gallaire, and R. Dangla, "Dynamics of microfluidic droplets", *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 16. Royal Society of Chemistry, pp. 2032–2045, Aug. 21, 2010. doi: 10.1039/c001191f.
- [6] R. Seemann, M. Brinkmann, T. Pfohl, and S. Herminghaus, "Droplet based microfluidics", *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, no. 1, Jan. 2012, doi: 10.1088/0034-4885/75/1/016601.
- [7] G. I. Taylor, "The Formation of Emulsions in Definable Fields of Flow", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol 146, Issue 858*, pp. 501-523, 1934, doi: 10.1098/rspa.1934.0169.
- [8] V. Hanswalter Giesekus, "Strömungen mit konstantem Geschwindigkeitsgradienten und die Bewegung von darin suspendierten Teilchen", *Rheologica Acta*, Band 2, Heft 2, pp 112-122, 1962.
- [9] B. J. Bentley and L. G. Leal, "An experimental investigation of drop deformation and breakup in steady, two-dimensional linear flows", *Journal of Fluid Mechanics*, 167, 241-283, 1986, doi:10.1017/S0022112086002811.
- [10] Y. T. Hu and A. Lips, "Transient and steady state three-dimensional drop shapes and dimensions under planar extensional flow", *Journal of Rheology*, vol. 47, no. 2, pp. 349–369, Mar. 2003, doi: 10.1122/1.1545078.
- [11] S. Ramaswamy and L. G. Leal, "The deformation of a viscoelastic drop subjected to steady uniaxial extensional flow of a Newtonian fluid." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 85, no. 2, pp. 127-163, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(98\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(98)00212-2).
- [12] P. J. O'rourke and A. A. Amsden, "The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup", *SAE Technical Paper. SAE International*, pp. 872089, 1987.
- [13] S. Basu and B. M. Cetegen, "Modeling of liquid ceramic precursor droplets in a high velocity oxy-fuel flame jet", *Acta Materialia*, vol. 56, no. 12, pp. 2750–2759, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.actamat.2008.02.007.
- [14] F. dos Santos and L. le Moyne, "Spray atomization models in engine applications, from correlations to direct numerical simulations", *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 801–822, Sep. 2011, doi: 10.2516/ogst/2011116.
- [15] M. R. Turner, S. S. Sazhin, J. J. Healey, C. Crua, and S. B. Martynov, "A breakup model for transient Diesel fuel sprays", *Fuel*, vol. 97, pp. 288–305, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2012.01.076.
- [16] K. Nishad, F. Ries, J. Janicka, and A. Sadiki, "Analysis of spray dynamics of urea–water–solution jets in a SCR-DeNOx system: An LES based study", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 70, pp. 247–258, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.02.017.
- [17] P. L. Maffettone and M. Minale, "Equation of change for ellipsoidal drops in viscous flow", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 78. Issues 2-3, pp. 227-241, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(98\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(98)00065-2).
- [18] Taylor, G.I., "The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream", *Batchelor, G.K. (Ed.), Scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, University Press, Cambridge III*, pp. 457–464, 1963.