

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**



**Nguyễn Đình Hòa**

**NGHIÊN CỨU TƯƠNG TÁC CỦA HẠT CHẤT LỎNG VỚI  
BỀ MẶT RẮN DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA MAO DẪN NHIỆT**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ  
CƠ HỌC CHẤT LỎNG VÀ CHẤT KHÍ**

**Mã số: 9 44 01 08**

***Hà Nội- 2024***

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

Người hướng dẫn 1: GS. TS Vũ Văn Trường

Người hướng dẫn 2: TS. Nguyễn Hồng Phan

Phản biện 1: PGS.TS Hà Ngọc Hiến

Phản biện 2: PGS.TS Trần Ngọc Đoàn

Phản biện 3: PGS.TS Hoàng Thị Kim Dung

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 09 giờ, ngày 14 tháng 5 năm 2024

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của luận án

Mạch vi lỏng là một mô hình trong đó tích hợp toàn bộ qui trình, xét nghiệm, kiểm tra trong các ngành công nghệ hóa học, y học, và điều chế thuốc. Tầm mạch được ra đời từ những năm 70 của thế kỷ trước. Nguyên lý hoạt động của mạch dựa trên ứng dụng các nghiên cứu tính chất dòng chảy trong thiết bị vi lỏng (thiết bị xử lý một lượng nhỏ chất lỏng). Chất lỏng di chuyển trong các kênh có kích thước nhỏ cỡ từ vài trăm micromét đến một vài milimét. Động lực cho chất lỏng di chuyển trong kênh có thể là lực điện trường, lực từ trường, lực mao dẫn nhiệt, .v.v. Việc nghiên cứu chuyển động của hạt chất lỏng trên bề mặt rắn của kênh vi lỏng trong mạch vi lỏng đóng vai trò quyết định trong việc tạo ra các mạch vi lỏng phức tạp, tổng hợp và hiệu năng cao. Vì vậy, NCS lựa chọn đề tài luận án: *“Nghiên cứu tương tác của hạt chất lỏng với bề mặt rắn dưới sự tác động của mao dẫn nhiệt”*. Nội dung cốt yếu trong luận án là nghiên cứu chuyển động của hạt chất lỏng trên bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt.

Nghiên cứu tương tác của hạt chất lỏng và bề mặt rắn (như bề mặt của thiết bị vi lỏng) dưới tác động của lực mao dẫn nhiệt đã được thực hiện nhiều. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ tập trung vào hạt chất lỏng đơn lớp. Trong nhiều ứng dụng thực tế (như ngành y học, công nghệ thực phẩm, hoặc ngành vật liệu ...), hạt chất lỏng đa lớp được sử dụng thay vì hạt chất lỏng đơn lớp. Vì vậy, luận án tập trung vào hạt chất lỏng đa lớp. Tương tác của hạt chất lỏng với bề mặt rắn được chia thành hai loại: tương tác dạng cản trở (tức là, hạt chất lỏng di chuyển bên trong và tương tác với biên dạng của kênh dẫn thất lại) và tương tác dạng trực tiếp (tức là, hạt chất lỏng tiếp xúc với bề mặt rắn).

## 2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Luận án đưa ra động lực học ứng xử và tương tác của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn dưới sự tác động của mao dẫn nhiệt.

## 3. Các nội dung chính của luận án

Luận án bao gồm: Mở đầu, Kết luận, và năm chương sau đây:

### Chương 1. Tổng quan nghiên cứu

Chương này giải thích các khái niệm cơ bản về mao dẫn nhiệt, bề mặt rắn, hạt chất lỏng đa lớp, v.v... Chương này cũng đưa ra các nghiên cứu đã được thực hiện về tương tác dạng cản trở và tương tác dạng trực tiếp.

**Chương 2.** Xây dựng chương trình mô phỏng tương tác của hạt chất lỏng với bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt.

Chương này đưa ra các phương trình toán học và phương pháp số thực hiện việc mô phỏng.

**Chương 3.** Mô phỏng tương tác của hạt chất lỏng đa lớp với biên dạng của kênh dẫn thắt lại trong điều kiện đẳng nhiệt.

Chương này đưa ra tương tác dạng cản trở thông qua nghiên cứu hạt chất lỏng đa lớp di chuyển bên trong và tương tác với phần thắt lại của kênh dẫn.

**Chương 4.** Mô phỏng tương tác của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn không dính ướt có kể đến ảnh hưởng của mao dẫn nhiệt.

Chương này đưa ra tương tác trực tiếp của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn không dính ướt thông qua nghiên cứu va chạm của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn dưới tác động của trường nhiệt độ. Lực mao dẫn nhiệt được sinh ra từ một trường nhiệt độ với nhiệt độ cao hơn được đặt ở biên bên trên và nhiệt độ thấp hơn được đặt ở bề mặt rắn. Lực mao dẫn nhiệt đóng vai trò hỗ trợ hạt chất lỏng đa lớp nảy lên khỏi bề mặt rắn.

**Chương 5.** Mô phỏng chuyển động của hạt chất lỏng đa lớp trên bề mặt rắn dính ướt dưới tác động của mao dẫn nhiệt.

Chương này đưa ra tương tác trực tiếp của hạt chất lỏng đa lớp và bề mặt rắn. Nhiệt độ cao hơn được đặt ở biên bên phải và nhiệt độ thấp hơn được đặt ở biên bên trái. Tùy theo góc tiếp xúc tĩnh của hạt chất lỏng và bề mặt rắn và thành phần của hạt chất lỏng đa lớp mà nó có thể chuyển động sang phía có nhiệt độ cao hơn hoặc sang phía có nhiệt độ thấp hơn.

### **Chương 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU**

Chương này đưa ra các khái niệm cơ bản và các định nghĩa như là hạt chất lỏng, mạch vi lỏng, hạt chất lỏng đa lớp, sự hình thành hạt chất lỏng, lực mao dẫn nhiệt,... Chương này cũng đưa ra các nghiên cứu về tương tác của hạt chất lỏng với bề mặt rắn dưới sự tác động của mao dẫn nhiệt.

Dựa trên tìm hiểu về tình hình nghiên cứu về sự tương tác của hạt chất lỏng với bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt, các kết luận được đưa ra như sau:

Tương tác hạt chất lỏng trên bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt đã được nghiên cứu trên thế giới. Tuy nhiên, các nghiên cứu còn có các điểm hạn chế sau đây:

Nghiên cứu mô phỏng số:

- Các nghiên cứu chỉ xem xét đến hạt chất lỏng đơn lớp, hạt chất lỏng tiếp xúc ướt với bề mặt rắn. Hoàn toàn chưa có nghiên cứu nào về hạt chất lỏng đa lớp.
- Mô phỏng số phần lớn là các mô phỏng hai chiều.
- Trong thực nghiệm, tồn tại một lượng nhỏ chất lỏng lưu lại trên bề mặt rắn khi di chuyển. Tuy nhiên, mô phỏng số chưa đưa ra được hiện tượng này.

Nghiên cứu lý thuyết:

- Các nghiên cứu lý thuyết chỉ giới hạn với góc tiếp xúc tĩnh nhỏ (nhỏ hơn  $45^\circ$ ). Chưa có nghiên cứu lý thuyết về hạt chất lỏng đa lớp.

Nghiên cứu thực nghiệm:

- Các nghiên cứu thực nghiệm chưa được đa dạng. Số lượng thực nghiệm còn hạn chế và chưa có thực nghiệm nào về hạt chất lỏng đa lớp.

Theo như tình hình nghiên cứu hiện tại, nghiên cứu về tương tác của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn dưới sự tác động của mao dẫn nhiệt chưa được thực hiện. Hạt chất lỏng bên trong có thể ảnh hưởng rất lớn đến động lực học của hạt chất lỏng bên ngoài, tương tác giữa hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt có thể phức tạp, khó đoán, và khác biệt so với hạt chất lỏng đơn lớp. Vì vậy, luận án sẽ đưa ra chi tiết về ứng xử của hạt chất lỏng đa lớp dính ướt trên bề mặt rắn khi chịu tác động của một trường nhiệt độ đều mà ở trong nước cũng như trên thế giới chưa ai nghiên cứu đến. Kết quả luận án sẽ đóng góp những kiến thức quan trọng trong việc phát triển của các ứng dụng liên quan đến mạch vi lỏng, đặc biệt trong những ứng dụng liên quan đến việc phát triển thuốc trong y học (sử dụng hạt chất lỏng đa lớp).

## **Chương 2: XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH MÔ PHỎNG TƯƠNG TÁC CỦA HẠT CHẤT LỎNG VỚI BỀ MẶT RẮN DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA MAO DẪN NHIỆT**

Các phương trình toán học được sử dụng bao gồm: phương trình bảo toàn động lượng (phương trình Navier-Stokes), phương trình liên tục, phương trình năng lượng, và các phương trình khác. Các đạo hàm được xấp xỉ hóa theo phương pháp sai phân hữu hạn. Các chất lỏng khác nhau được phân biệt dựa trên phương pháp theo dấu biên. Chương trình được viết bằng ngôn ngữ lập trình FORTRAN.

Phương trình bảo toàn động lượng được viết như sau:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \rho\nabla\cdot(\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla\cdot[\mu(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T)] + \mathbf{f} + \rho\mathbf{g} \quad (2.1)$$

Phương trình bảo toàn khối lượng:

$$\nabla\cdot\mathbf{u} = 0 \quad (2.2)$$

Phương trình năng lượng:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho c_p T\mathbf{u}) = \nabla\cdot(k\nabla T) \quad (2.3)$$

Phương trình sức căng bề mặt thay đổi theo nhiệt độ:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_T(T - T_0) \quad (2.4)$$

Các chất lỏng được phân biệt bằng việc xây dựng biên phân cách giữa chúng (phương pháp theo dấu biên). Biên phân cách này được hình thành từ các điểm nối với nhau theo một chiều nhất định. Các đặc trưng vật lý của chất lỏng như khối lượng riêng, độ nhớt, và các đặc tính khác được tính toán như sau:

$$\varphi = I\varphi_1 + (1-I)\varphi_2 \quad (2.5)$$

Biên phân cách giữa các chất lỏng được di chuyển theo phương trình sau:

$$x_f^{n+1} = x_f^n + \Delta t V_f \mathbf{n} \quad (2.6)$$

Lực căng bề mặt của một phần tử biên phân cách được tính như sau:

$$\delta\mathbf{f}_\sigma = \int_{\Delta s} \sigma \mathbf{k} nds = \int_{\Delta s} \frac{\partial\sigma}{\partial s} ds = (\sigma\mathbf{t})_2 - (\sigma\mathbf{t})_1 \quad (2.7)$$

Tương tác giữa hạt chất lỏng và bề mặt rắn được mô phỏng dựa trên việc đưa vào mô hình góc tiếp xúc động giữa hạt chất lỏng và bề mặt rắn.

Lược án sử dụng mô hình được đưa ra bởi Muradoglu và Tagsoglu. Theo đó, Góc tiếp xúc giả định được tính như sau:

$$\theta_{Di} = f_{Hoff}(Ca_{clm} + f_{Hoff}^{-1}(\theta_e)) \quad (2.8)$$

Hàm Hoffman ( $f_{Hoff}$ ) được xác định như sau:

$$f_{Hoff} = \cos^{-1}\left(1 - 2 \tanh\left[5,16\left(\frac{x}{1 + 1,31x^{0,99}}\right)^{0,706}\right]\right) \quad (2.9)$$

Góc tiếp xúc động được tính như sau:

$$\theta_D = \begin{cases} \theta_{Di} & \text{ khi } V_{cl} \geq 0 \\ 2\theta_e - \theta_{Di} & \text{ khi } V_{cl} < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Điều tiên là phương trình bảo toàn động lượng [phương trình (2.1)], phương trình này được giải bằng phương pháp tách biến. Rồi rạc hóa phương trình (2.1) bằng cách sử dụng lược đồ tiến bậc một theo thời gian ta được:

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = -\mathbf{A}_h^n + \frac{1}{\rho^n} \left( -\nabla_h P + \mathbf{D}_h^n + \mathbf{f}^n \right) + \mathbf{g}^n \quad (2.11)$$

Trước tiên, chúng ta bỏ qua thành phần áp suất ở phương trình (2.11) ta được:

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = -\mathbf{A}_h^n + \frac{1}{\rho^n} \left( \mathbf{D}_h^n + \mathbf{f}^n \right) + \mathbf{g}^n \quad (2.12)$$

Sau đó, chúng ta thêm ảnh hưởng của thành phần áp suất:

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_h} \nabla_h P \quad (2.13)$$

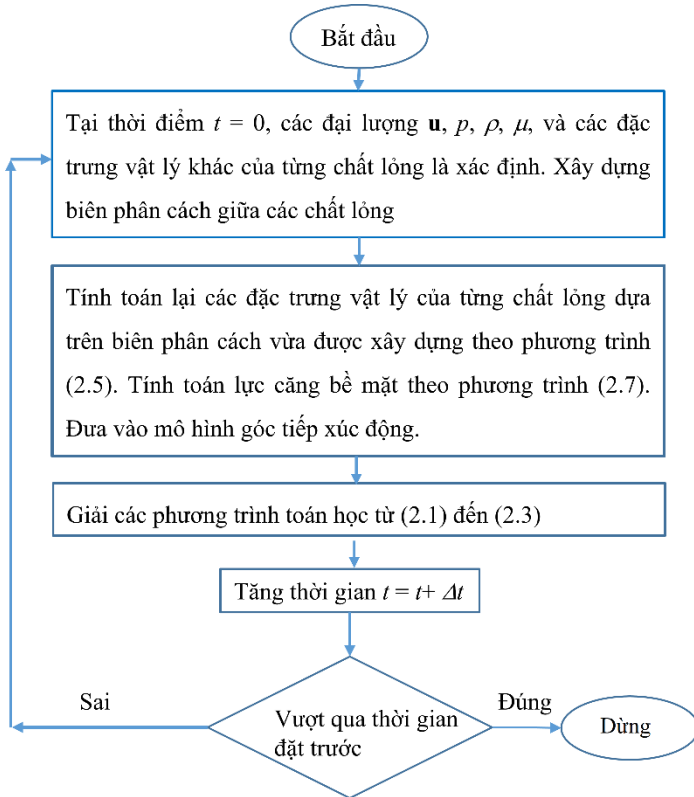
Khi cộng phương trình (2.12) và (2.13) ta được phương trình (2.11). Để tìm thành phần áp suất, chúng ta lấy toán tử  $\text{div}$  hai vế của phương trình (2.13) và sử dụng phương trình liên tục ( $\nabla_h \cdot \mathbf{u}^{n+1} = 0$ ) để loại bỏ đại lượng  $\mathbf{u}^{n+1}$  ta được:



$$\frac{\nabla_h \cdot \mathbf{u}^*}{\Delta t} = \nabla_h \cdot \left( \frac{1}{\rho^n} \nabla_h p \right) \quad (2.14)$$

Giải phương trình (2.14) ta được giá trị của áp suất tại bước thứ  $n$ . Sau khi có được giá trị của áp suất, thay giá trị đó vào phương trình (2.13) ta có được vận tốc tại thời điểm cần tính ( $\mathbf{u}^{n+1}$ ).

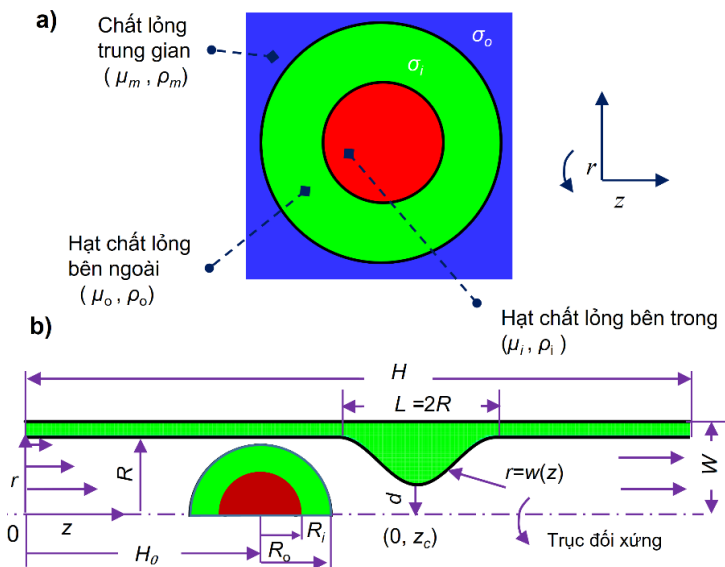
Phương trình cân bằng nhiệt được giải theo phương pháp sai phân hữu hạn. Các đạo hàm được xấp xỉ hóa theo lược đồ sai phân tiến và sai phân trung gian. Lược đồ giải được thể hiện ở Hình 2.1.



Hình 2.1 Lược đồ giải

### Chương 3: MÔ PHỎNG CHUYỂN ĐỘNG CỦA HẠT CHẤT LỎNG TRONG TƯƠNG TÁC VỚI BIÊN DẠNG CỦA KÊNH DẪN TRONG ĐIỀU KIỆN ĐẲNG NHIỆT

Mô hình bài toán được thể hiện ở *Hình 3.1*. Kênh dẫn có tiết diện tròn với bán kính là  $R$  và chiều dài là  $H$ . Độ thắt lớn nhất nằm ở chính giữa của kênh dẫn [tọa độ là  $(0, z_c)$ ]. Độ thắt này được kí hiệu là  $d$ . Chiều dài của vùng thắt lại là  $L = 2R$ . Bán kính của hạt chất lỏng bên ngoài và bên trong lần lượt được kí hiệu là  $R_o$  và  $R_i$ . Các phương trình toán học bao gồm phương trình (2.1) và phương trình (2.2). Ngoài ra, biên dạng của phần thắt lại có phương trình như sau:



*Hình 3.1* Sơ đồ bài toán

$$\begin{cases} r = w(z) = R\{1 - 0,5 \frac{d}{R} [1,0 + \cos(\pi(z - z_c)/L)]\} & \text{khi } |z - z_c| \leq L/2 \\ R & \text{khi } |z - z_c| > L/2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Vận tốc tại mép vào có phương trình như sau:

$$v = -2U_{ave}(1 - r^2 / R^2) \quad (3.2)$$

Động lực học của bài toán được đặc trưng bởi các tham số không thứ nguyên sau:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho_m U_{ave} (2R)}{\mu_m}, Ca = \frac{\mu_m U_{ave}}{\sigma_o}, \sigma_{io} = \frac{\sigma_i}{\sigma_o} \\ R_{or} &= \frac{R_o}{R}, R_{io} = \frac{R_i}{R_o}, d_R = \frac{d}{R}, \mu_{om} = \frac{\mu_o}{\mu_m}, \mu_{im} = \frac{\mu_i}{\mu_m} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Trong đó, giá trị của các tham số  $\mu_{om}$ ,  $\mu_{im}$ , và  $Re$  là không thay đổi, giá trị của chúng bằng 1 trong quá trình mô phỏng. Số mao dẫn thay đổi trong phạm vi từ 0,01 đến 1,0,  $R_{io}$  thay đổi trong phạm vi từ 0,2 đến 0,9,  $R_{or}$  thay đổi trong phạm vi từ 0,2 đến 0,9, và giá trị  $d_R$  thay đổi trong phạm vi từ 0,0 đến 0,8.

Kích thước miền tính toán lần lượt là  $W \times H = 1,2R \times 12R$ . Độ phân giải lưới được sử dụng là  $096 \times 960$ . Tham số nghiên cứu của bài toán là độ lõm tại bề mặt phía sau của hạt lưu chất bên trong và bên ngoài khi tính ở phía trước phần thất lại ( $IH$ ) và trên toàn ống mao dẫn ( $IF$ ).

### Kết luận chương 3

Chương 3 đã trình bày các kết quả mô phỏng về động lực học hạt chất lỏng di chuyển trong kênh dẫn thất lại với phần thất lại có dạng hình sin. Động lực học của hạt chất lỏng đa lớp được nghiên cứu thông qua tham số về độ lõm tại bề mặt phía sau của hạt chất lỏng đa lớp. Các tham số nghiên

cứu bao gồm số mao dẫn  $Ca$ , tỷ số bán kính của hạt chất lỏng bên trong và hạt chất lỏng bên ngoài  $R_{io}$ , tỷ số bán kính của hạt chất lỏng bên ngoài và bán kính kênh dẫn  $R_{or}$ , tỷ số sức căng bề mặt của hạt chất lỏng bên trong và hạt chất lỏng bên ngoài  $\sigma_{io}$ , độ thắt lớn nhất của kênh dẫn  $d_R$ .

Các kết quả chính được trình bày tóm tắt lại như sau:

+ Khi di chuyển trong kênh dẫn thắt lại, bề mặt phía sau của hạt chất lỏng đa lớp có thể có các trạng thái sau:

- Không bị lõm.
- Chỉ bị lõm ở phía sau của phần thắt lại.
- Bị lõm ở cả phía trước và phía sau của phần thắt lại.

+ Khi tăng giá trị của số  $Ca$ ,  $d_R$ , và  $R_{or}$  thì độ lõm tại bề mặt phía sau của hạt chất lỏng bên trong và bên ngoài đều tăng.

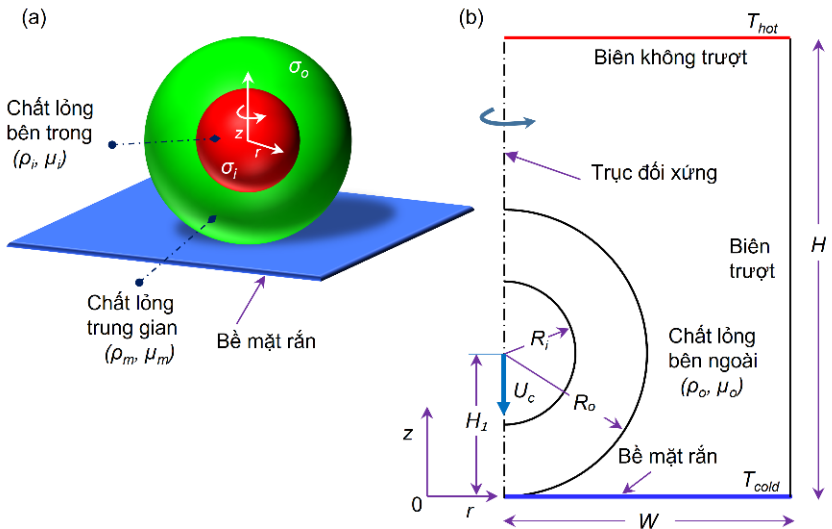
- Khi tăng giá trị của  $R_{io}$ , hạt chất lỏng bên ngoài bị lõm ít hơn. Tuy nhiên, hạt chất lỏng trong bị lõm nhiều hơn.
- Khi tăng giá trị của  $\sigma_{io}$  không thay đổi nhiều giá trị độ lõm lớn nhất của hạt chất lỏng bên ngoài. Tuy nhiên, giá trị độ lõm của hạt chất lỏng bên trong giảm nhanh và tiến tới giá trị bằng không (hạt chất lỏng bên trong không bị lõm).

Động lực học của hạt chất lỏng đa lớp khi di chuyển trong kênh dẫn thắt lại có thể bị ảnh hưởng bởi nhiều thông số khác. Bài toán đặt ra dưới giả thiết chất lỏng xem xét là chất lỏng Newton, hạt chất lỏng đa lớp chỉ có một hạt chất lỏng bên trong. Tuy vậy, nghiên cứu mang lại nhiều ứng dụng trong việc nghiên cứu thuốc hay truyền dẫn thuốc trong y học.

*Kết quả của chương 3 đã được công bố trên tạp thuộc danh mục SCIE (Q2), cụ thể, bài báo số 1 trong “DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA NCS”.*

## Chương 4: NGHIÊN CỨU TƯƠNG TÁC CỦA HẠT CHẤT LỎNG VỚI BỀ MẶT RẮN KHÔNG DÍNH ƯỚT CÓ KẼ ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA MAO DẪN NHIỆT

Mô hình của bài toán được thể hiện ở *Hình 4.1*. Hạt chất lỏng bao gồm hai lớp. Hạt ban đầu có dạng hình cầu với các lớp chất lỏng được đặt đồng tâm với nhau. Bán kính của hạt chất lỏng bên ngoài và hạt chất lỏng bên trong được kí hiệu lần lượt được kí hiệu là  $R_o$  và  $R_i$ . Hạt chất lỏng đa lớp chịu tác động của vận tốc ban đầu ( $U_c$ ) và lực mao dẫn nhiệt được tạo ra bởi một trường nhiệt độ. Trường nhiệt độ có nhiệt độ thấp hơn ( $T_{cold}$ ) được đặt ở trên bề mặt rắn và nhiệt độ cao hơn được đặt ở phía trên hạt chất lỏng đa lớp ( $T_{hot}$ ). Phương trình toán học của bài toán tương tự với phương trình (2.1), (2.2), và (2.3). Bề mặt rắn được giả thiết là hoàn toàn không dính ướt. Do đó, trong chương trình mô phỏng, vận tốc tại các điểm biên tiếp xúc với



*Hình 4.1* Sơ đồ bài toán

bề mặt rắn theo phương ngang được đặt bằng không. Kích thước của miền tính toán là  $W \times H = 4R_o \times 4R_o$ . Lưới được sử dụng là  $256 \times 256$ .

Tham số nghiên cứu là chiều cao nảy lên lớn nhất ( $H_m$ ), chiều cao nảy lên ổn định ( $H_s$ ) của hạt chất lỏng, thời gian mà hạt chất lỏng tiếp xúc với bề mặt rắn ( $t_r$ ), và độ biến dạng của hạt chất lỏng bên trong và bên ngoài ( $T_i$  và  $T_o$ ). Các tham số không thứ nguyên bao gồm:

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{\rho_m U_c D_o}{\mu_m}, We = \frac{\rho_m U_c^2 D_o}{\sigma_o}, Ma = \frac{\sigma_T D_o^2}{\mu_m \alpha_m}, \\
 Bo &= \frac{\rho_m g D_o^2}{\sigma_o}, \frac{\rho_o}{\rho_m}, \frac{\rho_i}{\rho_m}, \frac{\mu_o}{\mu_m}, \frac{\mu_i}{\mu_m}, \frac{k_o}{k_m}, \\
 \frac{k_i}{k_m}, \frac{c_o}{c_m}, \frac{c_i}{c_m}, \sigma_{io} &= \frac{\sigma_i}{\sigma_o}, V_{io} = \frac{V_i}{V_o}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Giá trị của số Reynolds  $Re$  thay đổi trong phạm vi từ 10 đến 40, số Weber  $We$  thay đổi từ 0,32 đến 1,4, số Marangoni  $Ma$  thay đổi từ 50 đến 350, số Bond  $Bo$  thay đổi từ 0,1 đến 5,6,  $V_{io}$  thay đổi từ 0,064 đến 0,512, và  $\sigma_{io}$  thay đổi từ 0,6 đến 4,8. Các tham số khác có giá trị là hằng số.

#### **Kết luận chương 4.**

Chương này đã trình bày động lực học tương tác của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn không dính ướt dưới tác động của mao dẫn nhiệt. Luận án đã đánh giá ảnh hưởng của các tham số không thứ nguyên như  $Ma$ ,  $Bo$ ,  $Re$ ,  $We$ ,  $V_{io}$ , và  $\sigma_{io}$ . Các kết quả quan trọng được tóm tắt lại như sau:

+ Sau khi tương tác với bề mặt rắn, nhờ tác động của gradient nhiệt độ, hạt chất lỏng đa lớp có thể ở những trạng thái sau:

- Hạt chất lỏng đa lớp nảy lên khỏi bề mặt rắn, cân bằng ở phía trên bề mặt rắn.
- Hạt chất lỏng đa lớp không nảy lên.

- Hạt chất lỏng đa lớp nảy lên, tuy nhiên sau đó rơi xuống và nằm ở bề mặt rắn.

+ Sự thay đổi của số Marangoni ảnh hưởng lớn đến chiều cao nảy lên lớn nhất và chiều cao nảy lên ổn định của hạt chất lỏng đa lớp. Kết quả cho thấy rằng với giá trị  $Ma$  nhỏ hơn 150, hạt chất lỏng đa lớp không thể nảy lên khỏi bề mặt rắn. Với giá trị  $Ma$  trong khoảng 150 đến 250, hạt chất lỏng nảy lên, nhưng sau đó rơi xuống và nằm cân bằng trên bề mặt rắn. Với giá trị  $Ma > 250$ , hạt chất lỏng nảy lên và cân bằng ở một độ cao nhất định so với bề mặt rắn.

+ Khi tăng kích thước của hạt chất lỏng bên trong sẽ làm giảm chiều cao nảy lên của hạt chất lỏng đa lớp. Với thể tích của hạt chất lỏng bên trong lớn hơn 0,216, hạt chất lỏng có thể nảy lên nhưng sau đó rơi xuống và ổn định trên bề mặt rắn.

+ Khi thay đổi tỷ lệ sức căng bề mặt của chất lỏng bên trong với chất lỏng bên ngoài sẽ ảnh hưởng nhiều đến độ biến dạng của hạt chất lỏng bên trong. Tuy nhiên, sự thay đổi này không ảnh hưởng nhiều đến thời gian mà hạt chất lỏng đa lớp tiếp xúc với bề mặt rắn trước khi nó nảy lên cũng như chiều cao mà hạt nảy lên.

+ Tăng giá trị số  $Bo$  làm cho hạt chất lỏng khó nảy lên khỏi bề mặt rắn. Với giá trị  $Bo$  lớn hơn 1,0, hạt chất lỏng đa lớp cân bằng trên bề mặt rắn.

+ Khi tăng giá trị của số Weber, với giá trị  $We$  lớn hơn 0,64, làm tăng chiều cao nảy lên ổn định của hạt chất lỏng đa lớp.

+ Khi giảm giá trị của số  $Re$ , hạt chất lỏng đa lớp sẽ dễ nảy lên hơn.

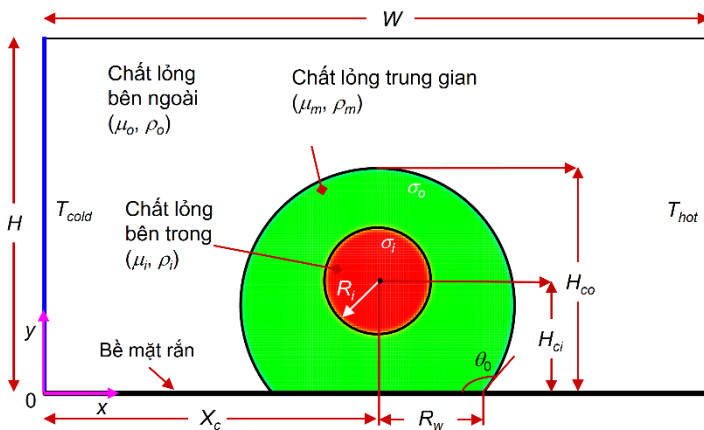
Chương 4 đã chỉ ra động lực học của hạt chất lỏng tương tác với bề mặt rắn không dính ướt dưới tác động của mao dẫn nhiệt. Nghiên cứu trạng thái của hạt chất lỏng đa lớp so với bề mặt rắn có thể được ứng dụng nhiều trong việc chế tạo các bề mặt tự làm sạch, bảo vệ các bề mặt trong các ngành

công nghiệp hóa học, và đưa ra phương pháp mới di chuyển hạt chất lỏng đa lớp trong các mạch vi lỏng.

*Kết quả của chương 4 đã được công bố trên tạp thuộc danh mục SCIE (Q2), cụ thể, bài báo số 2 trong “DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA NCS”*

## CHƯƠNG 5: NGHIÊN CỨU CHUYỂN ĐỘNG CỦA HẠT CHẤT LỎNG TRÊN BỀ MẶT DÍNH ƯỚT DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA MAO DẪN NHIỆT

Hình 5.1 đưa ra mô hình hai chiều của bài toán hạt chất lỏng đa lớp di chuyển trên bề mặt rắn. Bài toán bao gồm hạt chất lỏng đa lớp (hai lớp) được đặt dính ướt một phần trên bề mặt rắn. Góc dính ướt ban đầu của hạt chất lỏng bên ngoài với bề mặt rắn là  $\theta_0$ , với bán kính dính ướt là  $R_w$  và chiều cao là  $H_{co}$ . Hạt chất lỏng bên ngoài có thể tích tương đương với một hạt chất lỏng hình cầu có bán kính là  $R_o$ . Hạt chất lỏng bên trong có bán kính là  $R_i$ . Góc tiếp xúc ban đầu của hạt chất lỏng và bề mặt rắn  $\theta_0 = 130^\circ$ . Miền tính



Hình 5.1 Sơ đồ bài toán



toán có kích thước là  $W \times H = 10R_o \times 5R_o$ . Tương tác của hạt chất lỏng đa lớp và bề mặt rắn được xử lý theo phương pháp đã được đưa ra bởi Muradoglu và Tasoglu (phương trình (2.8) đến (2.10)).

Độ phân giải lưới sử dụng có giá trị là  $250 \times 130$ . Tham số nghiên cứu của bài toán là quỹ đạo của trọng tâm hạt chất lỏng bên ngoài ( $X_{co}, Y_{co}$ ) và quỹ đạo của hạt chất lỏng bên trong ( $X_{ci}, Y_{ci}$ ). Các tham số không thứ nguyên của bài toán bao gồm:

$$Ma = \frac{U_c R_o}{\alpha_m}, Oh = \frac{\mu_m}{\sqrt{\rho_m \sigma_o R_o}}, Pr = \frac{\mu_m c_m}{k_m}$$

$$\frac{\rho_o}{\rho_m}, \frac{\rho_i}{\rho_m}, \frac{\mu_o}{\mu_m}, \frac{\mu_i}{\mu_m}, \frac{k_o}{k_m}, \frac{k_i}{k_m}, \frac{c_o}{c_m},$$

$$\frac{c_i}{c_m}, \sigma_{io} = \frac{\sigma_i}{\sigma_o}, R_{io} = \frac{R_i}{R_o}$$
(5.1)

Trong đó, tỷ số độ nhớt  $\mu_o/\mu_m$  thay đổi trong phạm vi từ 0,1 đến 2,4. Tỷ số bán kính  $R_{io}$  thay đổi trong phạm vi từ 0,2 đến 0,7. Góc tiếp xúc tĩnh giữa hạt chất lỏng và bề mặt rắn  $\theta_e$  thay đổi từ  $60^\circ$  đến  $120^\circ$ . Các tham số khác là cố định.

## Kết luận chương 5

Chương 5 đã trình bày nghiên cứu về chuyển động của hạt chất lỏng đa lớp trên bề mặt rắn dính ướt dưới tác động của mao dẫn nhiệt: quỹ đạo trọng tâm các hạt chất lỏng và xu hướng di chuyển của hạt chất lỏng đa lớp với sự thay đổi của các tham số như góc tiếp xúc tĩnh của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn, tỷ số bán kính của hạt chất lỏng bên trong với hạt chất lỏng bên ngoài, và tỷ số độ nhớt của hạt chất lỏng bên ngoài và chất lỏng trung gian được đưa ra. Các kết quả chính được tóm tắt lại như sau:

- Hạt chất lỏng đa lớp có thể di chuyển sang phía có nhiệt độ thấp hơn hoặc phía có nhiệt độ cao hơn phụ thuộc vào giá trị góc tiếp xúc tĩnh của hạt chất lỏng và bề mặt rắn, tỷ số độ nhớt  $\mu_{om}$ , và kích thước của hạt chất lỏng bên trong.
- Khi tăng tỷ số độ nhớt của chất lỏng bên ngoài và chất lỏng trung gian, hạt chất lỏng đa lớp có xu hướng di chuyển sang phía có nhiệt độ cao hơn.
- Khi hạt chất lỏng bên trong có bán kính lớn ( $R_{io} \geq 0,6$ ), hạt chất lỏng bên ngoài có xu hướng di chuyển sang phía có nhiệt độ cao hơn. Quỹ đạo chuyển động của hạt chất lỏng bên trong ổn định và không bị xoáy.
- Khi góc tiếp xúc tĩnh của hạt chất lỏng bên ngoài và bề mặt rắn lớn ( $\theta_e \geq 115^\circ$ ), hạt chất lỏng đa lớp có xu hướng di chuyển sang phía có nhiệt độ cao hơn.

Chương này đã chỉ ra xu hướng và quỹ đạo di chuyển của một hạt chất lỏng đa lớp trên bề mặt rắn. Xu hướng di chuyển của hạt chất lỏng là khác nhau khi hạt chất lỏng ở trong những điều kiện khác nhau. Mục tiêu và ý nghĩa của nghiên cứu đã được chỉ ra ở phần MỞ ĐẦU.

*Kết quả của chương 4 đã được công bố trên tạp thuộc danh mục SCIE (Q2), cụ thể, bài báo số 4 trong “DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA NCS”.*

## KẾT LUẬN

Luận án đã trình bày chi tiết nghiên cứu tương tác của hạt chất lỏng trên bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt. Các kết quả của Chương 3, Chương 4, và Chương 5 đã được công bố trên các tạp chí quốc tế uy tín thuộc danh mục SCIE (ISI), tương ứng các công trình số 1, 2, và 4 trong “DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA NCS”. Mở rộng nghiên cứu của Chương 3 cho bài toán hạt tương tác với bề mặt rắn (có mao dẫn nhiệt) và hạt chất lỏng

tương tác với biên dạng sóng của một kênh dẫn đã được công bố trong công trình ISI số 3 và số 5. Luận án đã đạt được các kết quả sau:

1. NCS đã thừa kế chương trình mô phỏng bài toán hạt chất lỏng đơn lớp và phát triển chương trình mô phỏng tương tác của hạt chất lỏng đa lớp trên bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt. Đây là đóng góp quan trọng của NCS trong luận án trong sự phát triển và mở rộng phương pháp mô phỏng.

2. Luận án đã đưa ra động lực học chuyển động của một hạt chất lỏng đa lớp trong kênh dẫn thắt lại có dạng hình sin. Luận án cũng đã chỉ ra một hiện tượng hoàn toàn mới đó là sự cân bằng của hạt chất lỏng trên bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt khi hạt chất lỏng tương tác với bề mặt rắn không dính ướt.

3. Luận án đưa ra quỹ đạo chuyển động của một hạt chất lỏng đa lớp trên bề mặt rắn dưới sự tác động của mao dẫn nhiệt. Hạt chất lỏng đa lớp di chuyển sang phía có nhiệt độ cao hơn khi hạt chất lỏng bên trong đủ lớn. Hạt chất lỏng bên ngoài lúc này chuyển động theo hạt chất lỏng bên trong. Ngoài ra, luận án cũng phân tích các yếu tố khác ảnh hưởng đến quỹ đạo chuyển động của từng hạt chất lỏng của hạt chất lỏng đa lớp.

## **NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN**

Nghiên cứu tương tác của hạt chất lỏng và bề mặt rắn dưới sự tác động của mao dẫn nhiệt là đã được nghiên cứu. Tuy nhiên, việc xuất hiện một hạt chất lỏng bên trong dẫn đến nhiều hiện tượng mới, và nhiều đặc tính động lực học thay đổi. Vì vậy, luận án có những điểm mới sau:

- Đã xây dựng một chương trình tính toán tương tác của hạt chất lỏng đa lớp với bề mặt rắn dưới tác động của mao dẫn nhiệt. Luận án cũng đưa ra những đặc tính động lực học mới so với trường hợp hạt chất lỏng đơn lớp.

- Đã phân tích ảnh hưởng của các tham số không thứ nguyên đến độ lõm tại bề mặt phía sau của hạt chất lỏng đa lớp, chỉ ra các tham số quan trọng ảnh hưởng đến động lực học của hạt chất lỏng.
- Đã đưa ra hiện tượng hạt chất lỏng lỏng đa lớp nảy lên và ổn định ở phía trên bề mặt rắn khi tương tác với bề mặt rắn không dính ướt.
- Đã phân tích hướng dịch chuyển của hạt chất lỏng đa lớp trên bề mặt rắn khi chịu tác động của một trường nhiệt độ. Thay đổi giá trị của các tham số không thứ nguyên dẫn đến sự thay đổi chuyển động của hạt chất lỏng đa lớp.

**DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA NCS****Tạp chí quốc tế SCIE (ISI):**

1. **Hoe D. Nguyen**, Truong V. Vu, Phan H. Nguyen, Binh D. Pham, Nang X. Ho, Cuong T. Nguyen & Vinh T. Nguyen, Numerical study of the indentation formation of a compound droplet in a constriction, *J Mech Sci Technol*, Mar. 2021, <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0316-7>. (SCIE, IF2020 = 1.734, Q2).
2. **Hoe D. Nguyen**, Truong V. Vu, Phan H. Nguyen, Binh D. Pham, Vinh T. Nguyen, Hung V. Vu, Cuong T. Nguyen, Duong K. Tran, A numerical study of an impacting compound droplet undergoing thermocapillary convection, *Acta Mechanica*, 2022, <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03230-6> (SCIE, IF2020 = 2.698, Q2).
3. **Hoe D. Nguyen**, Truong V. Vu, Nang. Ho Xuan, Impact of Two Successive Compound Droplets Undergoing Thermal Convection, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00673-7>, (SCIE, IF2021 = 1.53, Q2).
4. **Hoe D. Nguyen**, Truong V. Vu, Nang X. Ho, Phan H. Nguyen, Anh D. Le, Thermocapillary migration of a compound droplet on a substrate, *Journal of European Journal of Mechanics/ B fluids*, 103 (2023) 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2023.08.003> (SCI, IF2023 = 2.598, Q2)
5. Hung V. Vu, Truong V. Vu, Binh D. Pham, **Hoe D. Nguyen**, Vinh T. Nguyen, Hoa T. Phan, Cuong T. Nguyen, Deformation of a compound droplet in a wavy constricted channel, *J Mech Sci Technol*. 37 (2023) 191–202. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-1220-5>. (SCIE, IF2020 = 1.734, Q2).

**Hội nghị:**

1. *Nguyễn Đình Hòa, Vũ Văn Trường, Nguyễn Hồng Phan, Phạm Duy Bình, Nguyễn Tuấn Vinh, Vũ Văn Hưng, Nguyễn Tiến Cường, Trần Khánh Dương, Tương tác của hạt lưu chất đa lớp với bề mặt rắn không thấm ướt dưới tác động của mao dẫn nhiệt, Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 25*