

A STUDY TO EVALUATE THE EFFECTS OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF A HEATED BOTTOM WALL IN A LID-DRIVEN SQUARE CAVITY BY CFD SIMULATION

Nguyen Thanh Son

The University of Danang – University of Technology and Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 25/01/2026 Revised: 28/02/2026 Published: 28/02/2026 KEYWORDS Lid-driven square cavity Square cavity CFD simulation Moving wall Separation	This study numerically investigates mixed convection in a square lid-driven cavity with a locally heated bottom wall of varying geometry. Four configurations are examined with a geometric ratio $Ar = W/(H+W)$ ranging from 1 to 0.33, while maintaining a constant perimeter of the heated region. Two-dimensional, steady-state simulations ($Re = 6667$; $\Delta T = 10\text{--}20\text{ K}$; $Ri = 327\text{--}654$) are performed using the finite volume method with the Boussinesq approximation. The results indicate that increasing ΔT enhances flow intensity and thermal gradients without altering the primary vortex structure. In contrast, the heater geometry strongly influences the flow pattern and temperature distribution. When Ar decreases to 0.33, the average thermal gradient increases by more than 60% compared to $Ar = 1$, and the central velocity rises significantly due to flow constriction. However, this local intensification does not result in global heat transfer optimization. The maximum average Nusselt number is obtained at $Ar = 1$ (51.89 at $\Delta T = 20\text{ K}$), approximately 6.18% higher than that at $Ar \approx 0.33$. The correlation $Nu_{avg} \sim Gr^n$ with $n \approx 0.21$ confirms the mixed convection regime. Overall, the findings demonstrate that heat transfer performance depends on the balance between local acceleration effects and the effective heat transfer area, rather than solely on peak thermal gradients.

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ HÌNH HỌC CỦA TƯỜNG ĐÁY ĐƯỢC GIA NHIỆT TRONG KHOANG VUÔNG CÓ NẮP TRƯỢT BẰNG MÔ PHỎNG CFD

Nguyễn Thành Sơn

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – ĐH Đà Nẵng

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 25/01/2026 Ngày hoàn thiện: 28/02/2026 Ngày đăng: 28/02/2026 TỪ KHÓA Khoang vuông có nắp trượt Khoang vuông Mô phỏng CFD Tường chuyển động Sự tách dòng	Nghiên cứu này khảo sát số đối lưu hỗn hợp trong khoang vuông có nắp trượt khi đáy được gia nhiệt cục bộ với hình học thay đổi. Bốn cấu hình được khảo sát với tỷ số hình học $Ar = W/(H+W)$ từ 1 đến 0,33 trong khi giữ nguyên chu vi vùng gia nhiệt. Mô phỏng hai chiều, ổn định ($Re = 6667$; $\Delta T = 10\text{--}20\text{ K}$; $Ri = 327\text{--}654$) được thực hiện bằng phương pháp thể tích hữu hạn và xấp xỉ Boussinesq. Kết quả cho thấy tăng ΔT làm gia tăng cường độ dòng và gradient nhiệt nhưng không làm thay đổi cấu trúc xoáy chính. Ngược lại, hình học vùng gia nhiệt chỉ phối mạnh cấu trúc dòng và phân bố nhiệt. Khi Ar giảm xuống 0,33, gradient nhiệt trung bình tăng trên 60% so với $Ar = 1$, dòng thời vận tốc trung tâm tăng đáng kể do hiệu ứng thắt dòng. Tuy nhiên, sự gia tăng cục bộ này không dẫn đến sự tối ưu hóa truyền nhiệt toàn cục. Giá trị Nu_{avg} lớn nhất đạt được tại $Ar = 1$ (51,89 ở $\Delta T = 20\text{ K}$), cao hơn khoảng 6,18% so với $Ar \approx 0,33$. Quan hệ $Nu_{avg} \sim Gr^n$ với $n \approx 0,21$ xác nhận chế độ đối lưu hỗn hợp. Kết quả cho thấy hiệu quả truyền nhiệt phụ thuộc vào sự cân bằng giữa gia tốc cục bộ và diện tích trao đổi nhiệt hiệu dụng, thay vì chỉ dựa trên gradient nhiệt cực đại.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14646>

Email: ntson@ute.udn.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

342

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

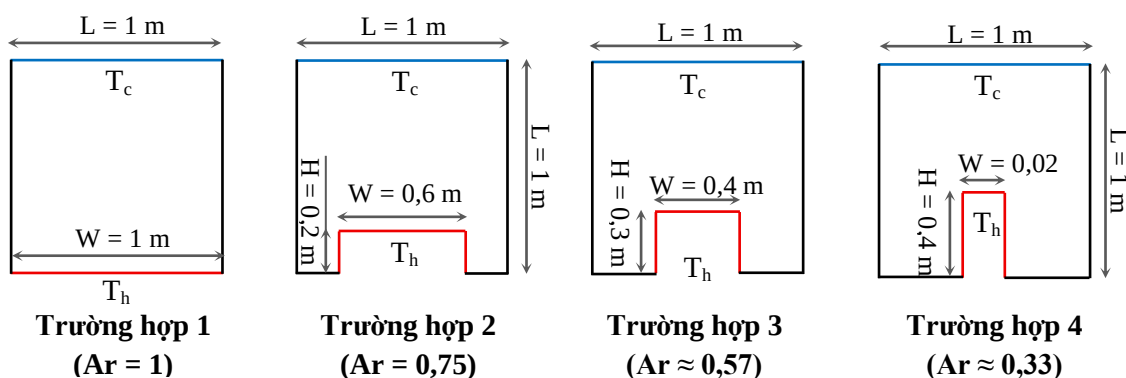
Khoang vuông có nắp trượt là một bài toán chuẩn kinh điển trong cơ học chất lưu và truyền nhiệt, được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu các cơ chế dòng chảy và trao đổi nhiệt liên quan đến nhiều ứng dụng kỹ thuật quan trọng như làm mát linh kiện điện tử, chế biến thực phẩm, thông gió-điều hòa không khí và các hệ thống nhiệt công nghiệp. Mặc dù có cấu hình hình học đơn giản, nhưng dòng chảy trong khoang lại thể hiện nhiều hiện tượng vật lý phức tạp như sự hình thành xoáy thứ cấp, phân nhánh dòng chảy, chuyển động không ổn định và các cơ chế chuyển tiếp, khiến mô hình này trở thành một bài toán kiểm chứng điển hình cho các phương pháp mô phỏng số.

Trong nhiều thập kỷ qua, các nghiên cứu số đã tập trung phân tích ảnh hưởng của số Reynolds, Grashof và Richardson đến cấu trúc dòng chảy và đặc tính truyền nhiệt trong khoang có nắp trượt với cấu hình hình học được giữ cố định [1], [2]. Bên cạnh việc thay đổi tham số dòng chảy, một số nghiên cứu đã đưa vào các hiệu ứng vật lý bổ sung, chẳng hạn nguồn nhiệt bên trong [3] nhằm đánh giá ảnh hưởng của các tham số điều khiển đến đặc tính thủy nhiệt của hệ. Đồng thời, ảnh hưởng của các vật cản bên trong khoang cũng đã được làm rõ, cho thấy hình dạng và điều kiện gia nhiệt của vật cản có tác động đáng kể đến cấu trúc xoáy, mức độ trộn và phân bố áp suất [4] - [6]. Ngoài ra, việc biến đổi hình học cục bộ thông qua vị trí khe trượt gia nhiệt [7] hay biến đổi hình học đáy (bậc thang) [8] giúp tăng đáng kể hiệu quả truyền nhiệt trong khoang. Gần đây hơn, các nghiên cứu chuyển sang khảo sát đối lưu hỗn hợp với sự biến đổi hình học của thành đáy được gia nhiệt trong khoang vuông có nắp trượt [9], [10], cũng như phân tích ảnh hưởng kết hợp của tham số hình học và nhiệt độ thông qua mô phỏng CFD [11]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình hiện có chủ yếu xem xét riêng rẽ ảnh hưởng của tham số hình học hoặc điều kiện nhiệt độ, trong khi sự tương tác đồng thời giữa hình học vùng gia nhiệt và chênh lệch nhiệt độ trong chế độ đối lưu hỗn hợp vẫn chưa được phân tích một cách hệ thống. Đặc biệt, trong cấu hình có vùng gia nhiệt cục bộ kết hợp với nắp trượt, tương tác giữa dòng cưỡng bức và lực nổi có thể hình thành các dòng tia cục bộ, gây phân tầng nhiệt và làm thay đổi cấu trúc xoáy cũng như giá trị số Nusselt trung bình.

Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng mô phỏng CFD để khảo sát đối lưu hỗn hợp trong khoang vuông có nắp trượt, tập trung phân tích ảnh hưởng kết hợp của hình học vùng gia nhiệt và chênh lệch nhiệt độ của thành đáy đến cấu trúc dòng chảy và đặc tính truyền nhiệt. Kết quả thu được nhằm cung cấp cơ sở định lượng cho việc hiểu rõ cơ chế tương tác thủy nhiệt và góp phần định hướng tối ưu hóa hiệu suất các hệ thống truyền nhiệt liên quan.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình tính toán



Hình 1. Các trường hợp được khảo sát của khoang vuông có nắp trượt với tường đáy được gia nhiệt

Mô hình tính toán được xây dựng dựa trên các hệ thống kỹ thuật thực tế có cơ cấu trượt tốc độ thấp và gia nhiệt đáy mức trung bình như buồng sấy nhẹ, thiết bị đóng gói nhiệt và hệ thống bảo

ôn công nghiệp. Hình 1 mô tả khoang vuông cạnh $L = 1$ m với nắp trên chuyển động; không khí là môi chất, chịu tác dụng của trọng lực hướng xuống; nắp trượt từ trái sang phải với vận tốc $0,1$ m/s và giữ ở $T_c = 298$ K, trong khi hai tường bên được cách nhiệt hoàn toàn. Tường đáy gồm hai phần: phần được gia nhiệt và phần không gia nhiệt. Phần đáy không gia nhiệt được cách nhiệt hoàn toàn, trong khi nhiệt độ của phần đáy được gia nhiệt (T_h) được duy trì ở ba mức khác nhau: 308 K, 313 K và 318 K. Trường hợp thứ nhất, phần đáy được gia nhiệt có bề rộng 1 m, ba trường hợp còn lại sử dụng các hình dạng khác nhau với chiều cao H và chiều rộng W được thiết kế sao cho chu vi phần gia nhiệt không đổi; và tỷ số hình học của phần này được định nghĩa là $Ar = \frac{W}{H+W}$.

2.2. Các phương trình toán học

Các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng cho dòng chảy không nén được trong chế độ ổn định và dòng chảy tầng, hai chiều được biểu diễn như sau [12] - [14]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u C_p T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v C_p T)}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (5)$$

Trong đó, u và v lần lượt là các thành phần vận tốc theo phương x và y (m/s); ρ là khối lượng riêng của chất lỏng (kg/m^3); P là áp suất (Pa); μ là độ nhớt động lực học của chất lỏng (kg/m.s); β là hệ số giãn nở nhiệt (K^{-1}); T_f và T lần lượt là nhiệt độ tham chiếu của chất lỏng và nhiệt độ chất lỏng (K); k là hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng (W/m.K); g là vectơ gia tốc trọng trường (m/s^2); và C_p là nhiệt dung riêng (J/kg.K).

2.3. Các giả thiết cho đối lưu hỗn hợp

- Dòng không khí được giả thiết là hai chiều, ổn định, không nén được và chảy tầng. Đây là cách tiếp cận đã được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu số trước đây về dòng chảy trong khoang vuông có nắp trượt nhằm đơn giản hóa mô hình và giảm chi phí tính toán.

- Sự sinh nhiệt bên trong được bỏ qua.

- Các tính chất nhiệt-vật lý của môi chất được coi là không đổi; tuy nhiên, khối lượng riêng xuất hiện trong lực thể tích của phương trình động lượng được xử lý theo xấp xỉ Boussinesq (bởi với trường hợp khắt khe nhất $\Delta T = 20$ K thì $\beta \cdot \Delta T = 0,065 < 0,1$), do đó cho phép mô tả lực nổi.

- Truyền nhiệt bằng bức xạ được xem là không đáng kể.

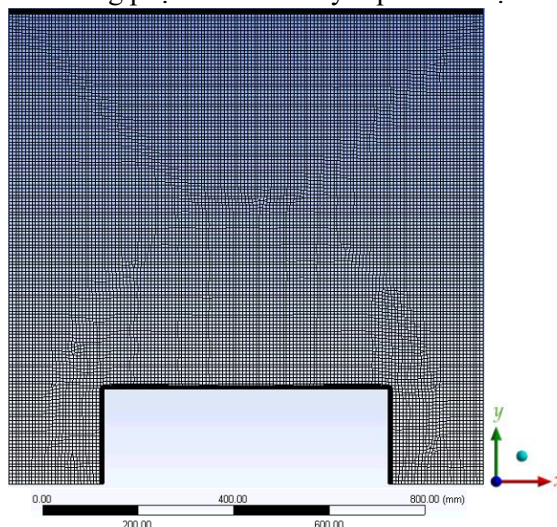
2.4. Điều kiện biên

Tường trên (nắp trượt): $u = U$, $v = 0$, $T = T_c$. Hai tường bên trái và phải: $u = 0$, $v = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$. Phần tường đáy được gia nhiệt: $u = 0$, $v = 0$, $T = T_h$. Phần tường đáy không gia nhiệt: $u = 0$, $v = 0$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$.

2.5. Lưới tính toán

Lưới thể tích hữu hạn có cấu trúc với độ phân giải cao được xây dựng cho các trường hợp 1-4 (Hình 2 thể hiện cấu trúc lưới của trường hợp 2).

Để kiểm tra độc lập của lưới thì một nghiên cứu độ nhạy của lưới được tiến hành cho trường hợp 4. Ở đây, trường hợp 4 ($Ar \approx 0,33$) được chọn cho nghiên cứu này vì nó tạo ra sự co hẹp dòng chảy mạnh nhất, do đó có yêu cầu khắt khe nhất về độ phân giải. Vì vậy, các trường hợp còn lại vẫn đảm bảo được tính độc lập của lưới và mức độ hội tụ. Ba mức mật độ lưới được khảo sát, bao gồm thô (10.000 phần tử), trung bình (20.000 phần tử) và mịn (40.000 phần tử), trong đó, tại nắp trượt, tường đáy được gia nhiệt; vùng thất dòng lưới được tiến hành tinh chỉnh cục bộ: có ít nhất 20 điểm lưới được bố trí trong phạm vi chiều dày lớp biên nhiệt.



Hình 2. Cấu trúc lưới của trường hợp 2

Số Nusselt trung bình tại tường đáy được gia nhiệt (Nu_{avg}) được sử dụng làm tiêu chí chính để đánh giá sự hội tụ. Theo Bảng 1, sai số tương đối của Nu_{avg} giảm đáng kể khi lưới được tinh mịn hơn. Sự sai khác giữa lưới Trung bình và lưới Mịn chỉ khoảng 0,36%, nằm hoàn toàn trong giới hạn chấp nhận được đối với độ chính xác số. Do đó, lưới Medium với 20.000 phần tử được lựa chọn cho tất cả các mô phỏng tiếp theo nhằm đạt được sự cân bằng tối ưu giữa độ chính xác tính toán và hiệu quả sử dụng tài nguyên.

Bảng 1. Kiểm tra tính độc lập của lưới

Mức lưới	Số phần tử	Số Nusselt trung bình tại tường đáy gia nhiệt Nu_{avg} ($T = 313$ K)	Sai số tương đối (%)
Thô	10 K	44,19	-
Trung bình	20 K	46,80	5,90%
Mịn	40 K	46,97	0,36%

2.6. Kiểm chứng mô hình

Các phép tính được thực hiện bằng phương pháp thể tích hữu hạn thông qua phần mềm thương mại ANSYS Fluent®. Thuật toán SIMPLEC được dùng để liên kết giữa trường áp suất và vận tốc. Các kết quả số được xem là hội tụ chấp nhận được khi sai số của phương trình năng lượng và động lượng đạt đến 10^{-6} và độ biến thiên tương đối của Nu_{avg} , vận tốc cực đại nhỏ hơn 10^{-5} giữa các lần lặp liên tiếp. Mô hình được kiểm chứng với trường hợp đáy phẳng gia nhiệt (trường hợp 1).

Để tăng độ tin cậy, mô hình không chỉ được so sánh nội bộ mà còn được đối chiếu với các nghiệm chuẩn cho bài toán khoang vuông có nắp trượt với tường đáy được gia nhiệt trong chế độ

đối lưu hỗn hợp. Cụ thể, giá trị Nu_{avg} và cấu trúc trường dòng được so sánh với các kết quả kinh điển trong tài liệu của Iwatsu [1] và Oztop [2]. Sai khác nằm trong khoảng chấp nhận được ($<5\%$), cho thấy mô hình có khả năng tái hiện đúng cơ chế tương tác giữa lực cắt do nắp trượt và lực nổi. Ngoài ra, xu hướng tăng của Nu_{avg} theo ΔT được phân tích theo quan hệ lũy thừa: $Nu_{avg} \sim Gr^n$. Từ các dữ liệu ở Bảng 2, với ba mức ΔT (10, 15 và 20 K) có được $\frac{Nu_{318}}{Nu_{308}} = \frac{51,89}{44,98} = 1,154$, kết

quả thu được cho $n \approx 0,21$. Giá trị này nằm trong khoảng 0,2–0,33 thường gặp cho đối lưu hỗn hợp, phù hợp với lý thuyết và các nghiên cứu trước. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng ba điểm dữ liệu chỉ đủ để xác nhận xu hướng phù hợp về mặt vật lý, chưa đủ để thiết lập một quan hệ thực nghiệm có độ tin cậy thống kê cao. Do đó, kết quả này được xem là kiểm chứng tính nhất quán của mô hình hơn là xây dựng quy luật tổng quát. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc mở rộng dải ΔT và số điểm dữ liệu sẽ được thực hiện để củng cố độ tin cậy của hệ số mũ n .

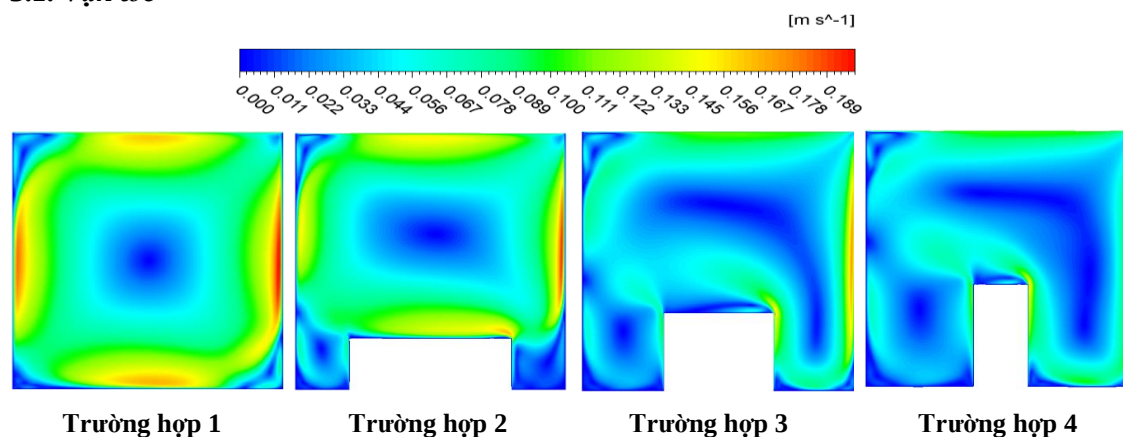
Bảng 2. Kiểm chứng mô hình số dựa trên Nu_{avg} cho trường hợp 1

T_h (K)	T_c (K)	ΔT (K)	Nu_{avg}	Tốc độ tăng của Nu_{avg}
308	298	10	44,98	-
313	298	15	48,95	8,84%
318	298	20	51,89	6,00%

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Để đánh giá ảnh hưởng của các tham số hình học tường đáy được gia nhiệt, phân bố nhiệt độ và vận tốc của bốn trường hợp được trình bày, phân tích và so sánh.

3.1. Vận tốc

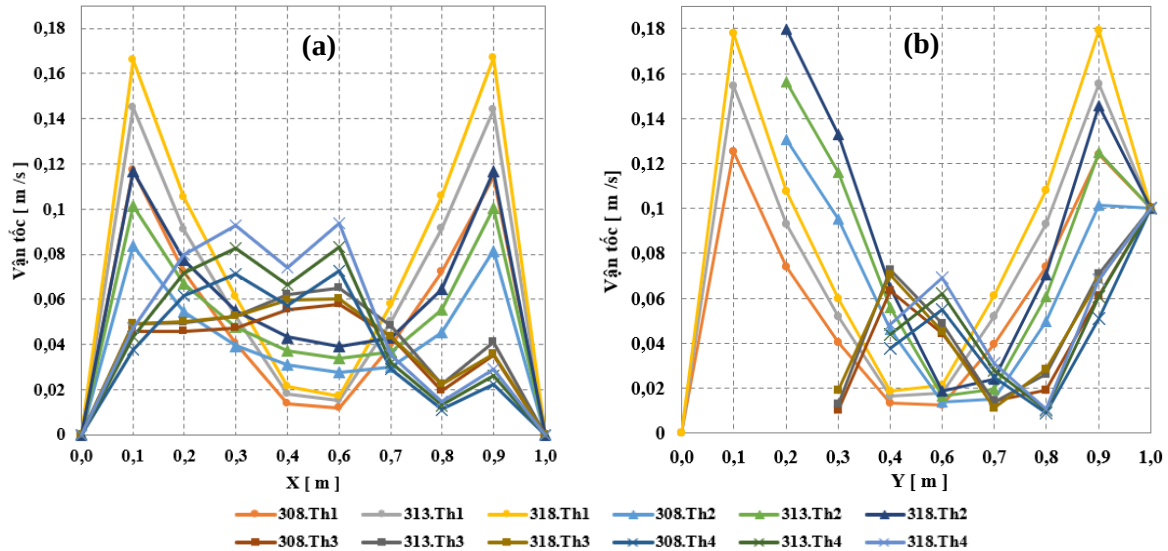


Hình 3. Trường vận tốc của các trường hợp 1-4 tại $T_h = 308$ K

Hình 3 minh họa ảnh hưởng của các tham số hình học tường đáy được gia nhiệt đến phân bố vận tốc trong khoang vuông có nắp trượt. Trường hợp 1 xuất hiện một xoáy chủ đạo với trường vận tốc tương đối đồng đều, trong khi trường hợp 2 chỉ tạo ra các nhiễu loạn cục bộ yếu gần tường đáy. Ngược lại, trường hợp 3 và 4 làm tăng đáng kể gia tốc dòng chảy dọc theo hai bên vật cản và hình thành các vùng hậu lưu vận tốc thấp. Đặc biệt, trường hợp 4 tạo ra dòng tia rõ rệt với các gradient vận tốc mạnh nhất, phản ánh mức độ thắt chặt dòng chảy cao.

Việc tăng T_h làm tăng cường lực nổi, từ đó dẫn đến vận tốc dòng chảy lớn hơn, điều này thể hiện rõ ở Hình 4a. Tuy nhiên, hình dạng tổng thể của phân bố vận tốc dọc theo đường tâm ngang hầu như không thay đổi, cho thấy nhiệt độ chủ yếu ảnh hưởng đến cường độ dòng chảy hơn là làm biến đổi cấu trúc dòng chảy nền. Đối với tất cả các mức T_h , trường hợp 1 thể hiện vận tốc cực đại lớn nhất do sự chi phối mạnh của đối lưu cưỡng bức, trong khi trường hợp 3 cho giá trị thấp nhất vì lực nổi không được chuyển hóa hiệu quả thành vận tốc dòng chảy; như tại 313 K, vận tốc cực đại

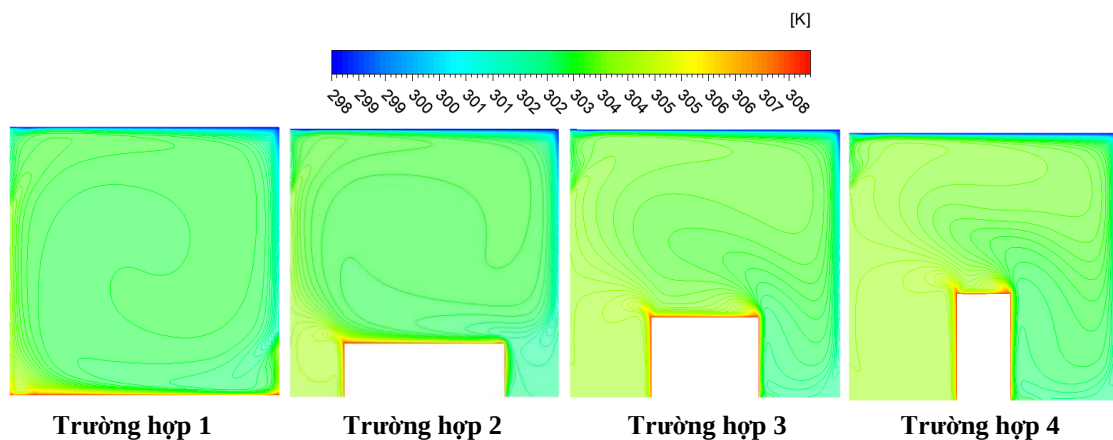
đọc theo đường tâm ngang của các trường hợp 1-4 lần lượt là 0,145; 0,101; 0,065 và 0,083 m/s. Ngoài ra, trong vùng $X = 0,4-0,6$ m, trường hợp 4 ghi nhận vận tốc lớn nhất, chứng tỏ sự xuất hiện của dòng tia mạnh do hiệu ứng thất dòng từ phần gia nhiệt hẹp, trong khi trường hợp 1 xuất hiện vùng vận tốc thấp vì không có gia tốc cục bộ. Các sai khác phần trăm được tính theo độ lớn vận tốc trung bình theo diện tích dọc theo đường tâm ngang trong khoảng này; tại 313 K, trường hợp 4 cao hơn trường hợp 1, 2 và 3 lần lượt khoảng 467%, 143% và 70%.



Hình 4. Phân bố vận tốc dọc theo đường tâm ngang (a) và đường tâm thẳng đứng (b) cho bốn trường hợp

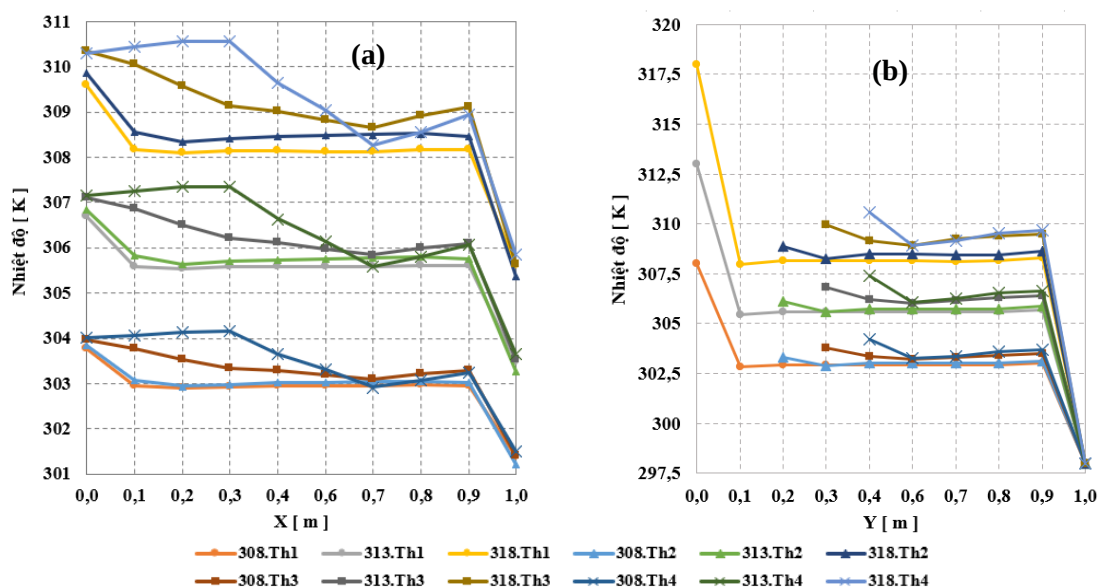
Mặc dù $Re = 6667$ nên dòng chảy được xem là cường bức chi phối, nhưng khi T_h tăng từ 308 K đến 318 K thì Ri tăng từ 327 đến 654, nên đối lưu tự nhiên chiếm ưu thế mạnh so với đối lưu cưỡng bức do nắp trượt. Vì vậy, lực nổi vẫn ảnh hưởng rõ đến phân bố vận tốc. Theo Hình 4b, khi T_h tăng vận tốc dọc theo đường tâm đứng trong tất cả các trường hợp đều gia tăng do lực nổi được tăng cường, với vận tốc cực đại tăng khoảng 10–13% cho mỗi 5 K, đặc biệt gần các biên dưới và trên. Ở mọi mức T_h , trường hợp 1 và 2 đạt vận tốc cực đại dọc theo đường tâm đứng cao hơn đáng kể so với trường hợp 3 và 4, do sự phát triển thuận lợi hơn của chuyển động thẳng đứng. Chẳng hạn, tại 318 K, vận tốc cực đại của các trường hợp 1–4 lần lượt là 0,179; 0,180; 0,070 và 0,069 m/s.

3.2. Nhiệt độ



Hình 5. Trường nhiệt độ của các trường hợp 1-4 tại $T_h = 308$ K

Hình 5 cho thấy tham số hình học của tường đáy được gia nhiệt không chỉ chi phối cường độ truyền nhiệt mà còn ảnh hưởng đến cấu trúc trường nhiệt trong khoang. Khi Ar giảm, phân bố nhiệt độ trở nên kém đồng đều và hiệu suất truyền nhiệt tổng thể suy giảm vì truyền nhiệt trung bình phụ thuộc vào thông lượng nhiệt tích phân trên toàn bề mặt, không chỉ vào cực đại cục bộ của $\partial T/\partial n$.



Hình 6. Phân bố nhiệt độ dọc theo đường tâm ngang (a) và đường tâm thẳng đứng (b) cho bốn trường hợp

Hình 6 cho thấy dạng phân bố nhiệt độ dọc theo cả đường tâm ngang và đường tâm thẳng đứng hầu như không thay đổi. Hành vi này cho thấy nhiệt độ T_h chủ yếu ảnh hưởng đến độ lớn của trường nhiệt, hơn là làm biến đổi cấu trúc không gian của nó. Bên cạnh đó, tỷ số Ar chi phối sự phát triển không gian của dòng chảy do lực nổi gây ra. Việc giảm tỷ số Ar dẫn đến sự phân tầng nhiệt mạnh hơn và làm suy giảm hiệu suất truyền nhiệt, qua đó nhấn mạnh vai trò chi phối của sự thất chặt hình học trong chế độ đối lưu hỗn hợp. Tại 318 K, giá trị gradient nhiệt độ trung bình dọc theo đường tâm ngang lần lượt là 3,99; 4,49; 4,71 và 6,49 K/m, trong khi theo đường tâm thẳng đứng đạt 20,00; 25,07; 28,57 và 33,34 K/m cho các trường hợp 1-4, khẳng định vai trò chi phối của hình học đối với sự phát triển trường nhiệt; và số Nusselt trung bình tại tường đáy được gia nhiệt lần lượt là 51,89; 51,31; 46,17 và 48,87 cho các trường hợp 1-4. Qua đây, trường hợp 4 (Ar nhỏ nhất) có gradient nhiệt lớn nhất là do hiệu ứng thất dòng, nhưng sự thu hẹp diện tích hiệu dụng và phân bố dòng không đồng đều khiến Nu_{avg} không đạt giá trị cao nhất.

4. Kết luận

Nghiên cứu làm rõ ảnh hưởng của các tham số hình học tường đáy được gia nhiệt đến dòng chảy và truyền nhiệt trong khoang vuông có nắp trượt dưới chế độ đối lưu hỗn hợp ($Re = 6667$; $Ri = 327-654$; $Pr \approx 0,71$). Các kết quả chính gồm:

- Giảm tỷ số hình học Ar làm tăng hiệu ứng thất dòng, hình thành dòng tia và tăng vận tốc cục bộ, nhưng không làm thay đổi đáng kể xoáy chính.
- Trường hợp 4 ($Ar \approx 0,33$) tạo gradient nhiệt độ trung bình lớn nhất (33,34 K/m tại 318 K) nhưng không tối ưu truyền nhiệt do diện tích trao đổi nhiệt hiệu dụng giảm.
- Trường hợp 1 ($Ar = 1$) cho Nu_{avg} lớn nhất (51,89 tại $\Delta T = 20$ K), cao hơn 6–12% so với các trường hợp khác, cho thấy tối ưu hóa phải dựa trên giá trị tích phân toàn bề mặt thay vì cực đại cục bộ.
- Nu_{avg} tăng theo ΔT và tuân theo quan hệ lũy thừa với Gr ($n \approx 0,21$), xác nhận đặc trưng đối lưu hỗn hợp trong phạm vi khảo sát.

Các kết luận áp dụng cho dòng hai chiều, ổn định với $\Delta T \leq 20$ K ($\beta \Delta T < 0,1$) và cung cấp cơ sở định lượng cho thiết kế, tối ưu hóa cấu hình gia nhiệt cục bộ trong hệ thống trao đổi nhiệt có tương tác đối lưu cưỡng bức–tự nhiên.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số T2024-06-03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. Iwatsu, J. M. Hyun, and K. Kuwahara, "Mixed convection in a driven cavity with a stable vertical temperature gradient," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 6, pp. 1601-1608, 1993.
- [2] H. F. Oztop and I. Dagtekin, "Mixed convection in two-sided lid-driven differentially heated square cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 8, pp. 1761-1769, 2004.
- [3] A. Chamkha, "Hydromagnetic combined convection flow in a vertical lid-driven cavity with internal heat generation or absorption," *Numerical Heat Transfer Part A-applications - Numer heat transfer pt a-appl*, vol. 41, pp. 529-546, 2002.
- [4] V. Golkarfard, S. A. Gandjalikhan Nasab, A. B. Ansari, and G. H. Bagheri, "Numerical investigation on deposition of solid particles in a lid-driven square cavity with inner heated obstacles," *Advanced Powder Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 736-743, 2012.
- [5] F. L. Rashid, A. F. Khalaf, A. Ameen, and M. A. Al-Obaidi, "Investigation of Thermo-Hydraulics in a Lid-Driven Square Cavity with a Heated Hemispherical Obstacle at the Bottom," *Entropy*, vol. 26, no. 5, pp. 1-25, 2024.
- [6] A. Khalaf, F. Rashid, A. Ali, and M. Abbas, "Numerical Analysis in a Lid-Driven Square Cavity with Hemispherical Obstacle in the Bottom," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 09, pp. 1639-1647, 2022.
- [7] M. Khalid, R. U. Haq, A. Alhushaybari, and E. A. Algehyne, "Lid driven flow and heat transfer due to various positions of slit in a square cavity: FEM approach," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 159, 2024, Art. no. 107951.
- [8] N. Janjanam, R. Nimmagadda, G. Lazarus, R. S. Harish, and S. Wongwises, "Conjugate heat transfer performance of stepped lid-driven cavity with Al_2O_3 /water nanofluid under forced and mixed convection," *SN Applied Sciences*, vol. 3, 2021, Art. no. 605.
- [9] M. N. Islam, U. I. Aziz, R. Karmaker, and S. F. Ahmed, "Numerical investigation of mixed convection heat transfer enhancement in a square cavity with a hump-shaped heated bottom wall," *Results in Engineering*, vol. 28, 2025, Art. no. 107410.
- [10] M. M. Fardin, M. S. Hossain, and M. N. Hasan, "CFD based neural network model framework for mixed convection in a lid-driven cavity with conductive cylinder," *Heliyon*, vol. 11, 2025, Art. no. e42637.
- [11] F. L. Rashid *et al.*, "Influence of adiabatic semi-circular grooved in backward-facing step on thermal-hydraulic characteristics of nanofluid," *International Journal of Thermofluids*, vol. 26, 2025, Art. no. 101052.
- [12] S. Ahmed, Z.-M. Chen, H. Xu, and M. Ishaq, "Mixed convection flow in a square lid-driven cavity subject to inclined magnetic field with highly accurate wavelet-homotopy solutions," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 162, pp. 33-51, 2024.
- [13] F. L. Rashid *et al.*, "Numerical investigation of heat transfer augmentation in elliptical passage with different rib geometries and aspect ratios," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 1390-1409, 2018.
- [14] R. Smriti, A. Das, F. Mahmood, and M. Hasan, "Fluid-structure interaction of a thin flexible heater inside a lid-driven cavity," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, pp. 75 - 93, 2023.
- [15] N. Rehman, R. Mahmood, A. Majeed, and I. Khan, "Multigrid simulations of non-Newtonian fluid flow and heat transfer in a ventilated square cavity with mixed convection and baffles," *Scientific Reports*, vol. 14, no.1, 2024, Art. no. 6694.