



NUMERICAL SIMULATION AND EVALUATION OF AIR PERMEABILITY OF ADVANCED TPMS ARCHITECTED MATERIALS

Dang Thi Thu Thao, Do Hai Hung, Tran Bao Viet*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Ha Noi, Viet Nam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 10/06/2026

Revised: 06/08/2026

Accepted: 11/08/2026

Published online: 15/08/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.6.6>

* *Corresponding author*

Email: viettb@utc.edu.vn; Tel: +84911451080

Abstract: With recent advancements in additive manufacturing, advanced architectural materials featuring unique cellular structures hold increasingly concrete prospects for applications in the construction industry. This paper presents an investigation into the air permeability of advanced architectural material structures based on Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), focusing on three fundamental types: Primitive (P), Gyroid (G), and Diamond (D). Utilizing the Lattice Boltzmann Method (LBM) with a D3Q19 lattice configuration, airflow through the complex void spaces of the TPMS is modeled and analyzed in detail. By computing the dimensionless permeability coefficient and benchmarking the results against the EN 12114 standard for air permeability of building components, this study quantifies the precise effects of geometric characteristics, pore size, and porosity on flow rate and aerodynamic behavior. The results indicate that the Primitive structure delivers the highest ventilation performance due to its straight channel network; the Gyroid structure exhibits the most optimal and uniform helical flow distribution; whereas the Diamond structure induces the highest flow resistance caused by tortuous pathways and bottleneck constraints. Furthermore, the study highlights a sharp, non-linear degradation of the permeability coefficient as porosity and pore size decrease to lower thresholds. These findings provide a solid scientific foundation for the design and deployment of TPMS architectural materials in natural ventilation wall systems and high-performance building envelope membranes.

Keywords: Architected materials; air permeability; Lattice Boltzmann; TPMS; 3D printing.

© 2026 University of Transport and Communications



MÔ PHỎNG SỐ ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG THẨM KHÍ CỦA MỘT SỐ DẠNG VẬT LIỆU KIẾN TRÚC TIỀN TIẾN

Đặng Thị Thu Thảo, Đỗ Hải Hưng, Trần Bảo Việt*

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 10/06/2026

Ngày nhận bài sửa: 06/08/2026

Ngày chấp nhận đăng: 11/08/2026

Ngày xuất bản Online: 15/08/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.6.6>

* Tác giả liên hệ

Email: viettb@utc.edu.vn; Tel: +84911451080

Tóm tắt. Với sự tiến bộ của công nghệ chế tạo bồi đắp, vật liệu kiến trúc tiên tiến có cấu trúc đặc biệt ngày càng có triển vọng ứng dụng cụ thể trong ngành xây dựng. Bài báo này trình bày nghiên cứu đánh giá khả năng thẩm khí của các cấu trúc vật liệu kiến trúc tiên tiến dựa trên bề mặt cực tiểu tuần hoàn ba chiều (Triply Periodic Minimal Surfaces - TPMS), bao gồm ba dạng cơ bản: Primitive (P), Gyroid (G) và Diamond (D). Bằng việc ứng dụng phương pháp mô phỏng số Lattice Boltzmann (LBM) với cấu hình không gian D3Q19, dòng chảy không khí qua các không gian rỗng phức tạp của TPMS được mô hình và phân tích chi tiết. Thông qua việc tính toán hệ số thẩm không thứ nguyên và đối chiếu trực tiếp với tiêu chuẩn EN 12114 về độ thẩm khí của cấu kiện xây dựng, nghiên cứu đã định lượng rõ sự ảnh hưởng của đặc điểm hình học, kích thước và độ rỗng đến lưu lượng và các đặc tính dòng chảy. Kết quả chỉ ra rằng cấu trúc Primitive mang lại khả năng thông gió tốt nhất nhờ các kênh dẫn thẳng, cấu trúc Gyroid cho thấy sự phân bố dòng chảy xoắn ốc đồng đều tối ưu, trong khi cấu trúc Diamond tạo ra trở lực lớn nhất do mạng lưới kênh dẫn uốn lượn và thắt nút cổ chai. Nghiên cứu cũng nhấn mạnh sự sụt giảm phi tuyến tính mạnh mẽ của hệ số thẩm khí độ rỗng và kích thước giảm xuống mức thấp. Các phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho việc thiết kế và ứng dụng vật liệu kiến trúc TPMS trong các hệ thống vách ngăn thông gió tự nhiên và màng bao che công trình hiệu năng cao.

Từ khóa: Vật liệu kiến trúc, Hệ số thẩm khí, Lattice Boltzmann, TPMS, In 3D

© 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những thập kỷ gần đây, xu hướng phát triển bền vững và kiến trúc xanh đã trở thành định hướng chủ đạo trong thiết kế xây dựng công trình trên toàn cầu cũng như tại Việt Nam [1]. Một trong những thách thức lớn nhất là làm thế nào để tối ưu hóa hiệu quả thông gió tự nhiên, nâng cao chất lượng vi khí hậu trong nhà, đồng thời giảm thiểu lượng điện năng tiêu thụ cho các hệ thống điều hòa không khí. Đối với các vùng khí hậu nhiệt đới nóng ẩm như Việt Nam, vỏ bao che công trình (như tường thoáng khí, gạch thông gió) đóng vai trò quyết định trong việc điều hòa dòng khí lưu thông. Các giải pháp truyền thống như gạch hoa gió, bê tông xốp rỗng tuy có ưu điểm chi phí thấp nhưng lại gặp hạn chế về tính đồng nhất cấu trúc, khả năng kiểm soát lưu lượng dòng khí và tính thẩm mỹ kiến trúc.

Sự phát triển vượt bậc của công nghệ Chế tạo bồi đắp (Additive Manufacturing - in 3D) [2] đã mở ra cơ hội thiết kế các dạng vật liệu kiến trúc tiên tiến (advanced architected materials) với cấu trúc hình học phức tạp được kiểm soát chính xác ở quy mô vi mô [3,4]. Trong số đó, các cấu trúc mạng dựa trên bề mặt cực tiểu tuần hoàn ba chiều (Triply Periodic Minimal Surfaces - TPMS) nổi lên như một giải pháp đột phá [5,6]. TPMS là các bề mặt toán học có độ cong trung bình bằng không tại mọi điểm và tuần hoàn trong không gian ba chiều. Đặc trưng nổi bật của TPMS rỗng (sheet-based) là sở hữu hệ thống kênh dẫn liên thông hoàn hảo, không có các nút giao sắc nhọn (nút thắt gây tập trung ứng suất trong cấu trúc giàn thanh truyền thống), diện tích bề mặt riêng lớn và độ rỗng cao. Các đặc tính này giúp TPMS trở thành ứng viên lý tưởng cho việc điều chỉnh và tăng cường khả năng thấm khí, truyền dẫn chất lưu và trao đổi nhiệt thụ động trong các dạng kiến trúc mặt đứng công trình [7].

Mặc dù tiềm năng của vật liệu TPMS trong các bài toán cơ học và trao đổi nhiệt đã được nghiên cứu rộng rãi, các khảo sát chi tiết về khả năng thấm khí của các cấu trúc TPMS ba chiều (3D - ô cơ sở đầy đủ) vẫn còn nhiều khoảng trống [8]. Đặc biệt, việc đánh giá định lượng và so sánh trực tiếp khả năng thấm khí giữa các cấu trúc TPMS phổ biến như Primitive (P), Gyroid (G), và Diamond (D) ở cùng một độ rỗng là rất cần thiết để đưa ra khuyến nghị thiết kế tối ưu.

Nhằm giải quyết vấn đề trên, bài báo này tập trung nghiên cứu đánh giá khả năng thấm khí của ba dạng cấu trúc TPMS rỗng tiên tiến (P, G, D). Chúng tôi xây dựng mô hình số giải bài toán dòng chảy chất khí ở tốc độ thấp qua không gian rỗng của cấu trúc bằng phương pháp Lattice Boltzmann (LBM) trên mô hình 3D. Từ kết quả vận tốc dòng chảy, hệ số thấm không thứ nguyên K được xác định theo định luật Darcy để đánh giá cấu trúc có hiệu năng thông khí tốt nhất. Bài báo được cấu trúc gồm 6 phần: Phần 1 giới thiệu tổng quan; Phần 2 trình bày thiết kế hình học và quan hệ độ rỗng; Phần 3 thiết lập các phương trình truyền dẫn chất lưu cơ bản; Phần 4 mô tả mô hình số LBM; Phần 5 phân tích kết quả mô phỏng và đánh giá; Phần 6 đưa ra kết luận và kiến nghị.

2. THIẾT KẾ HÌNH HỌC VÀ ĐỘ RỖNG CỦA CÁC CẤU TRÚC TPMS

Độ rỗng của vật liệu kiến trúc TPMS quyết định trực tiếp đến dung lượng chứa khí và khả năng lưu thông chất lưu. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung khảo sát các cấu trúc dạng tấm (sheet-based TPMS) ba chiều. Khác với các cấu trúc dạng khối (solid-based TPMS) phân chia không gian thành hai miền đặc rỗng riêng biệt, cấu trúc dạng tấm được tạo nên bởi một lớp vỏ mỏng bao quanh bề mặt cực tiểu. Miền không gian vật liệu đặc được định nghĩa bởi tập hợp các điểm thỏa mãn điều kiện:

$$c - \frac{t}{2} \leq F(x, y, z) \leq c + \frac{t}{2} \quad (1)$$

trong đó $F(x, y, z)$ là hàm ẩn toán học mô tả bề mặt cực tiểu tuần hoàn ba chiều, c là giá trị isovaleur điều khiển sự lệch tâm (bias) của cấu trúc, và t là tham số quy định khoảng giá trị của hàm ẩn. Chiều dày hình học thực tế của tấm được ký hiệu là t_g , liên hệ mật thiết với tham số t . Tham số t được xác định như là một hàm số phụ thuộc vào mật độ thể tích tương đối của vật liệu ρ_s và giá trị lệch tâm c :

$$t = f(\rho_s, c) \quad (2)$$

Ba dạng cấu trúc TPMS ba chiều chính được khảo sát trong nghiên cứu này bao gồm Primitive (P), Gyroid (G) và Diamond (D). Hàm ẩn của các bề mặt này được biểu diễn tương ứng như sau:

- Đối với cấu trúc Primitive (P):

$$F_P(x, y, z) = \cos(2\pi x) + \cos(2\pi y) + \cos(2\pi z) \quad (3)$$

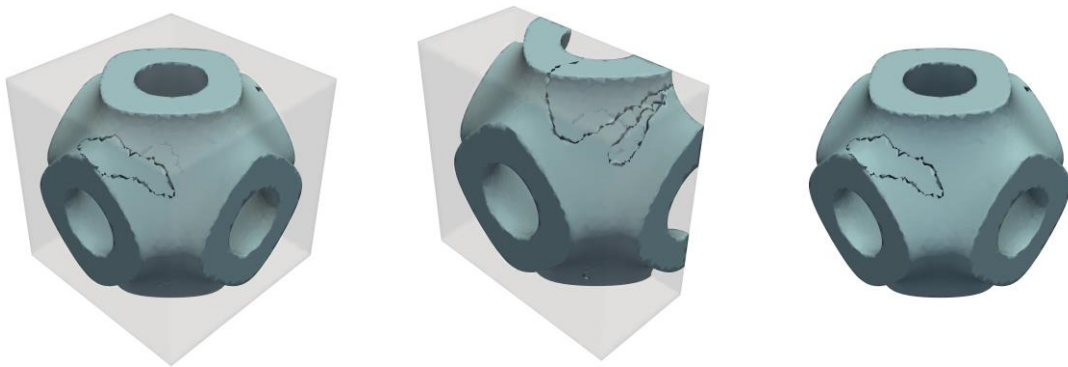
- Đối với cấu trúc Gyroid (G):

$$F_G(x, y, z) = \sin(2\pi x)\cos(2\pi y) + \sin(2\pi y)\cos(2\pi z) + \sin(2\pi z)\cos(2\pi x) \quad (4)$$

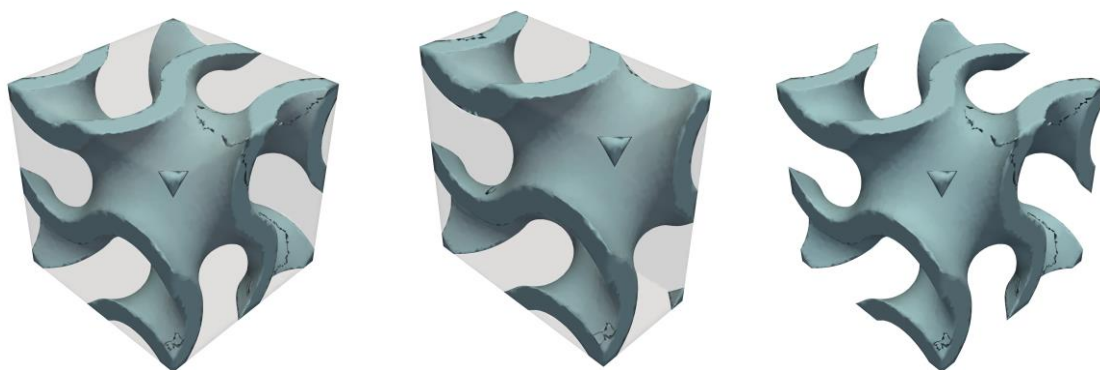
- Đối với cấu trúc Diamond (D):

$$F_D(x, y, z) = \cos(2\pi x)\cos(2\pi y)\cos(2\pi z) - \sin(2\pi x)\sin(2\pi y)\sin(2\pi z) \quad (5)$$

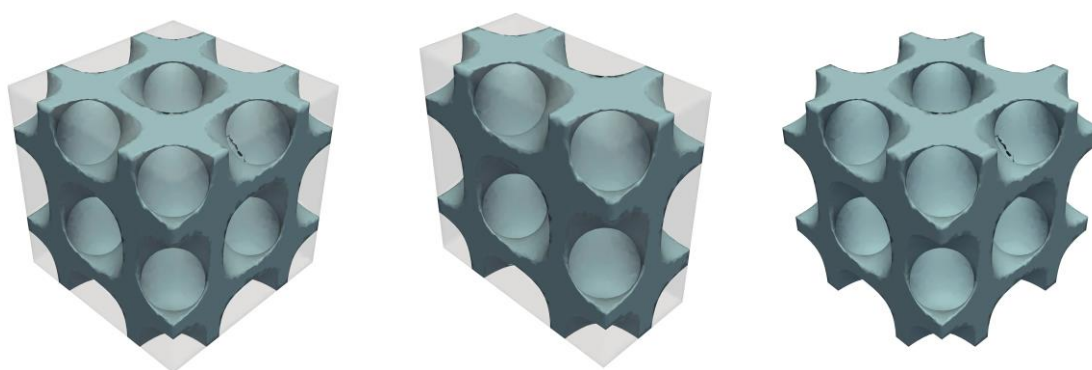
Trong nghiên cứu này, các cấu trúc hình học được mô phỏng trong một ô cơ sở tuần hoàn dạng lập phương có kích thước $L = 1,0$. Để minh họa trực quan cấu trúc dạng tấm, Hình 1, 2, 3 trình bày mô hình 3D của cấu trúc P, G, D dạng tấm với các thông số điển hình $\rho_s = 0,3$ và $c = 0$ bao gồm góc nhìn tổng thể (pha rỗng trong suốt), mặt cắt một nửa ô cơ sở, và riêng pha tấm đặc. Cần lưu ý thêm rằng, một số nét đen xuất hiện tại mặt cong tại Hình 1, 2 là do quá trình xuất ảnh hiển thị do cần đảm bảo độ phân giải cao. Đây không phải là khuyết tật của vật liệu nghiên cứu do đó không làm ảnh hưởng đến kết quả tính toán.



Hình 1. Trực quan hóa hình học 3D cấu trúc Primitive dạng tấm tại $\rho_s = 0,3$ và $c = 0$.



Hình 2. Trục quan hóa hình học 3D cấu trúc Gyroid dạng tấm tại $\rho_s = 0,3$ và $c = 0$.



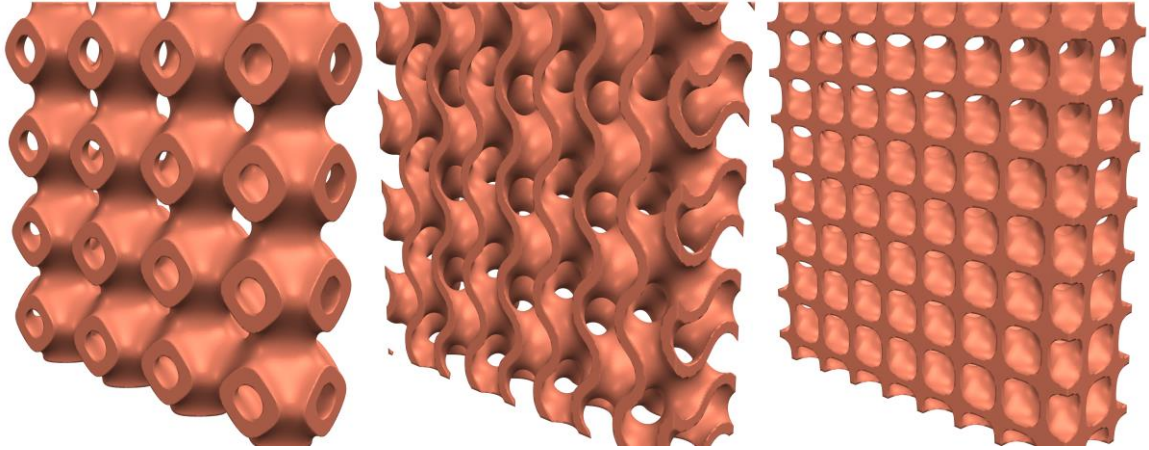
Hình 3. Trục quan hóa hình học 3D cấu trúc Diamond dạng tấm tại $\rho_s = 0,3$ và $c = 0$.

Mối quan hệ định lượng giữa tham số t , độ rỗng mục tiêu ρ_s và thông số lệch tâm c được xác định chính xác bằng phương pháp lấy tích phân thể tích. Bảng 1 tóm tắt các giá trị tham số dịch chuyển t tìm được cho các cấu trúc Primitive với các dải thông số khảo sát.

Bảng 1. Giá trị tham số t của cấu trúc TPMS dạng tấm theo các giá trị ρ_s và c .

c	0			0.2			0.4		
ρ_s	P	G	D	P	G	D	P	G	D
0,1	0,3495	0,1715	0,1715	0,3501	0,1703	0,1703	0,3511	0,1689	0,1689
0,2	0,7012	0,3457	0,3457	0,7009	0,3436	0,3436	0,6972	0,3374	0,3374
0,3	1,0506	0,5147	0,5147	1,0494	0,5148	0,5148	1,0475	0,5048	0,5048
0,4	1,4000	0,6900	0,6900	1,3988	0,6833	0,6833	1,4128	0,6783	0,6783
0,5	1,7455	0,8569	0,8569	1,7555	0,8526	0,8526	1,8273	0,8915	0,8915

Để minh họa trực quan khả năng ứng dụng thực tiễn của vật liệu TPMS dạng tấm làm cấu kiện kiến trúc thoáng khí, Hình 4 giới thiệu mô hình tấm tường thông gió đứng thẳng (lưới 4x1x4 ô cơ sở) tại độ rỗng $\rho_s = 0,3$ và $c = 0,0$ đối với cả ba cấu hình Primitive, Gyroid và Diamond được dựng bằng chất liệu đất nung.



Hình 4. Trực quan hóa mô hình tấm tường thông gió của các cấu hình: (a) Primitive, (b) Gyroid, và (c) Diamond.

3. PHƯƠNG TRÌNH TRUYỀN KHÍ TRONG CẤU TRÚC RỖNG

Hiện tượng chất khí chuyển động qua các kênh dẫn rỗng liên thông của vật liệu kiến trúc dưới tác dụng của sự chênh lệch áp suất được mô tả bởi các phương trình động lực học chất lưu cơ bản. Ở trạng thái dừng và giả thiết chất khí là chất lưu kiểu Newtonian không nén được, dòng chảy ở quy mô vi mô trong các lỗ rỗng tuân theo hệ phương trình Navier-Stokes dạng dừng:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (6)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (7)$$

Trong đó u là vectơ vận tốc vi mô dòng khí, p là áp suất tĩnh, ρ là khối lượng riêng và μ là độ nhớt động lực học của khí. Trong điều kiện thông gió tự nhiên công trình thông thường, giả thiết rằng vận tốc dòng khí qua các khe rỗng là nhỏ, dẫn đến số Reynolds cục bộ $Re \ll 1$ (dòng chảy tầng Stokes chậm). Khi đó, số hạng quán tính phi tuyến ở vế trái phương trình (6) có thể bỏ qua và hệ phương trình chi phối dòng khí rút gọn về phương trình Stokes tuyến tính dạng dừng:

$$\mu \nabla^2 u - \nabla p = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (9)$$

Hệ phương trình Stokes vi mô tuyến tính này hoàn toàn tương thích và là cơ sở để dẫn ra định luật Darcy ở quy mô vĩ mô. Do tính chất tuyến tính của phương trình Stokes dạng dừng và điều kiện biên không trượt trên bề mặt rắn của tấm TPMS, vận tốc cục bộ u tỷ lệ tuyến tính với gradient áp suất áp đặt. Khi tiến hành trung bình hóa thể tích trường vận tốc cục bộ u trên ô cơ sở tuần hoàn, ta thu được mối quan hệ tuyến tính vĩ mô giữa vận tốc trung bình (vận tốc Darcy) $\langle u_x \rangle$ và gradient áp suất tĩnh dọc theo hướng dòng chảy dp/dx :

$$\langle u_x \rangle = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (10)$$

Trong đó K (m^2) là hệ số thấm hiệu dụng, đặc trưng cho khả năng cho chất lưu đi qua của cấu trúc xốp. Để loại bỏ ảnh hưởng của kích thước hình học tuyệt đối, ta sử dụng hệ số thấm không thứ nguyên K^* được định nghĩa là:

$$K^* = \frac{K}{L^2} \quad (11)$$

với L là kích thước đặc trưng của ô cơ sở tuần hoàn. Giá trị K^* hoàn toàn phụ thuộc vào đặc điểm hình học, độ rỗng và độ rối của cấu trúc hình học xốp. Các đại lượng tương ứng trong các bài toán truyền dẫn cơ bản được thể hiện trong Bảng 2 [7].

Bảng 2. Một số hiện tượng truyền dẫn cơ bản.

Hiện tượng	Đại lượng thế	Đại lượng dòng	Hệ số dẫn	Nguồn
Thấm (Darcy)	Áp suất	Lưu lượng thể tích	Hệ số thấm ($m^2 \cdot s$)	Nguồn bơm/hút ($m^3/(m^3 \cdot s)$)
Dẫn nhiệt (Fourier)	Nhiệt độ	Mật độ dòng nhiệt	Hệ số dẫn nhiệt ($W/(m \cdot K)$)	Nguồn nhiệt thể tích (W/m^3)
Dẫn điện (Ohm)	Thế điện	Mật độ dòng điện	Hệ số dẫn điện (S/m)	Nguồn dòng/kích thích (A/m^3)

4. MÔ HÌNH SỐ LATTICE BOLTZMANN CHO DÒNG KHÍ

Để giải bài toán mô phỏng dòng khí đi qua không gian rỗng phức tạp của cấu trúc TPMS, phương pháp mô phỏng số Lattice Boltzmann (LBM) được sử dụng [9]. Phương pháp Lattice Boltzmann dựa trên ý tưởng thuyết động học chất khí của Ludwig Boltzmann, coi dòng chảy khí hay chất lưu là tập hợp vô số các hạt phân tử chuyển động ngẫu nhiên. Sự trao đổi động lượng và sự va chạm giữa chúng được mô hình hóa dưới dạng các hạt phân tử lan truyền trên một mạng lưới rời rạc. Khác với các phương pháp CFD truyền thống, việc giải trực tiếp sự tiến hóa của các hạt phân tử độc lập giúp LBM rất linh hoạt và phù hợp để giải quyết các điều kiện biên hình học phức tạp như đường cong của vật liệu TPMS mà không cần tính toán chia lưới lưới phân tử hữu hạn phức tạp.

Trong nghiên cứu này, không gian 3 chiều được rời rạc hóa sử dụng mô hình D3Q19, tương ứng với 19 hướng vector vận tốc vi mô $e_i (i = 0, \dots, 18)$. Mỗi hạt phân tử trên mạng lưới được liên kết với một hàm phân bố xác suất rời rạc $f_i(x, t)$, thể hiện xác suất mà hạt phân tử lan truyền theo một trong 19 phương bất kỳ. Từ các hàm phân bố vi mô này, các đại lượng vĩ mô của chất lưu được tính toán trực tiếp. Cụ thể, mật độ chất lưu vĩ mô ρ (tỉ lệ thuận với áp suất) được tính từ tổng các hàm phân bố:

$$\rho = \sum_i f_i \quad (12)$$

và động lượng vĩ mô ρu được xác định qua tổng các vector động lượng theo 19 hướng (trong đó f_i đóng vai trò là trọng số):

$$\rho u = \sum_i c_s f_i e_i \quad \text{với} \quad c_s = \Delta x / \Delta t. \quad (13)$$

Hệ số c_s đại diện cho vận tốc âm thanh của mạng tinh thể đo bằng tỉ số bước lưới Δx cho bước thời gian Δt . Nói một cách đơn giản, hệ số c_s đóng vai trò là một hằng số tỷ lệ chuyển đổi hoặc vận tốc đặc trưng của mạng lưới rời rạc nhằm thiết lập mối liên hệ giữa các bước dịch chuyển không gian và thời gian của các hạt phân tử trên mạng tinh thể.

Quá trình dịch chuyển của các hạt phân tử trên mạng lưới bao gồm hai bước chính: lan truyền (streaming) và va chạm (collision). Quá trình này được mô tả bởi phương trình Lattice Boltzmann rời rạc với toán tử va chạm BGK đơn thời gian dừng (Bhatnagar-Gross-Krook) [10].

Ở trạng thái có thêm lực thể tích W_i (đóng vai trò thay thế gradient áp suất để tạo ra dòng chảy trong mô hình ô cơ sở tuần hoàn), phương trình tiến hóa có dạng:

$$f_i(x + e_i) = f_i(x) - \frac{1}{\tau} [f_i(x) - f_i^{eq}(x)] + W_i \quad (14)$$

Trong đó, τ là thời gian dừng (relaxation time) vô hướng để hạt phần tử đạt đến trạng thái cân bằng. Độ nhớt động học của chất lưu liên hệ chặt chẽ với τ thông qua biểu thức $\eta = (\tau - 0,5)/3$. Thành phần f_i^{eq} là hàm phân bố cân bằng, được xác định dựa trên xấp xỉ Taylor của hàm phân bố Maxwell-Boltzmann ở giới hạn vận tốc c_s nhỏ:

$$f_i^{eq} = w_i \rho [1 + 3(e_i \cdot u)/c_s + 4.5(e_i \cdot u)^2/c_s^2 - 1.5u \cdot u/c_s^2] \quad (15)$$

Với w_i là các trọng số định hướng của mô hình D3Q19. Tóm lại, thuật toán Lattice Boltzmann mô phỏng dòng khí đi qua vật liệu TPMS được thực hiện theo trình tự lặp lại như sau:

1. Thiết lập giá trị đầu cho các đại lượng vĩ mô ρ , u và các hàm phân bố f_i , f_i^{eq}
2. Thực hiện pha va chạm tại từng nút lưới thông qua toán tử BGK dựa trên hàm phân bố cân bằng f_i^{eq} hiện tại. Do bước tính này hoàn toàn độc lập tại mỗi nút lưới, nó đặc biệt phù hợp để vector hóa.
3. Thực hiện pha lan truyền, dịch chuyển và cập nhật hàm phân bố f_i đến các vị trí láng giềng mới theo phương e_i .
4. Cập nhật các điều kiện biên: sử dụng phương pháp phản xạ ngược tại các vách cứng của cấu trúc TPMS, đảm bảo điều kiện không trượt lý tưởng; đồng thời áp dụng biên tuần hoàn tại các ranh giới của không gian mô phỏng.
5. Tính lại mật độ ρ , u từ hàm phân bố f_i mới theo công thức (12) và (13).
6. Tính lại hàm phân bố cân bằng f_i^{eq} bằng công thức (15) và lặp lại từ bước 2 cho đến khi sai số của trường vận tốc đạt ngưỡng hội tụ.

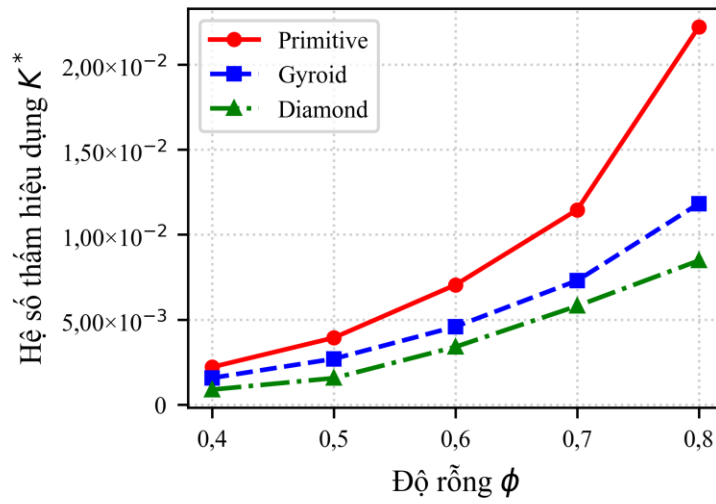
Việc ứng dụng thuật toán LBM với ma trận đa chiều (Numpy) trên Python giúp giải quyết bài toán mô phỏng dòng chảy tĩnh trong môi trường xốp TPMS một cách hiệu quả, tránh được việc phải giải trực tiếp phương trình Poisson phức tạp như các phương pháp thể tích hữu hạn truyền thống.

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG THẨM KHÍ

Kết quả mô phỏng số hệ số thẩm không thứ nguyên cho ba cấu trúc TPMS (P, G, D) ở các độ rỗng khác nhau từ 0,4 đến 0,8 được thể hiện chi tiết tại Bảng 3 và đồ thị Hình 5. Toàn bộ các tính toán số được thực hiện cho trường hợp đối xứng hoàn hảo với giá trị lệch tâm $c = 0,0$. Để đảm bảo đánh giá thống nhất khả năng thẩm khí của cấu kiện xây dựng, phương pháp tính toán này tham khảo tiêu chuẩn châu Âu EN 12114 quy định về phương pháp xác định lưu lượng dòng khí đi qua cấu kiện dưới sự chênh lệch áp suất không khí tĩnh áp đặt. Theo tiêu chuẩn EN 12114, lưu lượng dòng khí qua cấu kiện liên hệ với độ chênh áp qua phương trình lũy thừa $Q = C \cdot \Delta p^n$, với n là số mũ dòng chảy. Trong chế độ chảy tầng Stokes chậm (số Reynolds vi mô $Re \ll 1$) của dòng khí qua khe rỗng, số mũ $n = 1,0$ tương ứng với mối quan hệ tuyến tính giữa lưu lượng (hoặc vận tốc trung bình) và chênh lệch áp suất, phù hợp với định luật Darcy và mô hình Stokes dạng dừng.

Bảng 3. Kết quả tính toán hệ số thấm không thứ nguyên K^* cho các cấu trúc TPMS dạng tấm tại $c = 0,0$.

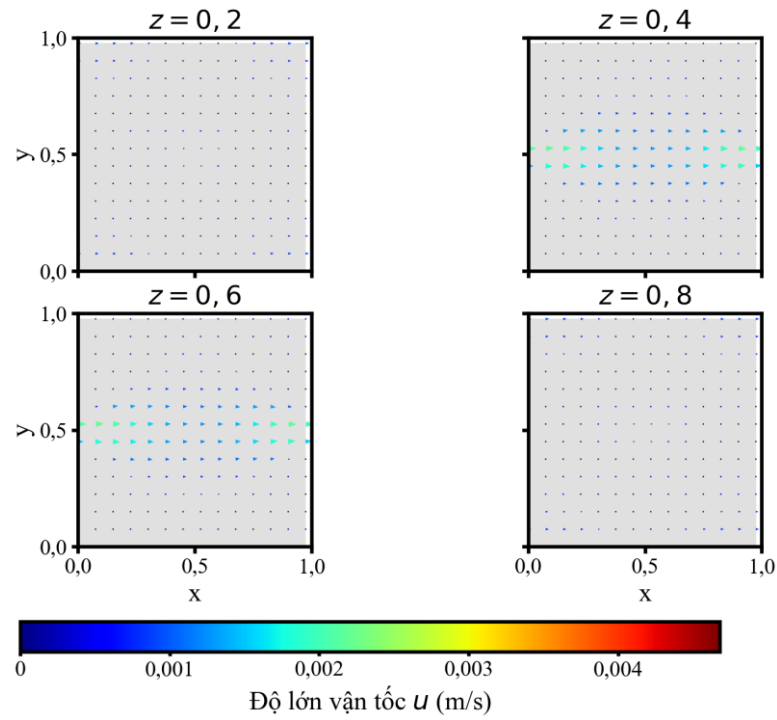
Cấu trúc TPMS	$(\phi = 0,4)$	$(\phi = 0,5)$	$(\phi = 0,6)$	$(\phi = 0,7)$	$(\phi = 0,8)$
Primitive	2,2087e-03	3,9332e-03	7,0448e-03	1,1457e-02	2,2219e-02
Gyroid	1,5696e-03	2,6945e-03	4,5868e-03	7,2943e-03	1,1821e-02
Diamond	8,8365e-04	1,5598e-03	3,3971e-03	5,8017e-03	8,4711e-03



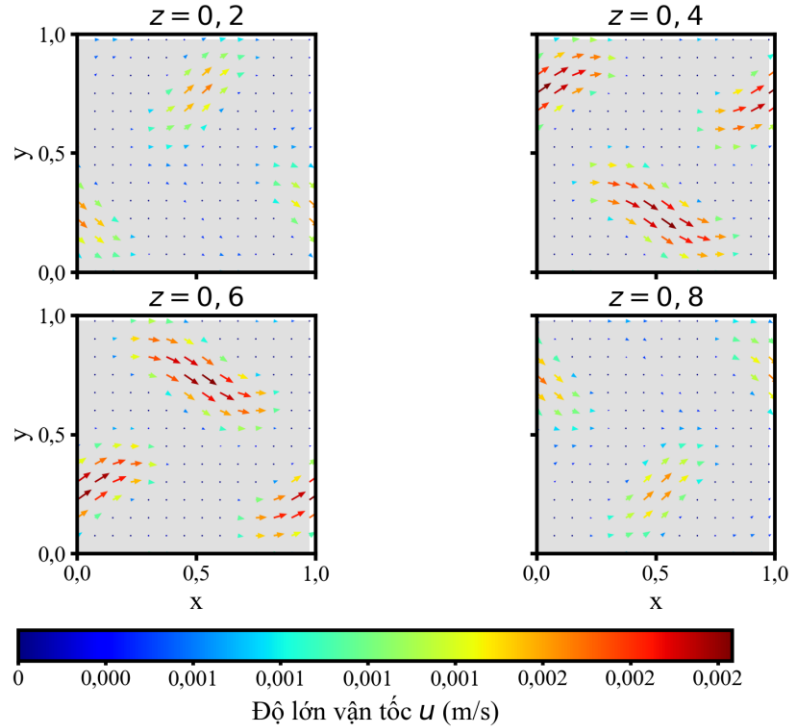
Hình 5. Đồ thị so sánh hệ số thấm không thứ nguyên K^* theo độ rỗng.

Trong các mô phỏng LBM 3D xác định K^* , tải trọng áp đặt tại biên tuần hoàn dọc theo hướng dòng chảy (trục x) tương đương với một gradient áp suất tĩnh vĩ mô 0,647 Pa/m (được mô hình hóa qua gia tốc lực thể tích đều $g = 1,0 \times 10^{-5}$ trong đơn vị lattice, với kích thước ô cơ sở đặc trưng $d = 3 \text{ mm}$, mật độ không khí $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ và độ nhớt động học $\eta = 1,508 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), với $N = 40$ là độ phân giải lưới dọc theo một cạnh của ô cơ sở tuần hoàn).

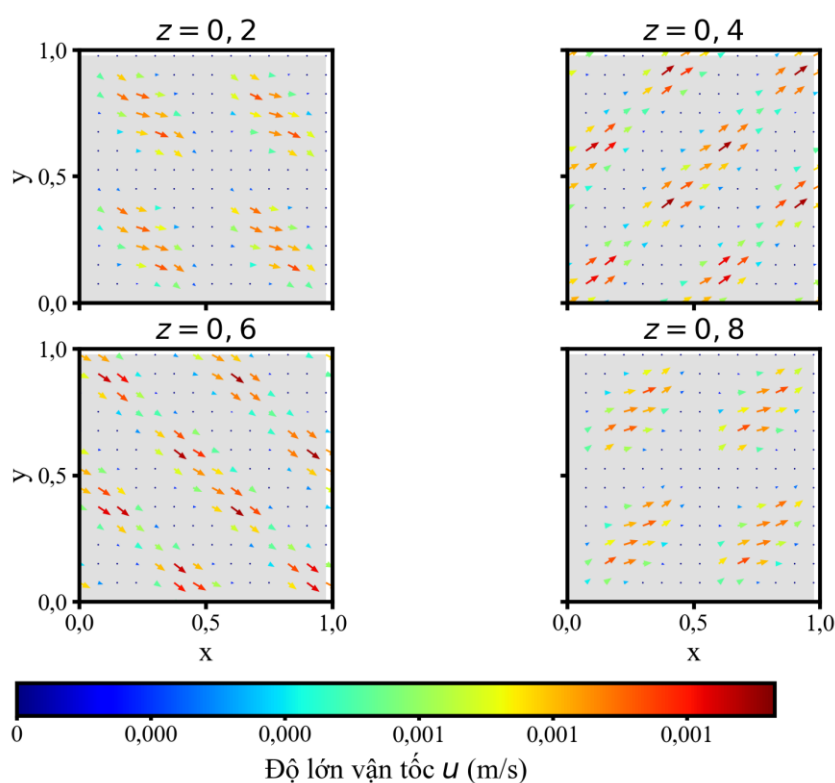
Kết quả thu được cho thấy, hệ số thấm không thứ nguyên K^* của cả ba cấu trúc đều tăng phi tuyến mạnh khi độ rỗng tăng. Điều này hoàn toàn phù hợp với thực tế vật lý, vì độ rỗng lớn hơn sẽ mở rộng tiết diện các kênh dẫn khí, làm giảm trở lực nhớt giữa dòng khí và thành rắn, do đó làm tăng đáng kể khả năng lưu thông. Ngoài ra, ở cùng một giá trị độ rỗng, cấu trúc Primitive (P) luôn cho hệ số thấm khí lớn nhất, tiếp theo là cấu trúc Gyroid (G), và thấp nhất là cấu trúc Diamond (D). Sự khác biệt này có thể giải thích rõ ràng thông qua phân bố trường vận tốc dòng chảy biểu diễn tại các mặt cắt $z = 0,20; 0,40; 0,60; 0,80$ của ba cấu trúc ở độ rỗng 0,6 trong Hình 6, Hình 7 và Hình 8. Trong các hình này, độ lớn vận tốc dòng khí (đơn vị vật lý m/s) được thể hiện trực tiếp qua màu sắc của các mũi tên chỉ hướng dòng chảy theo thang màu tương ứng. Các mũi tên màu đỏ biểu thị vận tốc dòng chảy cục bộ lớn nhất (thường đạt cực đại ở vùng trung tâm các kênh dẫn chính nơi dòng khí ít bị cản trở), các mũi tên màu xanh dương biểu thị vận tốc rất nhỏ tiến gần bằng 0 m/s (vùng dòng sát vách do ma sát nhớt không trượt no-slip hoặc tại các ngách kẹt).



Hình 6. Trường phân bố độ lớn vận tốc dòng khí (m/s) trong cấu trúc Primitive 3D tại các mặt cắt $z = 0,20; 0,40; 0,60$ và $0,80$ ($\rho = 0,6, c = 0,0$).



Hình 7. Trường phân bố độ lớn vận tốc dòng khí (m/s) trong cấu trúc Gyroid 3D tại các mặt cắt $z = 0,20; 0,40; 0,60$ và $0,80$ ($\rho = 0,6, c = 0,0$).



Hình 8. Trường phân bố độ lớn vận tốc dòng khí (m/s) trong cấu trúc Diamond 3D tại các mặt cắt $z = 0,20; 0,40; 0,60$ và $0,80$ ($\rho = 0,6, c = 0,0$).

Dựa vào phân bố trường vận tốc trên các mặt cắt khác nhau, ta có thể thấy cấu trúc Primitive sở hữu các kênh dẫn thẳng, song song trực tiếp với hướng của lực đẩy dòng chảy (trục x). Trường vận tốc trên cả 4 mặt cắt $z = 0,20; 0,40; 0,60; 0,80$ của Primitive đều thể hiện dòng chảy thẳng liên tục, ít bị cản trở, dẫn đến vận tốc trung bình và hệ số thấm lớn nhất. Ngược lại, cấu trúc Gyroid có hệ thống kênh dẫn liên thông ba chiều phức tạp dạng xoắn ốc. Sự biến đổi của trường vận tốc trên các mặt cắt (z thay đổi) cho thấy dòng khí phải liên tục uốn lượn đổi hướng dọc theo các bề mặt cong tròn, tạo ra các vùng cản dòng nhót và làm giảm hệ số thấm so với cấu trúc P. Cấu trúc Diamond có hệ thống kênh dẫn chéo góc lớn, tạo ra độ ngoằn ngoèo cao nhất và sự thu hẹp tiết diện lớn nhất tại các cổ chai dòng chảy (thể hiện qua các vùng vận tốc cục bộ rất cao xen kẽ vùng vận tốc bằng không trên các lát cắt $z = 0,20; z = 0,80$), dẫn đến trở lực lớn nhất và hệ số thấm thấp nhất ở cùng độ rỗng.

Về mặt lựa chọn thiết kế dạng kiến trúc thông gió: Nếu tiêu chí duy nhất là tối đa hóa lưu lượng gió đi qua vỏ bao công trình (khả năng thấm khí cực đại), cấu trúc Primitive (P) là lựa chọn hợp lý nhất. Tuy nhiên, nếu cần tính đến khả năng chịu lực đồng đều (đẳng hướng) và hiệu quả trao đổi khí/nhiệt dọc theo mặt đứng, cấu trúc Gyroid (G) là sự lựa chọn tối ưu hơn vì nó cân bằng tốt nhất giữa độ bền cơ học và khả năng thấm khí. Ngoài ra thì việc lựa chọn còn tùy thuộc nhu cầu sử dụng liên quan tới khả năng ngăn cách tầm nhìn cũng tiêu chí về chế tạo và độ bền.

Để có sự đánh giá đồng bộ và thực tiễn hơn theo các tiêu chuẩn kỹ thuật xây dựng hiện hành, nghiên cứu này tiến hành một thí nghiệm số mô phỏng lại quy trình thử nghiệm phòng thí nghiệm của tiêu chuẩn châu Âu EN 12114. Thử nghiệm số được thiết lập cho cả ba cấu trúc

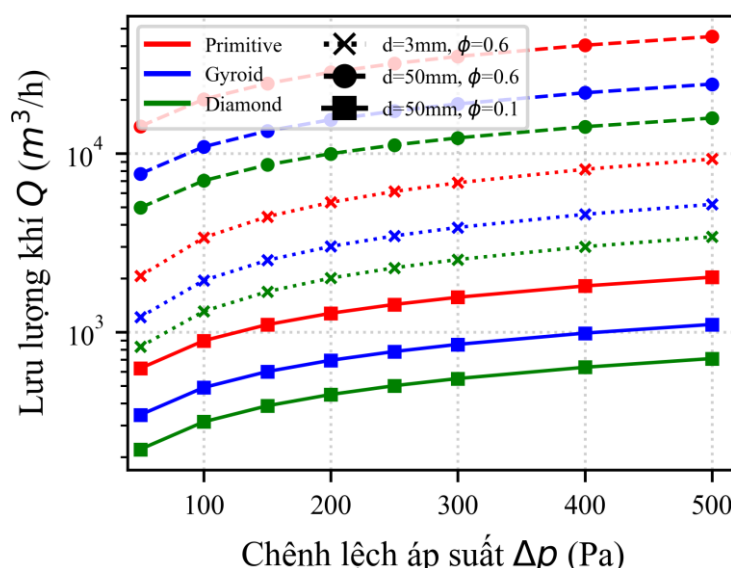
TPMS (Primitive, Gyroid, Diamond) tại 3 trường hợp (1) - độ rỗng $\rho = 0,6$, kích thước ô cơ sở $d = 3 \text{ mm}$; (2) - $\rho = 0,6$, $d = 50 \text{ mm}$; (3) - $\rho = 0,1$, $d = 50 \text{ mm}$. Mẫu thử có kích thước hình học danh nghĩa $L = 0,2 \text{ m}$ (chiều dày tường), diện tích trục diện $A = 1,0 \text{ m}^2$. Dòng khí đi qua cấu trúc được khảo sát dưới 8 cấp chênh áp logarit từ 50 Pa đến 500 Pa (50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 Pa) theo đúng quy trình của tiêu chuẩn. Mỗi quan hệ giữa chênh lệch áp suất và lưu lượng khí $Q \text{ (m}^3/\text{h)}$ được xác định bằng cách khớp dữ liệu số với phương trình lũy thừa tiêu chuẩn EN 12114:

$$Q = C (\Delta p)^n \quad (15)$$

Trong đó C là hệ số thấm khí và n là số mũ dòng chảy phản ánh chế độ dòng chảy ($n = 1,0$ đối với dòng tầng Stokes hoàn toàn và $n = 0,5$ đối với dòng rối hoàn toàn). Để đánh giá và so sánh khả năng thấm khí của các cấu kiện xây dựng theo tiêu chuẩn EN 12114, các chỉ số lưu lượng khí riêng được xác định tại chênh áp tham chiếu tiêu chuẩn 50 Pa (ký hiệu là Q_{50}). Các chỉ số này bao gồm: (i) lưu lượng khí riêng theo diện tích trục diện $q_{A,50} = Q_{50}/A \text{ (m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2))$, với diện tích mẫu $A = 1,0 \text{ m}^2$. Các chỉ số này phản ánh trực tiếp lưu lượng khí đi qua một đơn vị diện tích tường hoặc một đơn vị thể tích khối xây dựng trong thực tế. Kết quả khớp thông số và các đặc trưng thấm khí tương ứng được tóm tắt tại Bảng 5 và biểu đồ lưu lượng tại Hình 9.

Bảng 4. Các thông số đặc trưng thấm khí của các cấu trúc TPMS dạng tấm theo tiêu chuẩn EN 12114.

Trường hợp (Kích thước d , độ rỗng ρ)	Cấu trúc TPMS	Hệ số C [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]	Số mũ n	Hệ số thấm K [m^2]	$q_{A,50}$ [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]
$d=3\text{mm}$ $\rho=0,6$	Primitive	165,1919	0,6524	6,3403e-08	2061,2
$d=3\text{mm}$ $\rho=0,6$	Gyroid	106,1560	0,6291	4,1281e-08	1213,3
$d=3\text{mm}$ $\rho=0,6$	Diamond	76,6697	0,6137	3,0574e-08	827,0
$d=50\text{mm}$ $\rho=0,6$	Primitive	1988,5228	0,5024	1,7612e-05	14185,6
$d=50\text{mm}$ $\rho=0,6$	Gyroid	1080,0707	0,5020	1,1467e-05	7693,5
$d=50\text{mm}$ $\rho=0,6$	Diamond	698,4495	0,5017	8,4927e-06	4970,5
$d=50\text{mm}$ $\rho=0,1$	Primitive	85,1931	0,5104	1,8312e-07	626,0
$d=50\text{mm}$ $\rho=0,1$	Gyroid	47,5132	0,5063	1,6408e-07	343,9
$d=50\text{mm}$ $\rho=0,1$	Diamond	30,2551	0,5082	8,1232e-08	220,5



Hình 9. Đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa lưu lượng khí Q và chênh lệch áp suất đối với ba cấu trúc TPMS dạng tấm theo tiêu chuẩn EN 12114.

Kết quả tại Bảng 4 và Hình 9 cho thấy ảnh hưởng lớn của cấu trúc hình học bao gồm dạng hình học (P, G, D), kích thước mẫu cũng như lỗ rỗng tới khả năng thấm khí của vật liệu. Ở cùng một độ rỗng cấu trúc Primitive cho lưu lượng khí lớn nhất tại mọi cấp chênh áp, tương ứng với hệ số thấm khí lớn nhất và hệ số thấm tuyệt đối lớn nhất. Cấu trúc Gyroid tiếp tục thể hiện tính chất trung hòa tối ưu. Mặc dù các chỉ số lưu lượng của Gyroid thấp hơn so với Primitive, cấu trúc này vẫn cung cấp dòng chảy xoắn liên tục phân bố đều, tạo điều kiện hòa trộn và trao đổi nhiệt khí tốt hơn mà vẫn duy trì khả năng thông gió tự nhiên hiệu quả cho các tấm tường kiến trúc thoáng khí.

Đặc biệt cùng 1 thông số hình học, kích thước của ô cơ sở ảnh hưởng rất quan trọng tới khả năng thấm khí của vật liệu. Khi kích thước nhân tuần hoàn tăng lên $d=50\text{mm}$, hệ số n tiến đến giá trị 0,5 cơ chế cản dòng đã chuyển dịch hoàn toàn từ cản ma sát nhớt sang cản dạng/cản áp suất. Trong chế độ dòng chảy quán tính mạnh này, hình thái hình học của bề mặt đóng vai trò quyết định đến sự tổn thất năng lượng và hiện tượng khí động học. Cấu trúc Gyroid có bề mặt cong liên tục và không có các điểm dừng hoặc góc ngoặt đột ngột như Primitive. Nhờ đó, Gyroid giúp hướng dòng khí di chuyển trơn tru qua các kênh xoắn, hạn chế tối đa sự chia tách dòng và giảm kích thước của các vùng xoáy quán phía sau cấu trúc. Điều này giúp Gyroid duy trì hệ số cản quán tính thấp hơn, giảm tổn thất áp suất động khi có gió mạnh đi qua tấm tường. Ngoài ra, chuyển tiếp hình học trơn của Gyroid làm phân tán và giảm năng lượng của các cấu trúc xoáy, từ đó giảm thiểu hiện tượng phát tiếng ồn, mang lại lợi thế vượt trội về tiện nghi âm thanh cho các công trình sử dụng tấm tường bao che xoắn.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện thành công việc dựng mô hình hình học và tính toán mô phỏng số dòng chảy khí qua ba cấu trúc TPMS rỗng tiên tiến (P, G, D) dưới dạng 3 chiều bằng phương pháp Lattice Boltzmann (LBM). Mối quan hệ định lượng giữa tham số hình học c , độ rỗng ρ và hệ số thấm không thứ nguyên K^* , và các đặc trưng khác đã được thiết lập. Kết quả khẳng định cấu trúc Primitive luôn cho khả năng thấm khí cao nhất ở cùng độ rỗng nhờ đường dẫn thẳng trực tiếp, trong khi Gyroid và Diamond cho hệ số thấm thấp hơn do độ rối cao của các kênh dẫn

xoắn. Tuy nhiên khi kích thước phần tử trở nên lớn hơn thì mặt cong trơn dạng Gyroid có nhiều ưu điểm. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở dữ liệu khoa học quan trọng cho việc thiết kế vỏ bao công trình thông gió tự nhiên thông minh sử dụng vật liệu kiến trúc thông minh sử dụng công nghệ in 3D. Hướng phát triển tiếp theo là tiến hành thực nghiệm đo đặc độ thấm khí trên các mẫu chế tạo thực tế để kiểm chứng mô hình số.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2026-XD-003.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T.L.T. Võ, L.K.N. Nguyễn, M.K. Châu, T.P. Huỳnh, Gạch thông gió: Thực trạng và giải pháp ứng dụng hiệu quả trong kiến trúc hiện đại, CTU Journal of Science, 59 (2023) 269–278. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.053>.
- [2]. K. Tran-Quoc, L.B. Nguyen, V.H. Luong, H. Nguyen-Xuan, Machine learning for predicting mechanical behavior of concrete beams with 3D printed TPMS, Vietnam Journal of Mechanics 44, (2022) 538–584. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/17999>.
- [3]. M. Benedetti, A. du Plessis, R.O. Ritchie, M. Dallago, S.M.J. Razavi, F. Berto, Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication, Materials Science and Engineering: R: Reports, 144 (2021) 100606. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100606>.
- [4]. A. Garg, A. Sharma, W. Zheng, L. Li, A review on artificial intelligence-enabled mechanical analysis of 3D printed and FEM-modelled auxetic metamaterials, Virtual and Physical Prototyping, 20 (2025) e2445712. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2445712>.
- [5]. I. Mat Samudin, N.A. Mohd Radzuan, A.B. Sulong, Q. Ma, A.H. Azman, W.F.H. Wan Zamri, Stress strain curve analysis of sheet based TPMS structures in quasi static compression test: A review, Journal of Materials Research and Technology, 36 (2025) 5757–5796. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.168>.
- [6]. N. Khan, A. Riccio, A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions, Progress in Aerospace Sciences, 149 (2024) 101021. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2024.101021>.
- [7]. H. Hoàng Thị Minh, T. Tống Anh, T. Trần Anh, A. Trương Đình Thảo, V. Trần Bảo, Xấp xỉ giải tích và mô phỏng số bài toán lan truyền trong vật liệu cấu trúc mặt cong Primitive hai chiều, Transport and Communications Science Journal, 76 (2025) 1229–1242. <https://doi.org/10.47869/tcsj.76.9.7>.
- [8]. D.S. Springer, H.A. Loaiciga, S.J. Cullen, L.G. Everett, Air Permeability of Porous Materials Under Controlled Laboratory Conditions, Groundwater, 36 (1998) 558–565. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02829.x>.
- [9]. V.T. Vu, V.D. Duong, I.L. Ngo, A comprehensive study of low-Reynold flow through two tandem cylinders with various configurations using the Lattice Boltzmann method, Mar Geophys Res, 46 (2025) 7. <https://doi.org/10.1007/s11001-025-09568-5>.
- [10]. E.G. Flekkøy, Lattice Bhatnagar-Gross-Krook models for miscible fluids, Physical Review E, 47 (1993) 4247–4257. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.47.4247>.