

# VẬT LIỆU TRUYỀN NHIỆT ÂM: LÝ THUYẾT VÀ ỨNG DỤNG

## THERMAL METAMATERIALS: THEORY AND APPLICATION

Nguyễn Đức Trung<sup>1</sup>, Cao Xuân Bắc<sup>1</sup>, Lại Quang Linh<sup>1</sup>, Nguyễn Đình Nam<sup>1</sup>,  
Nguyễn Đức Nam<sup>2</sup>, Lê Tiến Dương<sup>3</sup>, Dương Quang Hà<sup>4\*</sup>

### TÓM TẮT

Vật liệu biến hóa (metamaterials) là những vật liệu nhân tạo được chế tạo theo các cấu trúc đặc biệt thể hiện những tính chất khác biệt so với các vật liệu tự nhiên thông thường, ví dụ như vật liệu chiết suất âm có nhiều ứng dụng trong kỹ thuật truyền sóng điện từ, quang học, âm thanh... Vật liệu truyền nhiệt âm (thermal metamaterials) là một dạng vật liệu mới được cộng đồng khoa học quan tâm trong những năm gần đây bởi khả năng điều khiển và dẫn hướng dòng nhiệt truyền đi trong vật liệu theo cách hoàn toàn khác biệt với những hiện tượng vật lý thông thường. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu mô phỏng quá trình dẫn nhiệt xảy ra trên cấu trúc bề mặt của vật liệu truyền nhiệt âm và trình bày các ứng dụng của cấu trúc này trong việc chế tạo "áo choàng nhiệt", "thiết bị hội tụ nhiệt", "thiết bị phân tán nhiệt" và "thiết bị xoay luống nhiệt". Ngoài ra, ảnh hưởng của các thông số cấu trúc tới điều khiển quá trình nhiệt trong vật liệu cũng được đề cập chi tiết.

**Từ khóa:** Vật liệu truyền nhiệt âm, áo choàng nhiệt, thiết bị hội tụ nhiệt, thiết bị khuếch tán nhiệt, thiết bị xoay luống nhiệt.

### ABSTRACT

Metamaterials are the artificial materials fabricated in special structures that exhibit the exotic properties different from the naturally occurring materials. For example, the well-known metamaterial is negative-refractive material used to control the propagation of electromagnetic, optical and acoustic waves... Thermal metamaterial is a new kind of metamaterials that has been interested in the scientific community in recent years because of its ability to control and guide heat flux inside the material in the manner which is not found in the conventional physical phenomena. In this paper, the simulation of heat conduction process occurring in the surface structure of two-dimensional (2D) thermal metamaterials and the applications of this structure to produce "thermal cloak", "thermal concentrator", "thermal diffuser" and "thermal rotator" are reported. In addition, the influence of geometrical structural parameters on the thermal process control is also presented.

**Keywords:** Thermal metamaterials, thermal cloak, thermal concentrator, thermal diffuser, thermal rotator.

<sup>1</sup>Viện Công nghệ Sinh học và Công nghệ Thực phẩm, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

<sup>2</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>3</sup>Trường THPT Ân Thi

<sup>4</sup>Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

\*Email: duong-quang.ha@usth.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/8/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/10/2020

Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2020

### 1. GIỚI THIỆU

Từ đầu thế kỷ XXI, con người bắt đầu quan tâm nhiều hơn tới các nguồn năng lượng tái tạo do sự suy giảm của các nguồn năng lượng hóa thạch như dầu mỏ, than đá, khí ga tự nhiên, năng lượng hạt nhân... Năng lượng nhiệt là nguồn năng lượng phổ biến được sử dụng trong hầu hết các ứng dụng đời sống thực tế và đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống năng lượng tái tạo hiện đại. Việc điều khiển và sử dụng hiệu quả các nguồn năng lượng nhiệt lúc này đóng vai trò quan trọng trong khoa học và kỹ thuật để cải tiến các công cụ phục vụ cuộc sống hàng ngày. Với sự phát triển của công nghệ bán dẫn, transistor là linh kiện tích cực chủ đạo trong quá trình điều khiển và khống chế năng lượng điện một cách hiệu quả tạo nên sự bùng nổ về công nghệ điện tử ngày nay. Tương tự, lời giải cho bài toán về khả năng điều khiển và khống chế dòng nhiệt là một nhu cầu cấp bách đối với các hệ thống năng lượng nhiệt tái tạo hiện đại. Vì vậy, vật liệu truyền nhiệt âm (thermal metamaterials) đã mở ra một phương pháp mới cho khả năng điều khiển quá trình truyền nhiệt trong thực tế.

Theo lý thuyết nhiệt động lực học, năng lượng nhiệt truyền đi khi xuất hiện sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai vật thể và quá trình truyền nhiệt sẽ dừng lại khi nhiệt độ của hai vật đạt trạng thái cân bằng. Dựa vào lý thuyết trao đổi nhiệt, quá trình truyền nhiệt cơ bản giữa các vật thể, giữa vật thể với môi trường được chia thành các dạng trao đổi nhiệt cơ bản gồm dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ nhiệt [1]. Khi tồn tại sự chênh lệch nhiệt độ giữa các môi trường ổn định (có thể là chất rắn hoặc chất lỏng) có tiếp xúc vật lý với nhau, quá trình dẫn nhiệt giữa các môi trường sẽ xảy ra qua lớp tiếp xúc. Hiện tượng trao đổi nhiệt đối lưu thường xảy ra giữa một bề mặt và một chất lưu chuyển động khi có sự chênh lệch nhiệt độ giữa chúng. Bức xạ nhiệt là sự phát xạ năng lượng dưới dạng sóng điện từ của mọi bề mặt có nhiệt độ hữu hạn. Khi hai bề mặt không tiếp xúc có sự chênh lệch nhiệt độ mà không có sự xuất hiện môi trường nào khác thì quá trình trao đổi nhiệt dưới dạng bức xạ nhiệt sẽ diễn ra giữa hai môi trường [2].

Hiện tượng dẫn nhiệt là quá trình truyền năng lượng giữa các phân tử mang năng lượng cao trong cấu trúc vật liệu cho các phân tử gần kề có năng lượng thấp hơn. Dưới cái nhìn động học phân tử, hiện tượng dẫn nhiệt bắt nguồn từ sự va chạm hoặc khuếch tán của các phân tử vật liệu trong quá trình chuyển động ngẫu nhiên của chúng. Vì vậy,

tốc độ dẫn nhiệt của một vật thể không chỉ phụ thuộc vào độ chênh lệch nhiệt độ mà còn phụ thuộc vào cấu trúc hình học, độ dày và vật liệu cấu thành vật thể đó [3]. Đối với hầu hết các vật liệu rắn có cấu trúc khối thông dụng, quá trình dẫn nhiệt xảy ra là đẳng hướng [4] hay nói cách khác là khi xuất hiện gradient nhiệt độ, dòng nhiệt sẽ truyền đi như nhau theo mọi hướng. Như vậy, khả năng khống chế dòng nhiệt trong vật liệu rắn gặp nhiều khó khăn trong các bài toán thực tế. Để có thể điều khiển được dòng nhiệt dẫn truyền đi trong vật liệu, cần phải sử dụng vật liệu có cấu trúc dị hướng hoặc vật liệu có cấu trúc nano để tác động lên hệ số dẫn nhiệt làm thay đổi hướng truyền nhiệt bên trong vật liệu. Tuy nhiên, các vật liệu này thường yêu cầu phương pháp chế tạo phức tạp dẫn tới nhiều khó khăn trong việc tích hợp vào hệ thống. Một phương pháp tiếp cận khác để điều khiển quá trình dẫn nhiệt trong vật liệu được trình bày trong bài báo này là phương pháp sử dụng vật liệu truyền nhiệt âm với khả năng điều khiển hướng truyền nhiệt và khả năng chế tạo dễ dàng hứa hẹn đem lại nhiều ứng dụng trong thực tế. Nguyên lý hoạt động, cấu trúc thiết kế, ảnh hưởng của các thông số hình dạng của vật liệu truyền nhiệt âm cũng được phân tích chi tiết trong phần tiếp theo. Ngoài ra, bài báo cũng trình bày một số cấu trúc điều khiển dẫn nhiệt cơ bản như áo choàng nhiệt, thiết bị khuếch tán nhiệt, thiết bị hội tụ nhiệt hoặc thiết bị xoay luồng nhiệt để có thể tích hợp thành các hệ thống điều khiển dòng nhiệt phức tạp hơn.

**2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT**

Năng lượng nhiệt được truyền đi trong chất rắn thông qua nhiều cơ chế khác nhau như thông qua các hạt tải điện (điện tử và lỗ trống), phonon, điện từ trường, sóng spin,... [5]. Tuy nhiên, định luật cơ bản nêu lên mối liên hệ giữa dòng nhiệt và gradient của trường nhiệt độ được đưa ra bởi Joseph Fourier trong trường hợp vật liệu đẳng hướng như sau:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T \tag{1}$$

trong đó,  $\vec{q}$  là vector mật độ dòng nhiệt,  $k$  là hệ số dẫn nhiệt và dấu (-) mang ý nghĩa biểu thị chiều của dòng nhiệt ngược với chiều của gradient nhiệt độ. Trong trường hợp vật liệu không đẳng hướng, phương trình (1) được viết lại dưới dạng:

$$q_i = -k_{ij} \cdot \nabla T_j \tag{2}$$

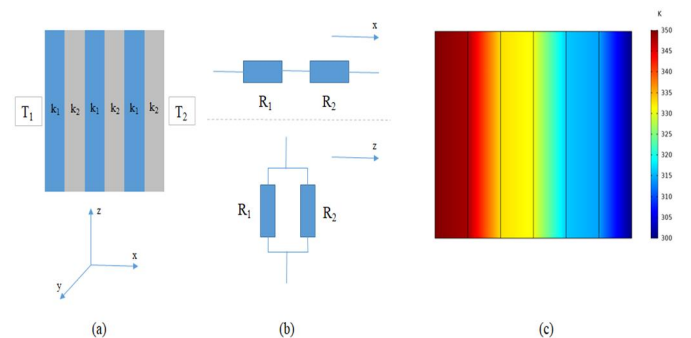
trong đó,  $q_i$  là mật độ dòng nhiệt truyền theo phương  $i$  và  $k_{ij}$  là tensor độ dẫn nhiệt bậc 2,  $\nabla T_j$  là gradient nhiệt độ theo phương  $j$ . Trong hệ tọa độ Descartes thì tensor này được viết dưới dạng:

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix} \tag{3}$$

Đối với vật liệu đẳng hướng,  $k_{ij}$  chỉ nhận một giá trị không đổi nên vector dòng nhiệt chỉ phụ thuộc vào gradient nhiệt độ trên vật liệu. Như vậy, nếu có sự xuất hiện của các thành phần  $k_{ij} (i \neq j)$  thì vector dòng nhiệt có khả năng đổi hướng. Ví dụ như sự xuất hiện của thành phần  $k_{xy}$

sẽ làm dòng nhiệt truyền đi theo phương  $x$  phụ thuộc vào gradient nhiệt độ theo cả hai phương  $x$  và  $y$  dẫn tới dòng nhiệt này sẽ truyền đi theo cả hai phương  $x$  và  $y$  (tức là bị uốn cong đi). Đây chính là nguyên lý cơ bản tạo ra khả năng đổi hướng truyền nhiệt trong vật liệu.

Phương pháp tạo ra sự dị hướng xuất hiện trong tensor hệ số dẫn nhiệt có thể được thực hiện bằng cấu trúc hai lớp xếp xen kẽ bao gồm 2 vật liệu đẳng hướng có hệ số dẫn nhiệt  $k_1$  và  $k_2$  để xuất như hình 1(a) [6]. Tỉ số hệ số dẫn nhiệt  $k_1/k_2 > 1$  được lựa chọn dựa trên vật liệu cấu tạo của từng lớp trên cấu trúc. Trong cấu trúc này, dòng nhiệt truyền từ bề mặt bên trái (có nhiệt độ không đổi  $T_1$ ) sang bề mặt bên phải (có nhiệt độ không đổi  $T_2$ ). Trong quá trình truyền nhiệt, giả thiết rằng dòng nhiệt truyền đi liên tục và bỏ qua các ảnh hưởng của tiếp xúc bề mặt [7].



Hình 1. Cấu trúc hai lớp xen kẽ của vật liệu truyền nhiệt âm: (a) hình ảnh phân bố các lớp (b) mô hình tương đương của cấu trúc theo 2 phương  $x$  và  $z$  (c) kết quả mô phỏng phân bố nhiệt

Xuất phát từ nhiệt trở của một tấm phẳng có chiều dài  $L$ , tiết diện  $A$  và hệ số dẫn nhiệt  $k$ :

$$R = \frac{L}{k \cdot A} \tag{4}$$

Mô hình tương đương của cấu trúc hình 1(a) được vẽ lại như trong hình 1(b) đối với 2 hướng truyền nhiệt khác nhau của dòng nhiệt tương ứng (phương  $x$  và  $z$ ). Như vậy, theo phương  $x$ , mô hình tương đương gồm 2 nhiệt trở  $R_1$  và  $R_2$  mắc nối tiếp; theo phương  $z$ , 2 nhiệt trở lúc này trở thành mắc song song. Nhiệt trở tương đương theo từng phương sẽ là:

$$R_x = R_1 + R_2$$

$$R_z = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{5}$$

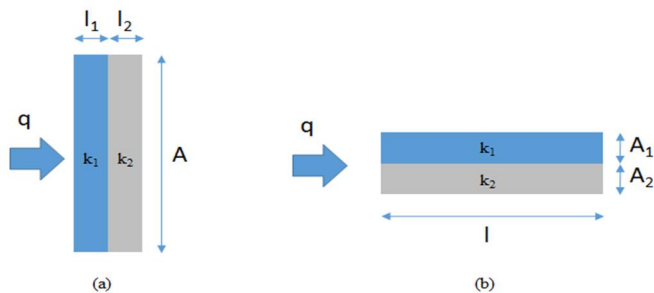
Kết quả là  $R_x \neq R_z$  dẫn tới dòng nhiệt sẽ truyền lệch về phương có nhiệt trở thấp hơn. Hình 1(c) thể hiện hình ảnh mô phỏng dòng nhiệt truyền đi trên cấu trúc này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm COMSOL Multiphysics (được trình bày chi tiết trong phần sau). Rõ ràng là theo phương  $z$ , phân bố nhiệt trên cấu trúc là đồng nhất và theo phương  $x$ , nhiệt độ sẽ giảm từ từ qua các lớp xen kẽ nhau. Do đó, dòng nhiệt truyền đi dễ dàng hơn theo phương  $z$  và khó khăn hơn theo phương  $x$ ; điều này tạo nên sự dị hướng truyền nhiệt trên cấu trúc bề mặt.

Để phân tích tensor dẫn nhiệt của cấu trúc này, hệ số dẫn nhiệt tương đương theo từng hướng truyền nhiệt được

tính toán dựa trên cấu trúc tương đương (hình 2). Trong hình 2, dòng nhiệt  $q$  truyền tới cấu trúc 2 lớp vật liệu đồng nhất có độ dày tương ứng là  $l_1, l_2$ ; hệ số dẫn nhiệt lần lượt là  $k_1, k_2$  với cùng tiết diện  $A$ . Mật độ dòng nhiệt truyền trên từng lớp vật liệu là:

$$q_1 = -k_1 \frac{\Delta T_1}{l_1 A}, q_2 = -k_2 \frac{\Delta T_2}{l_2 A} \quad (6)$$

trong đó,  $\Delta T_1, \Delta T_2$  là độ chênh lệch nhiệt độ giữa 2 bề mặt của từng lớp vật liệu.



Hình 2. Mô hình truyền nhiệt qua 2 lớp vật liệu nối tiếp (a) và song song (b)

Trong hình 2(a), dòng nhiệt truyền đi qua 2 lớp vật liệu là như nhau nên:  $q = q_1 = q_2$ . Mặt khác, theo công thức Fourier:

$$q = k_{eq} \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{(l_1 + l_2) A} \quad (7)$$

Với  $k_{eq}$  là hệ số dẫn nhiệt tương đương. Từ 2 phương trình (6) và (7), ta có:

$$k_{eq} = \frac{(l_1 + l_2) k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (8)$$

Trong hình 2(b), nhiệt độ chênh lệch giữa bề mặt 2 lớp vật liệu là như nhau:  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T$ . Để dàng suy ra hệ số dẫn nhiệt tương đương trong trường hợp này là:

$$q = q_1 + q_2 = k_1 \frac{\Delta T}{l_1 A} + k_2 \frac{\Delta T}{l_2 A} = k_{eq} \frac{\Delta T}{l A} \quad (9)$$

$$\rightarrow k_{eq} = \frac{k_1 A_1 + k_2 A_2}{A_1 + A_2}$$

Nếu 2 lớp vật liệu được lựa chọn có kích thước giống nhau ( $l_1 = l_2, A_1 = A_2$ ) thì phương trình (8) và (9) có thể rút gọn lại:

$$k_{nt} = \frac{2k_1 k_2}{k_1 + k_2}, k_{song song} = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (10)$$

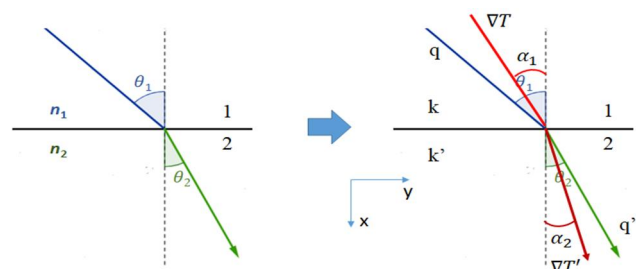
Với cấu trúc hình học như trong hình 1a, tensor dẫn nhiệt tính theo công thức (3) có dạng:

$$k = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2k_1 k_2}{k_1 + k_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_1 + k_2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_1 + k_2}{2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Trong trường hợp  $k_1 \gg k_2$ , công thức (11) chỉ ra  $k_x \ll k_y = k_z$ . Hệ quả của kết luận này là dòng nhiệt sẽ ít truyền đi theo phương x và chủ yếu sẽ truyền đi theo 2 phương y và z.

**Khái niệm truyền nhiệt âm:**

Tương tự như quá trình lan truyền ánh sáng (sóng điện từ) qua các môi trường chiết suất khác nhau, tia sáng bị đổi hướng khi đi qua mặt phân cách giữa 2 môi trường theo định luật khúc xạ ánh sáng. Định luật khúc xạ ánh sáng được bắt nguồn từ nguyên lý Fermat phát biểu rằng ánh sáng sẽ truyền đi theo phương có thời gian lan truyền ngắn nhất. Đối với dòng nhiệt truyền đi qua 2 môi trường đẳng hướng khác nhau, dòng nhiệt cũng ưu tiên truyền đi theo hướng có độ dẫn nhiệt cao hơn (điện trở nhiệt thấp hơn). Như vậy, sự tương đương giữa quá trình lan truyền ánh sáng và quá trình dẫn nhiệt trong vật liệu đưa ra khái niệm về sự "khúc xạ" dòng nhiệt truyền đi.



Hình 3. Mô hình tương đương sự lan truyền ánh sáng và sự dẫn nhiệt qua 2 môi trường khác nhau

Để đơn giản hóa quá trình phân tích, xét bài toán truyền nhiệt bề mặt (nhiệt độ biến thiên theo 2 phương x-y và không truyền đi theo phương z) qua 2 môi trường dị hướng có hệ số dẫn nhiệt khác nhau được biểu diễn bởi 2 tensor  $k$  và  $k'$ :

$$k = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{pmatrix}, k' = \begin{pmatrix} k'_{xx} & k'_{xy} \\ k'_{yx} & k'_{yy} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Trong mô hình tương đương như hình 3, vector mật độ dòng nhiệt  $q$  và gradient nhiệt độ  $\nabla T$  không có cùng phương do sự xuất hiện của các thành phần hệ số dẫn nhiệt  $k_{xy}$  và  $k_{yx}$ . Vector mật độ dòng nhiệt qua từng môi trường được xác định dựa trên công thức (2) như sau:

$$\vec{q} = -[(k_{xx} \cos \alpha_1 + k_{xy} \sin \alpha_1) \vec{x} + (k_{yx} \cos \alpha_1 + k_{yy} \sin \alpha_1) \vec{y}] \cdot \nabla T \quad (13)$$

$$\vec{q}' = -[(k'_{xx} \cos \alpha_2 + k'_{xy} \sin \alpha_2) \vec{x} + (k'_{yx} \cos \alpha_2 + k'_{yy} \sin \alpha_2) \vec{y}] \cdot \nabla T$$

Hướng truyền nhiệt của từng dòng nhiệt được xác định theo biểu thức:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{k_{yx} \cos \alpha_1 + k_{yy} \sin \alpha_1}{k_{xx} \cos \alpha_1 + k_{xy} \sin \alpha_1} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{k_{yx} + k_{yy} \tan \alpha_1}{k_{xx} + k_{xy} \tan \alpha_1} \right) \quad (14)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{k'_{yx} \cos \alpha_2 + k'_{yy} \sin \alpha_2}{k'_{xx} \cos \alpha_2 + k'_{xy} \sin \alpha_2} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{k'_{yx} + k'_{yy} \tan \alpha_1}{k'_{xx} + k'_{xy} \tan \alpha_1} \right)$$

Điều kiện biên của dòng nhiệt truyền đi giữa mặt phân cách của 2 vật liệu được xác định tương tự như điều kiện

biên áp dụng trong mô hình truyền sóng điện từ qua mặt phân cách của 2 môi trường điện môi [8]:

- Tính liên tục của mật độ dòng nhiệt (không tồn tại nguồn nhiệt nằm trong 2 môi trường):

$$q \cdot \vec{x} = q' \cdot \vec{x} \rightarrow (k_{xx} \cos \alpha_1 + k_{xy} \sin \alpha_1) \cdot \nabla T = (k'_{xx} \cos \alpha_2 + k'_{xy} \sin \alpha_2) \cdot \nabla T' \quad (15.a)$$

- Tính liên tục của gradient nhiệt độ dọc theo mặt phân cách của 2 vật liệu (bỏ qua điện trở lớp tiếp xúc):

$$\nabla T \cdot \vec{y} = \nabla T' \cdot \vec{y} \rightarrow \nabla T \cdot \sin \alpha_1 = \nabla T' \cdot \sin \alpha_2 \quad (15.b)$$

Từ phương trình (14) và (15.a), (15.b), ta có:

$$\frac{k_{xx} \tan \theta_1 - k_{yx}}{k_{xx} k_{yx}} = \frac{k'_{xx} \tan \theta_2 - k'_{yx}}{k'_{xx} k'_{yx}} \quad (16)$$

$$\rightarrow \theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{k'_{xx}}{k_{xx}} \cdot \tan \theta_1 + \frac{k'_{yx} \cdot (k_{yx} - k_{yx}')}{k_{yx} \cdot k'_{yx}} \right]$$

Phương trình (16) đã chỉ ra một nhận xét quan trọng: góc lệch  $\theta_2$  sau khi dòng nhiệt đi qua mặt phân cách có thể mang giá trị âm nếu điều kiện sau đây được thỏa mãn:

$$k'_{yx} < k_{yx} \cdot \tan \theta_1 \leq \frac{k_{xx} (k_{yx} - k_{yx}')}{k_{yx} \cdot k'_{yx}} \quad (17)$$

Hiện tượng truyền nhiệt âm sẽ xảy ra khi góc  $\theta_2 \leq 0$  nghĩa là dòng nhiệt sẽ bị “phản xạ” ngược ra khỏi nửa mặt phẳng phải của môi trường (2) trong hình 3 hoặc có thể phát biểu lại là vật liệu nằm trong nửa mặt phẳng này sẽ không chịu tác động của dòng nhiệt dẫn truyền đi từ môi trường (1). Hiện tượng này chính là cơ sở tạo thành lớp “áo choàng nhiệt” trong vật liệu.

### 3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Ngày nay, các công cụ mô phỏng số được sử dụng rộng rãi để hỗ trợ con người tạo ra những mô hình hoạt động gần giống như các quá trình diễn ra trong thực tế đem lại nhiều lợi ích to lớn như tiết kiệm thời gian, chi phí thử nghiệm, nguyên vật liệu,... Trong thực tế, các vấn đề liên quan tới quá trình truyền nhiệt và lưu chất thường là những vấn đề phức tạp trong tự nhiên với nhiều cơ chế hoạt động khác nhau. Vì vậy, các công cụ mô phỏng số đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu và kỹ thuật truyền nhiệt với các phần mềm (thương mại hoặc mã nguồn mở) phổ biến như MATLAB, ANSYS-CFX, ANSYS-Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics,... Trong các phần mềm này, COMSOL Multiphysics là một phần mềm mô phỏng mạnh dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để sử dụng, hỗ trợ người dùng làm việc với nhiều quá trình vật lý khác nhau [9]. Trong bài báo này, mô phỏng quá trình dẫn nhiệt trong vật liệu truyền nhiệt âm được thực hiện dựa trên module “Heat Transfer” của phần mềm COMSOL Multiphysics.

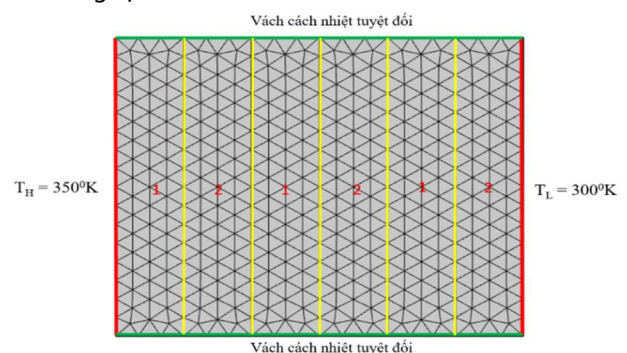
Mô hình dẫn nhiệt chất rắn trên nền tảng phần mềm COMSOL Multiphysics được xây dựng trên cơ sở phương trình truyền nhiệt [10]:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = \alpha T \div \frac{dS}{dt} + Q \quad (18)$$

trong đó:  $\rho$  là khối lượng riêng ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_p$  là nhiệt dung riêng đẳng áp ( $\text{J/kg.K}$ ),  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối ( $\text{K}$ ),  $u$  là vector vận tốc ( $\text{m/s}$ ),  $q$  là dòng nhiệt gây ra bởi hiện tượng dẫn nhiệt ( $\text{W/m}^2$ ),  $q_r$  là dòng nhiệt gây ra bởi hiện tượng phát xạ nhiệt ( $\text{W/m}^2$ ),  $\alpha$  là hệ số giãn nở nhiệt ( $\text{K}^{-1}$ ),  $S$  là tensor ứng suất Piola-Kirchhoff bậc 2 ( $\text{Pa}$ ),  $Q$  là nguồn gia nhiệt ( $\text{W/m}^2$ ). Trong trường hợp bài toán dẫn nhiệt ổn định, nhiệt độ được xem như trường dừng và không thay đổi theo thời gian nên các thành phần vi phân theo thời gian của phương trình (18) sẽ được bỏ qua.

#### Mô hình mô phỏng dẫn nhiệt:

Mô hình đơn giản của vật liệu truyền nhiệt âm gồm 2 lớp (hình 4), mỗi lớp vật liệu có kích thước giống nhau, được mô phỏng bằng COMSOL Multiphysics với kết quả như trong hình 1(c). Quá trình truyền nhiệt diễn ra từ môi trường có nhiệt độ không đổi  $T_H = 350^\circ\text{K}$  tới môi trường có nhiệt độ không đổi  $T_L = 300^\circ\text{K}$  (từ trái sang phải) và không có nguồn nhiệt nào tham gia vào quá trình dẫn nhiệt. Hai biên trên và dưới được xem là lớp cách nhiệt hoàn toàn. Vật liệu 1 là vật liệu dẫn nhiệt tốt được lựa chọn là đồng ( $k_1 = 400\text{W/m.K}$ ) và vật liệu 2 là vật liệu cách nhiệt được lựa chọn là polysilicon ( $k_2 = 30\text{W/m.K}$ ) [11]. Hình 4 mô tả hình dạng hình học của cấu trúc thu được sau khi áp dụng phương pháp chia lưới hình tam giác theo phương pháp phần tử hữu hạn. Trong bài báo này, các cấu trúc tiếp theo sẽ được mô phỏng theo mô hình đơn giản với các điều kiện biên tương tự.



Hình 4. Mô phỏng cấu trúc vật liệu truyền nhiệt âm bằng phần mềm COMSOL Multiphysics

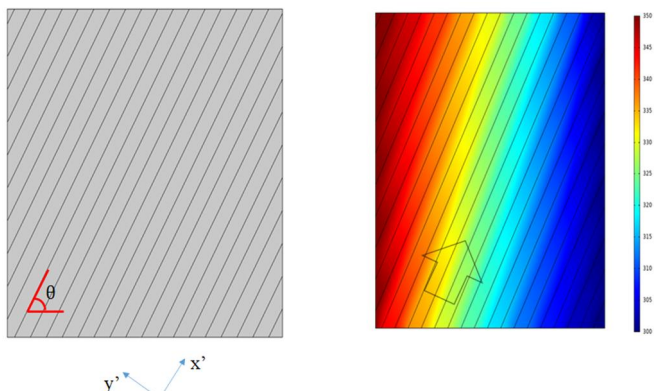
### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

#### 4.1. Cấu trúc điều khiển dòng nhiệt cơ bản

Nhằm mục đích dẫn hướng dòng dẫn nhiệt bên trong cấu trúc, về mặt lý thuyết, cần có các thành phần hệ số dẫn nhiệt ghép tương hỗ ( $k_{xy}, k_{yx}, \dots$ ) nằm trong tensor dẫn nhiệt trong công thức (11). Phương pháp đơn giản được đề xuất là xoay mặt phẳng cấu trúc hình (1) một góc  $\theta$  ( $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ ) [12]. Lúc này, tensor hệ số dẫn nhiệt của cấu trúc được biểu diễn theo công thức:

$$k'_{ij} = \frac{J \cdot k_{ij} \cdot J^T}{\det(J)} \quad (19)$$

trong đó,  $J$  là ma trận Jacobi của quá trình chuyển đổi hệ trục tọa độ,  $J^T$  là ma trận chuyển vị của  $J$  và  $\det(J)$  là định thức của ma trận  $J$ .

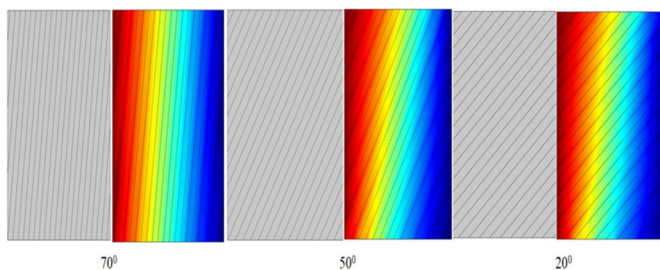


Hình 5. Hình ảnh dòng nhiệt truyền đi trong cấu trúc lớp xen kẽ khi xoay cấu trúc

Với cấu trúc trong hình 5, tensor hệ số dẫn nhiệt được tính từ công thức (11) và (19) như sau:

$$k' = \begin{pmatrix} \frac{2k_1k_2}{k_1+k_2} \cos^2\theta + \frac{k_1+k_2}{2} \sin^2\theta & -\left(\frac{2k_1k_2}{k_1+k_2} + \frac{k_1+k_2}{2}\right) \sin\theta \cos\theta & 0 \\ -\left(\frac{2k_1k_2}{k_1+k_2} + \frac{k_1+k_2}{2}\right) \sin\theta \cos\theta & \frac{2k_1k_2}{k_1+k_2} \cos^2\theta + \frac{k_1+k_2}{2} \sin^2\theta & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_1+k_2}{2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Hình 5 là kết quả mô phỏng cấu trúc lớp xen kẽ có kích thước tổng cộng 20mmx20mm được xoay một góc  $\theta$  (ảnh màu kế bên là hình ảnh phân bố nhiệt độ bên trong cấu trúc). Như vậy, gradient nhiệt độ được dẫn hướng theo phương  $\theta$  của cấu trúc. Hình 6 cũng chỉ ra khả năng dẫn hướng của dòng nhiệt với các góc quay khác nhau của cấu trúc. Với góc  $\theta$  càng nhỏ thì khả năng đổi hướng của dòng nhiệt càng lớn.

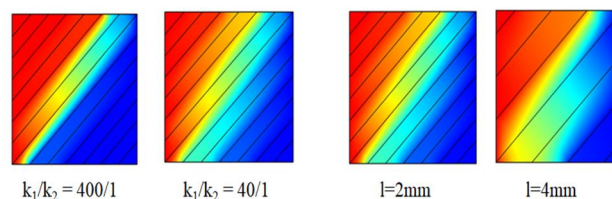


Hình 6. Khả năng dẫn hướng dòng nhiệt của cấu trúc lớp xen kẽ với các góc  $\theta$  khác nhau

**Ảnh hưởng của các thông số cấu trúc, vật liệu tới khả năng điều khiển dòng nhiệt:**

Như phân tích ở trên, độ chênh lệch nhiệt trở theo các phương khác nhau càng lớn thì tính chọn lọc của dòng nhiệt theo hướng có nhiệt trở thấp lại càng cao. Theo công thức (4), nhiệt trở của từng lớp trên cấu trúc phụ thuộc vào kích thước hình học ( $l, A$ ) và hệ số dẫn nhiệt  $k$  nên khả năng điều khiển dòng nhiệt trên cấu trúc xen kẽ sẽ phụ thuộc vào tỉ số giữa hệ số dẫn nhiệt giữa 2 lớp ( $k_1/k_2$ ) và kích

thước các lớp dẫn nhiệt. Hình 7 so sánh ảnh hưởng của hệ số dẫn nhiệt và chiều rộng của từng lớp vật liệu tới phân bố nhiệt độ trên cấu trúc lớp xen kẽ cơ bản có kích thước không đổi 20mmx20mm.

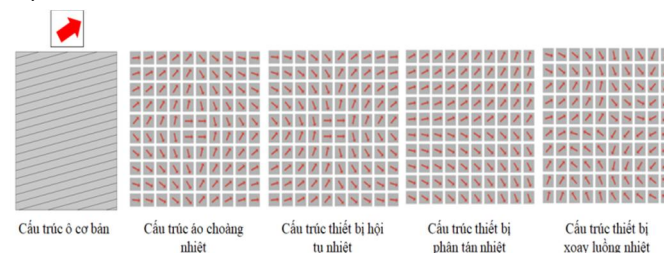


Hình 7. Ảnh hưởng của các thông số cấu trúc và vật liệu tới khả năng điều khiển dòng nhiệt

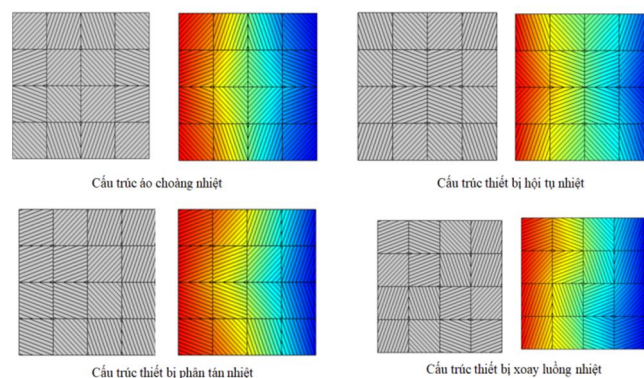
Rõ ràng, cấu trúc lớp xen kẽ sẽ điều khiển dòng nhiệt tốt hơn nếu tỉ số dẫn nhiệt giữa 2 loại vật liệu được lựa chọn càng lớn hoặc chiều dày của mỗi lớp giảm đi (số lớp trên cấu trúc tăng lên). Việc lựa chọn vật liệu phù hợp và tối ưu các thông số cấu trúc đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển dòng nhiệt của vật liệu truyền nhiệt âm.

### 4.2. Các cấu trúc điều khiển dòng nhiệt linh hoạt

Dựa trên khả năng điều hướng dòng nhiệt của cấu trúc các lớp xen kẽ bằng cách quay các góc  $\theta$  thích hợp (được gọi là các ô cơ bản), các cấu trúc điều khiển dòng nhiệt phức tạp như “áo choàng nhiệt”, “thiết bị hội tụ nhiệt”, “thiết bị phân tán nhiệt” và “thiết bị xoay luồng nhiệt” có thể được thiết kế từ các ô cơ bản này như mô tả trong hình 8 [13]. Tùy theo mục đích thiết kế, dòng nhiệt truyền đi liên tục trên cấu trúc sẽ được điều khiển theo hướng của từng ô cơ bản để hình thành phân bố nhiệt tương ứng với yêu cầu đặt ra.



Hình 8. Phương pháp tạo ra các cấu trúc điều khiển luồng nhiệt phức tạp từ các ô cơ bản với các hướng khác nhau (ký hiệu mũi tên màu đỏ)



Hình 9. Kết quả mô phỏng các cấu trúc điều khiển dòng nhiệt: áo choàng nhiệt, thiết bị hội tụ nhiệt, thiết bị phân tán nhiệt, thiết bị xoay luồng nhiệt

Bằng cách tối ưu hướng truyền dẫn và kích thước của ô cơ bản, phân bố nhiệt của từng cấu trúc điều khiển luồng nhiệt sẽ được mô tả như hình 9.

## 5. KẾT LUẬN

Vật liệu truyền nhiệt âm mở ra khả năng điều khiển dòng nhiệt truyền đi trong vật liệu một cách hiệu quả dựa trên nguyên lý tương tự như quá trình truyền sóng điện từ (ánh sáng) được áp dụng cho quá trình dẫn nhiệt. Nội dung của bài báo này nêu ra cơ sở lý thuyết về phương pháp điều khiển dòng nhiệt dẫn dựa trên các thành phần hệ số dẫn nhiệt ghép trong tensor dẫn nhiệt của vật liệu xuất phát từ định luật Fourier và khái niệm truyền nhiệt âm tương đương với quá trình truyền sóng trong lý thuyết trường điện từ. Ngoài ra, bài báo cũng mô tả cấu trúc lớp xen kẽ đều nhau của 2 vật liệu được thiết kế để điều khiển linh hoạt hướng của dòng nhiệt và ảnh hưởng của các thông số hình học cũng như vật liệu tới khả năng điều khiển của cấu trúc. Khi xoay cấu trúc này theo các góc quay  $\theta$  khác nhau thì hướng của dòng nhiệt sẽ thay đổi tương ứng. Dựa trên nguyên lý hoạt động của cấu trúc cơ bản này (ô cơ bản), các cấu trúc điều khiển dòng nhiệt phức tạp hơn như áo choàng nhiệt, thiết bị hội tụ nhiệt, thiết bị phân tán nhiệt và thiết bị xoay luồng nhiệt được xây dựng bằng cách ghép các ô cơ bản theo một hình dạng tối ưu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bùi Hải, Trần Thế Sơn, 2004. *Kỹ thuật nhiệt*. NXB Khoa học Kỹ thuật, 110-165.
- [2]. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, 2017. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, New York, USA, 1046 pages.
- [3]. Yunus A.Cengel, 2002. *Heat Transfer : A Practical Approach, 2<sup>nd</sup> edition*. McGraw Hill, New York, USA, 896 pages.
- [4]. David W.Hahn, M. Necati Ozisik, 2012. *Heat Conduction, 3<sup>rd</sup> edition*. Wiley, New Jersey, USA, 734 pages.
- [5]. Terry M. Tritt, 2004. *Thermal Conductivity: Theory, Properties and Applications*. Kluwer Academic, New York, USA, 306 pages.
- [6]. P.R.Bandaru, K.P.Vemuri, F.M.Canbazoglu, R.S.Kapadia, 2015. *Layered thermal metamaterials for the directing and harvesting of conductive heat*. AIP Advances 5, 053403, 1-25.
- [7]. Eric S. Toberer, Lauryn L. Baranowski, and Chris Dames, 2012. *Advances in Thermal Conductivity*, Annu. Rev. Mater. Res. 42(1), 179–209.
- [8]. William H. Hayt, Jr, John A. Buck, 2001. *Engineering Electromagnetics, 6<sup>th</sup> edition*. McGraw-Hill, New York, USA, 561 pages.
- [9]. COMSOL Inc., *COMSOL Multiphysics*, <https://www.comsol.com>.
- [10]. COMSOL Multiphysics, 2018. *Heat Transfer Module User's Guide, version 5.4*.
- [11]. Qing-An Huang and Neville Ka Shek Lee, 1999. *Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator*. Journal of Micromechanics and Microengineering 9, No.1, 64.
- [12]. K. P. Vemuri, F. M. Canbazoglu, P. R. Bandaru, 2014. *Guiding conductive heat flux through thermal metamaterials*. Applied Physics Letter 105, 193904.

[13]. Gwanwoo Park, Sunggu Kang, Howon Lee, Wonjoon Choi, 2017. *Tunable Multifunctional Thermal Metamaterials: Manipulation of Local Heat Flux via Assembly of Unit-Cell Thermal Shifters*. Scientific Reports 7, 4100.

## AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Đức Trung<sup>1</sup>, Cao Xuan Bac<sup>1</sup>, Lai Quang Linh<sup>1</sup>,  
Nguyen Dinh Nam<sup>1</sup>, Nguyen Duc Nam<sup>2</sup>, Le Tien Duong<sup>3</sup>,  
Duong Quang Ha<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>School of Biotechnology and Food Technology, Hanoi University of Science and Technology

<sup>2</sup>Faculty of Electrical Engineering Technology, Hanoi University of Industry

<sup>3</sup>An Thi High school

<sup>4</sup>University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science and Technology