

# HIỆU CHỈNH PHÉP ĐO HỆ SỐ DẪN NHIỆT THEO PHƯƠNG PHÁP NGUỒN NHIỆT ĐƯỜNG BẰNG MÔ PHỎNG SỐ

## CALIBRATION OF THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT USING LINE HEAT-SOURCE METHOD WITH NUMERICAL SIMULATION

LÊ ANH ĐỨC<sup>\*1</sup>, NGUYỄN THỊ VIỆT LINH<sup>2</sup>, VŨ HUY KHUÊ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Khoa Vật lý Kỹ thuật, Đại học Bách khoa Hà Nội

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

<sup>3</sup>Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email liên hệ: duc.leanh@hust.edu.vn

### Tóm tắt

Phương pháp đo hệ số dẫn nhiệt sử dụng nguồn nhiệt đường thường được sử dụng để đo hệ số dẫn nhiệt trong dải từ 0,05W/mK đến 5W/mK. Theo tiêu chuẩn ASTM D5334-22<sup>a</sup>, chiều dài que đo là 100mm, đường kính mẫu tối thiểu là 50mm, chiều dài mẫu là 100mm. Tuy nhiên, trong thực tế có rất nhiều mẫu thực phẩm như thịt, cá, rau, quả không đáp ứng được yêu cầu về kích thước mẫu đo. Trong bài báo này, kết quả đo hệ số dẫn nhiệt theo phương pháp nguồn nhiệt đường với que đo chiều dài 20mm sẽ được hiệu chỉnh dựa trên kết quả mô phỏng tính toán nhiệt. Kết quả thu được cho thấy hệ số dẫn nhiệt có sai lệch trong khoảng từ -10% đến 10% trong toàn dải đo. Việc hiệu chỉnh sẽ giúp nâng cao độ tin cậy của phép đo hệ số dẫn nhiệt đối với các loại thực phẩm, hỗ trợ việc sản xuất thiết bị đo trong nước có độ chính xác cao.

**Từ khóa:** Hệ số dẫn nhiệt, nguồn nhiệt đường, dẫn nhiệt không ổn định, mô phỏng CFD.

### Abstract

The method of measuring thermal conductivity using the line heat source technique is commonly used to measure thermal conductivity in the range from 0.05W/mK to 5W/mK. According to ASTM standard D5334, the length of the measuring probe is 100mm, and the required sample diameter and length are not smaller than 50mm and 100mm, respectively. However, in reality, many food samples such as meat, fish, vegetables, and fruits do not meet the requirements for sample size. In this paper, the results of measuring thermal conductivity using the heat source method with a 20mm long probe will be calibrated based on the results of the thermal simulation. The results show that the thermal conductivity deviates by approximately -10% to 10% across the entire

measurement range. The numerical calibration helps to improve the reliability of thermal conductivity measurements for various types of food and supports the production of highly accurate domestic measuring devices.

**Keywords:** Thermal conductivity, line heat source, transient heat transfer, CFD simulation.

### 1. Giới thiệu

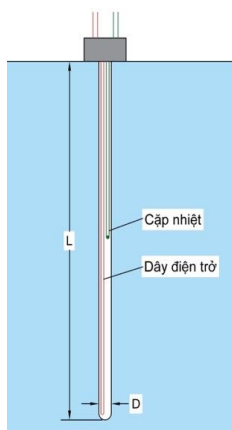
Hệ số dẫn nhiệt là một trong những tính chất nhiệt vật lý quan trọng của vật liệu. Với việc đặc trưng cho khả năng dẫn nhiệt của vật liệu, hệ số dẫn nhiệt quyết định lượng nhiệt truyền qua ở chế độ dẫn nhiệt ổn định và tốc độ thay đổi nhiệt độ ở chế độ dẫn nhiệt không ổn định. Đối với thực phẩm, hệ số dẫn nhiệt là thông số đầu vào của việc xác định quá trình trao đổi nhiệt bên trong thực phẩm từ đó tính toán thời gian cấp đông, thời gian làm lạnh hay thời gian sấy. Do đó, việc xây dựng bộ dữ liệu hệ số dẫn nhiệt cho các loại thực phẩm là hết sức quan trọng.

Các phương pháp đo hệ số dẫn nhiệt được chia làm 2 nhóm chính: Phương pháp ổn định và phương pháp không ổn định [1, 2]. Với phương pháp ổn định, hệ số dẫn nhiệt thường được xác định dựa trên mật độ dòng nhiệt truyền qua và độ chênh nhiệt độ giữa 2 mặt ở chế độ dẫn nhiệt ổn định [3, 4]. Tuy nhiên, nếu vật liệu có hệ số dẫn nhiệt thay đổi mạnh theo nhiệt độ hoặc thay đổi tính chất nhiệt vật lý khi bị nung nóng, điển hình là thực phẩm, phương pháp này có độ chính xác không cao. Một nhược điểm nữa của phương pháp ổn định là thời gian đo rất dài và không đo được cho các loại vật liệu có hệ số dẫn nhiệt rất lớn hoặc rất nhỏ. Trong khi đó, phương pháp không ổn định xác định hệ số dẫn nhiệt dựa trên biến thiên nhiệt độ của vật liệu khi được cấp nhiệt. Tùy theo hình dạng của nguồn nhiệt, phương pháp này được chia thành nhóm phương pháp nguồn nhiệt bề mặt và phương pháp nguồn nhiệt đường [1, 5].

Phương pháp đo hệ số dẫn nhiệt nguồn nhiệt đường được ứng dụng rất rộng rãi để xác định hệ số dẫn nhiệt của thực phẩm [6]. Ảnh hưởng của áp suất, thời thực phẩm, độ ẩm và nhiệt độ đến hệ số dẫn nhiệt đã được khảo sát cho nhiều loại vật liệu [7-10]. Tuy đã có nhiều nghiên cứu, nhưng cho đến nay chưa có một tiêu chuẩn chung nào hướng dẫn việc xây dựng đầu đo và xử lý sai số khi đo hệ số dẫn nhiệt của thực phẩm theo nguồn nhiệt đường. Hiện nay, phương pháp này đã được tiêu chuẩn hóa cho đối tượng là đất, đá, sỏi như tiêu chuẩn ASTM D5334-22, IEEE 442-1981 & IEEE 442-2017. Theo các tiêu chuẩn này, chiều dài của đầu đo được cố định là 100mm, đường kính và chiều dài mẫu đo không nhỏ hơn 50mm và 100mm nên không phù hợp cho các vật liệu kích thước nhỏ. Chính vì vậy nhu cầu chế tạo và sử dụng các đầu đo hệ số dẫn nhiệt có chiều dài ngắn hơn để phù hợp cho các loại vật liệu như cá, thịt hay rau củ được đặt ra hết sức cấp thiết. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một phương án đánh giá sai số có thể xảy ra khi thu hẹp chiều dài que đo thông qua mô phỏng quá trình dẫn nhiệt không ổn định bên trong vật liệu.

## 2. Phương pháp đo hệ số dẫn nhiệt nguồn nhiệt đường

Phương pháp đo không ổn định sử dụng nguồn nhiệt đường được xây dựng dựa trên bài toán dẫn nhiệt có nguồn nhiệt đường trong không gian được coi là rộng vô hạn. Phương pháp này đã được trình bày chi tiết trong rất nhiều tài liệu, do đó, trong bài báo này chỉ trình bày tóm tắt về nguyên lý đo. Để tạo ra nguồn nhiệt dạng đường, ta sử dụng que đo được thể hiện trong Hình 1. Bên trong que đo, nguồn nhiệt được tạo ra bằng cách sử dụng dây điện trở. Sự thay đổi nhiệt độ của que đo được ghi lại bằng dây can nhiệt lồng ở giữa que đo. Bằng cách điều chỉnh điện áp cấp vào



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý que đo hệ số dẫn nhiệt nguồn nhiệt đường

dây điện trở, công suất nhiệt theo chiều dài dây được khống chế trong suốt quá trình đo.

Công suất nhiệt tổng, mật độ dòng nhiệt theo chiều dài que đo được xác định theo công thức  $P = \frac{U^2}{R}$  [W] và  $q_l = \frac{P}{L}$  [W/m]. Trong đó,  $R$  [ $\Omega$ ] là điện trở dây dẫn,  $U$  [V] là điện áp nguồn cấp,  $L$  là chiều dài que đo.

Phương trình vi phân dẫn nhiệt mô tả quá trình dẫn nhiệt bên trong vật liệu được biểu diễn trên hệ trục tọa độ trụ có gốc tại tâm của que đo như sau:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Bỏ qua sự phân bố nhiệt độ bên trong que đo, điều kiện biên loại 2 tại bề mặt của que đo.

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{q_l}{2\pi R} \quad (2)$$

Trong đó,  $R$ : Kích thước xác định (bán kính của que đo);  $a$ : Hệ số dẫn nhiệt độ.

Với nhiệt độ ban đầu của vật liệu là  $t_0$ , nghiệm giải tích của bài toán dẫn nhiệt được biểu diễn như sau [11, 12]:

$$t = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4a\tau}{\gamma r^2} \right) + \frac{1}{1.1!} \left( \frac{r^2}{4a\tau} \right) - \frac{1}{2.2!} \left( \frac{r^2}{4a\tau} \right)^2 + \dots \right] + t_0 \quad (3)$$

Trong đó,  $\gamma = 1,781072$  là hằng số. Theo [13], khi  $\frac{r^2}{4a\tau}$  đủ nhỏ, ta có thể bỏ qua các số hạng bậc cao của chuỗi mà không gặp phải sai số. Xét 1 điểm bên trong vật liệu ở bán kính  $r$  bất kỳ, sự thay đổi nhiệt độ ở điểm này giữa 2 thời điểm  $\tau_1$  và  $\tau_2$  được xác định theo công thức:

$$t_2 - t_1 = \left[ \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \left( \frac{4a\tau_2}{\gamma r^2} \right) + t_0 \right] - \left[ \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \left( \frac{4a\tau_1}{\gamma r^2} \right) + t_0 \right] = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \quad (4)$$

Hay:

$$\lambda = \frac{q_l}{4\pi \frac{t_2 - t_1}{\ln(\tau_2) - \ln(\tau_1)}} = \frac{q_l}{4\pi K} \quad (5)$$

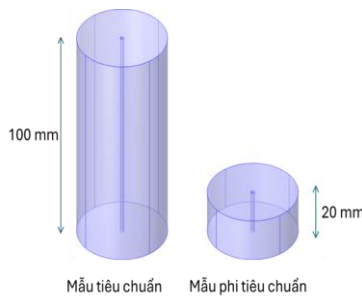
Trong đó, khi biểu diễn biến thiên nhiệt độ  $t$  theo  $\ln(\tau)$ , các điểm thực nghiệm sẽ được phân bố theo dạng tuyến tính với hệ số góc là  $K$ . Nếu xác định được

hệ số góc  $K$  và biết trước  $q_l$ , hệ số dẫn nhiệt của vật liệu được xác định theo phương trình (5).

### 3. Mô phỏng quá trình dẫn nhiệt với que thăm thực tế

Trong thực tế, cả vật liệu đo và que đo có kích thước giới hạn, do vậy khi xây dựng phép đo cần có các tiêu chuẩn để đảm bảo hạn chế sai số. Căn cứ theo tiêu chuẩn ASTM D5334-22, mô hình hình khối của mẫu đo và que đo dài 100mm được biểu diễn trên Hình 2. Bên cạnh mẫu đo và que đo chuẩn, quá trình dẫn nhiệt bên trong mẫu đo và que đo dài 20mm cũng được mô phỏng, tính toán. Do vật có kích thước giới hạn, điều kiện biên loại 3 được sử dụng các bề mặt bên ngoài của mẫu đo với nhiệt độ môi trường là 20°C, hệ số trao đổi nhiệt đối lưu là 5W/m<sup>2</sup>K. Nguồn nhiệt đường được chuyển về nguồn nhiệt thể tích sinh ra bên trong que đo theo công thức:

$$q_v = \frac{4q_l}{\pi D^2} \quad (6)$$



Hình 2. Mẫu đo và que đo sử dụng tiêu chuẩn và phi tiêu chuẩn sử dụng trong mô phỏng

Bảng 1. Thông số nhiệt vật lý sử dụng trong mô phỏng

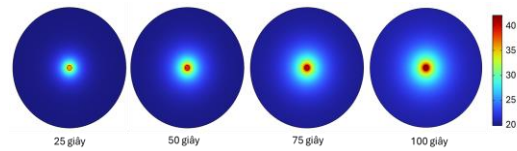
Vật liệu	Hệ số dẫn nhiệt	Nhiệt dung riêng	Khối lượng riêng
Que đo	48.4W/mK	1000J/kgK	3580kg/m <sup>3</sup>
Mẫu đo	0.5÷5 W/mK	2000J/kgK	1000kg/m <sup>3</sup>

Để đảm bảo độ hội tụ của kết quả, các hình khối được chia lưới với kích thước lưới lớn nhất là 0,02mm với que đo và 0,1mm với mẫu đo. Các kết quả cho thấy khi chia lưới nhỏ hơn, kết quả không có sự sai lệch mà chỉ làm tăng thời gian tính toán. Vì vậy, mô phỏng được tiến hành với lưới trên và bước thời gian 0,02 giây. Nguồn nhiệt đường  $q_l$  được cố định ở 100W/m. Tính chất nhiệt vật lý của que đo được cấu

trúc từ bột MgO trong vỏ thép mỏng và tính chất nhiệt vật lý của mẫu đo được trình bày trong Bảng 1. Riêng hệ số dẫn nhiệt của mẫu đo được thay đổi trong khoảng từ 0,5W/mK đến 5W/mK.

### 4. Kết quả và thảo luận

Sau khi mô phỏng, ta thu được phân bố nhiệt độ bên trong mẫu đo và que đo. Thời gian mô phỏng quá trình đo là 100 giây. Kết quả thu được ở 25 giây, 50 giây, 75 giây và 100 giây với mẫu đo dài 100mm và hệ số dẫn nhiệt 2W/mK được trình bày trong Hình 3. Số liệu nhiệt độ được sử dụng trong tính toán hệ số dẫn nhiệt là nhiệt độ tại tâm của que đo. Biểu đồ phân bố nhiệt độ theo thời gian và logarit cơ số tự nhiên của thời gian được biểu diễn ở Hình 4.

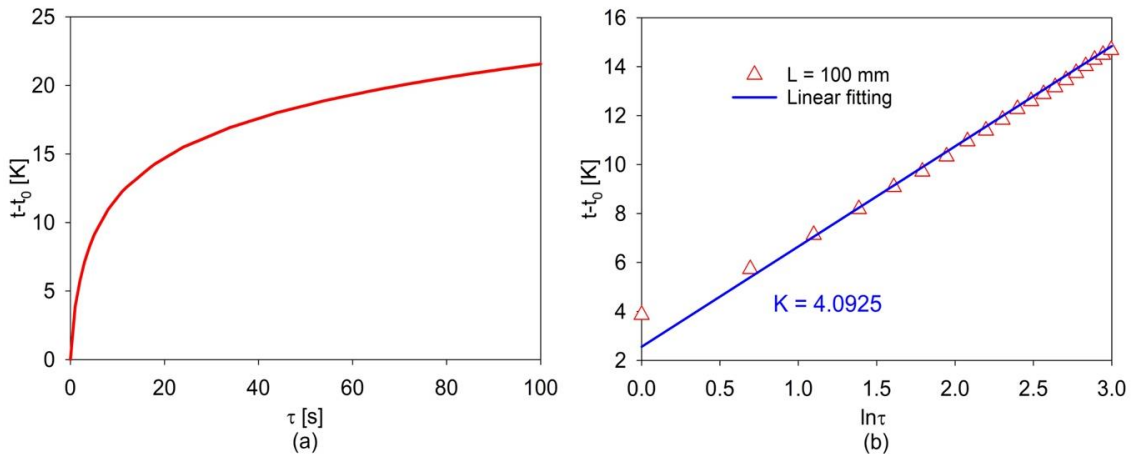


Hình 3. Phân bố nhiệt độ thu được ở các thời điểm khác nhau với mẫu đo dài 100mm và hệ số dẫn nhiệt 2W/mK

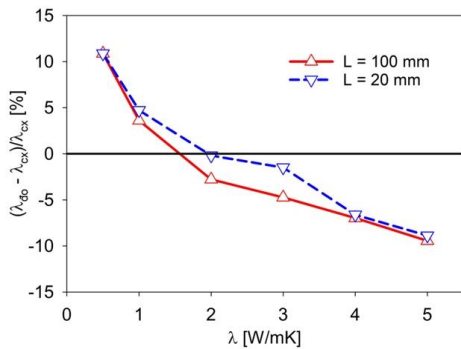
Căn cứ vào hệ số góc của đường hồi quy tuyến tính thể hiện ở Hình 4b, hệ số dẫn nhiệt của vật đo được xác định lại theo công thức (5). Giá trị hệ số dẫn nhiệt này có sự sai khác so với giá trị thực tế sử dụng trong mô phỏng như trong Hình 5. Với hệ số dẫn nhiệt mẫu đo là 0,5W/mK và 1W/mK, hệ số dẫn nhiệt xác định theo công thức nguồn nhiệt đường cao ( $\lambda_{do}$ ) hơn so với giá trị đầu vào của mô phỏng ( $\lambda_{cx}$ ). Trong khi đó, ở các giá trị 2 W/mK, 3W/mK, 4W/mK và 5W/mK, hệ số dẫn nhiệt của phương pháp nguồn đường có xu hướng thấp hơn. Việc sai lệch này có thể được giải thích do kích thước của nguồn đường là tương đối lớn, dẫn đến việc giả thiết đại lượng  $\frac{r^2}{4a\tau}$  đủ nhỏ sẽ không chính xác.

Bảng 2. Hệ số dẫn nhiệt theo nguồn nhiệt đường ở các chế độ mô phỏng

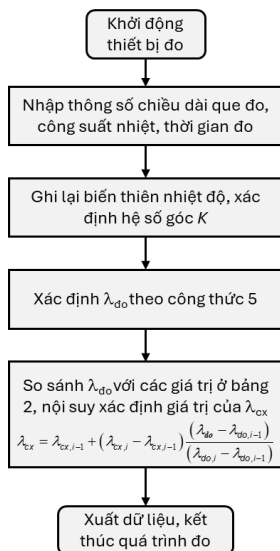
$\lambda_{cx}$ [W/mK]	$\lambda_{do}$ [W/mK]
0.5	0.557
1	1.038
2	1.949
3	2.994
4	3.737
5	4.558



**Hình 4. Đồ thị diễn hình sự biến thiên nhiệt độ theo thời gian (a) và theo logarit cơ số tự nhiên của thời gian (b)**



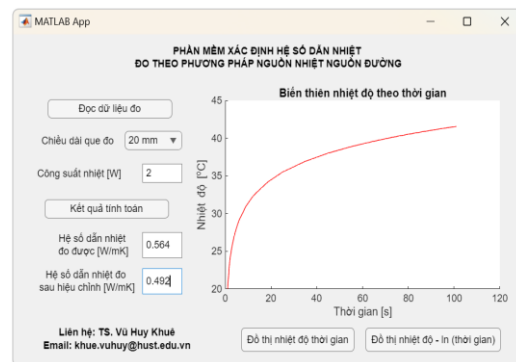
**Hình 5. Sai lệch tương đối kết quả xác định hệ số dẫn nhiệt theo nguồn nhiệt đường ở các chế độ mẫu khác nhau**



**Hình 6. Thuật toán hiệu chỉnh kết quả đo dựa trên kết quả mô phỏng quá trình dẫn nhiệt**

Các số liệu cũng cho thấy, sai lệch giữa kết quả tính toán theo phương pháp nguồn đường ở mẫu đo 100mm và 20mm cũng có sự sai khác tương đối rõ rệt. Bên cạnh đó, hiện tượng tích nhiệt bên trong que thăm cũng gây ra sai số đáng kể. Khi hệ số dẫn nhiệt của vật liệu nhỏ, ảnh hưởng của việc hệ số dẫn nhiệt que thăm lớn sẽ làm tăng kết quả tính toán theo phương pháp nguồn đường.

Sự sai khác này có thể do ảnh hưởng của thất thoát nhiệt từ mẫu ra môi trường đối với mẫu đo 20mm là đáng kể hơn so với mẫu đo 100mm. Để căn chỉnh số liệu đo thực tế với các que đo khác nhau, sự sai lệch này được xác định và đưa vào trong phần mềm tính toán theo thuật toán trên Hình 6, kết quả tính toán thể hiện trong Hình 7 để khử sai số hệ thống của phương pháp đo.



**Hình 7. Phần mềm hiệu chỉnh kết quả đo dựa trên kết quả mô phỏng quá trình dẫn nhiệt**

### 5. Kết luận

Bài báo này trình bày đánh giá sai số của thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt theo sử dụng phương pháp nguồn nhiệt đường thông qua mô phỏng quá trình dẫn nhiệt.

Các kết quả mô phỏng cho thấy sai số tương đối của việc xác định hệ số dẫn nhiệt chủ yếu nằm trong vùng từ -10% đến 10%. Sai số này thay đổi khi chiều dài que đo thay đổi. Chính vì vậy, việc hiệu chỉnh kết quả đo thu được là cần thiết để giảm thiểu sai số của phép đo. Phương pháp tiếp cận xây dựng trong bài báo này có thể được sử dụng để giảm thiểu sai số của phép đo với các dạng que đo phi tiêu chuẩn khác như que đo đầu phát nhiệt và đầu thu nhiệt độ tách rời song song. Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu này là tích hợp phần mềm hiệu chỉnh vào trong các bộ đo thực tế để nâng cao độ tin cậy của thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt chế tạo trong nước.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số **B2022-BKA-20**.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Yüksel, N. (2016), *The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Material*, in *Insulation Materials in Context of Sustainability*.
- [2] Sahin, S. and S.G. Sumnu (2006), *Thermal Properties of Foods*, in *Physical Properties of Foods*. pp.107-155.
- [3] Thoméo, J.C., M.V.A. Costa, and J.F. Lopes Filho (2004), *Effective Thermal Conductivity of Beans via a Steady-State Method*. *International Journal of Food Properties*, Vol.7(1), pp.129-138.
- [4] Longo, G.A. (2008), *A Steady-State Apparatus to Measure the Thermal Conductivity of Solids*. *International Journal of Thermophysics*, Vol.29(2), pp.664-677.
- [5] Huang, L. and L.-S. Liu (2009), *Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method*. *Journal of Food Engineering*, Vol.95(1), pp.179-185.
- [6] Hapenciuc, C.L., et al. (2019), *A steady-state hot-wire method for thermal conductivity measurements of fluids*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.134, pp.993-1002.
- [7] Modi, S.K., D.P. B, and M. Basavaraj (2014), *Effect of moisture content and temperature on thermal conductivity of Psidium guajava L. by line heat source method (transient analysis)*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.78: pp.354-359.
- [8] Blocka, C., et al. (2023), *Effects of moisture content and porosity on the thermal conductivity and volumetric specific heat capacity of pharmaceutical powders*. *Int J Pharm*, Vol.642, p.123130.
- [9] Zhu, S., et al. (2008), *Evaluation and comparison of thermal conductivity of food materials at high pressure*. *Food and Bioproducts Processing*, Vol.86(3), pp.147-153.
- [10] Hamdami, N., J.-Y. Monteau, and A. Le Bail (2003), *Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures*. *International Journal of Refrigeration*, Vol.26(7), pp.809-816.
- [11] Lienhard, J.I.L., J V (2019), *A Heat Transfer Textbook: Fifth Edition*. Dover Publications.
- [12] Rohsenow, W., J. Hartnett, and Y. Cho (1998), *Handbook of Heat Transfer 3rd Edition*. McGraw Hill.
- [13] Đăng Quốc Phú, Trần Thế Sơn, Trần Văn Phú (2024). *Truyền nhiệt*. NXB Giáo dục, Hà Nội.

Ngày nhận bài:	06/04/2024
Ngày nhận bản sửa:	14/04/2024
Ngày duyệt đăng:	19/04/2024