

# NGHIÊN CỨU THIẾT BỊ TRỮ NHIỆT ẨN DẠNG ỐNG CHÙM CÁNH THAN CHÌ

## RESEARCH ON GRAPHITE FIN SHELL AND TUBE LATENT HEAT STORAGE

Nguyễn Thành Phương<sup>1\*</sup>, Park Chan Woo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup>Đại học Quốc gia Jeonbuk - Hàn Quốc

\*Tác giả liên hệ: phuonngnt@dut.udn.vn

(Nhận bài: 09/8/2022; Chấp nhận đăng: 29/9/2022)

**Tóm tắt** - Trữ nhiệt ẩn là phương pháp lưu trữ năng lượng dư thừa và giải phóng năng lượng theo nhu cầu bằng sự chuyển đổi pha của vật liệu. Để chế tạo cánh cho thiết bị (TB) trao đổi nhiệt, than chì là một vật liệu tiềm năng bởi đặc tính độ dẫn nhiệt cao, khối lượng riêng nhẹ và không bị ăn mòn. Trong nghiên cứu này, một TB trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì đã được chế tạo và tiến hành thí nghiệm quá trình sạc và xả nhiệt tại các điều kiện vận hành khác nhau. Vật liệu chuyển đổi pha dùng trong nghiên cứu là sáp paraffin. Ngoài ra, ảnh hưởng của thông số độ dày cánh lên hiệu suất của TB cũng được phân tích. Khi tăng nhiệt độ nước nóng vào TB trữ nhiệt từ 50°C lên 70°C, tổng nhiệt trở giảm 20%. Khi tăng độ dày của cánh than chì từ 1,0 mm – 1,5 mm và 2,0 mm thì công suất nhiệt trên mỗi đơn vị khối lượng vật liệu đạt được tăng lần lượt 19-29%.

**Từ khóa** - Trữ nhiệt ẩn; vật liệu chuyển đổi pha; than chì; vật liệu chế tạo cánh; tiết kiệm năng lượng

### 1. Đặt vấn đề

Năng lượng tái tạo là đề tài thu hút rất nhiều nghiên cứu gần đây để giải quyết vấn đề về nguồn năng lượng thay thế cho các dạng năng lượng truyền thống. Tuy nhiên, khai thác và sử dụng được năng lượng tái tạo theo nhu cầu của con người là nhiệm vụ khó vì dạng năng lượng này phụ thuộc nhiều vào điều kiện tự nhiên. Do đó, lưu trữ năng lượng dư thừa và phân phối lại theo nhu cầu sử dụng là một giải pháp cần thiết để sử dụng năng lượng tái tạo hiệu quả. So với trữ nhiệt bằng nhiệt hiện và bằng phản ứng hóa học, trữ nhiệt ẩn có những đặc tính nổi bật như mật độ năng lượng cao, sự thay đổi nhiệt độ trong quá trình sạc và xả ít. Thành phần quan trọng trong thiết bị (TB) trữ nhiệt ẩn là vật liệu chuyển đổi pha (phase change material - PCM), giải nhiệt độ tan chảy của các loại PCM có thể đáp ứng cho nhiều mục đích từ trữ lạnh trong điều hòa không khí [1], hệ thống chiller [2] đến trữ nhiệt cho nhà máy điện mặt trời [3] và hệ thống tận dụng nhiệt thải công nghiệp [4]. Hạn chế lớn nhất của PCM là độ dẫn nhiệt rất bé làm ảnh hưởng đến thời gian sạc và xả của thiết bị trữ nhiệt. Một số phương pháp thường được sử dụng để nâng cao hiệu quả truyền nhiệt của thiết bị trữ nhiệt ẩn bao gồm: Sử dụng phụ gia có độ dẫn nhiệt cao, mở rộng diện tích trao đổi nhiệt bằng cánh hoặc bọc giữ vật liệu chuyển đổi pha bằng vật liệu có độ dẫn nhiệt cao.

Trong đó, phương pháp sử dụng cánh là phương pháp đơn giản và mang lại hiệu quả cao. Mahdi [5] đã nghiên cứu về lượng PCM nóng chảy trong một thiết bị trao đổi

**Abstract** - Latent heat storage is a method to store excessive energy and release on demand by the phase change process of a material. For fin manufacturing of a heat exchanger, graphite is a potential candidate due to its characteristic of high thermal conductivity, extreme light density and non-corrosiveness. In this research, a graphite fin shell and tube latent heat storage is produced and conducted experiments on different operating conditions. The phase change material in this research is paraffin wax (n-tetracosan). Otherwise, the effect of fin thickness on the thermal performance of the device is also considered. When increasing the inlet heat transfer fluid temperature from 50°C to 70°C, the total thermal resistance decreased 20%. And the thicker the graphite fin thickness from 1.0 mm – 1.5 mm and 2.0 mm, the higher the power per mass of 19-29%, respectively.

**Key words** - Latent heat storage; phase change material; graphite; fin material; saving energy

nhiệt dạng ống lồng ống với cánh cải tiến. Kết quả cho thấy hệ thống sử dụng cánh làm phương pháp tăng cường truyền nhiệt cho hiệu quả cao hơn hệ thống dùng phụ gia kích thước bé. Hoseinzadeh [6] đã đánh giá ảnh hưởng của các thông số hình học của cánh lên thiết bị trữ nhiệt ẩn và thấy rằng tăng độ dày của cánh giúp tăng lượng PCM hóa rắn. Shengxiang đã mô phỏng một thiết bị trữ nhiệt ẩn dùng cánh đồng để nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng cánh, vị trí cánh, số lượng cánh và nhiệt độ lưu chất truyền nhiệt lên quá trình sạc. Kết quả rút ra được là số lượng cánh phụ thuộc vào hình dạng cánh.

Sau khi tổng hợp các nghiên cứu, hầu hết các thiết bị trữ nhiệt ẩn sử dụng cánh bằng kim loại. Tuy nhiên, vật liệu kim loại có nhược điểm là bị ăn mòn và làm tăng đáng kể trọng lượng của thiết bị. Do đó, trong nghiên cứu này, thiết bị trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì được so sánh với TB dùng cánh bằng đồng. Ngoài ra, nhiệt độ đầu vào và lưu lượng lưu chất truyền nhiệt cũng được nghiên cứu để tìm ra điều kiện vận hành tối ưu cho thiết bị.

### 2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

#### 2.1. Lựa chọn vật liệu chuyển đổi pha (PCM)

Có nhiều loại PCM có thể sử dụng để trữ nhiệt ẩn như: Muối, axit béo, sáp. Việc lựa chọn vật liệu chuyển đổi pha cần căn cứ vào nhiệt độ chuyển đổi pha, giá cả vật liệu, mức độ có sẵn và độ bền lý hóa. Với mục đích ứng dụng quá trình trữ nhiệt cho hệ thống nước nóng dùng trong hộ gia đình, khoảng nhiệt độ thích hợp cho mục đích này là từ

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Thanh Phuong)

<sup>2</sup> Jeonbuk National University - South Korea (Park Chan Woo)

40-50°C [7-9]. Sau quá trình cân nhắc một số loại PCM, vật liệu sáp với thành phần chính là n-tetracosane ( $C_{24}H_{50}$ ) (OCI Chemical Co., Ltd; Trung Quốc) được lựa chọn cho nghiên cứu này. Đây là một loại sáp có giá thành rẻ 300.000 đồng/1 kg, giá trị nhiệt lượng chuyển pha cao và không gây ăn mòn hay phản ứng với các vật liệu khác trong thiết bị. Các thông số nhiệt động quan trọng của vật liệu cần được thực hiện đo đạc chính xác để phục vụ cho các quá trình tính toán về sau. Thiết bị phân tích nhiệt quét vi sai (DSC) (DSC 214, NETZSCH, Đức) được sử dụng để xác định điểm tan chảy, đông đặc, nhiệt dung riêng và nhiệt lượng chuyển pha của vật liệu. Khối lượng riêng của vật liệu được xác định bằng cân điện tử (Sartorius Cubis, Đức) dựa trên định luật Ác-si-mét. Độ dẫn nhiệt của PCM được xác định nhờ thiết bị đo độ dẫn nhiệt (C-Therm, Canada) và thiết bị xung laser được sử dụng để đo độ dẫn nhiệt của vật liệu than chì (LFA 447, NETZSCH, Đức). Các thông số nhiệt động quan trọng của vật liệu chuyển đổi pha và than chì được trình bày trong Bảng 1, giải đo và độ chính xác của các thiết bị đo thông số được liệt kê trong Bảng 2.

**Bảng 1.** Thông số nhiệt động của sáp và than chì

Vật liệu	Thông số	Giá trị
Sáp	Nhiệt độ chuyển đổi pha (°C)	Điểm bắt đầu: 46 Điểm kết thúc: 48
	Độ dẫn nhiệt (W/m.K)	0,24
	Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	0,85
	Nhiệt dung riêng (kJ/kg.K)	2,74
	Nhiệt ẩn chuyển pha (kJ/kg)	153
Than chì	Độ dẫn nhiệt (W/m.K)	150
	Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	1,8
	Nhiệt dung riêng (kJ/kg.K)	0,77

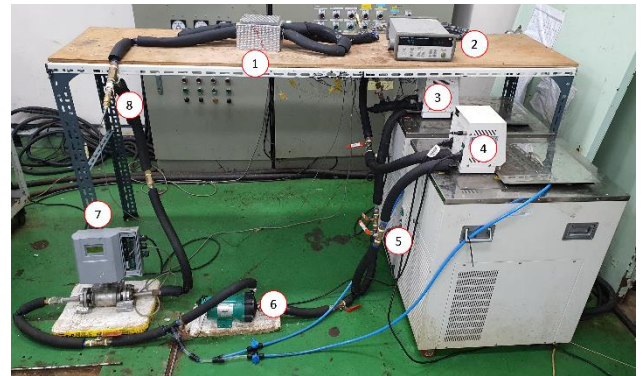
**Bảng 2.** Giải đo và độ chính xác của các thiết bị đo

Thiết bị	Giải đo	Độ chính xác
Thiết bị phân tích nhiệt quét vi sai [10]	-170 - 600°C	± 0,05% - ± 0,2%
Cân điện tử [11]	1,5 - 2.200 g	±1 mg
Thiết bị đo độ dẫn nhiệt [12]	0 - 50°C	±5%
Thiết bị xung laser [13]	25°C - 300°C	±5%
Lưu lượng kế [14]	0,05 lít/phút - 66,5 m <sup>3</sup> /h	±0,25%
Cảm biến nhiệt	0°C - 100°C	±0,1°C

### 2.2. Sơ đồ nguyên lý hệ thống trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì

Trước khi tiến hành thí nghiệm, một lượng sáp 0,83 kg được nạp vào trong thiết bị trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì (1). Không nên nạp PCM đầy mà nên chừa một khoảng hở giữa phần đỉnh của PCM với phần nắp hộp mục đích là để bù sự giãn nở thể tích của quá trình chuyển pha từ rắn sang lỏng. Để bắt đầu quá trình sạc cho thiết bị trữ nhiệt, nguồn nhiệt nóng là thiết bị gia nhiệt bằng điện trở (3) (CPT, RCHM20, Hàn Quốc) được vận hành để gia nhiệt cho nước lên đến nhiệt độ mong muốn 50°C - 60°C - 70°C. Sau khi đạt được nhiệt độ yêu cầu, hai van bị tay gạt (5) ở đầu vào và đầu ra của nguồn nóng được mở để nước nóng đi vào thiết bị trữ nhiệt ẩn. Lưu lượng của nước được đo tại lưu lượng kế (7) (Badger Meter, Mỹ). Tiếp theo, lưu chất chảy qua thiết bị trao đổi nhiệt dạng ống

chùm cánh than chì và truyền nhiệt cho vật liệu chuyển đổi pha. Nhiệt độ đầu vào và đầu ra của thiết bị trữ nhiệt cũng như thiết bị gia nhiệt được đo và ghi lại nhờ cảm biến nhiệt (8) (PT100) và thiết bị ghi dữ liệu (2) (Agilent 34970a, Mỹ). Cuối cùng, nước quay trở về thiết bị gia nhiệt (3) và quá trình lặp lại cho đến khi hoàn thành quá trình tan chảy của PCM. Lưu chất được luân chuyển trong hệ thống nhờ bơm (6). Ngược lại, đối với quá trình xả nhiệt, một thiết bị duy trì nước làm mát ở 20°C đóng vai trò là nguồn nhiệt lạnh (4). Việc chuyển đổi nguồn nhiệt nóng và lạnh được thực hiện nhờ việc khóa cặp van qua thiết bị này và mở cặp van qua thiết bị còn lại. Điều kiện vận hành được thay đổi để đánh giá ảnh hưởng lên thiết bị trữ nhiệt dạng ống chùm cánh than chì. Bảng 3 tóm tắt các điều kiện về nhiệt độ nước vào thiết bị và lưu lượng của lưu chất được sử dụng trong nghiên cứu.



**Hình 1.** Sơ đồ nguyên lý hệ thống trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh

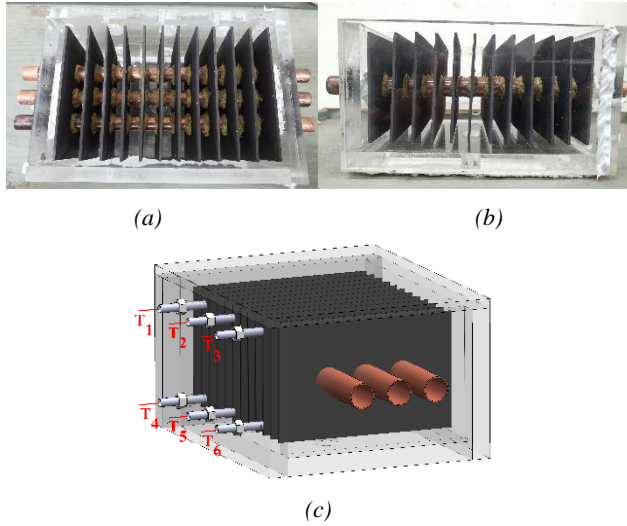
**Bảng 3.** Tổng hợp điều kiện vận hành các thí nghiệm trong nghiên cứu

Vật liệu làm cánh	Lưu lượng (lít/phút) (l/ph)	Nhiệt độ đầu vào nước nóng (°C)	Nhiệt độ đầu vào nước làm mát (°C)
Đồng	5, 7, 9, 11	50	20
	5, 7, 9, 11	60	
	5, 7, 9, 11	70	
Than chì	5, 7, 9, 11	50	
	5, 7, 9, 11	60	
	5, 7, 9, 11	70	

### 2.3. Thiết bị trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì

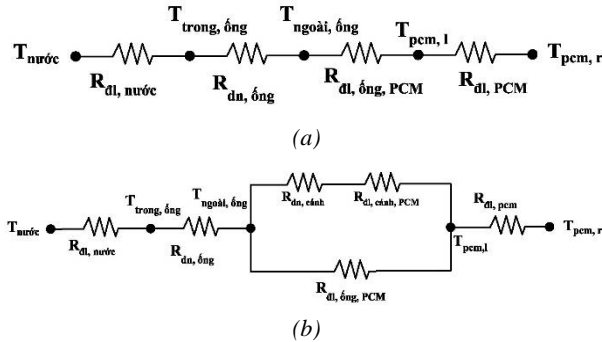
Thiết bị trữ nhiệt dạng ống chùm cánh than chì trên Hình 2 có dạng hình hộp chữ nhật, vỏ ngoài được làm bằng vật liệu nhựa trong suốt để dễ quan sát và thu thập hình ảnh của trình chuyển đổi pha. Hộp có kích thước ngoài là 125x100x80x10 mm (dài x rộng x cao x dày). Ba ống đồng độ dài 200 mm, đường kính ống (12 - 12,7 mm) được bố trí đối xứng xuyên qua hộp chữ nhật; 12 cánh than chì hình chữ nhật với độ dày 1,0 mm, 1,5 mm và 2,0 mm được gắn vào bên ngoài ống đồng. Tại bề mặt tiếp xúc của ống đồng và cánh than chì được bôi keo truyền nhiệt (OB-200, OMEGA, Mỹ) để loại bỏ khoảng trống giữa hai bề mặt truyền nhiệt. Kích thước của cánh than chì là 62x98 mm (rộng x dài). Trong quá trình trao đổi nhiệt, nước chuyển động bên trong ống đồng và truyền nhiệt qua thành ống cùng với bề mặt cánh cho vật liệu chuyển đổi pha tiếp xúc với bề mặt ngoài ống và cánh. Nhiệt độ của PCM bên trong

thiết bị trữ nhiệt được thu thập nhờ 6 cảm biến nhiệt được gắn vào thiết bị như trên Hình 2. Thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện nhiệt độ môi trường 15°C tại Hàn Quốc, do đó để hạn chế tối đa sự trao đổi nhiệt với môi trường bên ngoài, thiết bị trữ nhiệt ẩn và hệ thống ống vận chuyển lưu chất được bọc cách nhiệt bằng gen cách nhiệt có độ dày 20 mm.



**Hình 2.** Thiết bị trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì (a) mặt bằng, (b) mặt đứng và (c) vị trí của các cảm biến nhiệt theo dõi nhiệt độ của PCM trong thiết bị

**2.4. Cơ sở tính toán thông số đánh giá**



**Hình 3.** Sơ đồ nhiệt trở của thiết bị trữ nhiệt ẩn trong trường hợp (a) không cánh (b) có cánh

**Bảng 4.** Các thành phần của nhiệt trở

Nhiệt trở (R)	Định nghĩa
$R_{dl, \text{nước}}$	Quá trình đối lưu từ nước đến thành ống đồng
$R_{dn, \text{ống}}$	Quá trình dẫn nhiệt từ thành trong đến thành ngoài của ống
$R_{dl, \text{ống, PCM}}$	Quá trình đối lưu từ bề mặt ngoài ống đến PCM
$R_{dl, \text{PCM}}$	Quá trình đối lưu từ PCM lỏng sang PCM rắn
$R_{dn, \text{ống, cánh}}$	Quá trình dẫn nhiệt từ ống sang cánh
$R_{dn, \text{cánh, PCM}}$	Quá trình dẫn nhiệt từ cánh sang PCM

- Trường hợp không cánh

$$R_{\text{tổng}} = R_{dl, \text{nước}} + R_{dn, \text{ống}} + R_{dl, \text{ống, PCM}} + R_{dl, \text{PCM}} \quad (1)$$

- Trường hợp có cánh

$$R_{\text{tổng}} = R_{dl, \text{nước}} + R_{dn, \text{ống}} + \frac{R_{\text{cánh}} R_{dl, \text{ó, PCM}}}{R_{\text{cánh}} + R_{dl, \text{ó, PCM}}} + R_{dl, \text{PCM}} \quad (2)$$

$$R_{\text{cánh}} = R_{dn, \text{ống, cánh}} + R_{dl, \text{cánh, PCM}} \quad (3)$$

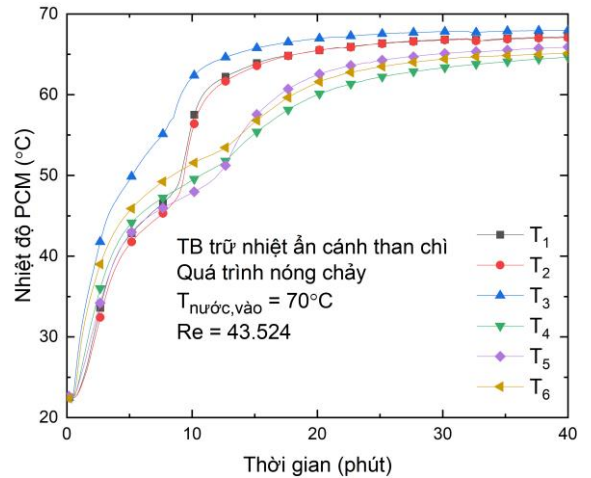
Ngoài ra, tổng nhiệt trở của quá trình truyền nhiệt có thể được tính toán bằng Công thức (4). Để có thể tính toán nhiệt trở bằng công thức này một số giả định và đơn giản hóa cần được thực hiện như: nhiệt lượng tổn thất từ thiết bị trữ nhiệt ẩn ra môi trường được bỏ qua và nhiệt độ trung bình của nước là trung bình cộng của nhiệt độ nước đầu vào và đầu ra thiết bị, nhiệt độ của PCM là nhiệt độ trung bình của 6 điểm bố trí cảm biến nhiệt bên trong thiết bị.

$$R_{\text{tổng}} = \frac{T_{tb, \text{nước}} - T_{tb, \text{PCM}}}{\dot{Q}} \quad (4)$$

**3. Bàn luận**

**3.1. Quá trình tích trữ và giải phóng năng lượng nhiệt**

**3.1.1. Quá trình sạc**



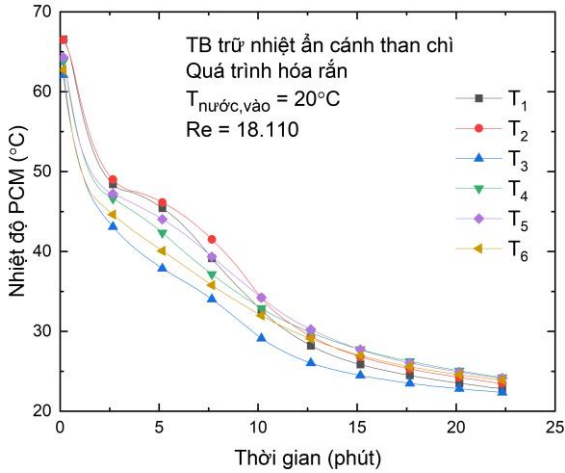
**Hình 4.** Sự thay đổi nhiệt độ của PCM theo thời gian tại 6 vị trí trong quá trình sạc của TB trữ nhiệt ẩn cánh than chì độ dày 2,0 mm tại  $T_{\text{nước, vào}} = 70^\circ\text{C}$ ,  $Re = 43.524$

Hình 4, trình bày sự thay đổi nhiệt độ của PCM tại 6 vị trí khác nhau trong quá trình nóng chảy của TB trữ nhiệt ẩn cánh than chì độ dày 1,0 mm. Tại giai đoạn đầu, nhiệt độ của các điểm cùng xuất phát từ giá trị 22°C và tăng lên đến khoảng 45°C, hình thức trao đổi nhiệt chủ yếu bằng sự dẫn nhiệt từ nước nóng đến PCM thông qua thành ống và cánh than chì. Đối với PCM, giai đoạn này vật liệu nhận nhiệt hiện và có khoảng tăng nhiệt độ lớn. Sau đó, khi đạt đến khoảng 46°C - 48°C; tốc độ tăng nhiệt độ giảm dần và PCM tiến vào giai đoạn bắt đầu tan chảy phần nằm ở gần ống đồng. Đây là giai đoạn trao đổi nhiệt chủ yếu bằng nhiệt ẩn do sự chuyển pha của vật liệu. Lượng PCM tan chảy càng nhiều tạo ra sự khác biệt nhiệt độ của phần vật liệu phía trên và phía dưới của TB, hiện tượng này là do sự đối lưu tự nhiên của dòng PCM nóng chảy. Cuối cùng, sau khi hoàn thành quá trình chuyển pha, nhiệt độ của PCM lỏng tiếp tục gia tăng lên đến 68°C.

**3.1.2. Quá trình xả**

Ngược lại, sau khi kết thúc quá trình sạc cho TB trữ nhiệt cánh than chì, van ba ngã được đảo chiều để TB tiến hành xả nhiệt cho nước làm mát 20°C. Quá trình xả nhiệt là quá trình chuyển pha từ lỏng sang rắn của vật liệu PCM. Tương tự như quá trình sạc nhưng theo chiều ngược lại.

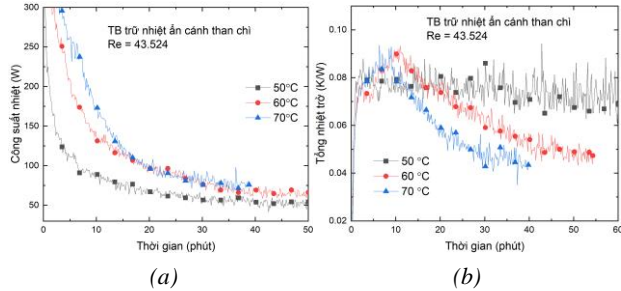
Thời gian hoàn thành quá trình xả nhỏ hơn quá trình sạc nhờ sự tăng cường truyền nhiệt của cánh than chì.



**Hình 5.** Sự thay đổi nhiệt độ của PCM theo thời gian tại 6 vị trí trong quá trình xả của TB trữ nhiệt ẩn cánh than chì độ dày 2,0 mm tại  $T_{nước,vào}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $Re=18.110$

**3.2. Ảnh hưởng của điều kiện vận hành**

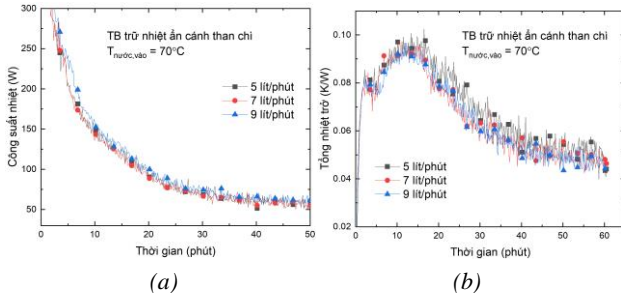
**3.2.1. Nhiệt độ đầu vào của lưu chất truyền nhiệt**



**Hình 6.** So sánh (a) công suất nhiệt và (b) tổng nhiệt trở của TB trữ nhiệt cánh than chì độ dày 2,0 mm khi thay đổi nhiệt độ đầu vào của nước  $50^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$

Để đánh giá ảnh hưởng của việc thay đổi nhiệt độ nước đầu vào lưu chất truyền nhiệt lên TB trữ nhiệt cánh than chì, đại lượng công suất nhiệt và tổng nhiệt trở được lựa chọn để so sánh giữa các trường hợp. Khi tăng nhiệt độ từ  $50^{\circ}\text{C}$  lên  $60^{\circ}\text{C}$  và  $70^{\circ}\text{C}$ , công suất nhiệt cũng tăng dần trong khi đó tổng nhiệt trở tuy có dao động nhưng xu hướng chung vẫn là giảm dần.

**3.2.2. Lưu lượng của lưu chất truyền nhiệt**

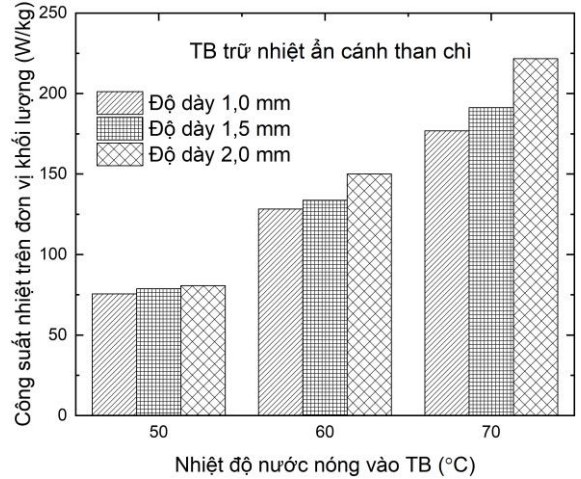


**Hình 7.** So sánh (a) công suất nhiệt và (b) tổng nhiệt trở của TB trữ nhiệt cánh than chì độ dày 2,0 mm khi thay đổi lưu lượng của lưu chất truyền nhiệt 5l/ph-7l/ph -9l/ph

Từ Hình 7 ta thấy, so sánh với ảnh hưởng của việc thay đổi nhiệt độ vào lưu chất truyền nhiệt, điều chỉnh lưu lượng nước nóng từ 5l/ph-7l/ph-9l/ph gần như không tạo ra thay

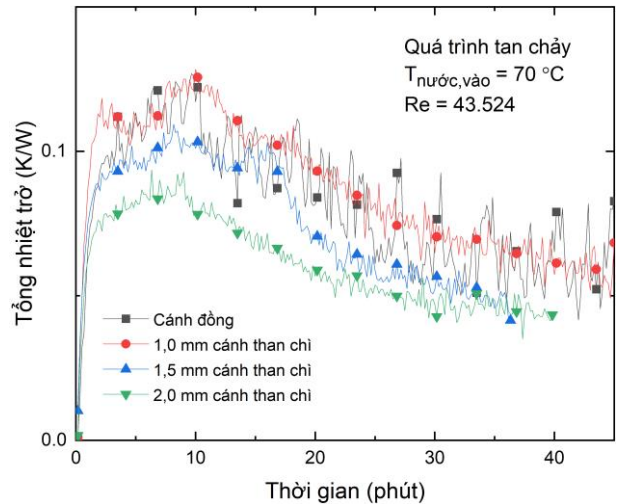
đổi rõ ràng đối với công suất nhiệt và tổng nhiệt trở của TB trữ nhiệt cánh than chì.

**3.3. Ảnh hưởng của độ dày và vật liệu làm cánh**



**Hình 8.** So sánh công suất nhiệt trung bình trên mỗi đơn vị khối lượng PCM của TB trữ nhiệt ẩn cánh than chì với sự thay đổi độ dày cánh 1,0-1,5-2,0 mm và  $T_{nước,vào}=50-60-70^{\circ}\text{C}$

Cánh than chì càng dày thì thể tích của nó chiếm trong TB càng lớn làm giảm lượng vật liệu PCM nạp được vào trong TB. Cụ thể, nếu làm kích thước cánh dày hơn 2,0 mm sẽ làm giảm thể tích của PCM nạp vào hơn 8%, làm giảm tổng nhiệt lượng có thể trữ được bên trong thiết bị. Do đó, khi so sánh ảnh hưởng của độ dày cánh cần xét công suất nhiệt trung bình trên mỗi đơn vị khối lượng vật liệu. Ở cả ba mức nhiệt độ nước nóng vào TB, cánh than chì 2,0 mm đều cho giá trị công suất nhiệt lớn hơn 1,5 mm và 1,0 mm. Mức độ lớn hơn càng rõ ràng khi nhiệt độ lưu chất càng tăng. Cụ thể, tại nhiệt độ  $70^{\circ}\text{C}$ , công suất nhiệt trên mỗi đơn vị PCM của cánh dày 2,0 mm lớn hơn cánh 1,5 mm 19% và cánh 1,0 mm 29%.



**Hình 9.** So sánh tổng nhiệt trở thay đổi theo thời gian ở các độ dày cánh và vật liệu khác nhau

Tổng nhiệt trở là đại lượng đặc trưng cho mức độ cản trở dòng nhiệt trên đường truyền, Hình 9 so sánh giá trị tổng nhiệt trở theo thời gian của các trường hợp ống trơn, cánh đồng và cánh than chì với độ dày khác nhau trong quá trình tan chảy của PCM. Khi không sử dụng cánh, giá trị tổng nhiệt trở rất lớn do diện tích bề mặt truyền nhiệt nhỏ

từ bề mặt ngoài của ống đồng đến PCM và độ dẫn nhiệt của PCM rất bé làm cản trở quá trình truyền nhiệt. Trong các trường hợp sử dụng cánh để tăng cường sự trao đổi nhiệt, cánh đồng có giá trị tổng nhiệt trở nhỏ xấp xỉ 0,1 K/W bằng cánh than chì độ dày 1,0 mm. Tuy nhiên, cánh đồng có giá trị nhiệt trở giao động rất mạnh, lí do vì độ dẫn nhiệt của đồng quá cao so với PCM nên dẫn đến độ trễ. Đối với cánh than chì, giá trị nhiệt trở của trường hợp cánh càng dày thì càng nhỏ đồng thời độ biến thiên của nhiệt trở cũng ít hơn, do đó quá trình truyền tải nhiệt cho PCM ổn định hơn so với dùng vật liệu đồng.

#### 4. Kết luận

Trữ nhiệt ẩn là phương pháp tận dụng nguồn năng lượng hiệu quả để giải quyết vấn đề thiếu hụt năng lượng hiện nay. Trong nghiên cứu này, thiết bị trữ nhiệt ẩn dạng ống chùm cánh than chì cho thấy đặc tính tốt trong quá trình sạc và xả. Một số kết quả rút ra từ nghiên cứu:

- Ảnh hưởng của thay đổi nhiệt độ đầu vào của nước nóng rõ ràng hơn so với điều chỉnh lưu lượng lưu chất.
- Tăng độ dày cánh than chì thêm 0,5 - 1,0 mm giúp tăng công suất nhiệt trên đơn vị khối lượng PCM đến 19-29%.
- So sánh với vật liệu đồng, cánh than chì cho tổng nhiệt trở nhỏ hơn đến 20% và quá trình truyền nhiệt diễn ra ổn định hơn.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Said, H.J.A.E. Hassan, "Parametric study on the effect of using cold thermal storage energy of phase change material on the performance of air-conditioning unit", *J Applied Energy*, 230, 2018, 1380-1402.
- [2] N.A.C. Sidik, T.H. Kean, H.K. Chow, A. Rajaandra, S. Rahman, J.I.C.i.H. Kaur, M. Transfer, "Performance enhancement of cold thermal energy storage system using nanofluid phase change materials: a review", *J International Communications in Heat Mass Transfer*, 94, 2018, 85-95.
- [3] B. Xu, P. Li, C.J.A.E. Chan, "Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments", *Journal of Applied Energy*, 160, 2015, 286-307.
- [4] K. Du, J. Calautit, P. Eames, Y.J.R.E. Wu, "A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply", *J Renewable Energy*, 168, 2021, 1040-1057.
- [5] J.M. Mahdi, S. Lohrasbi, D.D. Ganji, E.C.J.I.J.o.H. Nsofor, M. Transfer, "Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger", *J International Journal of Heat Mass Transfer*, 124, 2018, 663-676.
- [6] K. Hosseinzadeh, M. Alizadeh, M. Tavakoli, D.J.A.T.E. Ganji, "Investigation of phase change material solidification process in a LHTESS in the presence of fins with variable thickness and hybrid nanoparticles", *J Applied Thermal Engineering*, 152, 2019, 706-717.
- [7] S. Canbazoglu, A. Sahinaslan, A. Ekmekyapar, Y.G. Aksoy, F.J.E. Akarsu, buildings, "Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system", *J Energy Buildings*, 37(3), 2005, 235-242.
- [8] R. Murray, L. Desgrosseilliers, J. Stewart, N. Osbourne, G. Marin, A. Safatli, D. Groulx, W.M. Anne, *Design of a latent heat energy storage system coupled with a domestic hot water solar thermal system*, Linköping University Electronic Press, 2011.
- [9] B. Lamrani, F. Kuznik, A.J.R.E. Draoui, "Thermal performance of a coupled solar parabolic trough collector latent heat storage unit for solar water heating in large buildings", *J Renewable Energy*, 162, 2020, 411-426.
- [10] N. Co., "Differential Scanning Calorimetry DSC 214 Polyma Method, Technique, Applications", <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/products/differential-scanning-calorimeter-dsc-differential-thermal-analyzer-dta/dsc-214-polyma>, 26/08/2022.
- [11] S. AG, "User Manual Sartorius Cubis Series Electronic Semimicro Micro, Precision and Analytical Balances MSU Models", <https://www.sartorius.com/download/42384/man-cubis-msu-user-manual-wms6006-e-data.pdf>, 26/08/2022.
- [12] C.-T.T. Ltd., "TCi Thermal Conductivity Analyzer: Easy MTPS Testing", <https://ctherm.com/thermal-conductivity-instruments/tci-thermal-conductivity-analyzer/>, 26/08/2022.
- [13] N. Co., "Thermal Diffusivity - Thermal Conductivity LFA 447 Nano Flash", [pec.engr.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/955/2018/12/LFA447\\_Brochure.pdf](http://pec.engr.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/955/2018/12/LFA447_Brochure.pdf), 26/08/2022.
- [14] B. Meter, "AC/DC Powered Electromagnetic Flow Meters for All Processes", <https://badgermeter.co.uk/flow-meter-technologies/electromagnetic-flow-meters/mid2-ac-dc-powered-electromagnetic-flow-meters-for-all-processes/>, 26/08/2022.
- [15] Y.J.Ç. Çengel, Afshin J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications/Yunus A", McGraw Hill Education, 2015.