

# MÔ HÌNH MÔ PHÒNG TANK TRỮ NHIỆT DƯỚI DẠNG PHÂN TẦNG NHIỆT DÙNG PHƯƠNG PHÁP THỂ TÍCH HỮU HẠN

## A SIMULATION MODEL OF STRATIFIED THERMAL STORAGE TANK USING FINITE VOLUME METHOD

Huỳnh Ngọc Hùng\*, Phạm Duy Vũ

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

\*Tác giả liên hệ: hnhung@dut.udn.vn

(Nhận bài: 06/7/2022; Chấp nhận đăng: 26/8/2022)

**Tóm tắt** - Mô hình số một chiều được thiết lập để nghiên cứu sự phân bố nhiệt độ trong các tank tích trữ nhiệt ở dạng nhiệt hiện dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn. Ảnh hưởng của sự hòa trộn nước ở đầu vào các ống phân phối cũng được kể đến trong mô hình. Mô hình số được áp dụng để khảo sát phân bố nhiệt độ cho 2 tank tích trữ có qui mô thể tích khác nhau từ các nghiên cứu đã được công bố: 0,1m<sup>3</sup> và 2000m<sup>3</sup>. Kết quả phân bố nhiệt độ xác định từ mô hình số được so sánh với dữ liệu đo đạc từ thực nghiệm. Việc kiểm chứng cho thấy, mô hình cho kết quả đáng tin cậy, các kết quả mô phỏng sai khác không lớn do với dữ liệu thực nghiệm. Mô hình phát triển trong bài báo này có thể áp dụng để nghiên cứu tối ưu các tank trữ nhiệt đặc biệt là các tank có thể tích lớn mà việc áp dụng các mô hình hai hoặc ba chiều đòi hỏi rất lớn về tài nguyên máy tính.

**Từ khóa** - Tích trữ nhiệt; sự phân tầng nhiệt; phương pháp thể tích hữu hạn (FVM); phân bố nhiệt độ; tích trữ nhiệt hiện.

### 1. Đặt vấn đề

Tích trữ năng lượng dưới dạng nhiệt hiện được ứng dụng rộng rãi trong thực tế như trữ lạnh trong các hệ thống điều hòa không khí, trữ nhiệt trong các hệ thống thu năng lượng mặt trời, chu trình kết hợp nhiệt – điện, bom nhiệt và các hệ thống khác. Trong các hệ thống điều hòa không khí làm mát bằng nước (water chiller), lạnh được tích trữ ở giờ thấp điểm, thường vào ban đêm, và được sử dụng ở giờ cao điểm. Việc này giúp tránh quá tải lưới điện ở giờ cao điểm cũng như tiết kiệm chi phí vận hành. Ngoài ra, hệ thống hoạt động vào ban đêm thì hiệu suất của hệ thống cũng cao hơn. Trong khi ở các hệ thống thu năng lượng mặt trời, năng lượng nhiệt được tích trữ vào ban ngày và được dùng cho ban đêm.

Với việc tích trữ năng lượng dưới dạng nhiệt hiện trong khoảng nhiệt độ thấp, thì nước sử dụng khá phổ biến vì có khối lượng riêng và nhiệt dung riêng cao, sẵn có, chi phí thấp và an toàn với môi trường [1]. Hệ thống tích trữ năng lượng dưới dạng nhiệt hiện dùng nước sử dụng 1 bình tích trữ dựa trên sự phân tầng nhiệt độ được sử dụng rộng rãi vì hệ thống đơn giản, giảm được không gian lắp đặt, dễ vận hành bảo dưỡng và giúp giảm được chi phí đầu tư so với hệ thống tích trữ nhiệt ở 2 bình riêng biệt [2]. Với hệ thống tích trữ năng lượng sử dụng 1 bình chứa, cả nước nóng và nước lạnh được chứa vào 1 bình, không có vách ngăn cách. Nước nóng vào ở đỉnh bình và nước lạnh được lấy ra ở đáy bình sự phân tầng của nước trong bình hình thành nhờ lực nâng khi có sự chênh lệch nhiệt độ. Có bốn nguyên nhân chính góp phần làm tổn thất và suy giảm hiệu quả làm việc

**Abstract** - A one-dimension numerical model is developed to study the temperature distribution in the sensible heat storage tank using the Finite volume method. The effect of the water mixing at inlet diffuser is also included in the model. The model is applied to investigate the temperature profile in the two tanks having different volume scales, 0.1m<sup>3</sup> and 2000m<sup>3</sup>, from literature being published. The temperature-distribution results are compared with experimental data. The validations of the model show that, the model give the reliable results. The simulation results are not much different from the experimental data. The model developed in this paper can be applied to optimally study heat storage tanks, especially large volume tanks, which the application of two- or three-dimensional models require a lot of computer resources.

**Key words** - Thermal storage; heat stratification; Finite Volume Method (FVM); temperature distribution; sensible heat storage.

của tank tích trữ [1, 3, 4, 5]: (i) Nhiệt thất thoát ra môi trường xung quanh; (ii) Khuếch tán nhiệt từ lớp nước nóng sang lớp nước lạnh; (iii) Dẫn nhiệt ở vỏ bình cùng với tổn thất tạo ra các dòng đối lưu trong khối chất lỏng; (iv) Quá trình hòa trộn xảy ra ở các đầu ống phân phối nước vào bình trong chu kỳ nạp và xả.

Các nghiên cứu liên quan đến sự phân tầng nhiệt độ tập trung vào xác định các nguyên nhân gây phá vỡ sự phân tầng như đã đề cập ở trên từ đó tìm ra các giải pháp để nâng cao hiệu quả của tank tích trữ. Phương pháp giải tích hay còn gọi là phương pháp chính xác được phát triển để nghiên cứu tank tích trữ có thể tìm thấy trong một số nghiên cứu [6, 7, 8]. Phương pháp này thường được dựa trên một số giả thiết để bài toán trở nên đơn giản hơn [2]. Mặc dù vậy, do đặc điểm của bài toán trong tank tích trữ là bài toán không ổn định và tính chất nhiệt phức tạp nên các phương pháp chính xác cũng trở nên phức tạp ngay cả đối với các mô hình một chiều. Chính vì vậy, hầu hết các nghiên cứu liên quan đến sự phân tầng thường dựa vào các phương pháp thực nghiệm hoặc phương pháp số hơn là phương pháp giải tích [1, 3]. Các nghiên cứu thực nghiệm chủ yếu tập trung vào phân tích sự phân bố nhiệt độ của nước trong tank kể đến sự ảnh hưởng của các loại đầu phân phối nước khác nhau vào bình. Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện chủ yếu với các tank tích trữ có thể tích nhỏ và được dùng để kiểm chứng các mô hình mô phỏng lý thuyết [9, 10]. Với phương pháp số, phương pháp sai phân hữu hạn (FDM) cho bài toán một chiều được áp dụng rộng rãi. Với sự phát triển của máy tính, nhiều phần mềm thương mại về

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology (Huynh Ngoc Hung, Pham Duy Vu)

khí động lực học tính toán dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và thể tích hữu hạn (FVM) như COMSOL, ANSYS Fluent đã được áp dụng để nghiên cứu tối ưu các tank tích trữ [11, 12, 13].

Mô hình mô phỏng ba chiều có khả năng mô tả đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả làm việc của tank tích trữ. Tuy nhiên, với việc lựa chọn mô hình này để mô phỏng các hệ thống tích trữ lớn sẽ không phù hợp vì yêu cầu tài nguyên máy tính lớn ngay cả khi áp dụng mô hình hai chiều. Lúc này, mô hình mô phỏng một chiều là sự lựa chọn phù hợp hơn cho dù độ chính xác thấp hơn. Mô hình một chiều cũng được lựa chọn của một số phần mềm thương mại dùng cho việc mô phỏng sự thay đổi nhiệt độ trong tank tích trữ như TRNSYS (Transient System Simulation Tool). Độ chính xác của mô hình một chiều có thể được cải thiện bởi việc dùng các hệ số hiệu chỉnh kể đến các yếu tố ảnh hưởng. Ngoài ra, mô hình một chiều phù hợp cho mô phỏng các tank trữ được thiết kế tối ưu vì các tank tích trữ tối ưu thường có dòng chuyển động của môi chất chủ yếu là một chiều [10]. Các mô hình số một chiều dựa trên phương pháp FDM được xây dựng để nghiên cứu sự phân tầng nhiệt độ cho các tank trữ nhỏ có thể tìm thấy trong các nghiên cứu [12, 14, 15]. Áp dụng mô hình một chiều vào tank tích trữ có kích thước lớn được thực hiện bởi Joko Waluyo [16]. Ở nghiên cứu này, mô hình một chiều được xây dựng dựa trên phương pháp FDM với sai phân thời gian theo phương pháp tường minh (explicit scheme) có kể đến sự dẫn nhiệt ở vỏ tank, sự dẫn nhiệt trong chất lỏng và sự ảnh hưởng của sự hòa trộn từ các ống phân phối nước vào bình. Mô hình được áp dụng mô phỏng tank lạnh có thể tích 5400m<sup>3</sup> cho kết quả phân bố nhiệt độ phù hợp với các dữ liệu đo được từ vận hành thực tế.

Trong nghiên cứu này, mô hình số một chiều dựa trên phương pháp FVM được phát triển để nghiên cứu sự phân tầng nhiệt của nước trong tank có kể đến ảnh hưởng của sự hòa trộn của dòng chất lỏng vào bình. Mô hình được áp dụng để mô phỏng sự phân bố nhiệt độ cho cả tank chứa qui mô nhỏ và lớn. Kết quả của mô hình được so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã được công bố từ các nghiên cứu [17, 18].

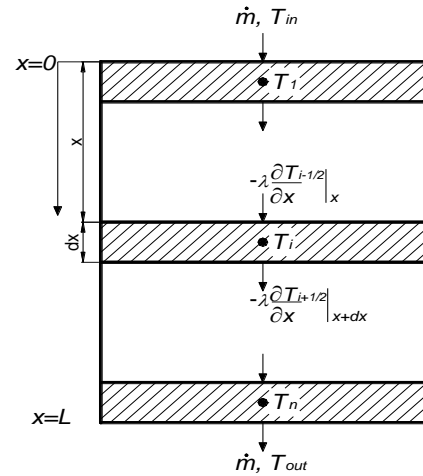
## 2. Mô hình toán và xây dựng mô hình mô phỏng số

### 2.1. Mô hình toán cho tank tích trữ nhiệt

Mô hình một chiều cho việc nghiên cứu tank tích trữ có thể đơn giản dựa trên một số giả thiết:

- 1) Bỏ qua tổn thất nhiệt từ tank ra môi trường. Thường tank được cách nhiệt tốt thì lượng nhiệt tổn thất không đáng kể;
- 2) Bỏ qua ảnh hưởng dẫn nhiệt của vỏ tank;
- 3) Nhiệt độ của môi chất đầu vào tank không đổi.

Mô hình toán học của tank tích trữ được xây dựng dựa trên bài toán một chiều kể đến ảnh hưởng của 2 phương thức trao đổi nhiệt là dẫn nhiệt và đối lưu. Dẫn nhiệt xuất hiện do sự chênh lệch nhiệt độ của nước nóng và nước lạnh và đối lưu do chuyển động của nước trong tank. Miền hình học của mô hình được thể hiện trong Hình 1. Tank có đường kính D chiều cao L. Theo phương pháp FVM, tank trụ được chia thành  $n$  phần tử theo chiều cao của tank và được đánh số 1 ÷  $n$  tương ứng với nhiệt độ ở tâm các phần tử  $T_i \div T_n$ .



Hình 1. Mô hình một chiều cho tank tích trữ dựa trên FVM

Phương trình cân bằng năng lượng cho phần tử chất lỏng:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_f} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Trong đó:  $T$  - nhiệt độ (°C);  $t$  - thời gian (s);  $\lambda_f$  - hệ số dẫn nhiệt (W/m.°C);  $\rho_f$  - khối lượng riêng (kg/m<sup>3</sup>);  $C_f$  - nhiệt dung riêng (J/kg.°C) của nước ở nhiệt độ  $T$  và  $u$  là vận tốc của nước theo phương  $x$  (m/s).

- Điều kiện ban đầu:

$$t = 0, 0 < x < L: T = T_0, u = 0 \quad (2)$$

- Điều kiện biên:

+ Vận tốc dòng môi chất

$$t \geq 0: u_{in} = u_{out} = u_0 \quad (3)$$

+ Nhiệt độ nước vào bình không đổi

$$T = T_{in} \quad (4)$$

+ Nhiệt độ nước ra khỏi bình bằng nhiệt độ phần tử kế cận

$$T_{out} = T_n \quad (5)$$

### 2.2. Xây dựng mô hình mô phỏng số

#### 2.2.1. Các phần tử bên trong

Ứng với các phần tử bên trong  $i = 2 \div n - 1$ . Lấy tích phân thể tích phương trình (1):

$$\int_{CV} \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_{CV} \frac{\lambda_f}{\rho_f C_f} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dV - \int_{CV} \frac{\partial(uT)}{\partial x} dV \quad (6)$$

Áp dụng lý thuyết phân kỳ cho (6) ta được:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Delta x = \left( a_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+1/2} - \left( a_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i-1/2} - (uT)_{i+1/2} - (uT)_{i-1/2} \quad (7)$$

Trong đó:

$$\left( a_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+1/2}, \left( a_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i-1/2} \text{ là thành phần khuếch tán;}$$

$uT)_{i+1/2}, uT)_{i-1/2}$  là thành phần đối lưu; và  $a_f = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_f}$  là hệ số khuếch tán nhiệt.

+ Với thành phần khuếch tán từ phương trình (7), áp dụng sai phân giữa:

$$\left( a_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i-1/2} = a_f \left( \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \right) = D_f (T_i - T_{i-1}) \quad (8)$$

$$\left(a_f \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{i+1/2} = a_f \left(\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x}\right) = D_f(T_{i+1} - T_i) \quad (9)$$

Trong đó:

$$D_f = \frac{a_f}{\Delta x} \quad (10)$$

+ Xấp xỉ các thành phần đối lưu từ phương trình (7):  
Áp dụng hệ First-Order Upwind:

$$uT_{i+1/2} - uT_{i-1/2} = u(T_i - T_{i-1}) \quad (11)$$

+ Xấp xỉ thành phần phụ thuộc vào thời gian: Áp dụng phương pháp hàm ẩn (Implicit scheme):

$$\frac{\partial T_i^{n+1}}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (12)$$

Kết hợp các phương trình (7) - (12) ta được:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \Delta x = [D_f(T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}) - u(T_i - T_{i-1})]^{n+1} \quad (13)$$

Sắp xếp lại (13) ta được:

$$-(u + D_f)T_{i-1}^{n+1} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} + u + 2D_f\right)T_i^{n+1} - D_f T_{i+1}^{n+1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} T_i^n \quad (14)$$

Các phần tử biên: Tương tự phần tử bên trong, áp dụng sai phân giữa cho đại lượng khuếch tán, First-Order Upwind cho đại lượng đối lưu và áp dụng các điều kiện biên ta được:

+ Phần tử biên 1:

$$\left(\frac{\Delta x}{\Delta t} + u + 3D_f\right)T_1^{n+1} - D_f T_2^{n+1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} T_1^n + (u + 2D_f)T_{in}^{n+1} \quad (15)$$

+ Phần tử biên n:

$$-(u + D_f)T_{n-1}^{n+1} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} + u + D_f\right)T_n^{n+1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} T_n^n \quad (16)$$

### 2.2.2. Ảnh hưởng của ống phân phối đến sự phân tầng

Các đầu ống phân phối môi chất vào tank có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả làm việc của tank tích trữ. Mô hình một chiều xây dựng trên chưa kể đến ảnh hưởng của sự hòa trộn của môi chất ở các đầu phân phối. Ảnh hưởng của sự hòa trộn có thể được kể đến thông qua hệ số hòa trộn hay còn gọi là hệ số khuếch tán hiệu quả  $\varepsilon_{eff}$  [10]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{(a_f + \varepsilon_H)}{a_f} \quad (17)$$

$\varepsilon_{eff}$  có giá trị lớn hơn 1 với dòng môi chất chảy rối và bằng 1 với dòng chảy tầng ( $\varepsilon_H = 0$ ). Hệ số khuếch tán hiệu quả được kể đến qua phương trình (1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_f \cdot \varepsilon_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (18)$$

Trong nghiên cứu này, hệ số khuếch tán hiệu quả được xây dựng bởi [10] được áp dụng.

### 2.2.3. Các bước xây dựng mô hình số

Mô hình số nghiên cứu sự phân tầng nhiệt độ trong tank tích trữ dựa trên phương pháp FVM được xây dựng theo các bước chính sau:

- Chia nhỏ miền hình học của tank tích trữ thành n phần tử (đọc theo chiều cao tank như Hình 1);

- Xấp xỉ phương trình vi phân cho mỗi phần tử (bao gồm cả thành phần đối lưu và khuếch tán) thành các phương trình đại số cho các phần tử bên trong (phương trình (14)) và các phần tử biên (phương trình (15) và (16));

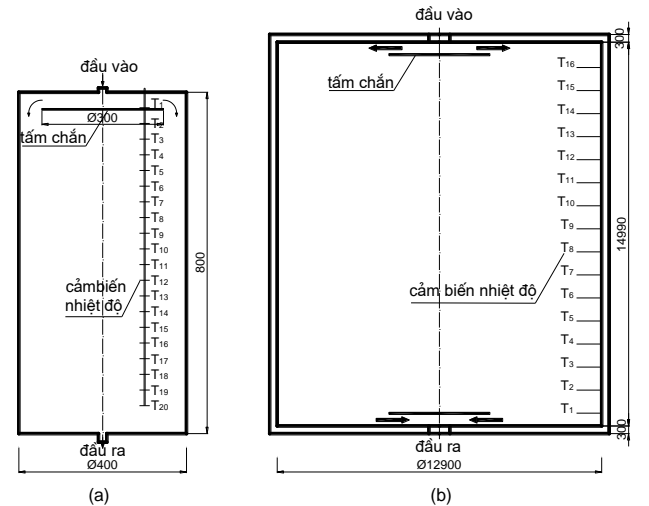
- Thiết lập hệ phương trình đại số gồm n phương trình từ các phương trình (14), (15) và (16);

- Chọn bước thời gian ( $\Delta t$ ) và giải hệ phương trình đại số theo điều kiện ban đầu (2);

- Kiểm chứng mô hình.

### 2.3. Mô hình kiểm chứng

Để kiểm chứng mô hình số được xây dựng, mô hình được áp dụng để mô phỏng cho các tank tích trữ có kích thước khác nhau. Dữ liệu thực nghiệm được áp dụng để kiểm chứng mô hình có thể tìm thấy trong các tài nghiên cứu [7] và [18] tương ứng với tank có kích thước nhỏ (Tank A) và lớn (Tank B). Hình 2 thể hiện kết cấu của các tank và các thông số chính được thể hiện trong Bảng 1.



**Hình 2.** Kết cấu tank tích trữ từ thực nghiệm (a) Tank kích thước nhỏ [17], và (b) tank kích thước lớn [18]

**Bảng 1.** Các thông số chính của mô hình thực nghiệm tank tích trữ

Các thông số chính	Tank A [17]	Tank B [18]
Đường kính (m)	0,4	12,9
Chiều cao (m)	0,8	14,99
Thể tích nước (m <sup>3</sup> )	0,1	2000
Lưu lượng khối lượng (kg/s)	0,03	0,56
Nhiệt độ nước lạnh (°C)	23	44
Nhiệt độ nước nóng (°C)	44	96

Mô hình thực nghiệm tank nhỏ có thể tích 0,1m<sup>3</sup>, nước nóng vào phía trên của tank với tấm chắn hướng dòng và nước ra khỏi tank từ đáy. Nhiệt độ dọc theo chiều cao của tank được đo bởi 20 cảm biến nhiệt độ với sai số  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Dữ liệu nhiệt độ được thu thập với bước thời gian 10s. Tank lớn với thể tích 2000m<sup>3</sup> là tank tích trữ nhiệt trong nhà máy nhiệt-điện kết hợp Hvide Sande (Đan mạch). Có 16 cảm biến nhiệt độ (PT100) được lắp đặt dọc theo chiều cao tank (do cảm biến thứ 15 bị hỏng nên không có giá trị nhiệt độ thu được ở vị trí này), với cảm biến thấp nhất cách đáy tank 0,5m và cảm biến cao nhất cách bộ phân phối nước phía trên 0,5m.

Sai số của cảm biến nhiệt độ nằm trong khoảng từ  $\pm 0,50^\circ\text{C}$  đến  $\pm 0,78^\circ\text{C}$  tương ứng với nhiệt độ của nước  $40^\circ\text{C}$  đến  $95^\circ\text{C}$ . Dữ liệu được thu thập sau mỗi 15 phút. Chi tiết về các tank có thể tìm thấy trong các nghiên cứu [17, 18].

### 3. Kết quả và bình luận

Mô hình số được áp dụng mô phỏng cho quá trình nạp của 2 tank tích trữ có thể tích khác nhau: tank có thể tích nhỏ (Tank A) và tank có thể tích lớn (Tank B). Sự ảnh hưởng của mật độ lưới và hệ số hòa trộn được đề cập. Cả 2 mô hình thực nghiệm đều có bộ phân phối kiểu tấm chắn nên hệ số hòa trộn tại đầu ống phân phối được phát triển bởi [10] được áp dụng:

$$\varepsilon_{eff}^{in} = 4,75(Re/Ri)^{0,522} \quad (18)$$

Trong đó:

-  $Re$  là số Reynolds  $Re = \rho_f \omega_f d / \mu_f$ . Với  $\rho_f$  là khối lượng riêng của nước;  $\omega_f$  là tốc độ nước từ ống phân phối vào tank;  $d$  là đường kính ống phân phối và  $\mu_f$  là độ nhớt động học của nước.

-  $Ri$  là số Richardson  $Ri = \Delta\rho_f \cdot g \cdot H / (\rho_f \cdot \omega_f^2)$ . Với  $\Delta\rho_f$  là trị tuyệt đối của độ chênh khối lượng riêng ở điều kiện nhiệt độ ban đầu và nhiệt độ môi chất đầu vào;  $H$  là chiều cao hiệu quả là khoảng cách từ ống phân phối vào đến cảm biến nhiệt độ sát đáy bình.

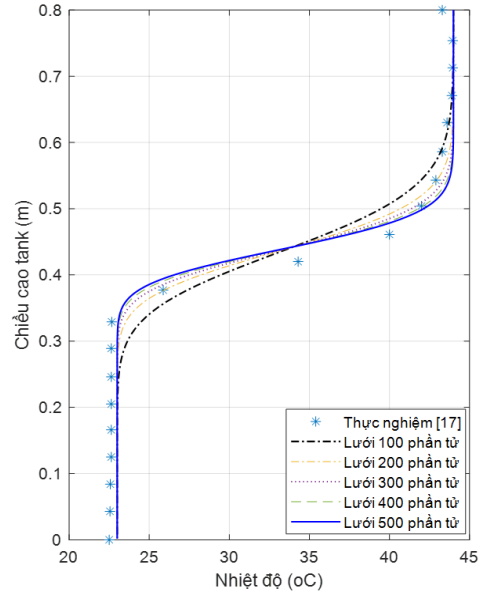
Giá trị của hệ số hòa trộn  $\varepsilon_{eff}$  được thay đổi theo hàm hyperbol từ giá trị  $\varepsilon_{eff}^{in}$  tại đầu vào ống phân phối đến bằng 1 ở đầu ra khỏi bình [10]. Các thông số vật lý của nước được nội suy theo nhiệt độ của các phân tử. Phân bố nhiệt độ ban đầu của nước trong Tank A đồng nhất bằng  $23^\circ\text{C}$  trong khi phân bố nhiệt độ trong Tank B ở thời điểm ban đầu là không đồng nhất và được lấy từ kết quả đo đạc thực nghiệm.

#### 3.1. Tank có kích thước nhỏ

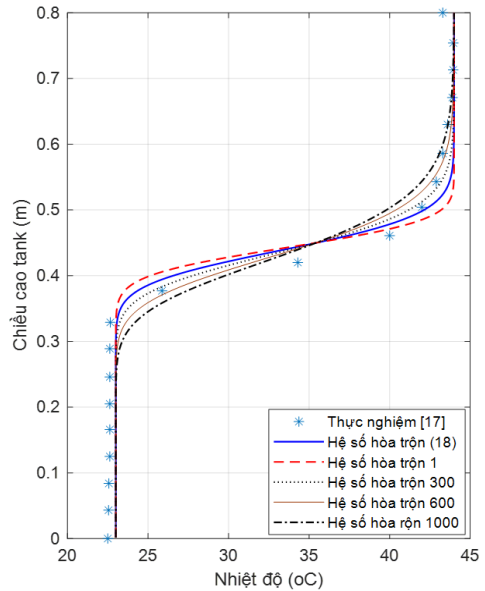
Ảnh hưởng của mật độ lưới đến kết quả phân bố nhiệt của mô hình số được so sánh với dữ liệu thực nghiệm cho Tank A được thể hiện trong Hình 3. Phân bố nhiệt độ được tính toán ở thời điểm 1500s của quá trình nạp với phân bố nhiệt độ của nước trong bình ở thời điểm ban đầu ( $t = 0$ ) là đồng nhất ở  $23^\circ\text{C}$  với bước thời gian  $\Delta t = 1s$  và hệ số hòa trộn tính theo công thức (18). Các kết quả cho thấy, mật độ lưới ảnh hưởng đáng kể đến kết quả mô phỏng. Với mô hình khảo sát, kết quả mô phỏng gần như thay đổi không đáng kể khi tăng mật độ lưới lớn hơn 500 phần tử. Với việc chọn số phần tử lưới phù hợp mô hình cho kết quả về sự phân bố nhiệt độ trong tank rất gần so với với kết quả đo đạc thực nghiệm.

Hình 4 biểu diễn ảnh hưởng của hệ số hòa trộn  $\varepsilon_{eff}^{in}$  của ống phân phối ở đầu vào bình đến kết quả phân bố nhiệt độ khi áp dụng mô hình số và được so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Khi không kể đến ảnh hưởng của sự hòa trộn của ống phân phối ( $\varepsilon_H = 0$  hay  $\varepsilon_{eff}^{in} = 1$ ) hoặc khi chọn hệ số hòa trộn quá lớn sẽ dẫn đến sai khác đáng kể giữa kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm. Việc đơn giản mô hình ba chiều thành mô hình một chiều đã làm mất đi sự ảnh hưởng của sự hòa trộn của môi chất ở đầu vào ống phân phối. Tuy nhiên, áp dụng hệ số hòa trộn  $\varepsilon_{eff}^{in}$  được tính từ công thức (18) (có giá trị là 112) đã cải tiến đáng kể đến kết quả mô phỏng.

Từ kết quả ta cũng có thể thấy được với chế độ chảy tầng ứng với  $\varepsilon_{eff}^{in} = 1$  thì độ dày lớp phân tầng nhiệt độ nhỏ nhất và độ dày lớp phân tầng tăng khi hệ số hòa trộn tăng.



**Hình 3.** Ảnh hưởng của mật độ lưới đến sự phân bố nhiệt độ trong tank nhỏ

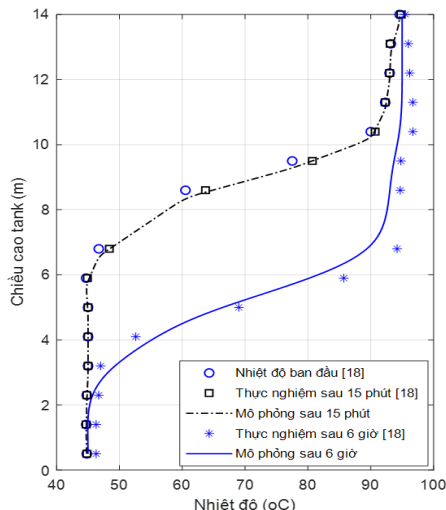


**Hình 4.** Ảnh hưởng của hệ số hòa trộn đến sự phân tầng trong tank nhỏ

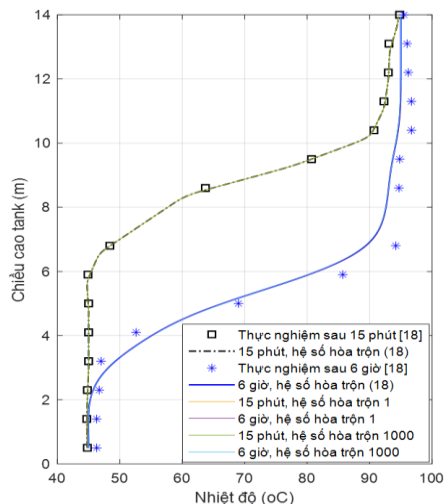
#### 3.2. Tank có kích thước lớn

Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ ở Tank B sau thời gian 15 phút và 6 giờ so với dữ liệu thực nghiệm được thể hiện ở Hình 5. Phân bố nhiệt độ ở thời điểm ban đầu là không đồng nhất và được xác định từ thực nghiệm. Trong mô phỏng các giá trị nhiệt độ ban đầu của các phân tử được nội suy từ các giá trị đo thực nghiệm. Kết quả kiểm chứng cho thấy, kết quả không phụ thuộc vào bước thời gian lựa chọn  $\Delta t = 10s$  khi sử dụng cho mô hình này với các mật độ lưới khác nhau. Các mật độ lưới khác nhau được khảo sát cho thấy, phân bố nhiệt độ trong bình gần như không thay đổi khi mật độ lưới lớn hơn 200 phần tử. Các kết quả mô phỏng cho thấy, phân bố nhiệt độ ở thời điểm 15 phút trùng khớp

với dữ liệu thực nghiệm. Tuy nhiên, với khoảng thời gian lớn hơn, sau 6 giờ, sự sai khác giữa mô phỏng và thực nghiệm tăng đáng kể. Mô hình đã cho kết quả khá tốt về sự phân bố nhiệt độ trong tank so với kết quả thực nghiệm.



**Hình 5.** Ảnh hưởng của mật độ lưới đến sự phân bố nhiệt độ trong tank lớn



**Hình 6.** Ảnh hưởng của hệ số hòa trộn đến sự phân tầng trong tank lớn

Hình 6 biểu diễn ảnh hưởng của các hệ số hòa trộn khác nhau ( $\epsilon_{eff} = 1, 1000$  và giá trị được tính từ công thức (18) là 256) đến kết quả phân bố nhiệt độ trong tank thể tích lớn. Kết quả cho thấy, các giá trị của hệ số hòa trộn được đề cập gần như không làm thay đổi phân bố nhiệt độ ở cả 2 thời điểm xét đến, 15 phút và 6 giờ. Điều này rất khác so với trường hợp tank có thể tích nhỏ. Tuy nhiên, việc khảo sát ảnh hưởng của hệ số hòa trộn chỉ đề cập đến một vài giá trị. Từ kết quả nghiên cứu cho thấy, việc áp dụng hệ số hòa trộn theo công thức (18) được đề xuất từ nghiên cứu [10] cho kết quả khá phù hợp cho bộ phân phối cố tấm chắn kiểu đĩa với các tank kích thước khác nhau.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng được mô hình một chiều mô phỏng phân bố nhiệt độ cho tank tích trữ dưới dạng nhiệt hiện dựa trên phương pháp FVM. Mô hình được áp dụng

để tìm phân bố nhiệt độ trong các tank có kích thước khác nhau. Kết quả từ mô hình được kiểm chứng với dữ liệu thực nghiệm cho thấy mô hình là đáng tin cậy.

Mật độ lưới ảnh hưởng rất lớn đến kết quả mô hình. Sự ảnh hưởng của hệ số hòa trộn chỉ đáng kể với tank có kích thước nhỏ trong khi với tank có kích thước lớn thì sự ảnh hưởng cho thấy rất nhỏ.

Mô hình có thể áp dụng để nghiên cứu tối ưu các tank tích trữ dưới dạng nhiệt hiện với các kích thước khác nhau đặc biệt là các tank có thể tích lớn vì tank kích thước lớn yêu cầu rất lớn về khả năng của máy tính và thời gian mô phỏng khi áp dụng các mô hình hai hoặc ba chiều.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Zurigat, Y. H., K. J. Maloney, and A. J. Ghajar, "A comparison study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks", *Solar Energy Engineering*, 111(3), 1989, 204-210.
- [2] Dincer, Ibrahim, and Marc A. Rosen, *Thermal energy storage systems and applications*, John Wiley & Sons, 2021.
- [3] Kleinbach, Eberhard Markus, W. A. Beckman, and S. A. Klein, "Performance study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks", *Solar energy*, 50(2), 1993, 155-166.
- [4] Chung, Jae Dong, et al., "The effect of diffuser configuration on thermal stratification in a rectangular storage tank", *Renewable Energy* 33(10), 2008, 2236-2245.
- [5] Njoku, H. O., O. V. Ekechukwu, and S. O. Onyegebu, "Analysis of stratified thermal storage systems: An overview", *Heat and mass transfer*, 50(7), 2014, 1017-1030.
- [6] Yoo, Hoseon, and Ee-Tong Pak, "Theoretical model of the charging process for stratified thermal storage tanks", *Solar Energy*, 51(6), 1993, 513-519.
- [7] Al-Nimr, M. A. "Temperature distribution inside a solar collector storage tank of finite wall thickness", *Solar Energy Engineering*, 115(2), 1993, 112-116.
- [8] Nelson, J. E. B., A. R. Balakrishnan, and S. Srinivasa Murthy, "Experiments on stratified chilled-water tanks: Expériences menées avec des reservoirs d'accumulation d'eau glacée à stratification", *International Journal of Refrigeration*, 22(3), 1999, 216-234.
- [9] Aszodi, A., Krepper, E. & Prasser, HM., "Experimental and numerical investigation of one and two phase natural convection in storage tanks", *Heat and Mass Transfer*, 36, 2000, 497-504.
- [10] Zurigat, Yousef H., Pedro R. Liche, and Afshin J. Ghajar, "Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34(1), 1991, 115-125.
- [11] Rahman, Aowabin, Amanda D. Smith, and Nelson Fumo, "Performance modeling and parametric study of a stratified water thermal storage tank", *Applied Thermal Engineering*, 100, 2016, 668-679.
- [12] Ievers, Simon, and Wenxian Lin, "Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank", *Applied Energy*, 86(12), 2009, 2604-2614.
- [13] Tang, J. L., Z. R. OuYang, and Y. Y. Shi, "Experimental analysis and FLUENT simulation of a stratified chilled water storage system", *The European Physical Journal Plus*, 134(3), 2019, 1-8.
- [14] Oppel, F. J., A. J. Ghajar, and P. M. Moretti, "Computer simulation of stratified heat storage", *Applied Energy*, 23(3), 1986, 205-224.
- [15] Nelson, J. E. B., A. R. Balakrishnan, and S. Srinivasa Murthy, "Parametric studies on thermally stratified chilled water storage systems", *Applied Thermal Engineering*, 19(1), 1999, 89-115.
- [16] Waluyo, Joko, "Simulation model of stratified thermal energy storage tank using finite difference method", *AIP Conference Proceedings*, 1737(1), 2016, 1-10.
- [17] Zachar, A., I. Farkas, and F. Szlivka, "Numerical analyses of the impact of plates for thermal stratification inside a storage tank with upper and lower inlet flows", *Solar Energy*, 74(4), 2003, 287-302.
- [18] Sreckiene, Giedre, and Violeta Miseviciute, "Research of operation modes of heat storage tank in CHP plant using numerical simulation", *Rigas Tehniskas Universitates Zinatiskie Raksti*, 6, 2011, 91-99.