

# MÔ HÌNH TOÁN QUÁ TRÌNH TRỮ LẠNH VÀ XẢ TẢI CHO HỆ THỐNG ĐIỀU HÒA KHÔNG KHÍ

## MATHEMATICAL MODELING OF COLD STORAGE AND COLD LOAD DISCHARGE PROCESS FOR AIR CONDITIONER SYSTEM

Võ Chí Chính<sup>1\*</sup>

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

\*Tác giả liên hệ: vcchinh@dut.udn.vn

(Nhận bài: 29/8/2020; Chấp nhận đăng: 12/11/2020)

**Tóm tắt** - Trong lĩnh vực điều hòa không khí, một trong những giải pháp tiết kiệm năng lượng, giảm chi phí đầu tư là thực hiện trữ lạnh. Việc trữ lạnh mang lại rất nhiều lợi ích thiết thực cho các doanh nghiệp là: Giảm chi phí đầu tư, giảm chi phí điện năng tiêu thụ, nâng cao hiệu quả làm việc của máy và góp phần giảm phụ tải lưới điện Quốc gia. Trong các giải pháp trữ lạnh, giải pháp trữ lạnh bằng băng có nhiều ưu điểm và được áp dụng khá rộng rãi, đặc biệt là hệ thống công suất trong bình. Trong các giải pháp trữ băng, chủ yếu người ta sử dụng giải pháp đóng băng bên ngoài đường ống. Bài báo này trình bày các kết quả xây dựng mô hình toán và giải nó trong hai trường hợp: Quá trình hình thành băng (gọi là quá trình nạp tải) và quá trình tan băng (gọi là quá trình xả tải). Kết quả tính toán là cơ sở để nhóm tác giả thiết kế bồn trữ lạnh cho các hệ thống điều hòa không khí công suất trung bình tại Việt Nam.

**Từ khóa** - Trữ lạnh; trữ nhiệt; tiết kiệm năng lượng; điều hòa không khí; cao điểm

**Abstract** - In the field of air conditioning, one of the solutions to save energy and reduce investment costs is to implement cold storage. Cold storage brings a lot of practical benefits to businesses, including: Reducing investment costs, reducing power consumption costs, improving working efficiency of the machine and contributing to reducing the national grid load. In cold storage solutions, ice cold storage solutions have many advantages and are widely applied, especially in-tank capacity systems. In ice storage solutions, mainly people use the freezing solution outside the pipes. This paper presents the results of constructing the mathematical model and solving it in two cases: the ice formation (called the loading process) and the belt ear process (called the discharge process). The calculation results are the basis for us to design cold storage tanks for medium capacity air conditioning systems in Vietnam.

**Key words** - Cold storage; heat storage; energie saving; air conditioning; peak times

### 1. Đặt vấn đề

Trong nhiều công trình nghiên cứu về vấn đề trữ lạnh, nhóm tác giả và nhiều tác giả khác đã phân tích rõ các ưu điểm nổi bật của giải pháp này [1, 2, 3, 4, 5, 6] thể hiện ở các điểm chính sau đây:

- Giảm công suất đầu tư của hệ thống, nhờ giải pháp san bằng tải;
- Dịch chuyển thời gian vận hành từ ban ngày sang ban đêm nên hiệu quả làm việc của máy lạnh cao hơn;
- Do vận hành lúc thấp điểm thay cho cao điểm nên giá cả điện năng tiêu thụ rẻ hơn, chỉ còn khoảng 1/3.
- Góp phần giảm tải cho lưới điện Việt Nam lúc cao điểm.

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày các kết quả mô phỏng mô hình toán quá trình trữ lạnh và xả tải để từ đó tính toán được thời gian kết đông, phân bố các ống dàn trao đổi nhiệt và cấu tạo bể trữ lạnh một cách hợp lý.

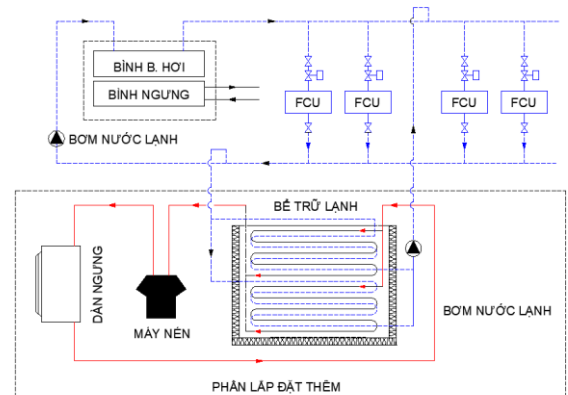
Việc tính toán quá trình truyền nhiệt lúc trữ lạnh bằng băng bên ngoài đường ống và quá trình xả tải của nó là rất phức tạp, trong đó khó khăn nhất là chiều dày lớp băng luôn thay đổi, dẫn đến trở nhiệt lớp băng đó cũng thay đổi trong suốt thời gian truyền nhiệt. Nhóm tác giả đã giải quyết được bài toán này nhờ phần mềm tính toán.

### 2. Mô hình toán quá trình trữ lạnh

#### 2.1. Sơ đồ nguyên lý

Sơ đồ nguyên lý hệ thống thiết bị trữ lạnh của nhóm tác giả được thể hiện trên Hình 1. Phần lắp đặt thêm cho dự án

làm việc hoàn toàn độc lập nhằm thực hiện quá trình trữ lạnh, gồm: Một hệ thống lạnh dung làm lạnh trực tiếp nước trong một bể trữ lạnh kín. Bên trong bể trữ lạnh có đặt 02 dàn trao đổi nhiệt: Dàn làm lạnh nước đá và dàn xả tải lạnh của bể.



**Hình 1.** Sơ đồ nguyên lý hệ thống trữ lạnh

Ở dàn làm lạnh băng được hình thành và bám bên ngoài đường ống trao đổi nhiệt và lớn dần cho đến khi tràn đầy bể trữ, bên trong đường ống trao đổi nhiệt là môi chất lạnh R134a bay hơi và nhận nhiệt từ nước.

Dàn xả tải lạnh của bể đưa nước ấm từ các hệ điều hòa về, nhiệt độ khoảng 12°C và được băng trong bể làm lạnh đến khoảng 7°C. Quá trình này băng nhận nhiệt từ nước ấm và tan dần.

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Sciences and Technology (Vo Chi Chinh)

**Ban đêm:** Hệ thống lạnh lắp đặt thêm chạy và trữ lạnh vào bể đá. Quá trình trữ được thực hiện vào thời gian thấp điểm để đơn giá điện năng thấp đồng thời là thời điểm mát mẻ để hệ thống hoạt động hiệu quả năng lượng cao nhất.

**Ban ngày:** Hệ thống điều hòa vẫn hoạt động lúc bình thường. Trong giai đoạn cao điểm từ 9h 30 đến 11h 30 và từ 17h 00 đến 20h 00 hệ thống lạnh máy điều hòa tạm dừng để tránh cao điểm và thực hiện quá trình xả tải ở bể đá để làm lạnh thay cho máy điều hòa

**2.2. Mô hình toán quá trình trữ lạnh**

Quá trình tạo băng trên đường ống được thực hiện như sau: Môi chất lạnh bay hơi ở trong ống làm lạnh nước trong bể và tạo nên lớp băng có bề dày sau thời gian  $\tau$  là  $\delta_x$ . Khi nhiệt độ nước xung quanh ống đã đạt 0°C, thì có thể coi toàn bộ nhiệt lượng mà môi chất lạnh nhận được đều được dùng để tạo băng.

- Dòng nhiệt truyền từ nước lạnh vào dòng môi chất bên trong đường ống:

$$Q_1 = \frac{t_{b,ng} - t_0}{\frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln \frac{d_x}{d_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1}}, w/m \tag{1}$$

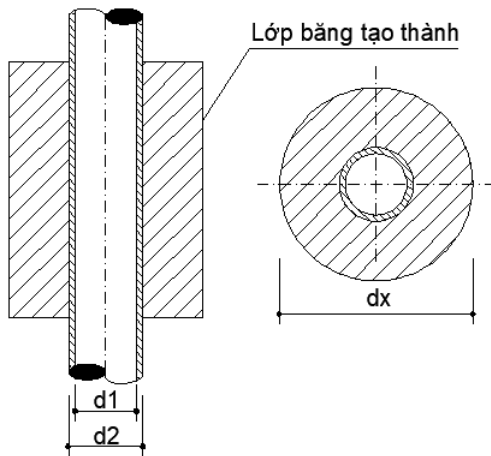
Trong đó:

$t_{b,ng}, t_0$  - Nhiệt độ lớp ngoài của băng và nhiệt độ bay hơi môi chất, °C;

$\lambda_b, \lambda_m$  - Hệ số dẫn nhiệt của băng và của kim loại ống, W/m.K;

$d_x, d_2, d_1$  - Đường kính lớp băng tại thời điểm  $\tau$ , đường kính ngoài và trong của ống dẫn môi chất, m;

$\alpha_1$  - Hệ số tỏa nhiệt về phía môi chất lạnh, W/m<sup>2</sup>.K.



**Hình 2. Quá trình tạo băng**

- Khối lượng băng bám trên 1 m chiều dài đường ống sau thời gian  $\tau$ .

$$M_x = \pi \cdot \rho_b \cdot (r_x^2 - r_2^2), kg/m \tag{2}$$

- Nhiệt lượng khối băng truyền cho môi chất trong ống sau thời gian  $\tau$

$$Q_\tau = m_x \cdot q_r, J/m \tag{3}$$

- Công suất trung bình:

$$Q_1 = \frac{Q_\tau}{\tau} = \frac{m_x \cdot q_r}{\tau} \tag{4}$$

- Quan hệ giữa thời gian và độ dày của lớp băng:

$$\tau = \frac{m_x \cdot q_r}{t_{b,ng} - t_0} \cdot \left[ \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln \frac{d_x}{d_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} \right] \tag{5}$$

Thay vào ta có :

$$\tau = \frac{\pi \cdot \rho_b \cdot (r_x^2 - r_2^2) \cdot q_r}{t_{b,ng} - t_0} \cdot \left[ \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln \frac{d_x}{d_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} \right] \tag{6}$$

$$\tau = \frac{\rho_b \cdot (r_x^2 - r_2^2) \cdot q_r}{t_{b,ng} - t_0} \cdot \left[ \frac{1}{2\lambda_b} \ln \frac{d_x}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} \right]$$

**Xây dựng quan hệ  $\delta_x = f(\tau)$**

Thay  $r_x = r_2 + \delta_x$  và  $d_x = d_2 + 2 \cdot \delta_x$  vào công thức trên ta có quan hệ giữa  $\delta_x = f(\tau)$  như sau:

$$\tau = \frac{\rho_b \cdot [(r_2 + \delta_x)^2 - r_2^2] \cdot q_r}{t_{b,ng} - t_0} \cdot \left[ \frac{1}{2\lambda_b} \ln \frac{d_2 + 2 \cdot \delta_x}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_1 \alpha_1} \right] \tag{7}$$

**2.3. Giải bài toán trữ lạnh**

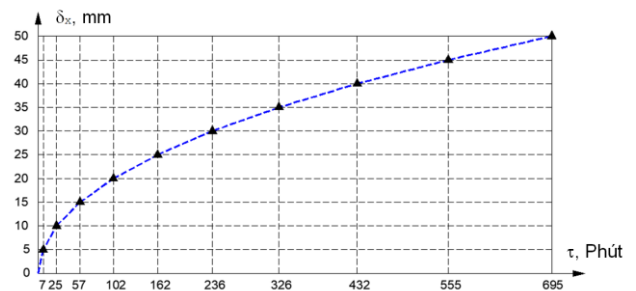
Các thông số của dàn trao đổi nhiệt được đưa ra trên Bảng 1. Căn cứ vào các thông số cụ thể của dàn, nhóm tác giả đã xác định được quan hệ  $\delta_x = f(\tau)$  trên Bảng 2 và Hình 3.

**Bảng 1. Các thông số đầu vào**

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị
1	Đường kính ngoài ống TĐN	$d_2$	28,83mm
2	Đường kính trong ống TĐN	$d_1$	26,64mm
3	Bán kính ngoài ống TĐN	$r_2$	14,42mm
4	Bán kính trong ống TĐN	$r_1$	13,32mm
5	Khối lượng riêng của băng	$\rho_b$	920 kg/m <sup>3</sup>
6	Nhiệt ẩn đóng băng của nước	$q_r$	333550 J/kg
7	Nhiệt độ ngoài lớp băng	$t_{b,ng}$	0 °C
8	Nhiệt độ bay hơi của môi chất R134a	$t_0$	-10 °C
9	Hệ số dẫn nhiệt của băng	$\lambda_b$	2,236 W/m.K
10	Hệ số dẫn nhiệt của ống đồng	$\lambda_m$	380 W/m.K
11	Hệ số tỏa nhiệt về phía môi chất sôi	$\alpha_1$	2500 W/m <sup>2</sup> .K

**Bảng 2. Kết quả tính toán**

$\delta_x$ , mm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\tau$ , Phút	0	7	25	57	102	162	236	326	432	555	695



**Hình 3. Quan hệ  $\delta_x = f(\tau)$**

Nhóm tác giả đã xây dựng được đường đặc tính quan hệ giữa chiều dày băng tạo thành với thời gian làm lạnh  $\delta_x = f(\tau)$ . Đó là căn cứ để bố trí dàn ống hợp lý để sau thời gian trữ lạnh, nước sẽ được đóng băng trên toàn bộ thể tích bể. Kết quả cho thấy, sau thời gian trữ lạnh khoảng 10 giờ, băng sẽ bám dày 50mm xung quanh ống.

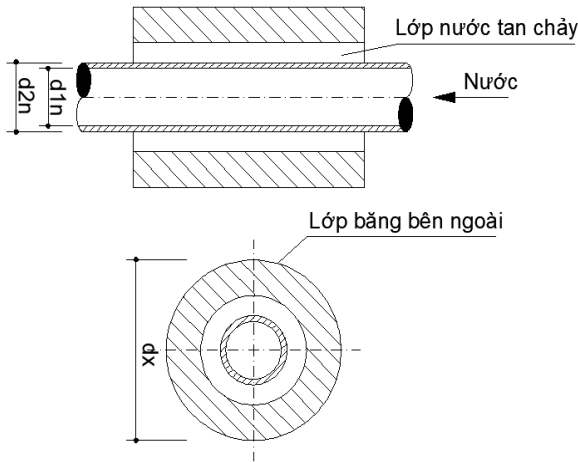
Như vậy, mật độ phân bố ống trong bể cách nhau khoảng 100mm là đạt yêu cầu.

**3. Quá trình xả tải**

**3.1. Mô tả quá trình xả tải và bài toán**

Quá trình xả tải được thực hiện nhờ nước ấm từ hệ tiêu thụ về. Nhiệt độ nước đầu vào là 12°C và đầu ra là 7°C. Sau đó, nước được dẫn đến các dàn trao đổi nhiệt (FCU) để trao đổi nhiệt với không khí thực hiện quá trình điều hòa.

Như vậy, lớp nước tan chảy nằm giữa lớp băng và ống trao đổi nhiệt. Chiều dày lớp nước tan chảy tăng dần và có thể coi lớp nước sát băng có nhiệt độ 0°C.



Hình 4. Mô hình xả tải

- Dòng nhiệt truyền từ nước ấm vào lớp băng bên ngoài đường ống:

$$Q_1 = \frac{t_{n.tb} - t_{nd}}{\frac{1}{2\pi\lambda_n} \ln \frac{d_x}{d_{2n}} + \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_{2n}}{d_{1n}} + \frac{1}{\pi d_{1n} \alpha_n}}, w/m \quad (8)$$

Trong đó:

$t_{n.tb}$ ,  $t_{nd}$  - Nhiệt độ trung bình nước ấm và nhiệt độ lớp ngoài của nước, °C;

$\lambda_n$ ,  $\lambda_t$  - Hệ số dẫn nhiệt của nước và của kim loại ống (thép), W/m.K;

$d_x$ ,  $d_{2n}$ ,  $d_{1n}$  - Đường kính ngoài của lớp nước tại thời điểm  $\tau$ , đường kính ngoài và trong của ống dẫn môi chất, m;

$\alpha_n$  - Hệ số tỏa nhiệt về phía nước ấm, W/m<sup>2</sup>.K.

- Khối lượng băng tan trên 1 m chiều dài đường ống sau thời gian  $\tau$ .

$$m_x = \pi \cdot \rho_b \cdot (r_x^2 - r_{2n}^2), \text{ kg/m} \quad (9)$$

- Nhiệt lượng khối băng truyền cho môi chất trong ống sau thời gian  $\tau$

$$Q_\tau = m_x \cdot q_r, \text{ J/m} \quad (10)$$

- Công suất trung bình:

$$Q_1 = \frac{Q_\tau}{\tau} = \frac{m_x \cdot q_r}{\tau} \quad (11)$$

- Quan hệ giữa thời gian và độ dày của lớp băng tan:

$$\tau = \frac{m_x \cdot q_r}{t_{n.tb} - t_{nd}} \cdot \left[ \frac{1}{2\pi\lambda_n} \ln \frac{d_x}{d_{2n}} + \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_{2n}}{d_{1n}} + \frac{1}{\pi d_{1n} \alpha_n} \right]$$

Thay vào ta có:

$$\tau = \frac{\pi \cdot \rho_b \cdot (r_x^2 - r_{2n}^2) \cdot q_r}{t_{n.tb} - t_{nd}} \cdot \left[ \frac{1}{2\pi\lambda_n} \ln \frac{d_x}{d_{2n}} + \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_{2n}}{d_{1n}} + \frac{1}{\pi d_{1n} \alpha_n} \right] \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\rho_b \cdot (r_x^2 - r_{2n}^2) \cdot q_r}{t_{n.tb} - t_{nd}} \cdot \left[ \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_x}{d_{2n}} + \frac{1}{2\lambda_t} \ln \frac{d_{2n}}{d_{1n}} + \frac{1}{d_{1n} \alpha_n} \right] \quad (13)$$

**Xây dựng quan hệ  $\delta_x = f(\tau)$**

Thay  $r_x = r_{2n} + \delta_x$  và  $d_x = d_{2n} + 2 \cdot \delta_x$  vào công thức trên ta có quan hệ giữa  $\delta_x = f(\tau)$  như sau:

$$\tau = \frac{\rho_b \cdot [(r_{2n} + \delta_x)^2 - r_{2n}^2] \cdot q_r}{t_{n.tb} - t_{nd}} \cdot \left[ \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_{2n} + 2 \cdot \delta_x}{d_{2n}} + \frac{1}{2\lambda_t} \ln \frac{d_{2n}}{d_{1n}} + \frac{1}{d_{1n} \alpha_n} \right] \quad (14)$$

**3.2. Kết quả giải bài toán xả tải**

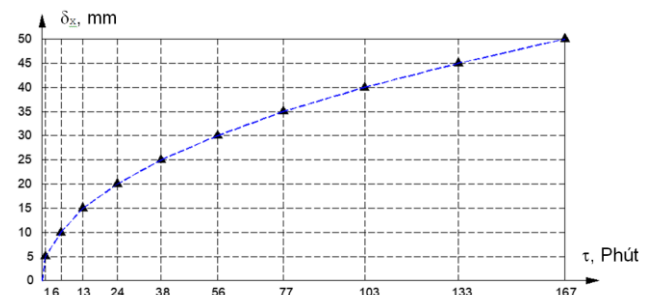
Các thông số tính toán của bộ trao đổi nhiệt giữa nước ấm và băng trong quá trình xả tải được đưa ra ở Bảng 3. Trên cơ sở các thông số cấu trúc của dàn trao đổi nhiệt và thông số của các môi chất, nhóm tác giả sử dụng phần mềm tính toán và xác định được quan hệ giữa chiều dày lớp băng tan chảy theo thời gian ở Bảng 4 và Hình 5.

Bảng 3. Các thông số đầu vào

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị
1	Đường kính ngoài ống TĐN	d2	21mm
2	Đường kính trong ống TĐN	d1	15mm
3	Bán kính ngoài ống TĐN	r2	10,5mm
4	Bán kính trong ống TĐN	r1	7,5mm
5	Khối lượng riêng của băng	$\rho_b$	920 kg/m <sup>3</sup>
6	Nhiệt ẩn đóng băng của nước	$q_r$	333550 J/kg
7	Nhiệt độ ngoài của nước	$t_{nd}$	0 oC
8	Nhiệt độ trung bình nước ấm	$t$	9,5 oC
9	Hệ số dẫn nhiệt của nước (có đối lưu)	$\lambda_n$	10 W/m.K
10	Hệ số dẫn nhiệt của ống thép	$\lambda_t$	46,5 W/m.K
11	Hệ số tỏa nhiệt về phía môi chất sôi	$\alpha_n$	2500 W/m <sup>2</sup> .K

Bảng 4. Kết quả tính toán

$\delta_x$ , mm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\tau$ , Phút	0	1	6	13	24	38	56	77	103	133	167



Hình 5. Quan hệ  $\delta_x = f(\tau)$

- Trên cơ sở kết cấu của bể trữ lạnh nhóm tác giả đã xây dựng được mô hình toán quá trình xả lạnh. Đó là quá trình tan băng bên ngoài đường ống thép tròn.

- Nhóm tác giả đã xây dựng được đường đặc tính quan

hệ giữa chiều dày băng tan chảy với thời gian xả lạnh. Đó là căn cứ để bố trí dàn ống hợp lý để sau thời gian xả lạnh, băng sẽ được tan chảy trên toàn bộ thể tích bể. Kết quả cho thấy, sau thời gian xả lạnh khoảng 3 giờ, băng sẽ tan chảy hết dày 50mm xung quanh ống

#### 4. Kết luận

Qua việc phân tích các giải pháp tích trữ lạnh và tính toán đánh giá sơ bộ hiệu quả của một dự án nhóm tác giả rút ra một số kết luận sau:

- Về thời gian nạp tải, sau 10 giờ nạp tải lượng băng bám bên ngoài đường ống tính toán được là khoảng 50mm và như vậy cần bố trí khoảng cách giữa các ống trao đổi nhiệt của dàn trữ lạnh khoảng 100mm là hợp lý.

- Tương tự, về phía dàn xả tải thì chỉ cần khoảng 3 giờ là đã thực hiện hết việc làm tan chảy băng bên ngoài ống với đội dày 50mm. Với kết quả tính được có thể phân bố các đường ống xả tải thưa hơn so với nạp tải và khoảng cách thích hợp khoảng 150mm.

- Các kết quả tính toán là cơ sở để thiết kế và bố trí các dàn trao đổi nhiệt bên trong các bể trữ lạnh.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Thị Thùy Vy, *Nghiên cứu tiết kiệm năng lượng bằng bồn trữ lạnh*, Luận án thạc sĩ, 2011.
- [2] Lê Thị Việt Hương, *Nghiên cứu thiết kế thiết bị tích trữ lạnh cho hệ thống điều hòa không khí water chiller sân bay Đà Nẵng*, Luận án thạc sĩ, 2014.
- [3] Nguyễn Thế Bảo, Trương Hồng Anh, *Nghiên cứu khả năng dùng công nghệ tích trữ lạnh dạng băng tan chảy bên ngoài ống trong các hệ thống điều hòa trung tâm*, *Tạp chí Phát triển KH&CN*, tập 10, Số 02 – 2007.
- [4] Nguyễn Thế Bảo, *Nghiên cứu thiết kế bồn tích trữ lạnh cho các hệ thống lạnh và xây dựng mô hình thí nghiệm*, Đề tài nghiên cứu cấp thành phố 2003-2004.
- [5] Nguyễn Thế Bảo, *Bồn trữ lạnh: Một giải pháp giảm chi phí đầu tư và vận hành*, *Hội thảo: Sử dụng hiệu quả năng lượng và bảo vệ môi trường*, Đại học Quốc gia và Sở Khoa học Công nghệ Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh 10/2003.
- [6] Võ Chí Chính, Phạm Ngọc Công, *Trữ lạnh để tiết kiệm chi phí điện năng cho các hệ thống điều hòa công suất lớn*, Hội thảo CLB các trường Đại học kỹ thuật, 2017.