

# XÂY DỰNG PHẦN MỀM TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ MÁY SẤY BƠM NHIỆT KẾT HỢP ỐNG NHIỆT TRỌNG TRƯỜNG PROGRAM CALCULATION AND DESIGN HEAT PUMP DRYER COMBINED GRAVITATIONAL HEAT PIPE

Nguyễn Thành Luân, Nguyễn Thế Bảo

Trường Đại học Bách khoa – Đại học Quốc gia TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 28/5/2018, ngày phản biện đánh giá 5/6/2018, ngày chấp nhận đăng 28/6/2018.

## TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu phần mềm tính toán và thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trọng trường. Phần mềm này được xây dựng trên nền tảng phần mềm EES (Engineering Equation Solve), có khả năng giúp cho người sử dụng tính toán một cách nhanh chóng khi thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trọng trường. Để đánh giá độ tin cậy của phần mềm, một mô hình thực nghiệm đã được thiết kế, chế tạo và làm thí nghiệm với mẫu sấy là rau má. Kết quả cho thấy phần mềm có độ tin cậy cao. Bài báo còn trình bày hiệu quả về mặt năng lượng và lợi ích về mặt bảo quản các vi lượng của sản phẩm sấy khi sử dụng bơm nhiệt để sấy trà rau má thay cho việc sử dụng điện trở như hiện nay.

**Từ khóa:** Ống nhiệt trọng trường; tính toán ống nhiệt; máy sấy bơm nhiệt; máy sấy bơm nhiệt cải tiến; sấy rau má.

## ABSTRACT

The article describes the program for calculating and designing heat pump dryers combined with gravitational heat pipes. This program, which has been written in EES ((Engineering Equation Solve) Platform. An experimental model of a heat pump dryer combined with gravitational heat pipes was designed and manufactured to validate the written program. The comparisons between the calculated results from the program and experimental results showed that the written program gave acceptably accurate computational results and could be used to calculate and design heat pump dryers combined with gravitational heat pipes. The use of heat pump technology to dry Centella Asiatica tea can help to save energy consumption and improve the quality of the product compared with those from traditional drying technology.

**Key words:** Gravitational heat pipes; calculating heat pipes; heat pump dryers; advances heat pump drying; drying Centella Asiatica.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay nhu cầu sử dụng năng lượng trên thế giới ngày càng cao, vấn đề tiết kiệm năng lượng càng trở nên cần thiết. Một trong những biện pháp tiết kiệm năng lượng là thu hồi nhiệt của dòng lưu chất thải ra, để gia nhiệt cho dòng lưu chất lạnh hơn. Ống nhiệt là thiết bị có khả năng thực hiện việc này mà không tốn chi phí vận hành. Từ những năm 1970 đã có nhiều nghiên cứu và ứng dụng bộ trao đổi nhiệt ống nhiệt. Đơn cử một số

nghiên cứu như: Nghiên cứu sử dụng ống nhiệt để làm mát CPU máy tính [1], nghiên cứu sử dụng ống nhiệt thu hồi nhiệt khói thải để sưởi ấm không khí trong ô tô [2]. Nghiên cứu bộ trao đổi nhiệt kiểu ống nhiệt để nâng cao hiệu quả máy lạnh hấp thụ carbon-amoniac [3]. Nghiên cứu bộ hồi nhiệt kiểu ống nhiệt để nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong hệ thống điều hòa không khí [4]. Đối với máy sấy bơm nhiệt, cũng có nhiều nghiên cứu để nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng như: Kết hợp máy sấy bơm nhiệt

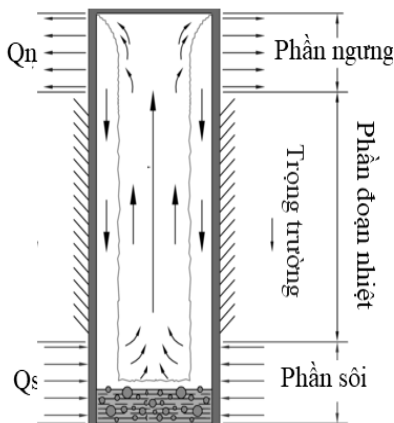
với vi sóng [5], kết hợp máy sấy bơm nhiệt với tia hồng ngoại [6], kết hợp máy sấy bơm nhiệt với sóng radio [7], kết hợp máy sấy bơm nhiệt với năng lượng mặt trời [8]. Đặc biệt là sự kết hợp máy sấy bơm nhiệt với ống nhiệt của tác giả Wera và ctv (2005), kết luận mức tiêu hao năng lượng của máy sấy giảm khoảng 12÷20% khi kết hợp ống nhiệt [9].

Các nghiên cứu trên cho thấy việc sử dụng ống nhiệt để thu hồi nhiệt là hiệu quả, đặc biệt có thể áp dụng trong máy sấy bơm nhiệt. Tuy nhiên việc xây dựng phần mềm để tính toán, thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trong trường chưa được đề cập trong các nghiên cứu trên. Vì vậy bài báo này sẽ trình bày việc xây dựng phần mềm để tính toán thiết kế loại máy sấy này.

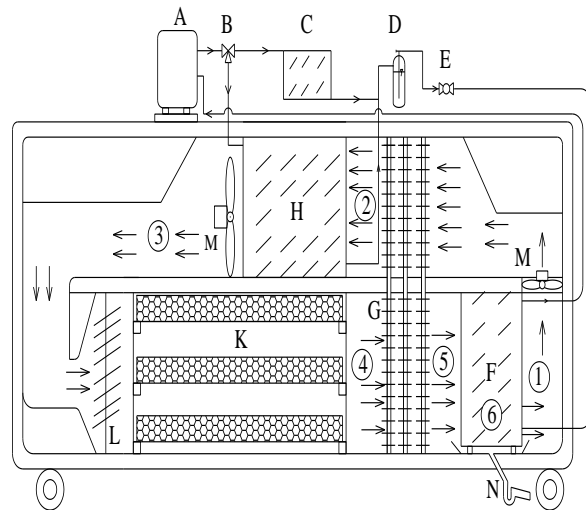
## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1 Máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trong trường

Hình 1 trình bày cấu tạo nguyên lý của ống nhiệt trong trường. Ống nhiệt là một phần tử trao đổi nhiệt kín, bên trong có chứa môi chất công tác 2 pha. Quá trình truyền nhiệt được thực hiện như sau: Nhiệt từ nguồn bên ngoài truyền qua phần sôi của ống nhiệt, tại đây môi chất lỏng sẽ nhận nhiệt, hóa hơi. Sau đó môi chất đi về phần ngưng nhả nhiệt ra môi trường bên ngoài, ngưng tụ thành lỏng, rồi quay trở lại phần sôi dưới tác dụng của trọng lực. Hình 2 trình bày sơ đồ nguyên lý của máy sấy bơm nhiệt hồi lưu toàn phần kết hợp ống nhiệt trong trường.



Hình 1. Cấu tạo nguyên lý ống nhiệt trong trường

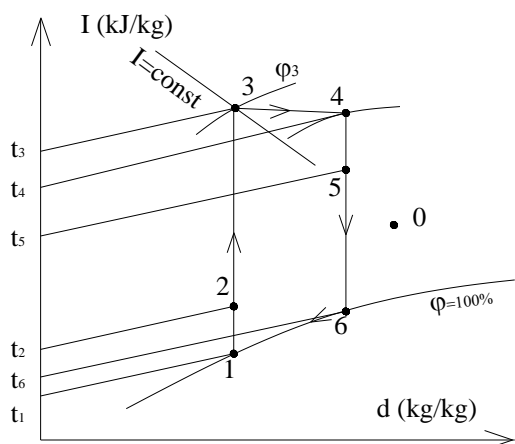


A: Máy nén, B: Van 3 ngã, C: Dàn nóng phụ, D: Bình chứa cao áp, E: Van tiết lưu, F: Dàn lạnh, G: Ống nhiệt, H: Dàn nóng chính, K: Buồng sấy, L: Cánh đảo gió, M: Quạt, N: Khay hứng nước

Hình 2. Sơ đồ nguyên lý máy sấy bơm nhiệt hồi lưu toàn phần kết hợp ống nhiệt trong trường

**Nguyên lý làm việc:** Tác nhân sấy (TNS) sau khi ra khỏi buồng sấy (K) sẽ đi qua phần sôi của ống nhiệt (G), tại đây TNS sẽ nhả nhiệt cho môi chất trong ống nhiệt (G). Kết quả môi chất trong ống nhiệt (G) nhận nhiệt, sôi và hóa hơi chuyển động về phần ngưng ống nhiệt (G); còn dòng TNS sau khi nhả nhiệt thì nhiệt độ giảm xuống, tiếp tục đi qua dàn lạnh (F) thực hiện quá trình tách ẩm. Sau khi thực hiện quá trình tách ẩm, dòng TNS đi qua phần ngưng của ống nhiệt (G), tại đây môi chất trong ống nhiệt sẽ nhả nhiệt cho TNS, ngưng tụ thành lỏng, nhờ trọng lực quay trở lại phần sôi của ống nhiệt (G). Dòng TNS sau khi được gia nhiệt, nhiệt độ tăng lên; tiếp tục đi vào dàn nóng và được gia nhiệt đến nhiệt độ yêu cầu. Sau đó dòng TNS được đưa vào buồng sấy (K), tại đây dòng TNS thực hiện quá trình tách ẩm ra khỏi vật liệu sấy. Chu trình cứ thế tiếp diễn. Như vậy nhờ có ống nhiệt (G) mà dòng TNS được làm lạnh trước khi qua dàn lạnh và được gia nhiệt trước khi đi qua dàn nóng; nhờ đó mà hiệu quả máy sấy được nâng cao.

Quá trình sấy thực tế của máy sấy được thể hiện trên đồ thị I-d như hình 3.



**Hình 3.** Đồ thị I-d quá trình sấy thực tế máy sấy bơm nhiệt hồi lưu toàn phần kết hợp ống nhiệt trọng trường

## 2.2 Tính toán quá trình sấy

- Lượng ẩm cần tách ra trong 1 mẻ sấy

$$W = G_1 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}; \text{kg/mẻ} \quad (1)$$

Trong đó:

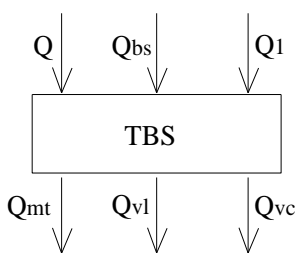
W: Lượng ẩm cần tách ra trong 1 mẻ sấy; kg/mẻ

$G_1$ : Khối lượng sản phẩm sấy đưa vào; kg

$\omega_1$ : Độ ẩm sản phẩm sấy đưa vào; %

$\omega_2$ : Độ ẩm sản phẩm sấy lấy ra; %

Hình 4 thể hiện sơ đồ cân bằng nhiệt tại thiết bị sấy.



**Hình 4.** Sơ đồ cân bằng nhiệt tại thiết bị sấy

- Phương trình cân bằng nhiệt

$$Q + Q_{bs} + Q_1 = Q_{vl} + Q_{mt} + Q_{vt} \quad (2)$$

Trong đó :

Q: Nhiệt cấp cho quá trình sấy; kW

$Q_{bs}$ : Nhiệt bổ sung (nếu có); kW

$Q_1$ : Nhiệt hữu ích do ẩm mang vào; kW

$Q_{mt}$ : Nhiệt tổn thất qua kết cấu bao che; kW

$Q_{vl}$ : Nhiệt tổn thất do vật liệu sấy mang ra; kW

$Q_{vc}$ : Nhiệt tổn thất theo thiết bị vận chuyển; kW

Trong đó:

t: Nhiệt độ nhiệt kế khô của tác nhân sấy;  $^{\circ}\text{C}$

$\varphi$ : Độ ẩm tương đối của tác nhân sấy; %

$P_{kh}$ : Áp suất khí quyển; bar

- Các nhiệt lượng trong phương trình (2) được xác định:

$$Q = L \cdot (I_4 - I_2); \text{kW} \quad (3)$$

$$Q_1 = W \cdot C_n \cdot t_v; \text{kW} \quad (4)$$

$$Q_{vl} = G_2 \cdot C_{vl} \cdot \Delta t_{vl}; \text{kW} \quad (5)$$

$$Q_{mt} = q \cdot F; \text{kW} \quad (6)$$

$$Q_{vc} = G_{kh} \cdot C_{kh} \cdot \Delta t_{kh}; \text{kW} \quad (7)$$

Trong đó:

L: Lượng tác nhân sấy cấp cho 1 mẻ sấy; kg/mẻ

$C_n$ : Nhiệt dung riêng của nước; kJ/kg.K

$C_{vl}$ : Nhiệt dung riêng của vật liệu sấy; kJ/kg.K

$C_{kh}$ : Nhiệt dung riêng của khay sấy; kJ/kg.K

$t_v$ : Nhiệt độ không khí ngoài trời;  $^{\circ}\text{C}$

$G_2$ : Khối lượng sản phẩm sau khi sấy; kg

$\Delta t_{vl}$ : Chênh lệch nhiệt độ sản phẩm sấy sau khi ra buồng sấy và trước khi vào buồng sấy;  $^{\circ}\text{C}$

$\Delta t_{kh}$ : Chênh lệch nhiệt độ khay sấy sau khi ra buồng sấy và trước khi vào buồng sấy;  $^{\circ}\text{C}$

q: Mật độ dòng nhiệt truyền qua vách buồng sấy;  $\text{W/m}^2$

F: Diện tích xung quanh buồng sấy;  $\text{m}^2$

- Với giả thiết không cấp nhiệt bổ sung  $Q_{bs}=0$ , chia 2 vế phương trình (2) cho W ta có:

$$\frac{Q}{W} + C_n \cdot t_v = \frac{Q_{vl}}{W} + \frac{Q_{mt}}{W} + \frac{Q_{vc}}{W} \quad (8)$$

$$\text{Đặt } \Delta = C_n \cdot t_v - \left( \frac{Q_{vl}}{W} + \frac{Q_{mt}}{W} + \frac{Q_{vc}}{W} \right) \quad (9)$$

Từ phương trình (3), (8), (9) ta có:

$$\frac{L}{W} (I_4 - I_2) = \Delta \quad (10)$$

Đây chính là cơ sở để xác định điểm nút số 4, trạng thái thực tế tác nhân sấy khi ra khỏi buồng sấy.

- Các hàm xác định các điểm nút [10]

Áp suất hơi bão hòa

$$P_{bh} = \exp\left(12 - \frac{4026,42}{235,5+t}\right); \text{ bar} \quad (11)$$

Dung ẩm của tác nhân sấy

$$d = 0,621 \cdot \frac{\varphi \cdot P_{bh}}{P_{kq} - \varphi \cdot P_{bh}}; \text{ kg/kg}_{kk} \quad (12)$$

Entanpy của tác nhân sấy

$$I = 1,004 \cdot t + d \cdot (2500 + 1,84 \cdot t); \text{ kJ/kg}_{kk} \quad (13)$$

- Lượng tác nhân sấy cấp cho 1 mẻ sấy

$$L = W \cdot \frac{1}{d_4 - d_2}; \text{ kg/mẻ} \quad (14)$$

- Công suất dàn nóng, dàn lạnh, bộ ống nhiệt

được xác định:

Công suất dàn nóng yêu cầu

$$Q_k = \frac{L \cdot (I_3 - I_2)}{\eta_1 \cdot \tau}; \text{ kW} \quad (15)$$

Công suất dàn lạnh yêu cầu

$$Q_0 = \frac{L \cdot (I_5 - I_1)}{\eta_2 \cdot \tau}; \text{ kW} \quad (16)$$

Công suất bộ ống nhiệt

$$Q_{hp} = \frac{L \cdot (I_4 - I_5)}{\eta_3 \cdot \tau}; \text{ kW} \quad (17)$$

Trong đó:

$\eta_1$ : Hiệu suất trao đổi nhiệt dàn nóng

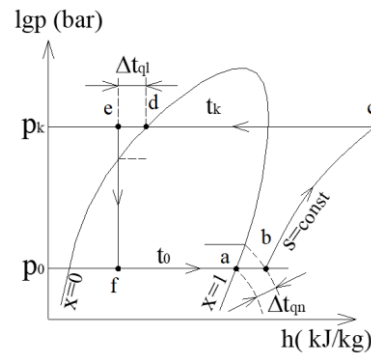
$\eta_2$ : Hiệu suất trao đổi nhiệt dàn lạnh

$\eta_3$ : Hiệu suất trao đổi nhiệt bộ ống nhiệt

$\tau$ : Thời gian sấy; giây

### 2.3 Tính toán chu trình bơm nhiệt

Hình 5 biểu diễn đồ thị lgp-h của một chu trình bơm nhiệt một cấp



Hình 5. Đồ thị lgp-h chu trình bơm nhiệt 1 cấp

- Lưu lượng môi chất qua dàn lạnh

$$m_0 = \frac{Q_0}{h_a - h_f}; \text{ kg/s} \quad (18)$$

- Lưu lượng môi chất qua dàn nóng

$$m_k = \frac{Q_k}{h_c - h_d} \quad (19)$$

- Lưu lượng môi chất qua dàn nóng và dàn lạnh theo tính toán có thể không bằng nhau. Do đó để đảm bảo công suất của toàn hệ thống thì ta chọn lưu lượng lớn nhất:  $m = \max(m_0, m_k)$

- Công suất dàn nóng phụ được xác định gần đúng theo nhiệt độ ngưng tụ

$$Q_{sub} = (m_0 - m_k) \cdot (h_c - h_d); \text{ kW} \quad (20)$$

- Công tiêu thụ của máy nén

$$L_{mn} = m \cdot (h_c - h_b); \text{ kW} \quad (21)$$

- Diện tích các dàn trao đổi nhiệt

$$\text{Dàn nóng chính: } F_k = \frac{Q_k}{k_1 \cdot \Delta t_{tb1}}; \text{ m}^2 \quad (22)$$

$$\text{Dàn nóng phụ: } F_{k-sub} = \frac{Q_{sub}}{k_1 \cdot \Delta t_{tb1}}; \text{ m}^2 \quad (23)$$

$$\text{Dàn lạnh: } F_0 = \frac{Q_0}{k_2 \cdot \Delta t_{tb2}}; \text{ m}^2 \quad (24)$$

Trong đó:

-  $k_1$ : Hệ số truyền nhiệt tại dàn nóng;  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$

-  $k_2$ : Hệ số truyền nhiệt tại dàn lạnh;  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$

-  $\Delta t_{tb1}, \Delta t_{tb2}$ : Hiệu nhiệt độ trung bình logarit tại dàn nóng và dàn lạnh;  $^{\circ}\text{C}$

## 2.4 Tính toán bộ ống nhiệt trọng trường bề mặt trong nhẵn, bên ngoài có cánh

- Công suất nhiệt toàn bộ của ống nhiệt [11]

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_z - t_w}{R_z + R_{vs} + R_{vn} + R_w + R_s + R_h + R_n} ; W \quad (25)$$

Trong đó:

Q: Công suất nhiệt toàn phần một ống nhiệt; W

$t_z, t_w$ : Nhiệt độ trung bình dòng lưu chất qua phần sôi, phần ngưng của ống nhiệt;  $^{\circ}C$

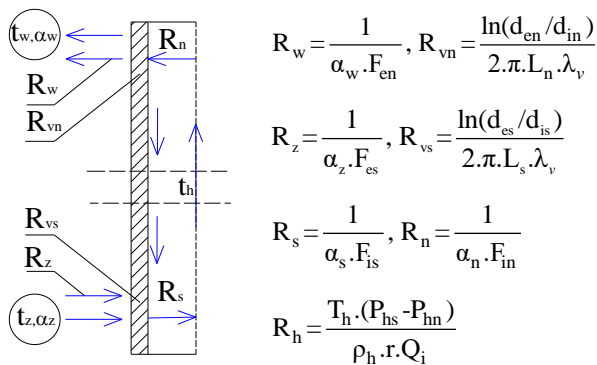
R: Nhiệt trở tổng; K/W

$R_z, R_w$ : Nhiệt trở vách ngoài phần sôi, phần ngưng ống nhiệt; K/W

$R_{vs}, R_{vn}$ : Nhiệt trở dẫn qua vách phần sôi, phần ngưng ống nhiệt; K/W

$R_s, R_n$ : Nhiệt trở môi chất khí sôi và khi ngưng; K/W

$R_h$ : Nhiệt trở hơi môi chất sôi chuyển động từ phần sôi đến phần ngưng ống nhiệt; K/W



Hình 6. Nhiệt trở của ống nhiệt

Trong đó:

Q<sub>i</sub>: Công suất nhiệt bên trong của ống nhiệt; W

$F_{es}, F_{en}$ : Diện tích mặt ngoài ống nhiệt phần sôi, phần ngưng;  $m^2$

$F_{is}, F_{in}$ : Diện tích mặt trong ống nhiệt phần sôi, phần ngưng;  $m^2$

$d_{en}, d_{in}$ : Đường kính ngoài và trong của ống nhiệt phần ngưng; m

$d_{es}, d_{is}$ : Đường kính ngoài và trong của ống nhiệt phần sôi; m

$\alpha_n, \alpha_s$ : Hệ số tỏa nhiệt khi ngưng, sôi của môi chất trong ống nhiệt;  $W/m^2.K$

$P_{hs}, P_{hn}$ : Áp suất môi chất trong phần sôi và phần ngưng ống nhiệt; Pa

-r: Nhiệt ẩn hóa hơi của môi chất nạp; J/kg

$-\lambda_v$ : Hệ số dẫn nhiệt của vách ống nhiệt; W/m.K

$-\rho_h$ : Khối lượng riêng hơi môi chất nạp;  $kg/m^3$

- Xác định công suất của một ống nhiệt, giải hệ phương trình theo phương pháp lặp với giả thiết ban đầu nhiệt trở trong  $R_i = 0$  [11]:

$$\begin{cases} Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_z - t_w}{R_i + R_e} = \frac{t_z - t_w}{(R_s + R_n + R_h) + (R_w + R_{vs} + R_{vn} + R_z)} \\ Q = 5,24.A.\xi.\Delta t_i^{0,75} \\ R_i = \frac{\Delta t_i}{Q_i} = \frac{\Delta t_i^{0,25}}{5,24.A.\xi} \end{cases} \quad (26)$$

Trong đó:

A: Hệ số phụ thuộc kích thước ống nhiệt

$\xi$ : Hệ số phụ thuộc vào tính chất vật lý môi chất nạp

- Hệ số A và  $\xi$  được xác định

$$A = d_{is} \cdot d_{in} \cdot \left( \frac{L_s \cdot L_n}{d_{is} \cdot L_s + d_{in} \cdot L_n} / \varphi \right)^{0,75} \quad (27)$$

$$\xi = \lambda_n^{0,75} \cdot \rho_n^{0,5} \cdot r^{0,25} \cdot \mu_n^{-0,25} \quad (28)$$

Trong đó:

$\varphi$ : Hệ số nạp, đối với nước  $\varphi = 0,44$  [11]

$\lambda_n$ : Hệ số dẫn nhiệt của lỏng môi chất nạp ứng với nhiệt độ  $t_h = \frac{t_z + t_w}{2}$ ; W/m.K

$\rho_n$ : Khối lượng riêng của lỏng môi chất nạp ứng với nhiệt độ  $t_h = \frac{t_z + t_w}{2}$ ;  $kg/m^3$

r: Nhiệt ẩn hóa hơi của môi chất nạp ứng với nhiệt độ  $t_h = \frac{t_z + t_w}{2}$ ; kJ/kg.K

$\mu_n$ : Độ nhớt động học của lỏng môi chất nạp ứng với nhiệt độ  $t_h = \frac{t_z + t_w}{2}$ ;  $kg/m.s$

- Chiều dài phần ngưng, phần sôi ống nhiệt

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_z}{\alpha_w}} = \frac{L_n}{L_s} \quad (29)$$

Đối với ống nhiệt sử dụng để hồi nhiệt dòng tác nhân sấy trong máy sấy bơm nhiệt, do phần ngưng và phần sôi có chế độ làm việc gần giống nhau nên  $\alpha_z \approx \alpha_w$ , vì vậy  $L_n \approx L_s$

- Trường hợp ống nhiệt có cánh, các ống được bố trí so le với bước ống ngang là  $s_1$ , bước ống dọc là  $s_2$  thì hệ số tỏa nhiệt  $\alpha_z, \alpha_w$  được xác định [12]:

Đường kính tương đương

$$d_e = \frac{F_{0c} \cdot d_2 + F_c \cdot \sqrt{\frac{F_c}{2 \cdot n_c}}}{F}; \text{ m} \quad (30)$$

Tốc độ tác nhân sấy lớn nhất khi đi qua phần sôi hoặc phần ngưng ống nhiệt

$$\omega_{\max} = \omega / \left[ 1 - \left( \frac{d_2}{s_1} + \frac{2 \cdot h_c \cdot \delta_c}{s} \right) \right]; \text{ m/s} \quad (31)$$

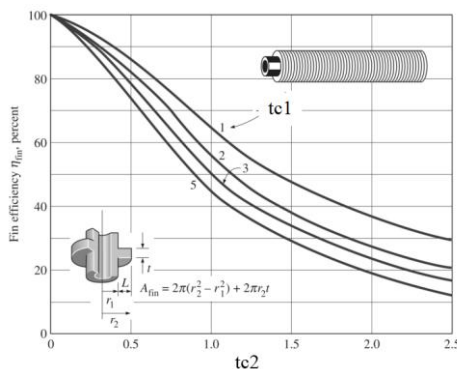
Hệ số Reynolds và Nusselt

$$Re = \frac{\omega_{\max} \cdot d_e}{\nu} \quad (32)$$

$$Nu = 0,251 \cdot Re^{0,67} \cdot \left( \frac{s_1 - d_2}{d_2} \right)^{-0,2} \cdot \left( \frac{s_1 - d_2}{t_c} \right)^{-0,2} \quad (33)$$

$$\text{Hệ số tỏa nhiệt cánh: } \alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{d_e}; \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (34)$$

- Hiệu suất cánh được tra theo đồ thị Hình 7 theo 2 điều kiện ( $tc_1$  và  $tc_2$ ) [13]



**Hình 7.** Hiệu suất cách trao đổi nhiệt

Trong phần mềm đồ thị sẽ được mã hóa thành phương trình toán học với 2 biến  $tc_1$  và  $tc_2$ .

$$tc_1 = \frac{(d_2 + 2 \cdot h_c) + t_c}{d_2}; tc_2 = (h_c + 0,5 \cdot t_c) \cdot \sqrt{\frac{\alpha_c}{t_c \cdot \lambda_c}} \quad (35)$$

Hệ số tỏa nhiệt phần sôi hoặc phần ngưng ống nhiệt

$$\alpha = \alpha_c \cdot \frac{F_c}{F} \cdot \left( \eta_c + \frac{F_{0c}}{F_c} \right); \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (36)$$

Trong đó:

$\lambda_c$ : Hệ số dẫn nhiệt cánh; W/m.k

$d_2$ : Đường kính ngoài ống nhiệt; m

$n_c$ : Số cánh tại phần sôi (phần ngưng) ống nhiệt

$t_c$ : Khoảng cách 2 cánh trao đổi nhiệt; m

$h_c$ : Chiều cao cánh; m

$\delta_c$ : Chiều dày cánh; m

$\omega$ : Tốc độ tác nhân sấy; m/s

$\nu$ : Độ nhớt động học tác nhân sấy; kg/m.s

$F_{0c}, F_c$ : Diện tích không có cánh và có cánh tại phần sôi (phần ngưng) của ống nhiệt;  $\text{m}^2$

$F$ : Tổng diện tích phần có cánh và không có cánh tại phần sôi (phần ngưng) ống nhiệt;  $\text{m}^2$

- Số lượng ống nhiệt

$$n = \frac{Q_{hp}}{Q}; \text{ ống} \quad (37)$$

Trong đó:

$n$ : Số lượng ống nhiệt; ống

$Q_{hp}$ : Công suất bộ ống nhiệt; W

$Q$ : Công suất một ống nhiệt; W

## 2.5 Tính chọn quạt

- Diện tích mặt cắt ngang kênh dẫn tác nhân sấy:

$$F_k = \frac{V_k}{\omega} = \frac{L}{\rho_k \cdot \tau \cdot \omega} \quad (38)$$

Trong đó:

$F_k$ : Diện tích mặt cắt ngang kênh dẫn;  $\text{m}^2$

$V_k$ : Lưu lượng thể tích tác nhân sấy;  $\text{m}^3/\text{h}$

$L$ : Lượng tác nhân sấy cấp cho 1 mẻ sấy; kg/mẻ

$\rho_k$ : Khối lượng riêng của tác nhân sấy ứng với nhiệt độ trung bình trong thiết bị sấy;  $\text{kg/m}^3$

$\tau$ : Thời gian sấy; giây

$\omega$ : Tốc độ tác nhân sấy; m/s

- Chọn kích thước kênh dẫn hình chữ nhật

$$F_k = a \cdot x \cdot b \quad (39)$$

- Đường kính trong tương đương của kênh dẫn tác nhân sấy

$$d_k = 1,3 \cdot \frac{(a \cdot b)^{0,625}}{(a+b)^{0,25}} \quad (40)$$

- Đối với ống tôn mỏng, bề mặt bên trong trơn, tiết diện tròn thì hệ số trở lực do ma sát có thể xác định [14]:

$$\lambda_k = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_k}} \quad (\text{khi } Re_k = \frac{\omega \cdot d_k}{\nu_k} < 10^5) \quad (41)$$

Trong đó:

$\nu_k$ : Độ nhớt động học tác nhân sấy ứng với nhiệt độ trung bình trong thiết bị sấy;  $kg/m \cdot s$

$\omega$ : Tốc độ tác nhân sấy;  $m/s$

$d_k$ : Đường kính trong tương đương của kênh dẫn tác nhân sấy;  $m$

- Tổng thất áp suất do ma sát dọc đường

$$\Delta P_{ms} = \lambda_k \cdot \frac{L_k}{d_k} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_k}{2}; \text{ mmH}_2\text{O} \quad (42)$$

Trong đó:

$\lambda_k$ : Hệ số trở lực do ma sát

$\omega$ : Tốc độ tác nhân sấy;  $m/s$

$L_k$ : Chiều dài kênh dẫn tác nhân sấy;  $m$

$d_k$ : Đường kính trong tương đương của kênh dẫn tác nhân sấy;  $m$

$\rho_k$ : Khối lượng riêng của tác nhân sấy ứng với nhiệt độ trung bình trong thiết bị sấy;  $kg/m^3$

- Hệ số trở lực cục bộ khi dòng tác nhân sấy khi đi qua bộ trao đổi nhiệt có cánh [11]

$$\xi = 0,72 \cdot Re^{-0,245} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{s_c} + 2\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{s_c}\right)^{-0,9} \cdot \left(\frac{d_e}{d_2}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{s_1 - d_2}{s_2 - d_2}\right)^{-0,1} \quad (43)$$

Trong đó:

Re: Hệ số Reynolds

$d_2$ : Đường kính ngoài ống nhiệt;  $m$

$s_1$ : Bước ống ngang;  $m$

$s_2$ : Bước ống dọc;  $m$

$s_c$ : Bước cánh;  $m$

$d_e$ : Đường kính tương đương của ống nhiệt có cánh bên ngoài;  $m$

- Tổng thất áp suất cục bộ

$$\Delta P_{cb} = \sum_i^n \xi_i \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_k}{2}; \text{ Pa} \quad (44)$$

Trong đó

$\xi_i$ : Hệ số trở lực cục bộ các thiết bị trên kênh dẫn tác nhân sấy.

$\rho_k$ : Khối lượng riêng của tác nhân sấy ứng với nhiệt độ trung bình trong thiết bị sấy;  $kg/m^3$

$\omega$ : Tốc độ tác nhân sấy;  $m/s$

- Tổng tổn thất áp suất trên kênh dẫn tác nhân sấy

$$H = k_s \cdot (\Delta P_{ms} + \Delta P_{cb}); \text{ Pa} \quad (45)$$

Trong đó

$k_s$ : Hệ số dự phòng.

$\Delta P_{ms}$ : Tổng thất áp suất do ma sát dọc đường;  $Pa$

$\Delta P_{cb}$ : Tổng thất áp suất cục bộ;  $Pa$

- Công suất điện của quạt

$$P_E = \frac{V_k \cdot H}{\eta_q \cdot 3,6 \cdot 10^3}; \text{ W} \quad (46)$$

Trong đó

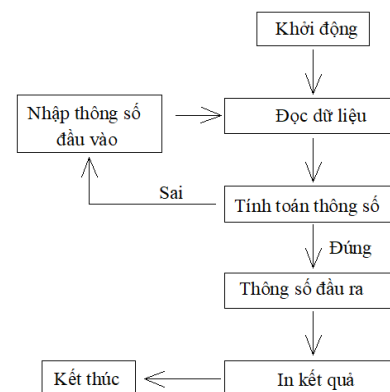
H: Tổng tổn thất áp suất trên kênh dẫn tác nhân sấy;  $Pa$

$V_k$ : Lưu lượng thể tích tác nhân sấy;  $m^3/h$

$\eta_q$ : Hiệu suất quạt

### 3. LẬP CHƯƠNG TRÌNH THUẬT TOÁN

#### 3.1 Xây dựng lưu đồ thuật toán



Hình 8. Lưu đồ thuật toán chương trình

### 3.2 Các thông số phần mềm

**Bảng 1.** Thông số đầu vào sản phẩm sấy

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Năng suất sấy	kg/m <sup>2</sup>
2	Độ ẩm sản phẩm vào	%
3	Độ ẩm sản phẩm ra	%

**Bảng 2.** Thông số khí hậu địa phương lắp đặt

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Nhiệt độ môi trường	°C
2	Độ ẩm môi trường	%

**Bảng 3.** Thông số đầu vào của tác nhân sấy

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Nhiệt độ sấy	°C
2	Thời gian sấy	giờ
3	Tốc độ TNS	m/s
4	Nhiệt độ TNS sau buồng sấy	°C
5	Chênh lệch nhiệt độ TNS khi qua phần sôi ống nhiệt	°C
6	Nhiệt độ TNS sau dàn lạnh	°C

**Bảng 4.** Thông số đầu vào khay sấy, buồng sấy

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Kích thước khay sấy	mm
2	Số lượng khay sấy	khay
3	Khối lượng mỗi khay sấy	kg
4	Nhiệt dung riêng vật liệu khay	kJ/kg.K
5	Các khoảng cách khay sấy so với khung buồng sấy	mm

**Bảng 5.** Thông số các lớp của vách buồng sấy

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Chiều dày lớp kim loại	mm
2	Chiều dày lớp cách nhiệt	mm
3	Hệ số dẫn nhiệt lớp kim loại	W/m.K
4	Hệ số dẫn nhiệt lớp cách nhiệt	W/m.K

**Bảng 6.** Thông số đầu vào chu trình bơm nhiệt

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Chọn môi chất lạnh	-
2	Chênh lệch nhiệt độ ngưng tụ với nhiệt độ sấy	°C
3	Chênh lệch nhiệt độ bay hơi với nhiệt độ TNS sau dàn lạnh	°C
4	Độ quá nhiệt	°C
5	Độ quá lạnh	°C

**Bảng 7.** Thông số đầu vào các dàn trao đổi nhiệt

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Các hệ số truyền nhiệt	W/m <sup>2</sup> .K
2	Hiệu suất trao đổi nhiệt, trong phần mềm được thay bằng hệ số dự trữ	-

**Bảng 8.** Thông số đầu vào ống nhiệt trọng trường

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Chiều dài phần sôi	mm
2	Chiều dài phần ngưng	mm
3	Đường kính trong ống nhiệt	mm
4	Đường kính ngoài ống nhiệt	mm
5	Hệ số dẫn nhiệt của vách ống	W/m.K
6	Hiệu suất trao đổi nhiệt tại phần ngưng ống nhiệt	%
7	Hệ số dự trữ	-

**Bảng 9.** Thông số đầu vào cánh trao đổi nhiệt

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Hệ số dẫn nhiệt của cánh	W/m.K
2	Khoảng cách giữa 2 cánh	mm
3	Chiều dày cánh	mm
4	Chiều cao cánh	mm

**Bảng 10. Thông số bố trí ống nhiệt**

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Bố trí so le	mm
2	Bước ống dọc, bước ống ngang	mm
3	Số hàng ống	hàng

**Bảng 11. Thông số đầu vào của quạt và kênh dẫn tác nhân sấy**

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Loại quạt	-
2	Số lượng quạt	cái
3	Hiệu suất quạt	-
4	Hệ số dự trữ	-
5	Bề rộng mặt cắt ngang của kênh dẫn tác nhân sấy	mm
6	Chiều dài kênh dẫn tác nhân sấy	m
7	Hệ số trở lực cục bộ các thiết bị trên kênh dẫn tác nhân sấy	-
8	Số lượng các thiết bị trên kênh dẫn tác nhân sấy	cái

**Bảng 12. Các thông số cần tính toán**

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Lượng ẩm cần tách	kg/mẻ
2	Lưu lượng tác nhân sấy	kg/h
3	Diện tích dàn nóng chính	m <sup>2</sup>
4	Diện tích dàn nóng phụ	m <sup>2</sup>
5	Diện tích dàn lạnh	m <sup>2</sup>
6	Công suất máy nén	kW
7	Công suất bộ ống nhiệt	kW
8	Công suất 1 ống nhiệt	W
9	Số lượng ống nhiệt	ống
10	Số hàng ống nhiệt	hàng
10	Số ống nhiệt trong một hàng	ống
11	Kích thước buồng sấy	-
12	Kích thước bộ ống nhiệt	-
14	Kích thước kênh gió	-
15	Các thông số quạt: Số lượng, lưu lượng, cột áp, công suất	-

### 3.3 Xây dựng chương trình

Dựa vào các phương trình từ số 1 đến 46, kết hợp với việc lập trình giải các phương trình lặp và mã hóa đồ thị liên quan [13] thành các hàm tương quan. Nhóm tác giả đã xây dựng phần mềm thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trong trường với các thông số đầu vào theo Bảng 1 đến Bảng 11 và thông số đầu ra theo Bảng 12. Với kết quả thể hiện như sau: Từ Hình 9 đến Hình 17 thể hiện các thông số đầu vào của chương trình. Từ Hình 18 đến Hình 22 thể hiện các thông số đầu ra của chương trình.

**I. Thông số sản phẩm sấy và khí hậu địa phương lắp đặt**

Năng suất:	1,6 [kg/mẻ]	Nhiệt độ môi trường:	28 [°C]
Độ ẩm vào:	86 [%]	Độ ẩm môi trường:	80 [%]
Độ ẩm ra:	10 [%]		

**Hình 9. Thông số đầu vào sản phẩm sấy và thông số khí hậu địa phương lắp đặt**

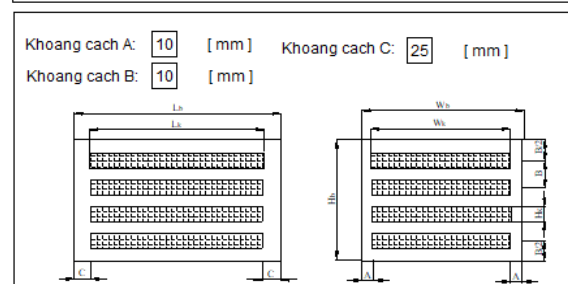
**II. Thông số tác nhân sấy**

Nhiệt độ sấy:	45 [°C]	Nhiệt độ TNS sau dàn lạnh:	17 [°C]
Thời gian sấy:	3 [giờ]	Nhiệt độ TNS ra khỏi buồng sấy:	41 [°C]
Tốc độ tác nhân sấy:	2,5 [m/s]		
Độ giảm nhiệt độ TNS khi qua phần sôi ống nhiệt:	3 [°C]		

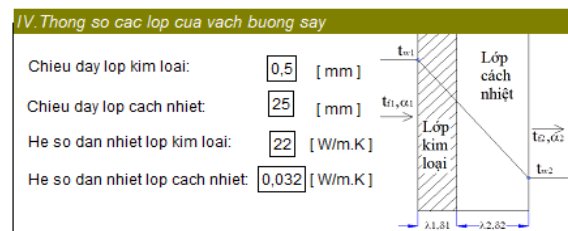
**Hình 10. Thông số đầu vào tác nhân sấy**

**III. Thông số khay sấy và các giá trị xác định kích thước buồng sấy**

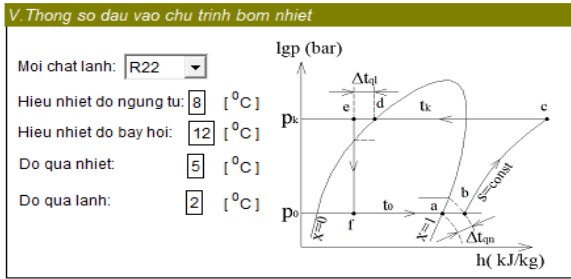
Chiều dài khay:	480 [mm]	Số lượng khay:	4 [Khay]
Chiều rộng khay:	400 [mm]	Khối lượng khay:	0,9 [kg]
Chiều cao khay:	95 [mm]	Nhiệt dung riêng vật liệu:	0,5 [kJ/kg.K]



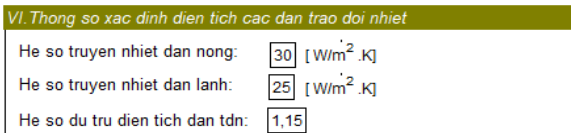
**Hình 11. Thông số đầu vào khay sấy, buồng sấy**



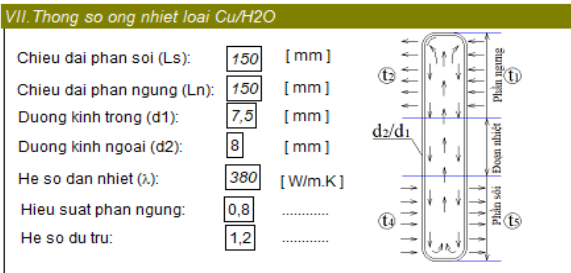
**Hình 12. Thông số các lớp của vách buồng sấy**



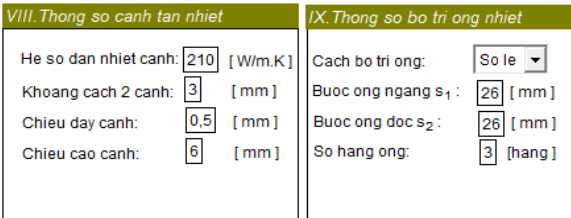
Hình 13. Thông số đầu vào chu trình bơm nhiệt



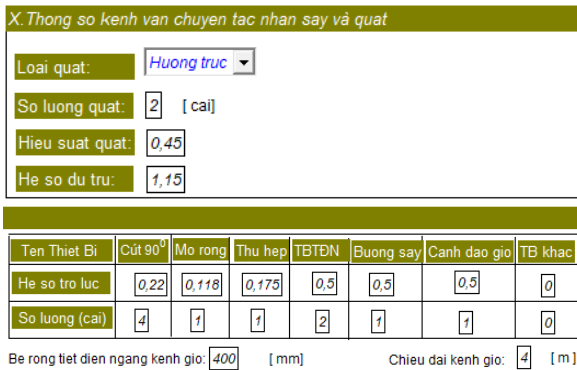
Hình 14. Thông số đầu vào các dàn trao đổi nhiệt



Hình 15. Thông số đầu vào ống nhiệt trọng trường



Hình 16. Thông số đầu vào cánh tản nhiệt và thông số bố trí ống nhiệt



Hình 17. Thông số đầu vào quạt và kênh dẫn tác nhân sấy

Kết quả tính toán các thông số đầu ra của chương trình được thể hiện từ Hình 18 đến Hình 22, trong đó Hình 18 và Hình 19 là bảng thông số các điểm nút của quá trình sấy thực tế và các điểm nút của chu trình bơm nhiệt. Hình 20 đến Hình 22 thể hiện thông số các thiết bị trong máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trọng trường.

II. Bảng thông số các điểm nút qua trình sấy thực tế

Điểm nút	t [°C]	W [%]	d [kg/kgkk]	I [kJ/kgkk]
0	28	80	0,01926	77,26
1	17	100	0,01224	48,05
2	19,41	86,02	0,01224	50,52
3	45	20,36	0,01224	76,79
4	41	28,22	0,01384	76,82
5	38	33,16	0,01384	73,73
6	18,93	100	0,01384	54,09

Hình 18. Kết quả bảng thông số các điểm nút quá trình sấy thực tế

III. Bảng thông số các điểm nút chu trình bơm nhiệt

Điểm nút	t [°C]	P [bar]	h [kJ/kg]	v [m <sup>3</sup> /kg]
b	10	5,843	410,6	0,04143
c	78,15	20,8	443,3	.....
d	53	20,8	267,6	.....
e	51	20,8	264,8	.....
f	5	5,843	264,8	.....
a	5	5,843	406,8	.....

Hình 19. Kết quả bảng thông số các điểm nút chu trình bơm nhiệt



Hình 20. Kết quả kích thước buồng sấy, kênh dẫn tác nhân sấy và thông số quạt

VII. Thông số các thiết bị bơm nhiệt (Heat pump)		
Luồng môi chất trong hệ thống:	0,01621	[kg/s]
Công suất dàn lạnh:	2,302	[kW]
Công suất dàn nóng chính:	2,315	[kW]
Công suất nhiệt dàn nóng phụ:	0,533	[kW]
Công suất máy nén:	0,53	[kW]
Diện tích trao đổi nhiệt dàn lạnh:	4,436	[m <sup>2</sup> ]
Diện tích trao đổi nhiệt dàn nóng chính:	4,326	[m <sup>2</sup> ]
Diện tích trao đổi nhiệt dàn nóng phụ:	0,996	[m <sup>2</sup> ]

**Hình 21.** Kết quả thông số các thiết bị trong chu trình bơm nhiệt

VIII. Thông số bộ ống nhiệt (Heat pipe)		
Công suất bộ ống nhiệt	0,2889	[kW]
Công suất một ống nhiệt:	14,42	[W]
Số lượng ống nhiệt:	20	[ống]
Số lượng cánh phân sôi:	43	[cánh]
Số lượng cánh phân ngưng:	43	[cánh]
Số hàng ống:	3	[hàng]
Số ống trên một hàng ngang:	7	[ống]
Chiều rộng bộ ống nhiệt:	182	[mm]
Chiều dài bộ ống nhiệt	72	[mm]
Chiều cao bộ ống nhiệt:	300	[mm]

**Hình 22.** Kết quả thông số bộ ống nhiệt

#### 4. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

Với giả thiết các thông số đầu vào như Hình 9 đến Hình 17. Qua tính toán bằng phần mềm xác định được kết quả như Hình 18 đến Hình 22. Nhóm tác giả tiến hành chế tạo mô hình máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trọng trường [15]. Tiến hành cân chỉnh nhiệt độ ngưng tụ và bay hơi của chu trình bơm nhiệt, điều chỉnh tốc độ tác nhân sấy như giả thiết. Quy trình thực nghiệm và các dụng cụ đo thực nghiệm [15].

Trong thực nghiệm, trà rau má được chọn để làm mẫu thí nghiệm, ngoài mục đích là sản phẩm sấy để đánh giá hiệu quả máy sấy, còn có mục đích là so sánh chất lượng mẫu trà rau má khi sử dụng công nghệ sấy bơm nhiệt so với công nghệ sấy điện trở như hiện nay.

Từ ngày 10/05/2018 đến ngày 12/05/2018 tiến hành thực hiện các mẻ sấy và xác định được thời gian sấy trung bình 175 phút (gần 3 giờ).

Sau đó tiến hành các mẻ sấy và có kết quả đo thực nghiệm tương tự nhau, như mẻ sấy ngày 20/05/2018 với kết quả đo như Bảng 13.

**Bảng 13.** Kết quả đo thực nghiệm ngày 20/05/18

Thời gian (phút)	Nhiệt độ TNS ra buồng sấy, $t_4$ (°C)	Nhiệt độ TNS sau phần sôi ống nhiệt, $t_5$ (°C)	Nhiệt độ TNS sau dàn lạnh, $t_1$ (°C)	Nhiệt độ TNS sau phần ngưng ống nhiệt, $t_2$ (°C)	Nhiệt độ TNS vào buồng sấy, $t_3$ (°C)	Áp suất bay hơi, $P_0$ (bar)	Áp suất ngưng tụ, $P_k$ (bar)
0	30	30	30	30	30	-	-
30	40,8	38,1	16,9	19,1	45,4	4,6	19,2
60	41,6	39,1	17	19,3	45,4	4,6	19,2
90	42,7	40,1	17,4	19,7	45,8	4,8	19,5
120	44	41,4	17,7	20,1	45,6	4,8	19,5
150	44,4	41,9	17,8	20,2	45,9	4,9	19,7
175	44,6	42,1	18	20,4	46,0	4,9	19,7

Khi so sánh các thông số giả thiết đầu vào và các thông số đo thực tế như Bảng 14. Nhận thấy, không có sự sai lệch nhiều giữa thông số đo thực tế và thông số giả thiết ban đầu. Với sai lệch đó có thể chấp nhận được.

**Bảng 14.** Thông số giả thiết và đo thực tế trên mô hình

Stt	Thông số	Giả thiết	Thực nghiệm
1	Thời gian sấy	180 phút	175 phút
2	Nhiệt độ tác nhân sấy vào buồng sấy	45°C	45,7°C
3	Nhiệt độ tác nhân sấy ra buồng sấy	41°C	40,5°C
4	Nhiệt độ tác nhân sấy sau dàn lạnh	17°C	17,4 °C
5	Nhiệt độ bay hơi	5°C	4,6 °C
6	Nhiệt độ ngưng tụ	53°C	52,3°C

Ngoài ra, với máy sấy trên nhóm tác giả tiến hành thí nghiệm với giả thiết chênh lệch nhiệt độ tác nhân sấy qua phần sôi ống nhiệt là 2 °C, qua phần mềm tính toán xác định được số ống nhiệt là 12 ống. Sau đó tiến hành các mẻ sấy có kết quả thực nghiệm tương tự nhau, như mẻ sấy ngày 21/05/2018 với kết quả như Bảng 15.

**Bảng 15.** Kết quả đo thực nghiệm ngày  
21/05/18

Thời gian (phút)	Nhiệt độ TNS ra buồng sấy, $t_4$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ TNS sau phần sôi ống nhiệt, $t_5$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ TNS sau dàn lạnh, $t_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ TNS sau phần ngưng ống nhiệt, $t_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ TNS vào buồng sấy, $t_3$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	30	30	30	80	30
30	36,2	34,5	16,8	82,1	18,3
60	40,1	38,5	17,4	75,9	19
90	41,1	39,5	17,6	74,2	19,2
120	41,7	40	17,7	72,9	19,3
150	42,4	40,7	18	71,9	19,7
180	42,8	41,1	18,2	71,3	19,9
195	43,5	41,6	18,3	70,8	20

Các ngày từ 15/05/2018 đến 16/05/2018 nhóm tác giả còn tiến hành các mẻ sấy rau má bằng điện trở, với kết quả thực nghiệm các mẻ sấy tương tự nhau, như kết quả mẻ sấy ngày 15/05/2018 trong Bảng 16. Sau đó sử dụng các mẫu sấy bằng bơm nhiệt và điện trở tiến hành kiểm định và phân tích vi lượng.

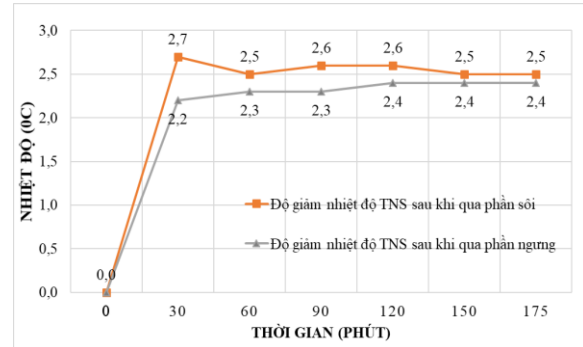
**Bảng 16.** Kết quả đo thực nghiệm ngày  
15/05/18

Thời gian (phút)	Nhiệt độ TNS trước điện trở ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ TNS vào buồng sấy ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ TNS ra buồng sấy ( $^{\circ}\text{C}$ )	Điện năng tiêu thụ kW.h
0	30	30	30	64,7
30	32	56,1	47,5	65,8
60	33	73,6	54,8	66,9
90	32,3	71,2	55,0	67,9
120	32,3	70,4	55,0	68,85
150	33,1	74,1	56,9	69,8
160	32,4	73,6	52,0	70,35

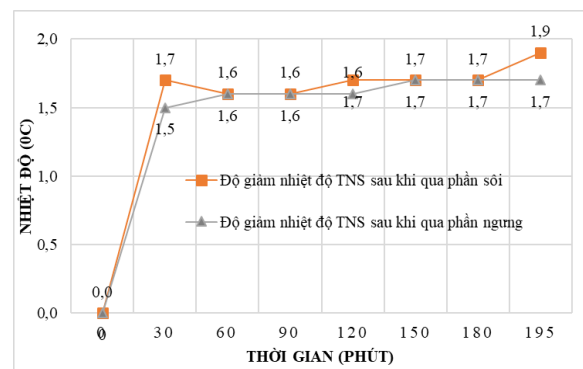
## 5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

+ Theo tính toán, với giả thiết độ giảm nhiệt độ tác nhân sấy sau khi qua phần sôi ống nhiệt là  $3^{\circ}\text{C}$ , xác định được số lượng ống

nhiệt là 20 ống (với thông số như Hình 22) và độ tăng nhiệt độ tác nhân sấy sau khi qua phần ngưng theo tính toán là  $2,4^{\circ}\text{C}$  (như kết quả Hình 18). Qua thực nghiệm, kết quả đo thực tế được thể hiện như Hình 23.

**Hình 23.** Độ giảm nhiệt độ khi qua phần sôi, độ tăng nhiệt độ khi qua phần ngưng của tác nhân sấy trường hợp sử dụng 20 ống nhiệt

Với giả thiết, độ giảm nhiệt độ tác nhân sấy sau khi qua phần sôi ống nhiệt là  $2^{\circ}\text{C}$ , xác định được số lượng ống nhiệt là 12 ống (với thông số như Hình 22) và độ tăng nhiệt độ tác nhân sấy sau khi qua phần ngưng theo tính toán là  $1,6^{\circ}\text{C}$ . Qua thực nghiệm, kết quả đo thực tế được thể hiện như Hình 24.

**Hình 24.** Độ giảm nhiệt độ khi qua phần sôi, độ tăng nhiệt độ khi qua phần ngưng của tác nhân sấy trường hợp sử dụng 12 ống nhiệt

Qua kết quả thực nghiệm Hình 23, sai lệch độ giảm nhiệt độ tác nhân sấy khi qua phần sôi ống nhiệt so với giả thiết trung bình là  $0,43^{\circ}\text{C}$  và sai lệch độ tăng nhiệt độ tác nhân sấy khi qua phần ngưng ống nhiệt so với kết quả tính toán lý thuyết là  $0,07^{\circ}\text{C}$ . Kết quả thực nghiệm Hình 24 cho thấy, sai lệch độ giảm nhiệt độ tác nhân sấy khi qua phần sôi ống nhiệt so với giả thiết trung bình là  $0,3^{\circ}\text{C}$  và sai

lệch độ tăng nhiệt độ tác nhân sấy khi qua phần ngưng ống nhiệt so với kết quả tính toán lý thuyết là 0,03°C. Thấy rằng, sai số giữa kết quả tính toán bằng phần mềm và kết quả đo thực tế không đáng kể. Vì vậy phần mềm có thể tin cậy sử dụng khi thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trọng trường.

+ Phần mềm có nhiều môi chất để lựa chọn cho chu trình bơm nhiệt như: R22, R134a, R290, R600, rất thuận lợi khi tính toán thiết kế, đồng thời có thể dùng làm cơ sở để so sánh hiệu quả khi thay đổi môi chất lạnh.

+ Phần mềm rất thuận lợi để so sánh khi thay đổi các thông số ống nhiệt, bước ống, thông số cánh trao đổi nhiệt, để lựa chọn phù hợp khi thiết kế.

+ Phần mềm này có thể sử dụng để thiết kế bơm nhiệt đơn thuần, khi lựa chọn chênh lệch nhiệt độ tác nhân sấy qua phần sôi ống nhiệt 0°C.

+ Kết quả thực nghiệm còn cho thấy, đối với trà rau má, nếu sử dụng công nghệ sấy bơm nhiệt để sấy thay cho công nghệ sấy điện trở như hiện nay thì mức tiêu thụ điện năng 2,47 (kW.h/kg), giảm so với khi sử dụng điện trở 3,53 (kW.h/kg) [15]. Ngoài ra, qua kiểm tra vi lượng 2 thành phần Vitamin C và Beta Caroten với kết quả trình bày trong Hình 25, Hình 26. Trong đó, Beta Caroten là thành phần quan trọng, có chức năng chống oxy hóa, phòng ngừa ung thư, ngăn chặn mù lòa, hỗ trợ miễn dịch [16].

Tên mẫu/ Name of sample : MẪU RAU MÁ: SẤY ĐIỆN TRỞ  
 Số lượng/ Quantity : 1  
 Tình trạng mẫu/ Sample description : Rau má khô.  
 Ngày nhận mẫu/ Date of receiving : 17/05/2018  
 Ngày hẹn trả KH/ Date of issue : 25/05/2018

STT/ No	Chỉ tiêu kiểm nghiệm/ Parameters	Đơn vị tính/ Unit	Kết quả/ Result	Phương pháp/ Test method
1	Beta Caroten	mg/kg	125	CASE.SK.0084 (HPLC)
2	Vitamin C	mg/kg	9,63	CASE.SK.0108 (I31ku010 - HPLC)(*)

**Hình 25.** Kết quả kiểm tra vi lượng mẫu rau má sấy bằng điện trở

Tên mẫu/ Name of sample : MẪU RAU MÁ: SẤY BƠM NHIỆT  
 Số lượng/ Quantity : 1  
 Tình trạng mẫu/ Sample description : Rau má khô.  
 Ngày nhận mẫu/ Date of receiving : 17/05/2018  
 Ngày hẹn trả KH/ Date of issue : 25/05/2018

STT/ No	Chỉ tiêu kiểm nghiệm/ Parameters	Đơn vị tính/ Unit	Kết quả/ Result	Phương pháp/ Test method
1	Beta Caroten	mg/kg	209	CASE.SK.0084 (HPLC)
2	Vitamin C	mg/kg	10,0	CASE.SK.0108 (I31ku010 - HPLC)(*)

(\*) Phương pháp được VILAS công nhận / Method is accredited by VILAS

(\*\*) Kết quả được thực hiện bởi nhà thầu phụ / Subcontracted test.

**Hình 26.** Kết quả kiểm tra vi lượng mẫu sấy rau má sấy bằng bơm nhiệt

Qua đó, nhóm tác giả nhận thấy nếu sử dụng công nghệ bơm nhiệt thay thế cho công nghệ điện trở để sấy trà rau má như hiện nay, thì tiết kiệm được chi phí điện năng, đảm bảo các vi lượng trong sản phẩm sấy. Vì vậy nhóm tác giả đề xuất, nên sử dụng công nghệ sấy bơm nhiệt, để thay thế công nghệ sấy điện trở đang được sử dụng phổ biến hiện nay.

## 6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày việc thiết lập phần mềm tính toán và thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp ống nhiệt trọng trường. Phần mềm này được xây dựng trên nền tảng phần mềm EES (Engineering Equation Solve), giúp cho người sử dụng tính toán một cách nhanh chóng máy sấy. Để đánh giá độ tin cậy của phần mềm, một mô hình thực nghiệm đã được thiết kế, chế tạo và làm thí nghiệm với mẫu sấy là trà rau má. Kết quả cho thấy phần mềm có độ tin cậy cao.

Bài báo còn trình bày, hiệu quả về mặt năng lượng và lợi ích về mặt bảo quản các vi lượng của sản phẩm sấy khi sử dụng bơm nhiệt để sấy trà rau má, thay cho việc sử dụng điện trở như hiện nay.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kwang-Soo Kim, Myong-Hee Won, Jong-Wook Kim, Byung-Joon Back Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU, Applied Thermal Engineering, Volume 23, Issue 9, Pages 1137-1144, June 2003

- [2] Feng Yang, Xiugan Yuan, Guiping Lin, Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas, Applied Thermal Engineering, February 2003
- [3] R.E. Critoph, The use of thermosyphon heat pipes to improve the performance of a carbon–ammonia adsorption refrigerator, in: Proceedings IV Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, 12–15, Minsk, Belarus, pp. 35–41, September 2000
- [4] Y.H. Yau, M. Ahmadzadehtalatapeh, A review on the application of horizontal heat pipe heat exchangers in airconditioning systems in the tropics, Applied Thermal Engineering, 30, 77–84, 2010
- [5] W. Trirattanapikul, S. Phoungchandang, Microwave blanching and drying characteristics of Centella asiatica (L.) urban leaves using tray and heat pump-assisted dehumidified drying, Journal of Food Science and Technology, Volume 51, pp 3623–3634, December 2014
- [6] Yun Deng, Yuegang Wang, Jin Yue, Zhenmin Liu, Yuanrong Zheng, Bingjun Qian, Yu Zhong, Yanyun Zhao, Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying, Food Control, February 2014
- [7] Kudra T, Mujumdar AS, Advanced drying technologies, Radio frequency assisted heat pump drying-chapter 31: 407–408, 2002
- [8] Othman MY, Ruslan MH, Sopian K, Abdulmajid ZA, Heat pump drying multifunctional solar thermal collector. World renewable energy congress, pp 1665–1670, 2008
- [9] Wera, P, Raghavan, G.S.V, Terdtoon, Loop thermosyphon application for heat pump drying, 3rd Inter American Drying Conference, Montre al, Canada, August, 2005.
- [10] Trần Văn Phú, Tính toán và thiết kế hệ thống sấy, NXB GD, 2002.
- [11] Bùi Hải-Trần Văn Vang, Ống nhiệt và ứng dụng ống nhiệt, NXB.BKHN, Tp.HN, 2008
- [12] Bùi Hải, Tính toán thiết kế thiết bị trao đổi nhiệt, NXB.GTVT, Tp.HN, 2002.
- [13] Yunus A. Cengel, Heat Transfer: A Practical Approach 2nd Edition, 2003
- [14] Võ Chí Chính, Tính toán thiết kế hệ thống điều hòa không khí, NXB GD, 2003
- [15] Nguyễn Thành Luân & Nguyễn Thế Bảo Nghiên cứu thực nghiệm sử dụng ống nhiệt trong trường trên máy sấy bơm nhiệt. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 2018
- [16] <http://vienyhocungdung.vn/loiichcuabeta-caroten>

**Tác giả chịu trách nhiệm bài viết**

Nguyễn Thành Luân

Trường Đại học Bách khoa – Đại học Quốc Gia TP.HCM, Vietnam

Email: [nguyenthanhluan.bkdn@gmail.com](mailto:nguyenthanhluan.bkdn@gmail.com)