

# XỬ LÝ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM NGƯNG TỤ TRÊN SÀN LẠNH CĂN PHÒNG BẰNG LÝ THUYẾT THỨ NGUYÊN

## DIMENSIONAL ANALYSIS OF CONDENSATION ON COLD FLOOR OF ROOM MODEL

ThS. Nguyễn Huy Thế, ThS. Nguyễn Văn Toàn, PGS, TS. Nguyễn Văn Quế  
Học viện Kỹ thuật Quân sự

### TÓM TẮT

*Bài báo trình bày phương pháp xử lý kết quả thí nghiệm bằng lý thuyết thứ nguyên để tính tốc độ ngưng tụ trên sàn lạnh của một căn phòng, thông qua các đại lượng không thứ nguyên. Mối phụ thuộc hàm số có thể áp dụng cho mô hình tương tự. Trước tiên, các thí nghiệm được tiến hành trên cơ sở lý thuyết quy hoạch thực nghiệm đối với mô hình thu nhỏ. Sau đó, áp dụng lý thuyết thứ nguyên và tương tự để biểu diễn tốc độ ngưng tụ trên sàn lạnh của căn phòng thông qua các số không thứ nguyên.*

**Từ khóa:** *Thứ nguyên, đối lưu, ngưng tụ, quy hoạch thực nghiệm.*

### ABSTRACT

*The paper presents the method of processing the experiment results using the dimensional analysis to obtain condensation rate on cold floor of a room by dimensionless numbers. The dimensionless function obtained can be used for similar models. Firstly, the experiments were conducted on the basis of design of experiments theory for the reduced model and the regression function was given to evaluate the influence of factors on the rate of condensation on the floor. Secondly, applying dimensional analysis and similarity theory for expressing the condensation rate on the cold floor of the room model as a function of dimensionless numbers.*

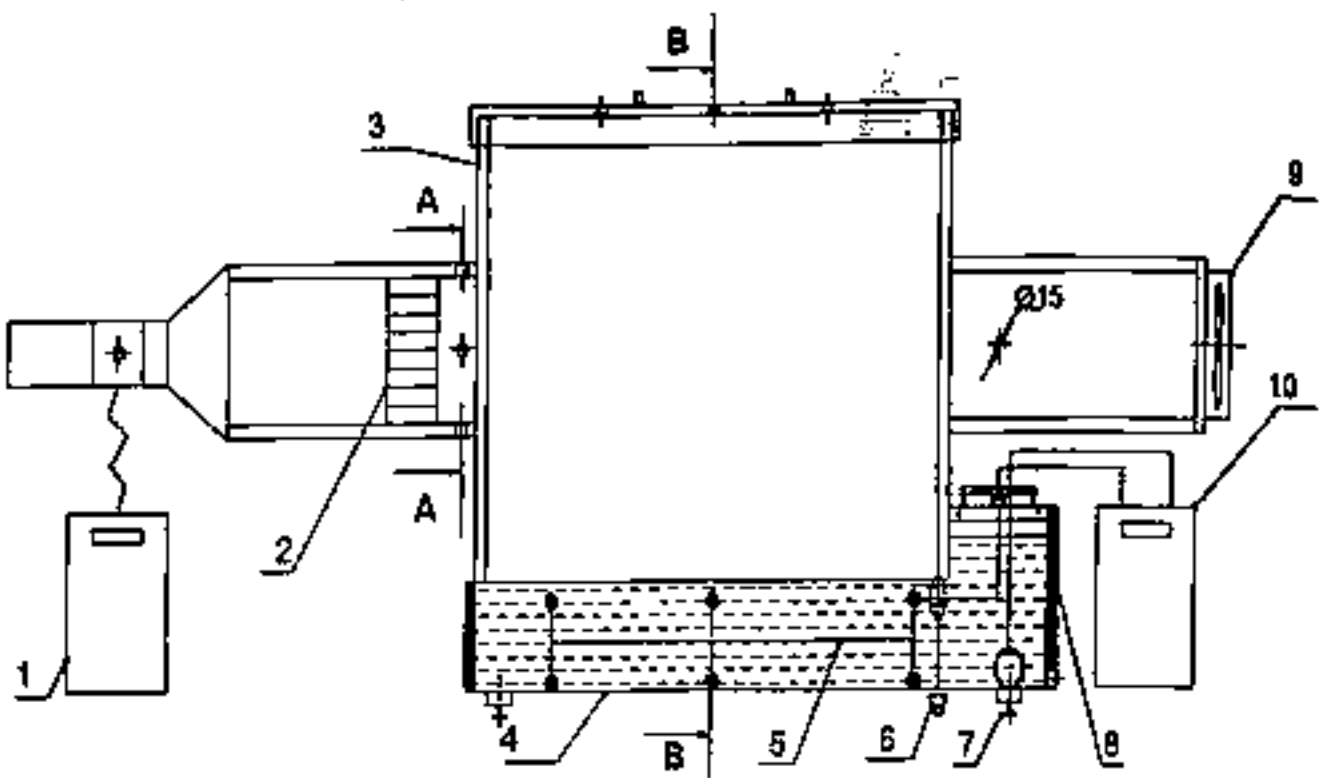
**Keywords:** *Dimension, convection, condensation, design of experiments.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chuyển động của dòng khí trong phòng hầu hết là dòng chảy rối và được mô tả bằng hệ phương trình Navier-Stokes là các phương trình vi phân đạo hàm riêng phi tuyến, liên kết [3]. Tuy nhiên, việc tìm nghiệm giải tích tổng quát cho hệ này đến nay chưa có mà chỉ tồn tại nghiệm cho một số rất ít các trường hợp sử dụng nhiều giả thiết đơn giản hóa và chỉ đúng cho dòng chảy tầng [4], [6]. Đối với bài toán ngưng tụ, hiện cũng chỉ có lời giải bán thực nghiệm dựa trên lý thuyết Nusselt cho những hình dạng đơn giản bản phẳng thẳng đứng hoặc nằm ngang; ống hay chùm ống thẳng đứng hoặc nằm ngang. Hiện nay, phương pháp số đang là xu hướng chủ đạo để giải các bài toán ngưng tụ đối lưu, điển hình như các công trình [5], [7], [9] của các tác giả nước ngoài hay các công trình [1], [8], [10] của các tác giả trong nước. Nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu số trên phần mềm ANSYS-FLUENT cải tiến và có các công bố trong các công trình [1], [8]. Tuy vậy, cần có kết quả thực nghiệm kiểm chứng. Trong bài báo này, nhóm tác giả đã tiến hành chế tạo mô hình thí nghiệm ngưng tụ cho không gian dạng căn phòng để làm cơ sở kiểm chứng công cụ số; áp dụng quy hoạch thực nghiệm để xác định tối ưu số thí nghiệm và phân tích được các yếu tố ảnh hưởng dưới dạng hàm hồi quy. Các kết quả thí nghiệm sau đó được xử lý bằng phương pháp thứ nguyên từ các phương trình cơ bản để tính toán được tốc độ ngưng tụ cho mô hình dòng dạng thông qua hàm số với các biến số là các số không thứ nguyên.

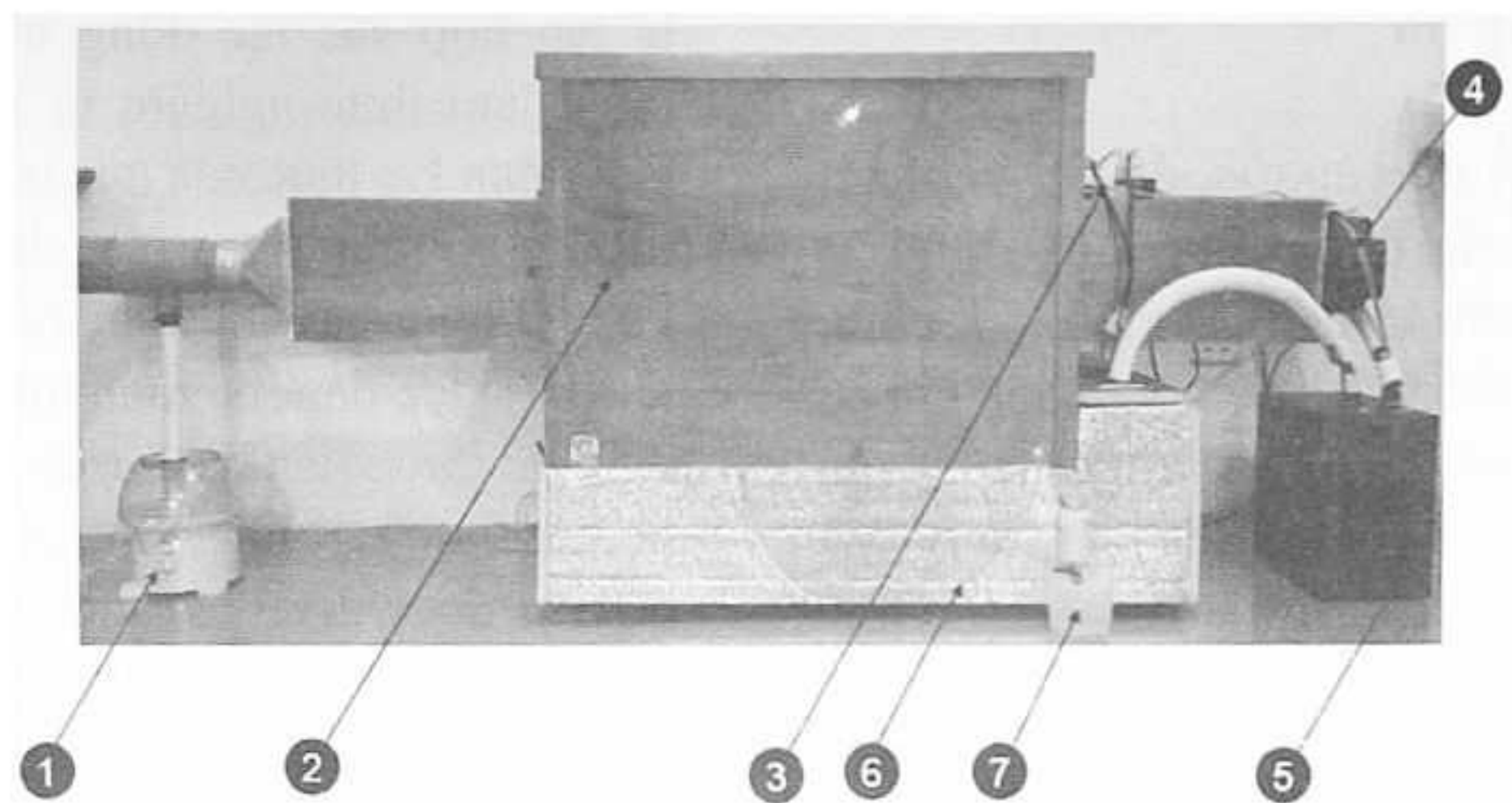
2. BỐ TRÍ THÍ NGHIỆM

2.1. Mô tả hệ thống thí nghiệm ngưng tụ



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống thí nghiệm ngưng tụ màng trên sàn lạnh

Hệ thống gồm có buồng thông thoáng (3) bằng gỗ xoan đào có kích thước thông thủy 90x60x60cm, dày 2cm. Phía trước và phía sau của buồng thông thoáng có cửa vào và cửa ra kích thước mặt cắt ngang 20x20cm được kéo dài về trước và sau mỗi phía 50 cm. Khối dòng (2) được lắp trong đoạn ống phía trước, sau khối nắn dòng có các lỗ  $\phi 15$  để đưa đầu đo vào đo các thông số dòng khí cửa vào. Trước khối nắn thẳng dòng là máy phun sương tạo ẩm siêu âm (1). Đoạn ống phía sau có lỗ  $\phi 15$  để kiểm tra các thông số đầu ra. Quạt hút li tâm được (9) được lắp ở cuối đoạn ống phía sau. Mặt trên của buồng thông thoáng là nắp đáy, trên nắp đáy có 3 lỗ  $\phi 20$  dọc theo chiều dòng chảy, trên mặt phẳng thẳng đứng, các lỗ này có nút bịt kín bằng gỗ. Phần đáy của buồng thông thoáng được gắn với thùng chứa nước lạnh bằng Inox (4), thông qua các tai cố định. Toàn bộ thùng nước lạnh được bảo ôn bằng vật liệu Pe-opp dày 2cm. Nước trong thùng được lưu thông nhờ bơm chìm (7) và làm lạnh nhờ máy làm lạnh nước (10), sau đó được tuần hoàn trở lại bằng hệ thống cấp nước tuần hoàn (5) Bề mặt trên thùng Inox được nghiêng để nước ngưng tụ chảy vào cốc hứng (6).



Hình 2. Hệ thống thí nghiệm ngưng tụ màng trên sàn lạnh:

1) Máy phun sương tạo ẩm Magic Bullet H122; 2) Buồng thông thoáng bằng gỗ xoan đào; 3) Hộp điều tốc; 4) Quạt hút li tâm TICO 15AV4; 5) Máy làm lạnh nước (water chiller) AI-S36G160; 6) Thùng Inox chứa nước tạo bề mặt lạnh, 7) Cốc hứng nước ngưng tụ

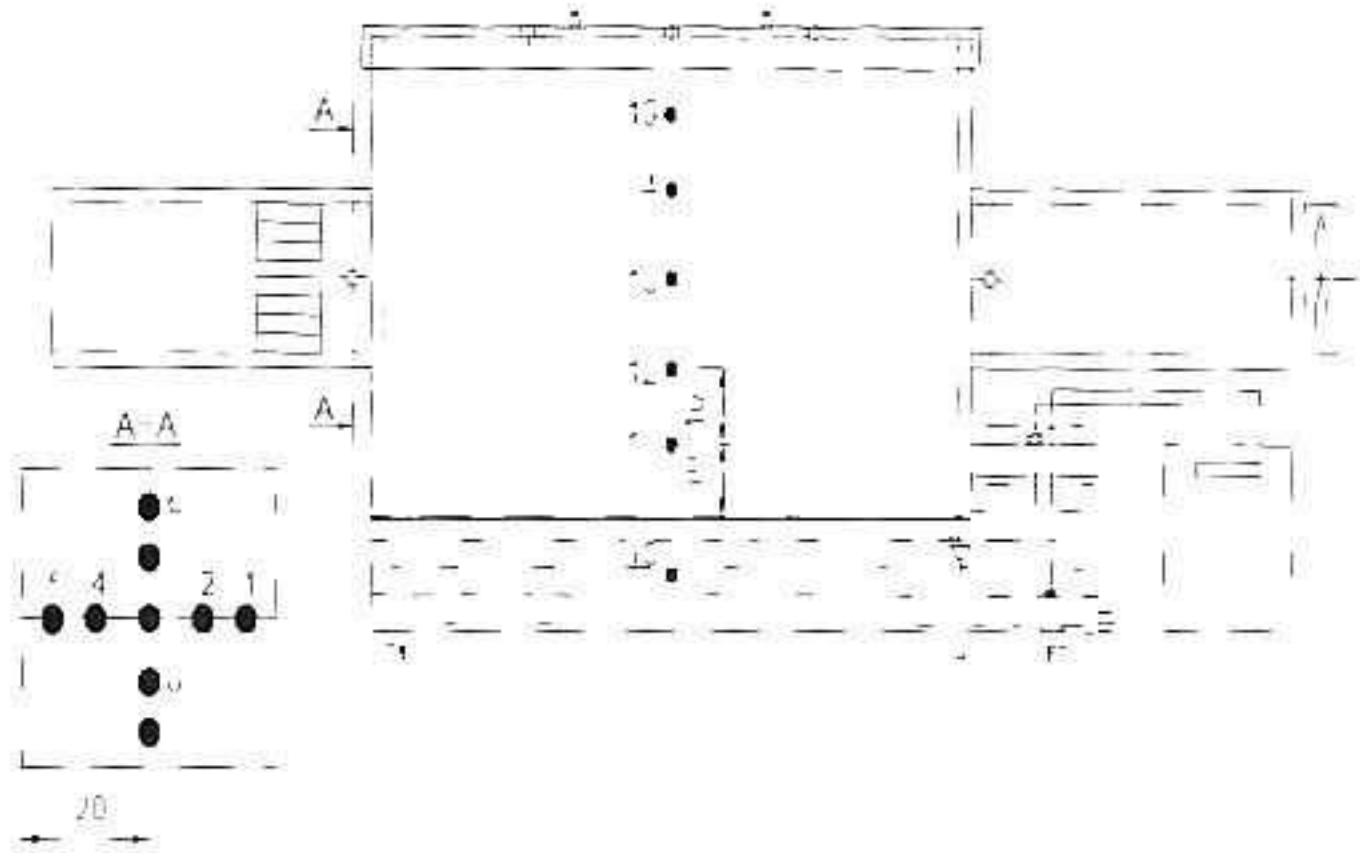
2.2. Các thiết bị đo

Bảng 1 Các thiết bị đo tốc độ, nhiệt độ, độ ẩm

|                                          |                                      |                              |                        |
|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------|
|                                          |                                      |                              |                        |
| Thiết bị đo nhiệt độ, độ ẩm Extech HD500 | Máy đo tốc độ và lưu lượng Testo 425 | Máy đo nhiệt độ EBRO TTX 100 | Máy đo VelociCalc 9565 |

2.3. Bố trí thiết bị đo

Các thông số của dòng khí ở cửa vào như vận tốc, nhiệt độ và độ ẩm tương đối được đo tại 9 điểm trên mặt cắt A-A (đánh số từ 1 đến 9) sau đó lấy giá trị trung bình. Các giá trị vận tốc, nhiệt độ, độ ẩm tại trục đối xứng của mô hình được đo tại 5 điểm (11-15). Nhiệt độ nước đo tại điểm số 10 (hình 3). Các khoảng cách trên hình 3 có đơn vị là cm.



Hình 3 Vị trí đo các thông số của dòng không khí ẩm và nước lạnh

2.4. Phương pháp đo

Các giá trị đo vận tốc, độ ẩm và nhiệt độ tại mỗi điểm đo được tính trung bình từ động các kết quả đo trong thời gian một phút, mỗi phút máy đo được 120 kết quả. Sau khi có giá trị đo trung bình tại mỗi điểm đo ta lấy giá trị trung bình của 9 điểm đo trên mặt cắt A-A ở cửa vào mô hình (hình 3).

3. QUY HOẠCH THỰC NGHIỆM

Quy hoạch thực nghiệm là cơ sở phương pháp luận của nghiên cứu thực nghiệm hiện đại. Đó là phương pháp nghiên cứu mới, trong đó công cụ toán học giữ vai trò tích cực. Cơ sở toán học nền tảng của lý thuyết quy hoạch thực nghiệm là toán học xác suất thống kê với hai lĩnh vực quan trọng là phân tích phương sai và phân tích hồi qui [11]. Quy hoạch thực nghiệm

là tập hợp các tác động nhằm đưa ra chiến thuật làm thực nghiệm từ giai đoạn đầu đến giai đoạn kết thúc của quá trình nghiên cứu đối tượng. Phương pháp này cho phép giảm đáng kể số lượng các thí nghiệm. Áp dụng nguyên tắc phức tạp dần mô hình toán học [12], các thí nghiệm được tiến hành trên cơ sở lý thuyết quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp một nhằm đưa ra được hàm hồi quy đa biến cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng của ba yếu tố đến tốc độ nước ngưng tụ trên sàn. Xây dựng quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp một để xét ảnh hưởng của 3 yếu tố ( $k=3$ ) là vận tốc  $V$ , chênh lệch nhiệt độ  $\Delta T$ , độ ẩm của không khí cửa vào  $\phi$  đến tốc độ ngưng tụ  $Q$ (ml/h) trên sàn lạnh của mô hình. Ta sẽ tiến hành 11 thí nghiệm, trong đó tám thí nghiệm cơ bản ( $n=2^k$ ), ba thí nghiệm tại tâm ( $V=1\text{m/s}$ ,  $\Delta T=17,5^\circ\text{C}$ ,  $\phi=90$ ).

Bảng 2. Các mức thí nghiệm của các yếu tố ảnh hưởng:

| Yếu tố ảnh hưởng                                                               | Mức thấp | Mức cao |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|
| Vận tốc cửa vào $V$ (m/s)                                                      | 0,5      | 1,5     |
| Chênh nhiệt giữa không khí cửa vào và sàn lạnh $\Delta T$ ( $^\circ\text{C}$ ) | 15,5     | 19,5    |
| Độ ẩm không khí cửa vào $\phi$ (%)                                             | 84       | 96      |

Các yếu tố ảnh hưởng được mã hóa trong ma trận thực nghiệm bởi các biến  $X_1$ ;  $X_2$ ;  $X_3$  trong ma trận thực nghiệm. Hàm hồi quy bậc nhất có dạng:

$$Y = 51,95 + 3,57X_1 + 25,78X_2 + 1,12X_3$$
(1)

Trong đó:  $b_0, b_i$ : Các hệ số của hàm hồi quy ma trận thực nghiệm được xây dựng như trong bảng 3.

Bảng 3. Ma trận quy hoạch thực nghiệm:

| N <sup>o</sup> | Các yếu tố ảnh hưởng |     |           | Yếu tố được mã hóa |       |       |       | GT đo (ml/h) |
|----------------|----------------------|-----|-----------|--------------------|-------|-------|-------|--------------|
|                | $\Delta T$           | V   | $\varphi$ | $X_0$              | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | Q            |
| 1              | 15,5                 | 0,5 | 84        | 1                  | -1    | -1    | -1    | 22           |
| 2              | 19,5                 | 0,5 | 84        | 1                  | 1     | -1    | -1    | 28           |
| 3              | 15,5                 | 1,5 | 84        | 1                  | -1    | 1     | -1    | 73           |
| 4              | 19,5                 | 1,5 | 84        | 1                  | 1     | 1     | -1    | 80           |
| 5              | 15,5                 | 0,5 | 96        | 1                  | -1    | -1    | 1     | 24           |
| 6              | 19,5                 | 0,5 | 96        | 1                  | 1     | -1    | 1     | 31           |
| 7              | 15,5                 | 1,5 | 96        | 1                  | -1    | 1     | 1     | 75           |
| 8              | 19,5                 | 1,5 | 96        | 1                  | 1     | 1     | 1     | 82           |
| 9              | 17,5                 | 1,0 | 90        | 1                  | 0     | 0     | 0     | 52           |
| 10             | 17,5                 | 1,0 | 90        | 1                  | 0     | 0     | 0     | 51           |
| 11             | 17,5                 | 1,0 | 90        | 1                  | 0     | 0     | 0     | 51           |

Các hệ số hồi quy tìm được theo phương pháp bình phương cực tiểu được thể hiện như trong bảng 4.

Bảng 4. Kết quả tính toán các hệ số của phương trình hồi quy:

| $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ |
|-------|-------|-------|-------|
| 51,95 | 3,57  | 25,78 | 1,12  |

Ta tìm được phương trình hồi quy

$$Y = 51,95 + 3,57X_1 + 25,78X_2 + 1,12X_3 \quad (2)$$

Để kiểm định ý nghĩa của hệ số hồi quy và sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm ta dùng tiêu chuẩn Student và Fisher [11], [12]. Từ kết quả ba thí nghiệm ở tâm (thí nghiệm số 9, 10, 11) và thu được giá trị trung bình  $y_{tb} = 51,33$ , phương sai tái hiện  $S_{th} = 0,33$ ,  $S_{th} = 0,58$ . Các hệ số được tính theo tiêu chuẩn Student  $t_i = |b_i| / S_{b_i}$ ;  $t_0 = 254,5$ ,  $t_1 = 17,5$ ,  $t_2 = 126,3$ ;  $t_3 = 5,5$ ; ta giữ lại các hệ số có

$t_i > t_{0,05}(2)$ . Tra bảng tiêu chuẩn Student ta có nên ta thấy các hệ số  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  là có ý nghĩa với độ tin cậy  $p < 0,05$ .

Để kiểm tra sự tương thích của hàm hồi quy với số liệu thực nghiệm ta dùng tiêu chuẩn Fisher. Theo tiêu chuẩn Fisher ta tính được  $F = S_d^2 / S_{th}^2 = 0,57$ , tra bảng ta có  $F(0,95; 4; 2) = 19,3 > F$ . Vậy, phương trình hồi quy (2) là tương thích với số liệu thực nghiệm. Đưa phương trình (2) về hàm đối với các biến thực ta thu được biểu thức:

$$Q = 51,55V + 1,78\Delta T + 0,18\varphi - 47,52 \quad (3)$$

Từ kết quả trên ta có một số nhận xét sau:

Phương sai tái hiện  $S_{th}$  là bé, chứng tỏ thí nghiệm có độ ổn định tốt. Tiêu chuẩn kiểm định F nhỏ hơn nhiều so với giá trị tới hạn  $F(0,95, 4; 2)$ , cho thấy hàm hồi quy phù hợp tốt với kết quả thí nghiệm. Từ kết quả ở trên, ta thấy tốc độ ngưng tụ Q (ml/h) có thể biểu diễn

dưới dạng hàm phụ thuộc vào vận tốc cửa vào  $V$  (m/s); độ chênh nhiệt của dòng vào với sàn  $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ ; độ ẩm tương đối  $\phi$  (%) theo phương trình (3). Cả ba yếu tố khảo sát đều làm tăng tốc độ ngưng tụ trong đó vận tốc đóng vai trò chính, tiếp đến là chênh nhiệt và sau cùng là độ ẩm tương đối.

## 4. XỬ LÝ KHÔNG THỨ NGUYÊN KẾT QUẢ QUY HOẠCH THỰC NGHIỆM

Mục đích của phân tích thứ nguyên ở đây là tính toán lượng nước ngưng tụ trên sàn cho các mô hình căn phòng thực từ kết quả thí nghiệm trên mô hình thu nhỏ đồng dạng với mô hình thực về cả hình học, động học và động lực học. Cơ sở khoa học của phương pháp không thứ nguyên là áp dụng định lý Pi-Buckingham [2].

Biểu diễn thứ nguyên của các đại lượng vận tốc ( $U$ ), mật độ ( $\rho$ ), độ ẩm tuyệt đối của hơi nước ( $\rho_h$ ), áp suất ( $P$ ), độ nhớt động lực học ( $\mu$ ), năng lượng ( $E$ ), hệ số dẫn nhiệt ( $k$ ), hệ số khuếch tán ( $D$ ), hằng số khí lý tưởng ( $R$ ), các số hạng nguồn trong các phương trình bảo toàn ( $S_m, S_p, S_e, S_w$ ) theo bốn thứ nguyên cơ sở trong nhiệt thủy khí là khối lượng  $[M]$ , chiều dài  $[L]$ , thời gian  $[T]$ , nhiệt độ  $[\Theta]$ :

$$[U] = LT^{-1}, [\rho] = ML^{-3}, [\rho_h] = ML^{-3}, [P] = ML^{-1}T^{-2}, [\mu] = ML^{-1}T^{-1} \\ [E] = L^2T^{-2}, [k] = ML^{-1}T^{-1}K^{-1}, [D] = L^2T^{-1}, [R] = L^2T^{-2}\Theta^{-1}, \\ [S_m] = ML^{-3}T^{-1}, [S_p] = ML^{-2}T^{-2}, [S_e] = ML^{-1}T^{-3}, [S_w] = ML^{-3}T^{-1}$$

Đặt:

$$\bar{U} = \frac{U}{U_o}, \bar{X} = \frac{X}{L}, \bar{p} = \frac{p - p_o}{\rho_h U_o^2}, \bar{T} = \frac{T - T_o}{T_o - T_o} = \frac{T - T_o}{\Delta T}, \bar{\rho}_h = \frac{\rho_h - \rho_{h,o}}{\rho_{h,o} - \rho_{h,i}}, \\ \text{Re} = \frac{U_o L}{\nu}, Gr = \frac{g \beta (\Delta T) L^3}{\nu^2}, Pr = \frac{\mu C_p}{k}, Sc = \frac{\nu}{D}$$

Các chỉ số “h”, “k”, “o”, “s” lần lượt là hơi nước, không khí, giá trị ở cửa vào và ở sàn. Biến đổi các hệ phương trình bảo toàn cho

dòng dừng không nén ở dạng thứ nguyên về dạng không thứ nguyên như sau:

Phương trình bảo toàn khối lượng:

$$\nabla \cdot (\bar{U}) = 0 \quad (4)$$

Dạng không thứ nguyên:

$$\bar{\nabla} \cdot (\bar{U}) = 0 \quad (5)$$

Phương trình bảo toàn động lượng:

$$\rho_o (\bar{U} \cdot \bar{\nabla}) \cdot \bar{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{U} + \rho_o g [1 - \beta(T - T_s)] \quad (6)$$

Một cách gần đúng có thể coi  $p$  - áp suất tĩnh, nghĩa là:

$$-\nabla p + g\rho$$

Dạng không thứ nguyên của phương trình động lượng:

$$(\bar{U} \cdot \bar{\nabla}) \bar{U} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \bar{U} - \bar{T} \pi_1; \pi_1 = \frac{g \beta (\Delta T) L}{U_o^2} = \frac{Gr}{\text{Re}^2} \quad (7)$$

Không khí ẩm với hai thành phần chính là hơi nước và không khí khô không ngưng. Gọi  $\omega_h$  là phân khối của hơi nước. Ta có phương trình truyền chất:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U} \omega_h) = -\nabla \cdot \bar{J}_h \quad (8)$$

Thông lượng khuếch tán của hơi nước.

$$\text{Với dòng chảy tầng: } \bar{J}_j = -\rho D_{m,j} \nabla \omega_j$$

Với dòng chảy rối:

$$\bar{J}_j = -(\rho D_{m,j} + \frac{\mu_j}{Sc_j}) \nabla \omega_j = -(\rho D_{m,j} + \rho D_t) \nabla \omega_j = -\rho D \nabla \omega_j$$

Trong đó  $D_t$  là hệ số khuếch tán rối,  $D_{m,j}$  là hệ số khuếch tán khối của chất  $j$ .

$$D = D_t + D_{m,j}$$

Dạng không thứ nguyên của phương trình truyền chất là:

$$\nabla \cdot [\bar{U} \omega_k] = -\pi_0 \nabla^2 \omega_k; \pi_0 = \frac{D}{LU_0} = \frac{\nu}{LU_0} \cdot \frac{D}{\nu} = \frac{1}{Re.Sc} \quad (9)$$

Ta sẽ biểu diễn phương trình (9) theo biên mới là độ ẩm tuyệt đối như sau:

Xét không khí ẩm trong thể tích V. Khối lượng của hơi là  $m_h$ ; của không khí khô là  $m_k$ . Gọi  $\rho_h$  và  $\rho_0$  lần lượt là độ ẩm tuyệt đối và mật độ của khí ẩm.

$$\rho_h = \frac{m_h}{V}; \rho_0 = \frac{m_h + m_k}{V} \Rightarrow \frac{\rho_h}{\rho_0} = \frac{m_h}{m_h + m_k} = \omega_h$$

Do  $m_h$  bé nên có thể coi  $\rho_0 = \text{const.}$

Thay vào phương trình (9) ta có:

$$\nabla \cdot [\bar{U} \rho_h] = -\pi_0 \nabla^2 \rho_h; \quad (10)$$

Đặt  $d = \rho_{h,0} - \rho_{h,s}$  khi đó dạng không thứ nguyên của độ ẩm tuyệt đối là:

$$\bar{\rho}_h = \frac{\rho_h - \rho_{h,s}}{d}$$

Biến đổi hai vế của phương trình (10) theo độ ẩm tuyệt đối không thứ nguyên như sau:

$$VT = \nabla \bar{U} \rho_h = \nabla \bar{U} (d \bar{\rho}_h + \rho_{h,s}) = d \nabla (\bar{U} \bar{\rho}_h) + \rho_{h,s} \nabla \bar{U} = d \nabla (\bar{U} \bar{\rho}_h)$$

$$VP = -\pi_0 \Delta \rho_h = -\pi_0 \Delta (d \bar{\rho}_h + \rho_{h,s}) = -d \pi_0 \Delta \bar{\rho}_h$$

Vậy, phương trình (10) trở thành:

$$\nabla [\bar{U} \bar{\rho}_h] = -\pi_0 \nabla^2 \bar{\rho}_h; \pi_0 = \frac{1}{Re.Sc} \quad (11)$$

Phương trình bảo toàn năng lượng:

$$\nabla \cdot \left[ \bar{U} \rho_0 \left( C_p T + \frac{U^2}{2} \right) \right] = k \nabla^2 T; \quad (12)$$

Đưa phương trình Error! Reference source not found, về dạng không thứ nguyên như sau:

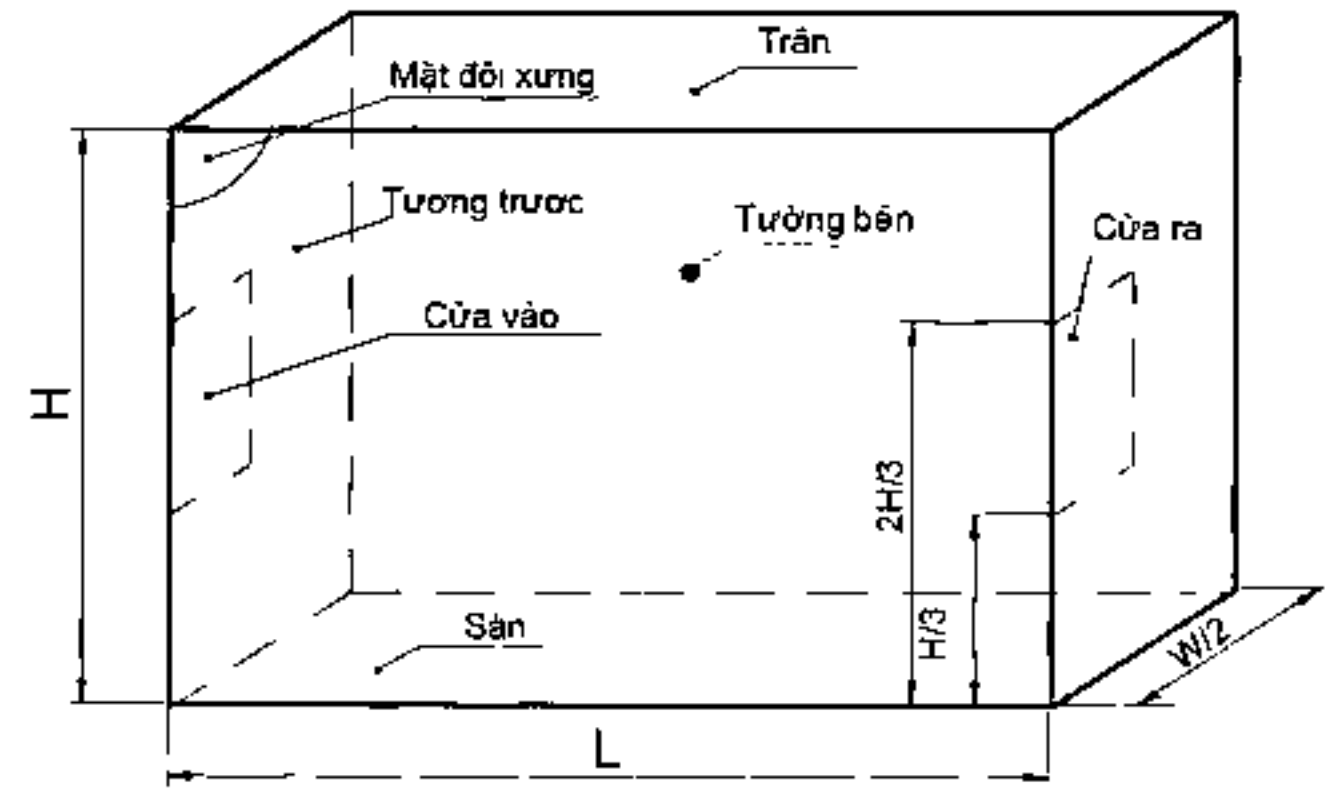
$$VP = \frac{k(\Delta T)}{L^2} \bar{\nabla}^2 \bar{T}$$

$$VT = \frac{\rho_0 U_0 C_p (\Delta T)}{L} \nabla \left[ \bar{U} \left( \bar{T} + \frac{\bar{U}^2}{2} \pi_2 \right) \right]; \pi_2 = \frac{U_0^2}{C_p (\Delta T)}$$

Vậy, phương trình bảo toàn năng lượng dạng không thứ nguyên sẽ là:

$$\nabla \bar{U} \left[ \bar{T} + \frac{\bar{U}^2}{2} \pi_2 \right] = \pi_3 \bar{\nabla}^2 \bar{T}; \pi_3 = \frac{k}{L \rho_0 U_0 C_p} = \frac{1}{Re.Pr} \quad (13)$$

Điều kiện biên của bài toán (hình 4) như sau:



Hình 4 Các điều kiện biên trên nửa mô hình ngưng tụ

- Trần:  $z = H, \bar{z} = H/L, U_x = U_y = U_z = 0, \bar{U}_x = \bar{U}_y = \bar{U}_z = 0,$
- Tường bên:  $y = W/2, \bar{y} = W/2L, U_x = U_z = 0, \bar{U}_x = \bar{U}_z = \bar{U}_y = 0,$
- Tường trước:  $x = L; \bar{x} = 1; \bar{U}_x = \bar{U}_y = \bar{U}_z = 0;$
- Tường sau:  $x = 0; \bar{x} = 0; \bar{U}_x = \bar{U}_y = \bar{U}_z = 0;$
- Tại mặt đối xứng:

$$y = 0, U_y = 0, \frac{\partial \rho_h}{\partial y} = 0, \bar{y} = 0, \bar{U}_y = 0, \frac{\partial \bar{\rho}_h}{\partial \bar{y}} = 0, \frac{\partial \bar{T}_h}{\partial \bar{y}} = 0$$

- Cửa trước:

$x = L; -\frac{W}{6} \leq y \leq 0; \frac{H}{3} \leq z \leq \frac{2H}{3};$   
 $U_x = -U_0; U_y = U_z = 0; \rho_h = \rho_{h0}$   
 $\bar{x} = 1; -\frac{W}{6L} \leq \bar{y} \leq 0; \frac{H}{3L} \leq \bar{z} \leq \frac{2H}{3L};$   
 $\bar{U}_x = -1; \bar{U}_y = \bar{U}_z = 0; \bar{\rho}_h = 1; \bar{T} = 1$

• Cửa sau:

$x = 0; 0 \leq y \leq -\frac{W}{6}; \frac{H}{3} \leq z \leq \frac{2H}{3}; p = p_{mt} = p_0$   
 $\bar{x} = 0; -\frac{W}{6L} \leq \bar{y} \leq 0; \frac{H}{3L} \leq \bar{z} \leq \frac{2H}{3L}; \bar{p} = 0$

• Sàn:

$z = 0; \rho_h = \rho_{hs}; U_x = U_y = 0;$   
 $\bar{z} = 0; \bar{U}_x = \bar{U}_y = 0; \bar{\rho}_h = 0; \bar{T} = 0$

Tốc độ ngưng tụ Q(ml/h) trên toàn sàn được tính bởi tổng tốc độ ngưng tụ trên từng phần tử tính toán trên sàn (“cellwall”) [1]:

$Q = \sum_{cellwall} \frac{\rho D}{1 - \omega_s} \frac{\partial \omega_s}{\partial z} \bar{A}_{cellwall}; [Q] = MT^{-1}$  (14)

Biểu diễn Q qua độ ẩm tuyệt đối  $\rho_h$ :

$Q = \sum_{cellwall} \frac{\rho_0 D}{\omega_s - 1} \frac{\partial(\rho_s - \rho_0)}{L \partial \bar{z}} \bar{A}_{cellwall} = \frac{LD}{\omega_{hs} - 1} \sum_{cellwall} \frac{\partial \rho_s}{\partial \bar{z}} \bar{A}_{cellwall}$  (15)

Biểu diễn Q qua độ ẩm tuyệt đối  $\bar{\rho}_h$ :

$Q = \frac{LD}{\omega_s - 1} \sum_{cellwall} \frac{\partial(\bar{\rho}_s d + \rho_{s0})}{\partial \bar{z}} \bar{A}_{cellwall} = \frac{LDd}{\omega_s - 1} \sum_{cellwall} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial \bar{z}} \bar{A}_{cellwall}$  (16)

Từ hệ phương trình và điều kiện biên ở trên, theo lí thuyết thứ nguyên, suy ra

$\bar{\rho}_s = f(Re, Gr, Pr, Sc, \pi_2; \frac{H}{L}, \frac{W}{L}, \bar{x}_1); \pi_2 = \frac{U_0^2}{C_p(\Delta T)}$  (17)

Đặt:  $f^* = - \sum_{cellwall} \frac{\partial \bar{\rho}_h}{\partial \bar{z}} \bar{A}_{cellwall}$  khi đó, f là

hàm của  $f^* = f(Re; Gr; Pr; Sc; \pi_2; \frac{H}{L}; \frac{W}{L})$

Phương trình (16) trở thành:

$Q = \frac{LD(\rho_{h0} - \rho_{hs})}{1 - \omega_{hs}} f^* = \frac{LD\rho_0(\omega_{h0} - \omega_{hs})}{1 - \omega_{hs}} f^*$  (18)

Do  $C_p$  là lớn (của không khí khô là 1005J/(kg.K)), nên có thể xem  $\pi_2 = 0$ , vì vậy:

$f^* = f(Re; Gr; Pr; Sc; H/L; W/L)$  (19)

Từ (18) ta thấy, nếu giữ nguyên chất công tác (không khí ẩm) và hình dáng căn phòng thì  $Pr; Sc; H/L; W/L = \text{const}$ . Do đó, Q chỉ còn phụ thuộc vào 2 biến là Re và Gr.

Dùng phân tích hồi quy đa biến cho các kết quả thí nghiệm mô hình ngưng tụ thu được ở trên ta có:

$f^* = -11,13 + \frac{5,27}{10^4} Re + \frac{7,82}{10^9} Gr$  (20)

Trong đó:

$2,77.10^4 \leq Re \leq 8,84.10^4$   
 $1,44.10^9 \leq Gr \leq 1,82.10^9$  (21)

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp không thứ nguyên để xác định tốc độ ngưng tụ trên sàn lạnh của căn phòng thông thoáng bởi không khí ẩm. Tốc độ ngưng tụ trên sàn lạnh được tính thông qua hàm số của các biến không thứ nguyên khi căn phòng cần tính là đồng dạng với mô hình căn phòng thu nhỏ đã thí nghiệm. ❖

Ngày nhận bài: 15/4/2017

Ngày phản biện: 12/5/2017

**Tài liệu tham khảo:**

- [1]. Nguyễn Huy Thế, Nguyễn Văn Quế (2016); *Nghiên cứu sự ngưng tụ trên sàn lạnh của không khí ẩm trong phòng do sự đối lưu hỗn hợp*, Hội nghị Khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc. 1, tr. 668-677.
- [2]. Nguyễn Văn Quế (2013); *Khí động học khí cụ bay*, NXB. Quân đội Nhân dân, Hà Nội.
- [3]. Trần Văn Trần, Nguyễn Thị Thủy (2009); *Mô phỏng số bài toán thông thoáng*, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc.
- [4]. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N (2002), *Transport Phenomena*, Wiley and Sons, Inc, New York, USA.
- [5]. Dehbi, A., Janasz, F., Bell, B (2013), *Prediction of steam condensation in the presence of noncondensable gases using a CFD-based approach*, Nuclear Engineering and Design. 258, tr. 199-210.
- [6]. Holman J.P. (1997), *Heat Transfer*, Edn, 8th, ed, McGraw-Hill, New York
- [7]. Mohammad Saraireh (2012), *Heat transfer and condensation of water vapour from humid air in compact heat exchangers*, School of Engineering and Science, Victoria University.
- [8]. Nguyen Huy The, Nguyen Van Que (2015), *Condensation of water vapor from humid air in forced convection over a flat plate*, Military Journal of Science and technology, chủ biên, tr. 158-164.
- [9]. Sparrow, EM, Minkowycz, WJ và Saddy, M (1967), *Forced convection condensation in the presence of noncondensables and interfacial resistance*, International Journal of Heat and Mass Transfer. 10(12), tr. 1829-1845.
- [10]. Tran van Tran and N T. Thuy (2015), *Some characteristics of the resultant air flow induced by ventiation and natural convection in a two-dimensional enclosure*, Vietnam Journal of Mechanics
- [11]. Giang Thị Kim Liên(2009), *Bài giảng môn quy hoạch thực nghiệm*, Đà Nẵng.
- [12]. Bùi Minh Trí (2011); *Xác suất thống kê và quy hoạch thực nghiệm*, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội