ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH THỨ NGUYÊN ĐỂ XÁC LẬP CÁC CHUẨN SỐ ĐỒNG DẠNG KHÔNG THỨ NGUYÊN CHO BÀI TOÁN TIẾT LƯU MÔI CHẤT LẠNH

Trịnh Văn Dũng
Nguyễn Tấn Dũng
Trần Ngọc Hào

ABSTRACT

The Expansion Processing is a very important process of the Refrigeration and Air Conditioning, by invention of the process the industrial refrigeration systems and the civil refrigeration systems are developed more perfect. However, this process is not studied thoroughly until now because it is such a complicated process and has so many parameters related to the process. For this reason, establishing maths models to solve problems of the process will be not easy.

In this paper, we will introduce a unit analysis method to establish maths models and similar unit parameters for the Expansion processing refrigerant problems.

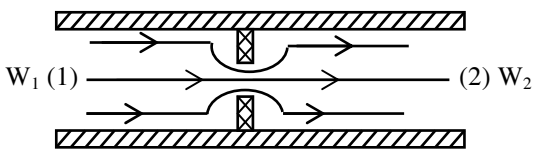
TÓM TẮT

Quá trình tiết lưu là một quá trình hết sức quan trọng trong ngành kỹ thuật lạnh, nhờ sự phát minh của quá trình này mà các hệ thống lạnh công nghiệp hay dân dụng ngày nay phát triển đạt tới mức hoàn thiện hơn. Tuy nhiên, quá trình tiết lưu này cho đến bây giờ vẫn chưa được nghiên cứu triệt để, bởi vì quá trình tiết lưu là một quá trình rất phức tạp, có quá nhiều thông số tham gia, chính vì vậy khi thiết lập mô hình toán sẽ gặp rất nhiều khó khăn để giải quyết bài toán tiết lưu.

Ở bài viết này, chúng tôi sẽ giới thiệu phương pháp phân tích thứ nguyên để xây dựng mô hình toán và xác lập các chuẩn số đồng dạng cho bài toán tiết lưu mô chất lạnh.

I. NỘI DUNG

1. Cơ sở khoa học của quá trình tiết lưu môi chất lạnh



Hình 1: Cơ cấu tiết lưu trong ống

- Khi cho dòng môi chất lạnh lỏng qua cơ cấu tiết lưu như hình 1 giản nở không sinh ngoại công từ áp suất cao P_1 xuống áp suất thấp hơn P_2 và không có trao đổi nhiệt môi trường xung quanh.

Như vậy, quá trình tiết lưu là quá trình đoạn nhiệt không thuận nghịch vì có sự tổn thất năng lượng do ma sát khi qua khe hẹp $ds > 0$, đồng thời không sinh ngoại công $l_{12} = 0$, do (1) và (2) cách xa nhau nên $w_1 \approx w_2$, có nghĩa là: $w_1^2 - w_2^2 \approx 0 \rightarrow dw \approx 0$. Theo định luật nhiệt động học thứ nhất ta có:

$$\delta q = dh + wdw = 0 \qquad (1.1)$$

$$\delta q = dh - vdp = 0 \qquad (1.2)$$

Từ (1.1) $\Rightarrow$ dh = 0 $\Rightarrow$ $h_1 - h_2 = 0 \Leftrightarrow h_1 = h_2 \Rightarrow$ Quá trình tiết lưu có thể được xem là quá trình đẳng entanpy.

Từ (1.1) và (1.2) $\Rightarrow$ wdw = - vdp $\Rightarrow$ dp.dw < 0. Vì khi qua khe hẹp tốc độ tăng tức thời, có nghĩa: dw > 0 $\Rightarrow$ dp < 0 như vậy P là một hàm nghịch biến với tốc độ, cho nên áp suất giảm $P_1 > P_2$ dẫn đến nhiệt độ giảm $T_1 > T_2$, điều này thấy rất rõ qua hiệu ứng Junlen – Thomson.

- Hiệu ứng Junlen-Thomson

Vào cuối thế kỷ 19 Junlen – Thomson đã tìm ra hiệu ứng trong quá trình tiết lưu như sau: khi cho dòng môi chất đi qua cơ cấu tiết lưu Junlen –Thomson đã phát hiện ra độ biến thiên nhiệt độ theo áp suất của các nhóm lưu chất thực khác nhau nó thay đổi theo chiều hướng khác nhau. Và Junlen-Thomson gọi độ biến thiên nhiệt độ theo áp suất bằng một đại lượng là α_i và đại lượng này được biểu diễn theo phương trình sau:

$$\alpha_i = \frac{\delta T}{\delta P} = \frac{T.\left(\frac{\delta v}{\delta T}\right)_p - v}{c_p} \qquad (1.3)$$

Từ (1.3) thì khi quá trình tiết lưu lưu chất được thực hiện thì có các trường hợp xảy ra như sau:

- Nếu $\alpha_i > 0$ có nghĩa T = f(P) là một hàm đồng biến. Vì vậy sau quá trình tiết lưu áp suất giảm nó sẽ kéo theo nhiệt độ giảm. Trường hợp này đúng cho nhóm lưu chất thực môi chất lạnh sử dụng trong các hệ thống lạnh.

- Nếu $\alpha_i < 0$ có nghĩa T = f(P) là một hàm nghịch biến. Vì vậy sau quá trình tiết lưu áp suất giảm nó sẽ kéo theo nhiệt độ tăng. Trong trường hợp này nó đúng cho nhóm lưu chất sử dụng trong các trường hợp đặc biệt.

- Nếu $\alpha_i = 0$ có nghĩa T = f(P) là một hàm hằng, có nghĩa là cho dù áp suất giảm trong quá trình tiết lưu nhưng nhiệt độ vẫn không thay đổi. Trường hợp này đúng cho nhóm khí lý tưởng bởi vì: Ta có pv = RT

Từ đó suy ra:

$$\left(\frac{\delta v}{\delta p}\right)_P = \frac{R}{P}$$

Thay vào phương trình (1.3) sẽ được:

$$\alpha_i = \frac{T.\left(\frac{R}{P}\right) - v}{c_P} = 0$$

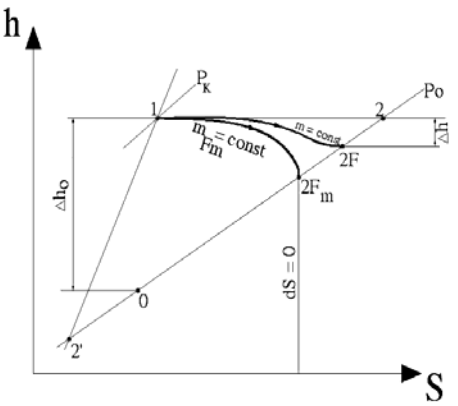
2. Phương pháp nghiên cứu

Để xây dựng mô hình toán cho quá trình tiết lưu môi chất lạnh chúng tôi đã ứng dụng phương pháp phân tích thứ nguyên (phương pháp hệ số tỷ lệ) để giải quyết bài toán. Bởi vì, quá trình tiết lưu môi chất lạnh rất phức tạp và có quá nhiều thông số tham gia, cho nên không thể xây dựng hệ phương trình vi phân để mô tả cho quá trình được, hơn nữa việc xây dựng mô hình toán gặp rất nhiều khó khăn.

3. Xác lập các chuẩn số đồng dạng cho bài toán tiết lưu môi chất lạnh

3.1. Thiết lập hàm số đặc trưng cho quá trình tiết lưu tác nhân lạnh trong ống tiết lưu

Như đã biết, tiết lưu môi chất lạnh là một quá trình hết sức phức tạp, phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố và được đặc trưng bằng đường cong Fanno như trình bày trên giản đồ h – s trong hình sau:



Hình 2: Đường cong đặc trưng Fanno trên giản đồ h - s

Nếu gọi m là vận tốc khối lượng hay mật độ dòng nhiệt [kg/m^2.s] thì ta có:

$$m = f(\Delta P, \rho', \rho'', \Delta h_o, \mu', \mu'', \sigma, l, d, w', w'', R_\Omega, \Omega, x, \varphi, g, \alpha, \eta, \beta_i) \quad (3.1)$$

Trong đó:

- $\Delta P = P_k - P_o$: độ chênh áp suất
- P_k: áp suất ngưng tụ của tác nhân lạnh
- P_o: áp suất bốc hơi của tác nhân lạnh
- ρ', ρ'': lần lượt là khối lượng riêng của tác nhân lạnh lỏng và hơi [kg/m^3]
- μ', μ'': lần lượt là độ nhớt động lực học của tác nhân lạnh lỏng và hơi
- σ: ứng suất bề mặt
- w', w'': lần lượt là tốc độ của lỏng và hơi
- l: là độ dài ống tiết lưu
- d: đường kính ống tiết lưu
- R_Ω: bán kính đặc trưng cho bọt
- Ω: diện tích bề mặt chuyển pha
- x: độ khô ($x = 1$ đường bão hoà khô; $x = 0$ đường bão hoà lỏng)
- φ: độ ẩm
- g: gia tốc trọng trường
- α: góc nghiêng của ống tiết lưu
- η: phần hơi truyền nhiệt tăng lên trong quá trình chuyển động trong ống
- β_i: tất cả các đại lượng phụ thuộc còn lại

Mặt khác, do giữa các đại lượng trong hàm số trên có mối tương quan với nhau:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho'}x + \frac{1}{\rho''}(1-x)$$

$$\Omega = \frac{3(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'})}{(\frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho,})\rho'' R_\Omega}$$

……

Nên biểu thức (3.1) trở thành:

$$\dot{m} = f(\Delta P, \rho, \Delta h_o, \mu', \mu'', w, \alpha, l, d) \quad (3.2)$$

Xuất phát từ phương trình Bernoulli và phương trình chuyển động liên tục, ta xác định được đường cong Fanno như sau:

$$dh = -d\left[\frac{mv^2}{2}\right]$$

$$\Leftrightarrow h = h_1 - \left[\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}\right] \quad (3.3)$$

Trong đó:

h_1: entanpy lỏng tác nhân lạnh bão hoà ở áp suất P_k (trạng thái trước tiết lưu).

h: entanpy của tác nhân lạnh trong quá trình tiết lưu.

v: thể tích riêng tác nhân lạnh trong quá trình tiết lưu.

Trên cơ sở phương trình (3.3), với giá trị vận tốc khối lượng m cụ thể, ta dựng được đường cong Fanno tương ứng (1 – 2_F). Khi m đạt đến một giá trị nào đó thì quá trình tiết lưu sẽ diễn ra theo đường cong Fanno tới hạn (1 – 2_{FTH}). Ở đó, tiếp tuyến với đường cong Fanno tại giao điểm với đường đẳng áp suất hơi P_o = const sẽ trùng với đường đẳng entropy s = const (tức ds = 0). Vận tốc khối lượng m trong trường hợp này gọi là vận tốc khối lượng tới hạn m_{TH}. Và khi đó: $\eta_o = 0.5$ = const.

Trường hợp tác nhân lạnh chuyển động trong ống tiết lưu từ áp suất P_k đến P_o mà không có tổn thất do ma sát, không có tổn thất nhiệt ra môi trường xung quanh (tiết lưu đoạn nhiệt không thuận nghịch) thì vận tốc khối lượng lý thuyết của tác nhân lạnh sẽ đạt tới giá trị sau:

$$\dot{m}_0 = \rho_0 w_0 = \rho_0 \sqrt{2\Delta h_0} \quad (3.4)$$

Trong đó:

ρ_o: khối lượng riêng của hơi ẩm tác nhân lạnh sau quá trình tiết lưu đoạn nhiệt (ở trạng thái ứng với điểm 0).

$\Delta h_o = h_1 - h_o$: tổn thất entanpy trong quá trình tiết lưu đoạn nhiệt.

Ngoài ra, từ cơ sở lý thuyết cũng chứng minh được rằng, trong quá trình tiết lưu:

$\rho = f(\rho_o, \mu', \mu'', \sigma, l, d)$

$w = f(w_o, \mu', \mu'', \sigma, l, d)$

Mặt khác, từ (3.3), ta có:

$\eta = f(\eta_o, \mu', \mu'', \sigma, l, d)$

Từ những điều đã trình bày trên ta nhận thấy: vận tốc khối lượng m sẽ là hàm số của vận tốc khối lượng lý thuyết m_o và những tổn thất do ma sát được xác định bởi các lực ma sát ở pha lỏng và pha hơi. Chúng được đặc trưng bằng các hệ số nhớt động lực đặc trưng μ', μ''. Các lực ma sát này còn phụ thuộc cả vào không gian hình học của hệ. Không gian này được xác định bởi chiều dài l, đường kính d và đặc tính của dòng môi chất lạnh tiết lưu:

$$\dot{m} = f(\dot{m}_o, \Delta h_o, \mu', \mu'', \sigma, l, d) \quad (3.5)$$

Do m_o, Δh_o và ρ_o có mối liên hệ với nhau nên phương trình (3.5) có thể viết lại dưới dạng:

$$\dot{m} = f(\rho_o, \Delta h_o, \mu', \mu'', \sigma, l, d) \quad (3.5a)$$

3.2. Xác lập chuẩn số đồng dạng cho quá trình tiết lưu môi chất lạnh trong ống tiết lưu

❖ Viết thứ nguyên của tất cả các đại lượng tham gia

Đại lượng vật lý	Thứ nguyên
l	L
d	L
ρ_o	ML^{-3}
Δh_o	L^2T^{-2}
μ'	$ML^{-1}T^{-1}$
μ''	$ML^{-1}T^{-1}$
σ	MT^{-2}
m	$ML^{-2}T^{-2}$

Số đại lượng vật lý n = 8; số đơn vị cơ bản m = 3; như vậy, số chuẩn số thứ nguyên: r = 8 -3 = 5

❖ Tìm phương trình: $\varphi[\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_5] = 0$

- $\pi_5 = \dfrac{1}{d}$ → chọn d làm hệ số tỉ lệ cho l
- $P_L = d$
- $\pi_4 = \dfrac{\mu''}{\mu'}$

Xác định hệ số tỉ lệ của thời gian, khối lượng, độ nhớt, sức căng bề mặt, tổn thất entanpy, vận tốc khối lượng.

- Tìm P_T = ?
- Tìm P_M = ?

$[\rho_o] = M.L^{-3} \Rightarrow M = [\rho_o].L^3$

$\Rightarrow P_M = \rho_o.d^3$

Xây dựng đơn vị đo của các đại lượng phụ thuộc thông qua các đơn vị đo cơ bản.

Thay các hệ số tỉ lệ tương ứng: L → d; T → $\dfrac{l}{\sqrt{\Delta h_o}}$; $M \to \rho_o d^3$

- Tìm $P_{\mu'}$

$$\left[\mu'\right] = M.L^{-1}.T^{-1} = \rho_0 d^3 d^{-1}\left(\frac{d}{\sqrt{\Delta h_0}}\right)^{-1}$$

$$\Rightarrow P_{\mu'} = \rho_0 d\sqrt{\Delta h_0}$$

- Tìm P_σ

$$\left[\sigma\right] = M.T^{-2} = \rho_0 d^3\left(\frac{d}{\sqrt{\Delta h_0}}\right)^{-2}$$

$$\Rightarrow P_\sigma = \rho_0 d\Delta h_0$$

- Tìm P_m

$$\left[m\right] = M.L^{-2}.T^{-1} = \rho_0 d^3 d^{-2}\left(\frac{d}{\sqrt{\Delta h_0}}\right)^{-1}$$

$$\Rightarrow P_m = \rho_0\sqrt{\Delta h_0}$$

Từ đó xác định được các chuẩn số đồng dạng:

- $\pi_3 = \pi_\sigma = \dfrac{\sigma}{P_\sigma} = \dfrac{\sigma}{\rho_0 \Delta h_0 d} = We$

- $\pi_2 = \pi_{\mu'} = \dfrac{\mu'}{P_{\mu'}} = \dfrac{\mu'}{\rho_0 d\sqrt{\Delta h_0}} = \mathrm{Re}^{-1}$

- $\pi_2 = \pi_{\dot{m}} = \dfrac{\dot{m}}{P_{\dot{m}}} = \dfrac{\dot{m}}{\rho_0 \sqrt{\Delta h_0}} = \dfrac{Ga}{F\rho_0\sqrt{\Delta h_0}}$

Lưu ý: π_3 và $(\pi_2)^{-1}$ là dạng biến thể của chuẩn số We và Re

Vậy biểu thức liên hệ giữa các định số và chuẩn số đồng dạng:

$$\varphi = f\left(\frac{Ga}{F\rho_0\sqrt{\Delta h_0}}, \frac{\rho_0 d\sqrt{\Delta h_0}}{\mu'}, \frac{\sigma}{\rho_0 \Delta h_0 d}, \frac{\mu''}{\mu'}, \frac{l}{d}\right) \quad (3.6)$$

Hay:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} = f\left(\frac{\rho_0 d\sqrt{\Delta h_0}}{\mu'}, \frac{\sigma}{\rho_0 \Delta h_0 d}, \frac{\mu''}{\mu'}, \frac{l}{d}\right) \quad (3.6a)$$

Mặt khác, từ (3.3) ta có:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2\Delta h}{v^2}}; \dot{m}_0 = \sqrt{\frac{2\Delta h_0}{v_0^2}} \Rightarrow \frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} = \sqrt{\frac{\Delta h / \Delta h_0}{\left(v / v_0\right)}} \quad (3.7)$$

Từ các biểu thức (3.6a), (3.7) có thể đưa ra các nhận xét về điều kiện đồng dạng của quá trình tiết lưu tác nhân lạnh trong ống tiết lưu như sau:

- Các chuẩn số đồng dạng tham gia trong vế phải phương trình (3.6a) có giá trị bằng nhau.

- Có sự đồng dạng nhiệt động học thể hiện trong mối tương quan giữa H và V (tức là giữa $\Delta h / \Delta h_o$ và v / v_o).

Ngoài ra, vì: $\mathrm{Re}We = \dfrac{\sigma}{\mu'\sqrt{\Delta h_0}} = Dr_t$

nên biểu thức (3.6a) còn có thể viết lại như sau:

$$\frac{m}{m_0} = f\left(\mathrm{Re}, Dr_t, \frac{\mu''}{\mu'}, \frac{l}{d}\right) \quad (3.8)$$

II. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Khi nghiên cứu dùng phương pháp phân tích thứ nguyên để xác lập các chuẩn số đồng dạng không thứ nguyên và đồng thời thiết lập được hàm quan hệ ở (3.8), thì chúng ta hoàn toàn có thể xây dựng mô hình toán cho quá trình tiết lưu theo phương trình sau đây:

$$\frac{m}{m_0} = A.\mathrm{Re}^m.Dr_t^n.\left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)^\alpha.\left(\frac{l}{d}\right)^\beta \quad (3.9)$$

Trong đó: A, m, n, α, ß: là các hằng số xác định bằng phương pháp thực nghiệm.

Từ phương trình (3.9) ta có thể hoàn toàn xác định được m một cách chính xác, đồng thời có thể ứng dụng tính toán chọn van tiết lưu cho phù hợp với năng suất lạnh của hệ thống lạnh.

III. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Từ trước đến nay việc tính toán chọn van tiết lưu phù hợp với năng suất lạnh của hệ thống lạnh gặp rất nhiều khó khăn, thông thường chọn theo kinh nghiệm là chủ yếu. Trong quá trình nghiên cứu xây dựng mô hình toán cho quá trình tiết lưu ở phương trình (3.8) và (3.9), chúng ta có thể thiết lập phương trình (3.10) để tính toán chọn van tiết lưu phù hợp với năng suất lạnh của hệ thống lạnh như sau:

$$F = \frac{m_{tt}}{\eta.\sqrt{\Delta P.\rho.g}} = \frac{Q_0}{3600.\eta.q_0.\sqrt{\Delta P.\rho.g}} \quad (3.10)$$

Trong đó:

- m_{tt} [Kg/s]: lưu lượng khối lượng môi chất lạnh tuần hoàn qua van tiết lưu.

- η: hệ số nén của dòng chảy qua van tiết lưu.

- $\Delta P = P_k - P_0$, [Kg/m^2] độ chênh áp suất trước và sau tiết lưu.

- g = 9,81 [m/s^2]: gia tốc trọng trường của trái đất.

• ρ [Kg/m^3]: khối lượng riêng môi chất lạnh trước khi qua van tiết lưu.

• Q_0 [kCal/h]: năng suất lạnh của hệ thống lạnh.

• q_0 [kCal/Kg]: năng suất lạnh riêng của hệ thống lạnh.

• F [m^2]: tiết diện ngang của van tiết lưu.

2. Kiến nghị

Việc xây dựng mô hình toán cho quá trình tiết lưu là rất khó khăn và phức tạp. Tuy nhiên, để xây dựng phương trình (3.9) một cách chính xác thì cần phải có thiết bị thí nghiệm hiện đại, đồng thời kiểm soát các thông số tham gia trong quá trình bằng máy tính, bên cạnh đó phải thực hiện nhiều đợt thí nghiệm để xác định A, m, n, α, ß.

Từ (3.9) ta lấy logarit cơ số 10 hai vế thì sẽ được:

$$\lg\frac{m}{m_0} = \lg A + m\lg \mathrm{Re} + n\lg Dr_t + \alpha\lg\left(\frac{\mu''}{\mu'}\right) + ß\lg\left(\frac{l}{d}\right) \qquad (3.11)$$

Phương trình (3.11) có 5 ẩn số đó là A, m, n, α, ß. Do đó, mỗi đợt thí nghiệm phải làm 5 lần để xác định $\frac{m}{m_0}$, Re, $\left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)$, $\left(\frac{l}{d}\right)$. Như vậy, mỗi lần sẽ thu được một phương trình, cuối cùng sẽ có 5 phương trình 5 ẩn và giải hệ phương trình đó sẽ tìm được A, m, n, α, ß.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. PGS. TS. Võ Thị Ngọc – TS. Trịnh Văn Dũng, Lý thuyết truyền vận, NXB Đại Học Quốc Gia TP.HCM, Năm 2003.

[2]. Nicholas P. Chopey Handbook of Chemical Engineering Calculation, McGraw – Hill, Inc. 1993, 734p and 856p.

[3]. A. Newman, Trans. Am. Inst. Chem. Eng., vol 1997, p.1481.

[4]. PGS. TSKH. Lê Xuân Hải, Tiếp cận hệ thống, NXB Đại Học Quốc Gia TP.HCM, Năm 2005.

[5]. ThS. Nguyễn Tấn Dũng, Giáo Trình Công nghệ lạnh, Đại học SPKT – TP.HCM, Năm 2006.