

Truyền nhiệt từ tác nhân khí đến hạt ứng dụng trong tính toán sấy muối tinh bằng máy sấy tầng sôi liên tục

(*) ThS. BÙI TRUNG THÀNH

1. Giới thiệu

Truyền nhiệt trong lớp hạt sôi khí xảy ra có ba cơ chế truyền nhiệt khác nhau bao gồm:

- Truyền nhiệt khí đến hạt
- Truyền nhiệt giữa hạt - khí hoặc hai pha hỗn hợp hạt - khí
- Truyền nhiệt một bề mặt truyền nhiệt dạng vách đến lớp hạt [1,2,3].

Ba cơ chế truyền nhiệt này đều liên quan đến những quá trình kết hợp với các lớp hạt vật liệu. Các cơ chế truyền nhiệt này tùy thuộc vào từng điều kiện ứng dụng cụ thể. Ví dụ như sự cháy lớp sôi của than đá, trong đó các hạt than được hóa sôi bằng không khí. Sự oxy hóa tỏa nhiệt của carbon tại bề mặt vật liệu gây ra một sự gia tăng nhiệt độ hạt và điều này dẫn đến sự truyền nhiệt từ vật liệu nóng đến khí hóa sôi. Hay trong quá trình sấy hạt vật liệu rời bằng lớp sôi, dòng khí nóng liên tục truyền nhiệt vào lớp hạt ẩm để ẩm từ trong các hạt vật liệu thoát ra bề mặt ngoài rồi được dòng tác nhân khí kéo ra ngoài buồng sấy.

Đối với cơ chế truyền nhiệt dạng thứ ba, để duy trì một sự cân bằng năng lượng tổng của lớp hạt sôi thì cần thiết phải truyền nhiệt từ vùng lớp hạt sôi (hạt - khí) tới một bề mặt làm nguội nào đó, chẳng hạn là ống trao đổi nhiệt (giữa lớp hạt sôi và bề mặt truyền nhiệt được đặt chìm trong lớp sôi).

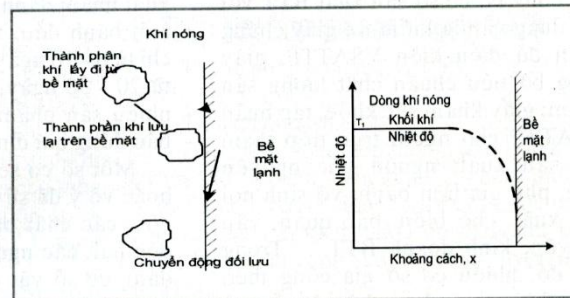
Trong bài viết này, chúng tôi xin đề cập đến truyền nhiệt trong lớp hạt sôi bọt bằng khí [2] và quá trình truyền nhiệt xảy ra ở cơ chế truyền nhiệt từ khí - hạt và ứng dụng phần nội dung nghiên cứu này vào tính toán truyền nhiệt khi sấy hạt muối tinh trong máy sấy tầng sôi liên tục.

2. Dữ liệu và phương pháp

Mặc dù hệ số truyền nhiệt từ tác nhân khí - hạt rắn trong sấy tầng sôi bé, thường vào khoảng 5 - 20W/m².K, nhưng nó cho ưu điểm lớn nhất là tốc độ truyền nhiệt tốt, nhiệt độ đồng đều và dễ kiểm soát quá trình. Điều này có được bởi lẽ diện tích bề mặt truyền nhiệt của nó là rất lớn, do khối hạt nhỏ. Theo [4] 1m³ hạt 100 μm có diện tích bề mặt 30,000 m², sự truyền nhiệt giữa khí và hạt hiếm khi bị giới hạn trong truyền nhiệt lớp hạt sôi. Nhằm có thể làm rõ cơ chế truyền nhiệt cũng như tìm hiểu các tương quan trong truyền nhiệt khí - hạt rắn lần lượt ta đi vào khảo sát các nội dung lý thuyết cụ thể dưới đây.

2.1. Lý thuyết hạt đơn

Cũng theo [2], hệ số trao đổi nhiệt trong lớp hạt sôi thường nằm trong phạm vi từ 1 - 40 Btu/giờ.ft².OF, trong khi diện tích truyền nhiệt thay đổi trong phạm vi từ 1000 đến 15000 ft²/ft³ của lớp hạt [1]. Một trở ngại chính để dòng nhiệt truyền từ khí đến hạt trong lớp sôi là dẫn nhiệt qua một lớp màng mỏng của khí bao quanh hạt. Hình 1 mô phỏng cơ chế truyền nhiệt đối lưu khí đến hạt và Hình 2 mô tả phân bố nhiệt độ khí nóng trao đổi nhiệt với mặt vách lạnh.



Hình 1

Hình 2

Theo [2], hệ số trao đổi nhiệt điểm thứ i là :

$$(1) \quad hi = k_i/x_i$$

$$\text{Với: } xi = \Phi(d_p, v/\rho/\mu, \Psi, \delta, \epsilon)$$

Xem xét : Dẫn nhiệt hạt cầu đơn theo định luật Fourier, công thức truyền nhiệt được thể hiện:

$$(2) \quad \alpha \cdot d_p/\lambda = d_p/x + 2$$

Trong đó: d_p - đường kính hạt; ρ - khối lượng riêng của hạt; μ - độ nhớt động học của khí; Ψ - hệ số hình dạng của hạt; δ - độ nhấp nhô của hạt; ϵ - độ xốp của hạt; α - hệ số trao đổi nhiệt đối lưu; λ - hệ số dẫn nhiệt; xi - chiều dày điểm màng tiếp xúc dẫn nhiệt (đối với một lưu chất bất kỳ có thể giảm giá trị đến 2).

Chuyển động của hạt lên xuống trong dòng khí hóa sôi sẽ dẫn đến một quá trình truyền nhiệt của hạt không ổn định. Từ việc phân tích kích thước hạt cho ta tìm được tương quan [2]:

$$(3) \quad \alpha d_p/\lambda = \Phi_1 (d_p v \cdot \rho/\mu)^c (C_p \mu/\lambda)^f \times \Phi_2 (\Psi \cdot \delta \cdot \epsilon)$$

2.2. Một số kết quả nghiên cứu về truyền nhiệt khí - hạt của một số tác giả

(*) Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh

Nghiên cứu về truyền nhiệt khí - hạt đã được một số tác giả công bố [2] như: Kattenring, Maderfield trong thí nghiệm lớp hạt silica gel và hạt nhôm sôi trong dòng tác nhân khí ổn định và đã đưa ra tương quan:

$$(4) \quad \alpha d_p / \lambda = 0,0135(d_p v / \mu)^{1,35}$$

Trong đó: v - vận tốc khí, xác định được khoảng biến thiên của hệ số trao đổi nhiệt đối lưu $\alpha = 3-10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Wamsley, thí nghiệm lớp sôi với hạt vật liệu là hạt thủy tinh đã được nghiên cứu và hạt nhôm trong dòng khí hóa sôi không và đã đưa ra được tương quan

$$(5) \quad \alpha = 1270 d_p^{1,27}$$

hệ số trao đổi nhiệt đối lưu được xác định nằm trong khoảng $\alpha = 0,07-9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Trong lãnh vực sấy muối tầng sôi có Frantz thí nghiệm về sự bay hơi ẩm của dịch muối ở nhiệt độ khí hóa lỏng cao [2] trạng thái ổn định và đã sử dụng tương quan:

$$(6) \quad d_p / \lambda = 0,018(d_p v / \mu)^{1,2}$$

và cũng đã xác định được dải biến thiên của hệ số trao đổi nhiệt đối lưu $\alpha = 0,8-2 \text{ W/m}^2\text{K}$

2.3. Truyền nhiệt khí - hạt

Để đơn giản nhất, ta xem lớp các hạt vật liệu ban đầu có nhiệt độ bằng nhau, một dòng khí nóng thổi xuyên qua từ từ mà (không làm xáo trộn các hạt) nghĩa là các hạt đang được sắp xếp cố định tự nhiên (lớp hạt tĩnh). Dòng nhiệt sẽ truyền từ luồng khí nóng tới các hạt bằng hình thức truyền nhiệt đối lưu, hệ số truyền nhiệt phụ thuộc vào tính chất chuyển động của dòng tác nhân khí (chảy tầng, chảy quá độ hay chảy rối) bên trong các lỗ trống xung quanh các hạt. Tuy nhiên, hiệu quả truyền nhiệt giữa khí nóng và các hạt chính là diện tích bề mặt truyền nhiệt của các hạt tiếp xúc với dòng khí là rất lớn. Diện tích bề mặt tiếp xúc thực sự với khí nóng chỉ bao gồm một phần của toàn bộ diện tích bề mặt của các hạt trong lớp hạt bởi vì dòng khí có thể chỉ luồn thẳm thấu theo những đường thuận lợi riêng giữa các hạt. Vì vậy, hệ số truyền nhiệt từ khí tới hạt dựa trên toàn bộ diện tích bề mặt của các hạt có thể vẫn còn khá nhỏ. Khi tốc độ của dòng khí đi qua các lỗ trống tăng lên, làm cho hệ số truyền nhiệt tại mặt tương tác giữa khí và hạt sẽ tăng, nhưng rất khó xác định chính xác hệ số truyền nhiệt này bằng bao nhiêu. Theo [1], Kunii và Levenspeil (1969) đã thu thập dữ liệu sự truyền nhiệt giữa khí tới hạt trong các lớp hạt tĩnh, với một dải các loại hạt và kích cỡ hạt và vận tốc lưu chất khác nhau thông qua hệ số không thứ nguyên Nuselt và hệ số Reynold

$$(7) \quad Nu_u = \alpha \frac{d_h}{\lambda_k}$$

$$(8) \quad Re_e = \frac{\rho_k v_k d_h}{\mu_k}$$

Theo [3], hệ số Nu và Re có quan hệ tương quan qua công thức 9:

$$(9) \quad Nu = C \cdot Re^n$$

Trong đó: C và n là hằng số thực nghiệm, biểu diễn giới hạn của ứng dụng do có sự biến đổi rộng của C và n giữa các lớp hạt thay đổi. Vì vậy, khi quyết định những giá trị thích hợp của hệ số truyền nhiệt từ khí tới

hạt trong những lớp hạt tĩnh, phải tiến hành những thí nghiệm với những hạt cụ thể dưới điều kiện vận hành thực tế [1,3]

Một vấn đề quan trọng khác liên quan đến truyền nhiệt từ khí nóng đến hạt trong thực tế là độ chứa nhiệt của hạt còn gọi là nhiệt dung riêng. Nhiệt chứa trong một đơn vị thể tích của khí rất nhỏ so với độ chứa nhiệt của các hạt, chẳng hạn nhiệt dung riêng của không khí ở áp suất khí quyển chỉ bằng 1/1000 so với độ chứa nhiệt của các hạt. Vì vậy, khi dòng khí tiếp xúc với các hạt nóng nhiệt độ của khí được hi vọng sẽ thay đổi đến một giá trị gần với nhiệt độ của các hạt, không có điều ngược lại. Tuân theo đó, nhiệt độ của hạt lại chi phối nhiệt độ của không khí trong các lỗ trống trong lớp hạt và cùng với nó là khối lượng riêng của khí và độ nhớt của khí. Vì vậy, hệ số truyền nhiệt đối lưu khí đến hạt và của toàn bộ tính chất của lớp hạt bao gồm hoặc là lớp hạt tĩnh hay là lớp hạt sôi đều bị chi phối bởi nhiệt độ của hạt.

Xét cho trường hợp truyền nhiệt từ dòng khí tới hạt là lớp hạt sôi, Kunii và Levenspeil (1969) [3] đưa ra một biểu đồ dữ liệu dựa trên giả thiết dòng chảy xuyên qua lớp hạt là dòng chảy một hướng, nghĩa là bỏ qua sự thay đổi nhiệt độ khí theo phương ngang chỉ tính đến hướng của dòng chảy của khí, kết quả là ta có sự tương quan:

$$(10) \quad Nu_{kh} = 0,03 Re^{1,3}$$

Trong đó: Nukh- hệ số Nusselt từ khí tới bề mặt hạt được theo công thức 7 và số Reynold hạt Reh được tính theo công thức 8.

Công thức 10 giúp chúng ta xác định khoảng cách tới lớp sôi của hạt là bao xa mà khí đang hoá lỏng phải xuyên qua trước khi độ chênh lệch nhiệt độ của hạt tới 10% so với nhiệt độ khí đầu vào lớp hạt [3].

3. Kết quả và thảo luận

Tính toán cho trường hợp cụ thể khi sấy muối tinh bằng phương pháp sấy tầng sôi liên tục, hạt muối tinh vào máy sấy có đường kính trung bình $d_p = 956 \mu\text{m}$, khối lượng riêng thể tích trạng thái tĩnh ở độ ẩm 5% có giá trị $\rho_p = 886 \text{ kg/m}^3$ [6,7]; khối lượng riêng của hạt $\rho_s = 2.138 \text{ kg/m}^3$, cầu tính hạt muối tinh $\phi = 0,71$ [9], nhiệt độ tác nhân sấy đi vào lớp sôi $t = 160^\circ\text{C}$, vật liệu muối tinh khi hóa sôi được xem là khuấy trộn tốt có nhiệt độ hạt vật liệu ban đầu là 28°C , vận tốc của tác nhân khí thổi vào lớp hạt hoá lỏng là $0,63 \text{ m/s}$ và độ rỗng của lớp $\epsilon = 0,6$ [9]. Ta thực hiện tính toán tìm khoảng cách (distance) mà tác nhân khí nóng thâm nhập vào (thổi xuyên qua) lớp hạt muối tinh theo hình 3 để nhiệt độ của tác nhân khí ra là 80°C . Như vậy tác nhân khí ta xét lúc này đi vào lớp hạt có nhiệt độ trung bình 120°C , thông số của khí khô 120°C có giá trị ở Bảng 1:

Trước tiên chúng ta tính vận tốc bề mặt lớp sôi tới

Thông số	Giá trị
ρ (kg/m^3)	0,898
μ (kg/m.s)	$2,28 \cdot 10^{-5}$
λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	$3,34 \cdot 10^{-2}$
C_p (kJ/kg.K)	1,009

thiểu v_k theo nhiệt độ trung bình vào lớp hạt ở nhiệt độ 120°C :

$$v_k = 0,63 [(120 + 273)/(28 + 273)] = 0,825 \text{ m/s}$$

Tính hệ số Reynolds (Re_{tt}) theo công thức 8 tại vận tốc sôi tối thiểu

$$Re_{tt} = \frac{0,898 \times 0,825 \times 956 \times 10^{-6}}{2,28 \times 10^{-5}} = 31,1$$

Từ phương trình 10 chúng ta tính được hệ số Nusselt $Nu = 0,03 \times (31,1)^{1,3} = 2,62$

Ta xác định hệ số truyền nhiệt từ khí sang hạt α_{gp} từ định nghĩa của hệ số khí sang hạt Nusselt:

$$(11) \quad Nu_{gp} = \alpha_{gp} d_h / \lambda_k$$

Do đó:

$$(11') \quad \alpha_{gp} = \frac{Nu_{gp} \lambda_k}{d_h}$$

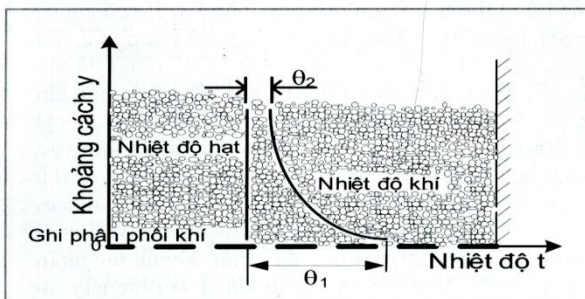
$$\alpha_{gp} = \frac{2,62 \times 3,34 \times 10^{-2}}{956 \times 10^{-6}} = 91,54 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Chúng ta tham khảo Hình 3 bên dưới, biểu diễn sự phân bố nhiệt độ của không khí và hạt ngay tại khu vực phía trên ghi phân phối khí (air distributor) và ta có thể tính được giá trị của khoảng cách Y như sau:

Biến thiên nhiệt độ trung bình giữa các hạt và không khí đang hoá lỏng sẽ được tính bằng logarit biến thiên nhiệt độ trung bình (logarithmic mean temperature difference - LMTD). LMTD thường được sử dụng để tính toán trong truyền nhiệt theo công thức 11:

$$(12) \quad LMTD = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(\theta_1/\theta_2)}$$

Trong đó θ_1 và θ_2 biến thiên nhiệt độ giữa tác nhân khí nóng và nhiệt độ hạt tại cửa vị trí vào và tại vị trí Y (khoảng cách mà dòng khí đi xuyên qua Y tương ứng)



Hình 3: Sự phân bố nhiệt độ của hạt và không khí gần ghi phân phối khí của lớp hạt sôi

Tốc độ truyền nhiệt Q, từ không khí đến các hạt thông qua khoảng cách y được tính theo công thức 13:

$$(13) \quad Q = \alpha_{gp} \cdot A_h \cdot (LMTD)$$

trong đó: A_h -diện tích bề mặt của hạt.

Độ lớn nhiệt động của hệ bị mất (entanpy) do không khí, Q tính theo công thức 14

$$(14) \quad Q = mC_p (\Delta T)$$

trong đó: m là khối lượng của dòng khí; C_p -nhiệt dung riêng đẳng áp, Δt - biến thiên nhiệt độ.

Ta cân bằng phương trình (13) và (14), quan sát hình (3) cho thấy độ biến thiên trong công thức (12) là khoảng tăng nhiệt độ ΔT của dòng không khí đang hoá lỏng (ta coi nhiệt độ của hạt trong trường hợp này là hằng số).

Ta xác định diện tích bề mặt của hạt:

$$(15) \quad A_p = \frac{mC_p \ln(\theta_1/\theta_2)}{\alpha_{kh}}$$

Sau đây chúng ta sẽ xét một diện tích bề mặt phẳng thực tế của ghi phân phối khí, khối lượng dòng khí m được thể hiện dưới giá trị lưu lượng $\rho_k v_k$, do đó phương trình (15) trở thành:

$$(16) \quad A_p = \frac{\rho_k v_k C_p \ln(\theta_1/\theta_2)}{\alpha_{gp}}$$

Mặt khác ta lại có:

$$(17) \quad A_p = \text{số hạt} \times (\pi d_p^2)/4$$

Gọi V_h là thể tích của hạt,

$$(18) \quad V_h = \text{số hạt} \times (\pi d^3)/6$$

Một đơn vị diện tích bề mặt của lớp hạt được tính theo (18):

$$(19) \quad V_h = y(1-\epsilon)$$

Trong đó: ϵ -độ xốp của lớp hạt; Y-khoảng cách ‘‘chiều dày lớp hạt’’ để nhiệt độ của không khí nóng truyền qua và nhiệt độ khí ra khỏi lớp hạ xuống còn 80°C :

$$(20) \quad y = \frac{\rho_k v_k C_p d_h \ln(\theta_1/\theta_2)}{6\alpha_{kh}(1-\epsilon)}$$

$$y = \frac{0,898 \times 0,825 \times 1,009 \times (956 \times 10^{-6}) \ln(132/52)}{6 \times 91,54 \times (1-0,6)}$$

$$Y = 3,03 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Như vậy, khoảng cách Y mà tác nhân sấy thổi xuyên qua lớp hạt muối tinh và hoá lỏng để nhiệt độ của nó có thể đạt được nhiệt độ gần bằng với nhiệt độ trung bình của lớp hạt là rất nhỏ. Điều này cho thấy, nếu trong trường hợp ghi phân phối khí bố trí lỗ phân khí không tốt dẫn đến không khí sẽ không được phân phối đều, do vậy sẽ hình thành khu vực chứa vùng hạt không hoá lỏng, hay nói một cách khác sẽ có một số hạt sẽ tích tụ, và các tính toán ở trên sẽ thiếu chính xác.

Phương trình (10) là phương trình tương quan đơn giản được dùng để xác định hệ số truyền nhiệt từ khí sang hạt.

Có một cách tính khác là tính chiều dày của lớp hạt theo kết quả thực nghiệm của của Kato và cộng sự (1979) [3]. Mỗi tương quan áp dụng được dựa trên khoảng biến thiên của hệ số Reynolds trong phạm vi: $3 < Re < 50$ sẽ được tính theo công thức 21:

$$(21) \quad Nu = 0,59 Re^{1,1} (dh/H)^{0,9}$$

trong đó H là chiều dày của lớp hạt

Nếu phương trình (21) được đưa vào sử dụng trong cách tính cho lớp hạt sấy là muối tinh ở trên, thay cho phương trình (10) thì chiều dày của lớp hạt H lại sẽ phải được cho trước. Giả sử rằng chiều dày lớp hạt H = 30mm. Vậy trước hết ta đi kiểm tra hệ số Re. Ta tính Re theo công thức 8:

Giá trị Re tìm được nằm trong khoảng biến thiên cho phép áp dụng công thức 21. Ta tính Nu theo công thức 21:

$$Nu = [0,59 (23,7)^{1,1}] [(956 \times 10^{-6}) / (3 \times 10^{-2})]^{0,9} = 0,86$$

Áp dụng công thức 11' ta tìm lại hệ số trao đổi nhiệt đối lưu hạt khí:



$$\alpha_{gp} = \frac{0,86 \times 3,34 \times 10^{-2}}{956 \times 10^{-6}} = 30W / m^2.K$$

Như vậy khoảng cách Y tương ứng mà không khí phải xuyên qua để nhiệt độ của nó đạt 80°C. Tính lại theo công thức 20:

$$y = \frac{0,898 \times 0,825 \times 1,009 \times (956 \times 10^{-6}) \ln(132/52)}{6 \times 30 \times (1 - 0,6)}$$

$$y = 9,5 \times 10^{-6} m$$

4. Kết luận

- Hệ số truyền nhiệt đối lưu khí đến hạt muối tinh biến thiên trong phạm vi $\alpha_{gp} = 30 - 91,54W / m^2.k$.

- Khoảng cách y tính toán mà dòng tác nhân khí thổi vào lớp hạt và xuyên qua lớp hạt muối tinh để truyền nhiệt vào khối hạt đạt chênh lệch 50 % nhiệt độ có giá trị bằng $3,03.10^{-6}m$ đến $9,5 \times 10^{-6}m$.

- Việc tính toán hệ số truyền nhiệt cũng như khoảng cách mà dòng khí nóng truyền nhiệt Khí-hạt trong hai phương pháp tính cho thấy tầm quan trọng của việc thực hiện thí nghiệm đúng hơn là chỉ tin cậy vào mối quan hệ tương quan qua lại của các thông số. □

Tài liệu tham khảo:

- [1] John C. Chen, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, USA, fluidized bed Heat transfer
- [2] G.K. Roy & K.J.R. SARMA, Department of chemical Engineering, Regional Engineering college, Rourkela-8, fluidized bed transfer
- [3] Howard J.R. Fluidized bed Technology, principles and application, Publisher Taylor & Francis Group Date, 1989
- [4] Martin Rhodes, Fluidization of Particles by Fluids, Department of Chemical Engineering, Monash University, Melbourne Australia
- [5] Wen-Ching Yang, handbook of fluidization and fluid-particle System, Siemens Westing house Power Corporation Pittsburg, Pennsylvania, USA, Marcell Dekker, Inc, 2003.
- [6] Bùi Trung Thành (2009), Nghiên cứu xác định kích thước hình học hạt muối tinh ứng dụng sấy bằng lớp sôi, Tạp chí khoa học công nghệ nhiệt số 3.
- [7] Bùi Trung Thành, Nguyễn Hay (2009), Xác định một số thông số thủy động lực học trong sấy hạt muối tinh bằng lớp sôi, tạp chí Khoa học Công nghệ nhiệt số tháng 11.
- [8] Bùi Trung Thành (2009), Máy sấy muối tinh tầng sôi liên tục, Tạp chí Khoa học Công nghệ nhiệt số tháng 7.
- [9] Bùi Trung Thành (2009), xác định một số thông số vật lý cơ bản của hạt muối tinh ứng dụng trong tính toán thiết kế sấy lớp hạt sôi liên tục, Tạp chí Cơ khí Việt nam số tháng 10.