

# Xác định vận tốc khí qua lớp hạt sôi tối thiểu trên mô hình máy sấy muối tinh tầng sôi liên tục

(\*) BÙI TRUNG THÀNH - (\*\*\*) NGUYỄN HAY

## 1. Giới thiệu

Sự hóa sôi hạt vật liệu rời trong dòng khí là một quá trình tương tự như quá trình hóa lỏng, trong đó lớp vật liệu hạt dạng hạt rời được chuyển từ trạng thái hạt rắn tĩnh thành trạng thái động, nghĩa là khối hạt có đặc tính như chất lỏng gọi là giả lỏng (fluidization). Quá trình hạt vật liệu hóa lỏng xảy ra khi có một dòng tác nhân khí di chuyển theo hướng vuông góc và xuyên qua lớp hạt. Khi lớp vật liệu hóa sôi sẽ có cùng thể tích với bồn chứa, bề mặt vật liệu vẫn vuông góc với trọng lực, và các hạt vật liệu nào có khối lượng riêng nhỏ hơn khối lượng riêng của lớp hạt sẽ nổi trên bề mặt, lớp hạt trôi lên sụt xuống trong khi vật liệu hạt có khối lượng riêng lớn hơn thì sẽ chìm xuống dưới đáy của lớp hạt. Do khối hạt có tính chất như chất lỏng nên cho phép vật liệu có thể được vận chuyển đi giống như lưu chất, chảy trong ống mà không cần vận chuyển cơ học. Như vậy để hình thành được lớp vật liệu sôi trong dòng khí thì dòng khí phải bố trí theo hướng thổi lên [1], có áp suất và vận tốc đủ lớn để có thể đi lên lối qua các lỗ xỏp trong lớp hạt để xuyên qua lớp vật liệu và làm các hạt vật liệu này chuyển động. Do sự hòa trộn mãnh liệt của vật liệu gần giống như sự sôi của chất lỏng nên các hạt vật liệu hầu như có nhiệt độ đồng đều, hệ số truyền nhiệt đối lưu cao, tính chất này được ứng dụng để sấy hay làm nguội hạt... Giá trị vận tốc của dòng khí xuyên qua lớp hạt tại thời điểm lớp hạt bắt đầu chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái hóa sôi (các hạt “nhúc nhích”) được gọi là vận tốc hóa sôi tối thiểu ( $v_u$ ). Giá trị thực của vận tốc khí này được đo trên bề mặt lớp hạt bằng dụng cụ đo vận tốc khí (air meter).

Nội dung bài báo được viết nhằm giới thiệu với độc giả các phương pháp lý thuyết tính vận tốc khí ở trạng thái hạt hóa sôi tối thiểu của các tác giả trên thế giới và ứng dụng cụ thể của các phương pháp này vào tính toán thiết kế máy sấy muối tinh bằng phương pháp sấy tầng sôi cũng như đối chiếu các phương pháp tính lý thuyết cụ thể này với kết quả thực nghiệm được xác định trên mô hình vật lý của tác giả thiết kế phục vụ cho đề tài nghiên cứu [1].

## 2. Dữ liệu và phương pháp

### 2.1. Xác định vận tốc khí hoá sôi tối thiểu (vtt) theo phương trình Ergun

Khi dòng khí có áp suất và vận tốc đủ lớn đi qua lớp hạt tĩnh có dạng cầu ở trạng thái lớp hạt bắt đầu giãn nở (các hạt vật liệu trở nên “linh động” tại trạng thái này được gọi là trạng thái lớp hạt sôi tối thiểu và được mô phỏng và giải thích bằng phương trình Ergun (vị trí A Hình 1),

$$(1) \frac{\Delta P}{H} = \frac{150\mu_k(1-\varepsilon_u)^2 v_u}{\varepsilon_u^3 d_h^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon_u)\rho_k v_u^2}{\varepsilon_u^3 d_h}$$

Trong đó:  $\Delta P$  - trở lực dòng khí xuyên qua lớp hạt;  $K_g/m^2$ ;  $\rho_k$ - khối lượng riêng của khí,  $kg/m^3$ ;  $d_h$  - đường kính trung bình của hạt vật liệu,  $m$ ;  $H_u$  - chiều dày lớp hạt hóa sôi tối thiểu,  $m$ ;  $\varepsilon_u$  - độ xốp ( độ rỗng của lớp hạt vật liệu) trạng thái sôi tối thiểu;  $v_u$  - vận tốc khí bề mặt đi qua lớp hạt,  $m/s$ ;  $\varphi$  - độ nhớt động lực học của dòng khí,  $kg/m.s$ .

Với khối hạt vật liệu có hình dạng bất kỳ tổn áp của dòng khí ở trạng thái lớp hạt sôi tối thiểu, mô tả (PT2), “cầu tính”  $\varphi$  của hạt vật liệu được đưa vào (PT1):

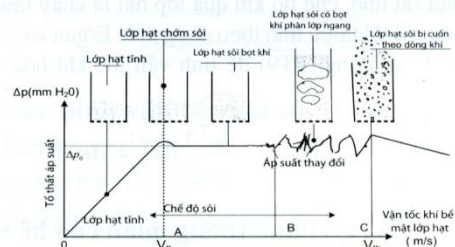
$$(2) \frac{\Delta p}{H_u} = 150 \frac{(1-\varepsilon_u)^2}{\varepsilon_u^3} \frac{\mu_k v_u}{(\varphi d_h)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon_u)}{\varepsilon_u^3} \frac{\rho_k v_u^2}{\varphi d_h}$$

Để lớp hạt chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái giả lỏng, áp suất dòng khí phải đủ lớn thắng được trọng lượng của lớp hạt và được xác định bởi phương trình (3):

$$(3) \Delta p = \frac{M}{\rho_h A} (\rho_h - \rho_k) g$$

Trong đó:  $M$ -khối lượng của hạt,  $K_g$ ;  $\rho_h$  - khối lượng riêng của hạt,  $K_g$ ;  $A$  là diện tích mặt cắt ngang chứa lớp hạt sôi,  $m^2$ ;  $g$ -gia tốc trọng trường,  $m/s^2$ ;

Trong phương trình (3) xem như không có lực tương tác giữa các hạt trong lớp và thành vách buồng chứa hạt không có năng lượng nên không gây ra các va chạm tương tác các hạt gây hiệu ứng làm tăng tổn áp và tổn áp dòng khí thì không đổi khi vận tốc khí tăng lên từ vận tốc hóa sôi nhỏ nhất đến vận tốc mà tại đó sự cuốn hạt xảy ra (vị trí C Hình 1):



Hình 1: Tổn áp qua lớp hạt và các chế độ sôi của hạt theo vận tốc khí hóa sôi

(\*) Đại học Công nghiệp TP. HCM

(\*\*\*) Đại học Nông Lâm TP. HCM



Trong Phương trình (1), (2) cho thấy tổn áp của dòng khí qua lớp hạt sôi phụ thuộc vào kích thước hạt ( $d_h$ ), độ rỗng của lớp hạt ( $\epsilon_u$ ), nhiệt độ của tác nhân khí ( $t^{\circ}\text{C}$ ). Theo (PT3) cho thấy tổn áp của dòng khí qua lớp hạt phụ thuộc vào khối lượng vật liệu và diện tích ghi phân phối khí và khối lượng riêng của hạt.

Từ các phương trình (1), (2) và (3) cho phép ta xác định được vận tốc khí tối thiểu vtt đi qua lớp hạt sôi tối thiểu có hình dạng bất kỳ bằng cách giải (PT4):

$$(4) \frac{M.H}{\rho_p A} (\rho_h - \rho_k)g = 150 \frac{(1 - \epsilon_u)}{\epsilon_u^3} \frac{\mu_f v_u}{(\varphi d_h)^2} + 1,75 \frac{\rho_k v_u^2}{\epsilon_u^3 \varphi d_h}$$

Nghiệm của (PT4) là vận tốc khí tối thiểu  $v_u$  trên cơ sở đã có các thông số như: chiều cao lớp hạt tĩnh hóa sôi (Htt); Khối lượng vật liệu trên ghi (M). Diện tích ghi phân phối khí (A), khối lượng riêng của hạt  $\rho_k$ , đường kính trung bình hạt vật liệu  $d_h$ ; cầu tính của hạt vật liệu ( $\varphi$ ); độ xốp của lớp hạt trạng thái sôi tối thiểu ( $\epsilon_u$ ).

Thông thường "tính cầu" thường phải xác định bằng thực nghiệm (độc giả xem trong [10] hoặc xác định thực nghiệm theo [8]).

Về mặt lý thuyết để hạt có thể hóa sôi thì trọng lượng thực của lớp hạt phải cân bằng với lực tác động hướng lên lớp hạt và có giá trị bằng trở lực qua lớp hạt  $\Delta P$  (pressure drop across the bed) nhân với diện tích mặt cắt ngang của buồng chứa hạt (A). Với lớp hạt sôi tối thiểu có chiều dày lớp là Htt, độ rỗng khối hạt trạng thái sôi tối thiểu  $\epsilon_u$  thì thể tích khối hạt khi giãn nở hóa sôi có giá trị là:

$$(5) (1 - \epsilon_u)A.H_u$$

và trọng lực thực của khối hạt sẽ có giá trị là:

$$(6) (1 - \epsilon_u)(\rho_h - \rho_k)A.H_u.g.$$

Cân bằng hai thành phần trọng lực thực của khối hạt và lực hướng lên tác động lên khối hạt của dòng khí có giá trị tính theo (PT7):

$$(7) \Delta P = (1 - \epsilon_u)(\rho_h - \rho_k) H_u.g$$

Thế (PT9) vào (PT1) hoặc (PT2) ta có (PT8):

$$(8) (1 - \epsilon_u)(\rho_h - \rho_k).H_u.g = 150 \frac{(1 - \epsilon_u)}{\epsilon_u^3} \frac{\mu_k v_u}{(\varphi d_h)^2} + 1,75 \frac{(1 - \epsilon_u)}{\epsilon_u^3} \frac{\rho_k v_u^2}{\varphi d_h}$$

Đưa các giá trị thông số vật lý của hạt [10] và tác nhân khí vào (PT8) ta tìm ra vận tốc vtt.

Với hạt rất nhỏ, chế độ khí qua lớp hạt là chảy tầng, vận tốc khí hóa sôi tối thiểu tính theo công thức Ergun có ý nghĩa. Khi  $Re_u < 1$  sử dụng (PT9) để tính vận tốc khí hóa sôi tối thiểu:

$$(9) 150 \frac{(1 - \epsilon_u)}{\varphi^2 \epsilon_u^3} Re_u + \frac{1,75}{\varphi \epsilon_u^3} Re_u^2 = Ar$$

## 2.2. Xác định ( $v_u$ ) bằng tương quan của hệ số Reynol ( $Re_u$ ) và hệ số Archimeter (Ar)

Khi dòng khí đi qua lớp hạt có hình dạng bất kỳ, hệ số Reynol ở trạng thái sôi tối thiểu ( $Re_u$ ) được xác định qua phương trình 10:

$$(10) Re_u = \frac{\rho_k v_u . d_h . \varphi}{\mu_k}$$

Tương quan giữa hệ số  $Ar$ ;  $Re_u$  cùng với độ xốp lớp hạt trạng thái sôi tối thiểu biểu diễn (PT11) [2].

$$(11) Ar = 150 \frac{(1 - \epsilon_u)}{\varphi^2 \epsilon_u^3} Re_u + \frac{1,75}{\varphi \epsilon_u^3} Re_u^2$$

Trong đó hệ số Archimeter (Ar) được xác định bằng (PT12) cho hạt vật liệu có hình dạng bất kỳ:

$$(12) Ar = \frac{\rho_k (\rho_h - \rho_k) g (\varphi d_h)^3}{\mu_k^2}$$

Ta thiết lập được phương trình 13:

$$(13) \frac{\rho_k (\rho_h - \rho_k) g (\varphi d_h)^3}{\mu_k^2} = 150 \frac{(1 - \epsilon_u)}{\varphi^2 \epsilon_u^3} Re_u + \frac{1,75}{\varphi \epsilon_u^3} Re_u^2$$

Thế các giá trị thông số vật lý của hạt vật liệu bao gồm khối lượng riêng của hạt ( $\rho_h$ ), khối lượng riêng của khí tại nhiệt độ khí hóa sôi tối thiểu ( $\rho_k$ ), độ nhớt động lực học của khí ( $\mu_k$ ); cầu tính của hạt vật liệu  $\varphi$ ; độ xốp của lớp hạt trạng thái tối thiểu ( $\epsilon_u$ ); đường kính trung bình hạt vật liệu  $d_h$  (độc giả tìm đọc trong [8]) vào (PT12) và đưa kết quả tính Ar vào (PT13); giải PT bậc 2 tính  $Re_u$  trong (PT10), chỉ lấy giá trị dương. Ta tính được giá trị vận tốc hóa sôi tối thiểu ( $v_u$ ) từ (PT10).

## 2.3. Xác định ( $v_u$ ) bằng tương quan Kozeny-Carman [4]

Kozeny-Carman đưa ra công thức tính vận tốc lớp hạt sôi tối thiểu cho lớp hạt rất nhỏ trong điều kiện hệ số  $Re_u < 10$  (CT14):

$$(14) v_u = \frac{g(\rho_h - \rho_k)}{150 \mu_k} \frac{\epsilon_u^3}{1 - \epsilon_u} \varphi^2 d_h^2$$

Trong đó:  $\epsilon_u$  - độ rỗng của lớp hạt trạng thái sôi tối thiểu,  $\varphi$ -cầu tính của hạt. Với các hạt gần giống hình cầu thì  $\epsilon_u = 0,4 \div 0,45$ . trong tính toán cho loại hạt cụ thể khi biết được đường kính hạt ta tính theo tương quan Wen và Yu hoặc xác định bằng thực nghiệm [8].

## 2.4. Xác định ( $v_u$ ) bằng tương quan theo Wen và Yu

Trong thực tế nếu độ rỗng lớp hạt  $\epsilon_u$  hoặc cầu tính  $\varphi$  không có sẵn (không xác định được), thì phải xác định vận tốc tối thiểu bằng tương quan thực nghiệm của Wen và Yu (1966)[1]. Wen và Yu đã đưa ra công thức thực nghiệm tính độ rỗng (Void fraction) của lớp hạt ở trạng thái sôi tối thiểu  $\epsilon_u$  khi biết được cầu tính bằng thực nghiệm hoặc ngược lại tính cầu tính khi biết  $\epsilon_u$ .

$$(15) \frac{1 - \epsilon_u}{\varphi^2 \epsilon_u^3} \approx 11.0 \quad \text{hoặc} \quad \frac{1}{\varphi \epsilon_u^3} \approx 14$$

Hay theo [3] có thể sử dụng cách tính độ rỗng của khối hạt trạng thái sôi tối thiểu từ một tương quan khác được biến đổi từ Wen và Yu để tính:

$$(15') \epsilon_u = \left( \frac{0,071}{\varphi} \right)^{1/3}$$

Trên cơ sở tính độ rỗng lớp hạt trạng thái sôi tối  $\varepsilon_u$  thiếu (tại vị trí A, hình 1) (PT15):

Thế giá trị  $\varepsilon_u$  ở (PT15) vừa tìm được vào phương trình Ergun (PT2) cho ra (PT16):

$$(16) Ar = 1650 Re_u + 24.5 Re_u^2$$

Sử dụng kết quả tính Ar từ (PT12) và thế giá trị Ar vừa tìm được vào phương trình (PT16, PT17) để tính Rett:

$$(17) Re_u = \frac{-1650 \pm \{1650 + (4 \times 24.5 Ar)\}^{1/2}}{2 \times 24.5}$$

Lấy giá trị căn dương ta được (PT18):

$$(18) Re_u = (33,7^2 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7$$

Phương trình (18) được áp dụng trong khi tính toán cho các hạt vật liệu có kích thước lớn hơn 100  $\mu m$  [1,2]. Từ giá trị Rett vừa tìm được ta tính được vtt theo (PT10). Mở rộng hơn cho các hạt vật liệu bé, vận tốc khí hóa sôi tối thiểu được tính:

$$V_u = 7,90 \times 10^{-3} \cdot d_h^{1,82} (\rho_h - \rho_k) 0,94 \mu_k^{-0,83}$$

### 2.5. Xác định vận tốc bằng tương quan theo Beayens và Geldart

Beayens và Geldart (1973) [1];[2] đã đưa ra một tương quan thực nghiệm Ar và Rett cho hạt có kích thước 0,05 mm < d < 4mm cùng khối lượng riêng của hạt 850 kg/m<sup>3</sup> < dh < 8810 kg/m<sup>3</sup>:

$$(19) Ar = 1823 Re_u^{1,07} + 21.7 Re_u^2$$

Và vận tốc hóa sôi tối thiểu còn có thể được tính trực tiếp khi có các thông số về hạt và khí.

$$(20) v_u = \frac{9,125 \times 10^{-4} ((\rho_h - \rho_k)g)^{0,934} d_h^{1,8}}{\mu_k^{0,87} \rho_h^{0,66}}$$

Khi sử dụng (PT19) và (PT20) của Beayens và Geldart để tính vận tốc hóa sôi tối thiểu, ta cũng phải dựa vào các thông số vật lý của hạt và của không khí có sẵn.

### 2.6. Xác định vận tốc bằng tương quan Goroshko

Goroshko xác định ra tương quan để tính vận tốc tối thiểu từ (PT1):

$$(21) a Re_u^2 + b Re_u - Ar = 0$$

Trong đó:

$$(22) a = \frac{1,75}{\varphi \varepsilon_u^3}$$

Và

$$(23) b = \frac{150(1 - \varepsilon_u)}{\varphi^2 \varepsilon_u^3}$$

$\varphi$  được lấy bằng 1.0.

Giải phương trình (21) lấy giá trị căn dương:

$$(24) Re_u = \frac{-b + (b^2 + 4aAr)^{1/2}}{2a}$$

Lấy tử số và mẫu số của phương trình (24) nhân với  $(b + \sqrt{b^2 + 4aAr})$  ta có được biểu thức (25):

$$(25) Re_u = Ar \left\{ \frac{b}{2} + \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + aAr \right]^{1/2} \right\}^{-1}$$

Phương trình Goroshko được xác định theo (PT26):

$$(26) Re_u = \frac{Ar}{b + \sqrt{aAr}}$$

(PT26) này không giống như (PT25) ở phần thêm giá trị kéo theo

$$\left( \frac{b}{2} \right)^2 + aAr = \frac{b}{2} + \sqrt{aAr}$$

Ta thấy mẫu số của phương trình Goroshko (PT26) lớn hơn so với mẫu số giải theo cách giải của phương trình Ergun (PT25):

Như vậy giá trị của Rett tính theo phương trình Goroshko thì nhỏ hơn Rett tính theo phương trình Ergun (25). Khoảng sai lệch phụ thuộc vào giá trị của hệ số Aschimeter Ar.

Như vậy, ra có phương trình tương quan

$$(27) \frac{Re_u (Ergun)}{Re_u (goroshko)} = \frac{b + \sqrt{aAr}}{\left\{ b/2 + \left[ (b/2)^2 + aAr \right]^{1/2} \right\}}$$

### 2.7. Xác định vận tốc khí tối thiểu ( $v_u$ ) theo Goroshko và ToDes

Vận tốc khí bề mặt hóa sôi tối có thể được xác định từ hệ số  $Re_u$  ToDes [7].

Đối với hạt có hình dạng là hạt cầu:

$$(28) Re_u = \frac{Ar}{150 \frac{1 - \varepsilon_u}{\varepsilon_u^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\varepsilon_u^3} Ar}}$$

Đối với lớp hạt đa phân tán (kích thước phân bố tự nhiên không đều nhau) khi sử dụng (PT28), hệ số  $R_c$  có sai số từ 15-20 % [7].

Trường hợp tính toán nhanh ta xem độ rỗng lớp hạt ở trạng thái tĩnh bằng với trạng thái sôi tối thiểu  $\varepsilon_o = \varepsilon_u = 0,4$  thì hệ số  $Re_u$  được tính theo công thức (29) trong công thức này  $R_c$  là không giới hạn.

$$(29) Re_u = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}}$$

### 2.8. Xác định vận tốc khí tối thiểu ( $v_u$ ) theo Pt của Leva

Từ công thức của Carman-Kozan, Leva đã đưa ra công thức xác định vận tốc hóa sôi thiếu như sau [6].

$$(30) v_u = \frac{5 \times 10^{-3} (\varphi d_h)^2 (\rho_h - \rho_k) g \varepsilon_u^3}{\mu_k (1 - \varepsilon_u)}$$



Điểm giới hạn trong công thức của Leva tốt nhất là  $Re_c < 10$ ,

Trường hợp  $Re_u > 10$  phải sử dụng thông số điều chỉnh [6].

### 2.9. Xác định vận tốc khí tối thiểu ( $v_u$ ) theo kunii -Levenspiel

Kunii và Levenspiel đơn giản hóa từ công thức của Ergun và đưa ra đưa ra hai trường hợp tính vận tốc khí hóa sôi tối thiểu. Trường hợp đối với hạt vật liệu có kích thước nhỏ trong điều kiện hệ số Reynol  $Re_{tt} < 20$  sử dụng (PT31):

$$(31) \quad v_u = \frac{(\varphi d_h)^2 (\rho_h - \rho_k) g \varepsilon_u^3}{150 \mu_k (1 - \varepsilon_u)}$$

Trường hợp đối với hạt vật liệu kích thước lớn trong điều kiện hệ số  $Re_{tt} > 1000$  sử dụng (Pt32) [6].

$$(32) \quad v_u^2 = \frac{(\varphi d_h)(\rho_h - \rho_k) g \cdot \varepsilon_u^3}{1,75 \rho_k}$$

### 2.10. Vấn đề sử dụng độ xốp( độ rỗng) của lớp hạt

Ở trạng thái lớp hạt sôi tối thiểu (sôi không bọt khí), Kunii và Levenspiel đưa ra phương trình tương quan về mặt cân bằng khối lượng:

$$g \cdot H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_h \cdot A = (1 - \varepsilon_u) \rho_h g \cdot H_u$$

Như vậy ta lập được tương quan:

$$\frac{H_u}{H_0} = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_u}$$

Trong đó  $\varepsilon_0$ ;  $H_0$  độ xốp lớp hạt và chiều cao lớp hạt trạng thái tĩnh;  $\varepsilon_u$ ;  $H_u$  độ xốp và độ cao lớp hạt trạng thái sôi tối thiểu.

Theo [9] ở trạng thái sôi tối thiểu  $\varepsilon_u = \varepsilon_0 \times 10\%$  và cũng tương ứng  $H_u = H_0 \times 10\%$ .

Trường hợp tính với các hạt gần giống hình cầu theo McCabe và Harriott (2001) [4] đề xuất  $\varepsilon_u = 0,4 \div 0,45$  và tăng lên  $\varepsilon_u = 0,5$  khi kích thước hạt lớn.

Khi lớp hạt bị dòng tác nhân khí lôi cuốn (vị trí C hình 1) thì  $\varepsilon = 1$ . Nhằm có cơ hội gần thực tiễn với lý thuyết cũng như khả năng thực nghiệm để so sánh, Trong các công thức tính lớp sôi tối thiểu được sử dụng từ kết quả thực nghiệm [11].

### 3. Kết quả và thảo luận

Phần trên đã trình bày 9 phương pháp tính vận tốc lớp hạt vật liệu hóa sôi tối thiểu trên cơ sở có được các thông số vật lý của hạt và thông số nhiệt vật lý của dòng tác nhân khí bằng thực nghiệm kết hợp cánh tính tương quan hay bằng các công thức thực nghiệm.

Nhằm có cơ sở đánh giá tính chính xác của mỗi phương pháp tính so với phương pháp xác định bằng thực nghiệm, ta thực hiện tính toán cụ thể cho hạt muối tinh sấy bằng máy sấy tầng sôi liên tục với các kích thước hạt cụ thể là 1,65mm; 1,35mm, 1,05mm; 0,75mm và 0,45mm và cho đối tượng hạt phân bố ngẫu nhiên lấy thẳng từ công nghệ nghiền rửa (xác định bằng đường kính trung bình). Độc giả tìm đọc trong [8] trình bày các cấp hạt và tỷ lệ phân bố cấp hạt của muối tinh nguyên liệu đưa vào sấy.

### 3.1. Một số vấn đề xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu bằng tính toán lý thuyết

Khi tính toán trở lực qua lớp hạt, ta dựa vào kết quả thực nghiệm thông số vật lý của hạt và không khí đã được công bố trong [8] và được tóm tắt trong bảng 1. Cụ thể lưu ý cho mỗi phương pháp tính như sau:

- Tính toán dựa trên phương trình Ergun và các tương quan về áp suất

Ở trạng thái sôi tối thiểu,  $H_u = H_0 \cdot 1,1 = 33\text{mm}$ ; độ rỗng  $\varepsilon_u = \varepsilon_0 \cdot 1,1 = 0,56$  và cầu tính

$\varphi = 0,71$ , các thông số khác lấy từ bảng 1.

Trường hợp sử dụng Pt Ergun để tính vận tốc hóa sôi tối thiểu được khuyến cáo là Rett không có giới hạn [6].

- Tính toán vtt theo tương quan của Reynol (Rett)-Archimeter (Ar) và của Kozeny-Carman.

Trong hai phương pháp tính này, các thông số đưa vào tính toán đều được lấy từ các kết quả thực nghiệm theo trong bảng 1.

- Xác định (vtt) theo Wen và Yu.

Ta thừa nhận theo cách của Wen và Yu là không biết trước thông số độ rỗng của lớp hạt hạt muối tinh ở trạng thái sôi tối thiểu  $\varepsilon_u$ , và cầu tính  $\varphi$  của hạt muối tinh được tính theo (PT15 và (PT15')). Từ kết quả tính được cầu tính lý thuyết thế vào (PT15) ta tìm  $\varepsilon_u$ .

- Xác định vtt theo Groshko-ToDes

Phương pháp tính này cũng lấy kết quả thông số vật lý của hạt muối tinh và khí hóa sôi bằng 1 để tính hệ số Ar, riêng hệ số Rett được sử dụng theo (PT28) để tính và kết quả tìm được được nhân thêm với hệ số sai số  $k = 1,2$  [7] và được xem đó là kết quả tính Rett cho hạt muối không có dạng cầu.

Cũng trong phương pháp Todes này, còn thêm một cách tính khác là khi sử dụng (PT29) trên cơ sở thừa nhận kết quả có sẵn  $\varepsilon_u = 0,4$ , đưa giá trị này vào (PT15) ta xác định được cầu tính  $\varphi$  của hạt muối theo tương quan của Wen và Yu, từ đó thế vào (PT12) tìm được Ar và đưa giá trị Ar vào (PT29) tìm Rett, từ kết quả Rett tìm ra vtt theo (PT10).

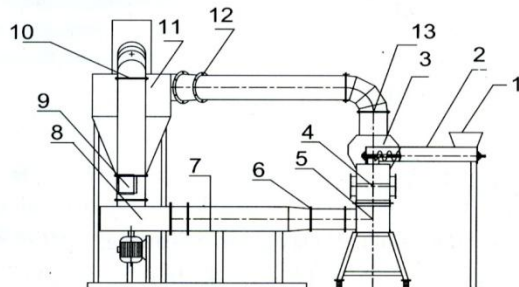
- Xác định  $v_u$  theo công thức của Beayens – Geldart, của Goroshko, của Leva và của kunii –Levenspiel.

Giá trị vtt trong các công thức này đều được dựa vào các thông số vật lý của hạt muối tinh và khí hóa sôi trong bảng 1.

Bảng 2 bên dưới trình bày các kết quả tính toán từ các công thức.

### 3.2. Thực nghiệm xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu

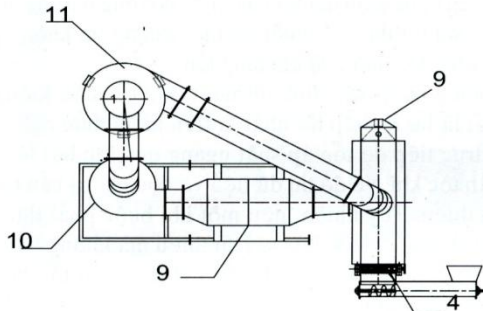
Để thực hiện được các yêu cầu và nội dung thực hiện đề tài





KC07.01/06-10 [12], chúng tôi tiến hành tính toán, thiết kế, chế tạo cũng như thực hiện thí nghiệm xây dựng chế độ sấy hợp lý trên mô hình vật lý (hình 2) và sơ đồ xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu theo (hình 3).

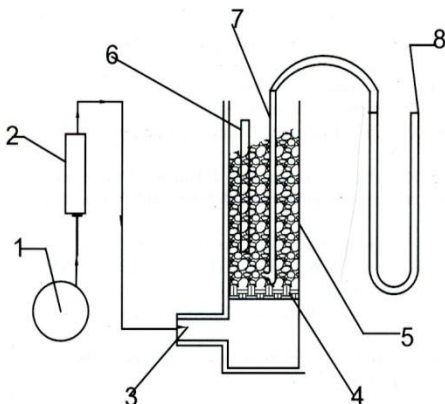
1-phễu nạp liệu; 2-vít tải định lượng; 3-buồng phân ly; 4-buồng sấy; 5-buồng chứa tác nhân sấy; 6-ống cấp tác nhân vào máy sấy; 7-bộ điện trở; 8-quạt ly tâm; 9-cửa điều tiết cấp khí trời vào hệ thống; 10-ống hồi khí thải để hồi lưu; 11-Cyclone; 12-ống khí thải; 13-ống thoát khí thải trên buồng phân ly.



Hình 2: Mô hình máy sấy tầng sôi liên tục

Để có thể tăng dần vận tốc khí cấp cho khối hạt, quạt cấp khí (1) được lắp thêm bộ biến tần để thay đổi số vòng quay mô tơ quạt vô cấp.

Bố trí thí nghiệm xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu được thực hiện theo mô hình thực nghiệm minh họa Hình 3.



Hình 3: Mô hình và sơ đồ xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu  
1-quạt ly tâm; 2-bộ điện trở nung không khí; 3-cửa cấp tác nhân vào buồng; 4-giới phân phối khí; 5-buồng chứa hạt hóa sôi; 6-nhiệt kế đo nhiệt độ bề mặt lớp hạt; 7-ống pito đo áp suất động bề mặt, áp suất tổng của khí; 8-áp kế chữ U.

Cơ sở xây dựng các thông số công nghệ và kỹ thuật sấy muối tinh cho đề tài KC07.01 được dựa trên các hoạt động thử nghiệm của mô hình thiết kế theo hình 2 và hình 3.

Các thông số thiết bị của đề tài cần phải đạt là năng suất sấy thực tế, chất lượng sản phẩm sấy bao gồm: độ ẩm thành phẩm, nhiệt độ sản phẩm và chất lượng hạt. Để có được các

thông số thiết bị theo yêu cầu thì phải tiến hành thực nghiệm trên mô hình và hiệu chỉnh mô hình, thông qua đó ta xây dựng được chế độ sấy.

Thông số vật lý hạt và khí sử dụng cho tính toán trình bày trong bảng 1 [8][10]

Bảng 1: Thông số vật lý hạt muối tinh và thông số nhiệt vật lý của khí hóa sôi

Đường kính hạt $d_h$	mm	1,65;1,35; 1,05;0,75; 0,45;0,225.
Đường kính trung bình khối hạt tự nhiên $d_m$	mm	0,953
Độ xốp lớp hạt (tính $\epsilon_0$ )		0,51
Độ xốp lớp hạt sôi tối thiểu $\epsilon_{tt}$		0,56
Khối lượng riêng hạt $\rho_h$	kg/m <sup>3</sup>	
Khối lượng riêng thể tích khối hạt $\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>	982
Cầu tính của hạt $\phi$		0,71
Khối lượng riêng tác nhân khí $\rho_k$	kg/m <sup>3</sup>	0,815
Độ nhớt động lực học $\mu$	kg/m.s	$2,45 \cdot 10^{-5}$

Ghi Chú: Đường kính hạt  $d = 0,953$  là đường kính trung bình của hạt trong khối muối lấy từ công nghệ tính theo [8]

Mô hình (hình 2) được thiết kế có năng suất 48kg/giờ, chiều dày lớp muối đệm trạng thái tĩnh được thực nghiệm xác định  $H_0 > 30$  mm. Tiến hành thực nghiệm xác định vận tốc hoá sôi tối thiểu vtt cho các cấp hạt

có kích thước 1,65mm, 1,35mm, 1,05mm, 0,9mm, 0,65mm, 0,4mm và 0,3mm đây là dải kích thước hạt phân bố tự nhiên được lấy từ loại nguyên liệu theo công nghệ nghiên cứu rửa thông thường [10];[12].

Kết quả thực nghiệm xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu cho lớp hạt sôi cho các cấp kích thước hạt trình bày trong bảng 2 và đồ thị so sánh vận tốc tối thiểu giữa các phương pháp tính lý thuyết của các tác giả (phần 2 dữ liệu và phương pháp) với xác định bằng phương pháp thực nghiệm theo (hình3) trên mô hình máy sấy tầng sôi liên tục ( hình 2) ta rút ra một số nhận xét như sau:

### 3.3. Nhận xét

Vận tốc hoá sôi tối thiểu ( $v_{tt}$ ) tính theo Ergun và tính theo qua hệ ( $R_c$ ) và ( $A_r$ ) đối với tất cả các cỡ hạt cho kết quả tính là khá hợp lý so với thực nghiệm. Hệ số  $Re_{tt}$  biến thiên từ 0,3-51,7. Các hạt có kích thước  $d_h = (0,225;0,45;0,75)$ mm có xu hướng chảy tầng

Vận tốc hoá sôi tối thiểu ( $v_{tt}$ ) tính theo Kozeny-Carman và Kunii cho các hạt có kích thước  $d_h > 1$  mm giá trị ( $v_{tt}$ ) quá lớn so với thực nghiệm. Nhưng hạt có kính thước  $d_h < 1$ mm cho kết quả tính khá phù hợp so với thực nghiệm. Nếu lấy độ xốp trạng thái sôi tối thiểu  $\epsilon_{tt} = 0,4 \div 5$  cho kết quả tính phù hợp với thực nghiệm hơn.

Sử dụng tương quan của Wen và Yu trong cách tính độ xốp trạng thái sôi tối thiểu  $\epsilon_{tt}$  khi biết cầu tính, nhưng kết quả tính thì quá bé so với giá trị thực nghiệm.  $Re_{tt}$  biến thiên  $0,07 \div 21,1$

Sử dụng tương quan Reynol (Rett) và hệ số Archimedes ( $Ar$ ) cho kết quả tính vận tốc tối thiểu là khá hợp lý so với xác định bằng thực nghiệm. Giá trị hệ số Reynol biến thiên trong phạm vi  $Re_{tt} = 0,16 \div 36,6$ .

Vận tốc hoá sôi tối thiểu tính theo tương quan  $Re_{tt}$  và hệ số  $A_r$  của Beayens và Geldart (Pt19) cho kết quả hợp lý

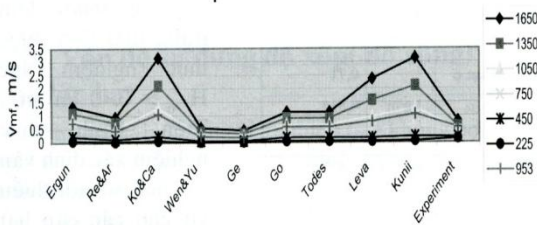


trong khi sử dụng.

**Bảng 2 - Kết quả tính toán vận tốc hóa sôi bằng các phương trình và các công thức tương quan thực nghiệm của các tác giả**  
**Đồ thị so sánh độ lớn các giá trị vận tốc khí hoá sôi tối thiểu tính toán và thực nghiệm**

Xác định vận tốc sôi tối thiểu theo các phương pháp lý thuyết và thực nghiệm									
Minimum fluidization velocity									
Ergun	Re&Ar	Ko&Ca	Wen&Yu	Gedat	Go	Todes	Leva	Kunii & Levenspiel	Thực nghiệm
1.327	0.939	3.149	0.5414	0.45	1.1223	1.122	2.362	3.149	0.8
1.094	0.736	2.108	0.4002	0.331	0.9022	0.902	1.581	2.108	0.6
0.826	0.518	1.275	0.2625	0.219	0.6653	0.665	0.956	1.275	0.58
0.731	0.445	1.05	0.2209	0.186	0.586	0.586	0.788	1.05	0.55
0.522	0.298	0.651	0.1416	0.123	0.4188	0.419	0.488	0.651	0.42
0.22	0.115	0.234	0.0524	0.05	0.1863	0.186	0.176	0.234	0.2
0.058	0.029	0.059	0.0132	0.014	0.0537	0.054	0.044	0.059	0.15

Giá trị vận tốc hóa sôi tối thiểu tính theo Goroshko gần bằng giá trị thực nghiệm.



Sử dụng công thức Todes tính giá trị cách tính thẳng từ (Pt20) lại cho giá trị bé, xa với thực nghiệm. Giá trị tính vtt theo Beayens và Geldart là thấp nhất so với các cách tính từ các phương pháp khác.

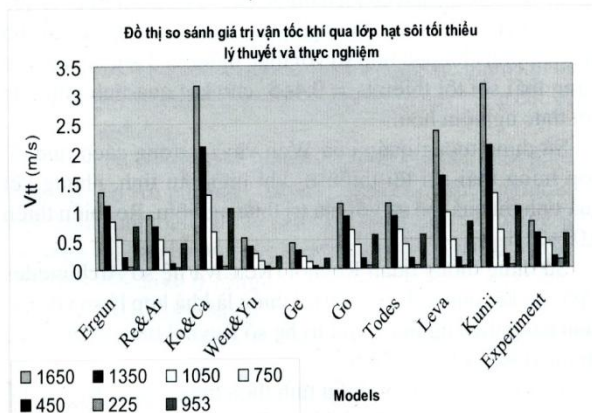
Giá trị chênh lệch giữa Rett tính theo Goroshko và Ergun thấp hơn từ 10 ÷ 20%.

Reynol cho các loại hạt nằm trong dải  $Re_{tt} = 0,28 \div 43,7$  và giá trị vận tốc vtt cho các hạt có kích thước  $dh < 0,9mm$  cho kết quả gần với thực nghiệm hơn là các hạt có kích thước  $> 0,9mm$ .

Vận tốc khí hoá sôi tối thiểu tính theo công thức Leva thì thích hợp cho các hạt có kích thước  $dh < 0,75mm$  và giá trị  $Re < 10$  chế độ khí qua lớp hạt là chảy tầng.

Phương pháp tính vận tốc khí hoá lỏng hạt theo Kunii và Levenspiel thích hợp cho các hạt  $dh = (0,225; 0,45; 0,75)mm$  và phù hợp theo điều kiện  $Re_{tt} < 20$  và kết quả tính gần với thực nghiệm

**4. Kết luận**



Hầu hết các tương quan, các công thức tính do các tác giả đưa ra đều xuất phát từ những thí nghiệm với lớp hạt tại nhiệt độ bằng hoặc gần với nhiệt độ môi trường do vậy khi áp dụng phải lưu ý đến tính chính xác và phải sử dụng phép ngoại suy từ những tương quan trên khi tính ở trạng thái có nhiệt độ cao hơn nhiệt độ môi trường.

Khi nhiệt độ trong lớp hạt tăng lên có thể dẫn đến có sự chuyển đổi tính chất trong lớp hạt. Ví dụ từ các hạt loại D ở nhiệt độ môi trường thành hạt loại B (Botterill 1982 [2]) Các tính toán lý thuyết trên cho thấy khả năng xác định vận tốc hóa sôi tối thiểu, trong khi cầu tính hạt và độ xốp của lớp hạt không được biết với độ chính xác cao đều lấy theo khoảng biến thiên bằng kinh nghiệm. Thực tế độ rỗng ở trạng thái lớp hạt hóa sôi tối thiểu ở nhiệt độ môi trường thì không giống với độ rỗng khi nhiệt độ khí tăng lên.

Phương pháp xác định tốt nhất (khi có điều kiện) thứ tốt nhất là biện pháp tốt nhất là tiến hành thực nghiệm đo lường trực tiếp độ tổn áp suất ngang qua lớp hạt lúc giảm dần vận tốc khí, vẽ đồ thị dữ liệu và đọc giá trị vận tốc hóa sôi tối thiểu. Tuy nhiên, nếu một khi buộc phải thực hiện việc đánh giá vận tốc hóa sôi tối thiểu mà không tiến hành một thí nghiệm tổn áp suất, thí nghiệm vận tốc hóa sôi, thì cách tiến hành tốt nhất là xác định độ rỗng lớp hạt tại vận tốc hóa sôi tối thiểu, xác định cầu tính bằng lý thuyết và sau đó dùng cách tính của Ergun hoặc tính theo tương quan Ar và  $Re_{tt}$  trong (PT12); (PT11) và (PT10) để tính vận tốc hóa sôi tối thiểu có độ chính xác gần tương đương với phương pháp thực nghiệm. □

**Tài liệu tham khảo:**

- [1] Howard.J.R. Fluidized bed Technology, principles and application, Publisher Taylor & Francis Group 1989.
- [2] Martin Rhodes, Fluidization of Particles by Fluids, Department of Chemical Engineering Monash University, Melbourne, Australia.
- [3] H.S.Fogle and L.F. Brown, Fluidized bed Reactors, Vol 168, P31, 1981.
- [4] W.E.McCabe-J.C.Smith and P.Harriott, Unit operations of chemical Engineering, McGraw Hill, Newyork, 2001.
- [5] Perry's Chem mical Engineering Handbook, 7th, 1977(Ed:R.H.perry,DW.Green and J.O Maloney), McGraw-Hill, New York.
- [6] Trần văn Phú, Kỹ thuật sấy, Nhà xuất bản Giáo dục, 2006.
- [7] Nguyễn Văn Lụa, Quá trình và thiết bị công nghệ hóa học và thực phẩm, tập 1, Các quá trình và thiết bị cơ học, quyển 1, khuấy-lắng.
- [8] Bùi Trung Thành, 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 3/2009.
- [9] Bùi Trung Thành, Nguyễn Hay, 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 11/2009.
- [10] Bùi Trung Thành, 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 9/2009.
- [11] Bùi Trung Thành, Máy sấy muối tinh tầng sôi liên tục, Tạp chí Khoa học Công nghệ Nhiệt số tháng 7/2009.
- [12] Nguyễn Hay - Bùi Trung Thành, thuyết minh đề tài cấp nhà nước "Nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy ly tâm và máy sấy muối tinh liên tục trang bị cho dây chuyền sản xuất muối tinh năng suất 3 tấn/giờ", 1/2006.