

XÁC ĐỊNH BẰNG THỰC NGHIỆM TỐC ĐỘ TUẦN HOÀN HẠT TRONG BUỒNG ĐỐT LỚP SÔI TUẦN HOÀN

Phạm Hoàng Lương - Đại học Bách Khoa Hà Nội

Nguyễn Minh Tiến - Cục An toàn lao động, Bộ Lao động Thương binh và Xã hội

Tóm tắt: Khí động học của buồng đốt lớp sôi tuần hoàn được đặc trưng bởi sự lưu động của dòng hai pha khí - hạt trong buồng đốt. Sự lưu động này thường được lượng hóa bởi tốc độ tuần hoàn hạt trong buồng đốt. Bài viết này tổng hợp các phương pháp xác định tốc độ tuần hoàn hạt bằng thực nghiệm trên cơ sở đó có thể diễn giải các hiện tượng trao đổi nhiệt và cháy nhiên liệu trong buồng đốt lớp sôi tuần hoàn.

1. Giới thiệu chung

Khí động học trong buồng đốt lớp sôi tuần hoàn (Circulating Fluidized Bed Combustor, CFBC) được đặc trưng bởi sự lưu động của dòng hai pha khí - hạt trong buồng đốt. Ở các chế độ vận hành của CFBC, việc xác định vận tốc hạt dọc theo chiều cao buồng đốt CFBC là không khả thi và do vậy đại lượng này chỉ có thể được tính toán thông qua việc xác định tốc độ tuần hoàn hạt (khối lượng hạt lưu chuyển qua một đơn vị diện tích vuông góc với chiều chuyển động của dòng hạt trong một đơn vị thời gian) và khối lượng của lớp hạt tại các vị trí khác nhau của buồng đốt CFBC. Tùy thuộc vào cấu trúc buồng đốt và chế độ vận hành của CFBC, vận tốc trung bình của hạt có thể được xác định tại các vị trí khác nhau của CFBC:

- i) tại van L (là nơi tuần hoàn hạt từ điểm cuối cùng của ống xuống về lại buồng đốt lớp sôi);
- ii) tại ống xuống (Return leg);
- iii) tại ống lên (Riser).

Phương pháp xác định vận tốc hạt, do vậy cũng rất khác nhau.

2. Nghiên cứu thực nghiệm xác định tốc độ tuần hoàn hạt trong CFBC

Phạm và Bhattacharya [1] đã xác định tốc độ tuần hoàn hạt trên mô hình thí nghiệm CFB (Hình 1) với các thông số vận hành, thông số mô hình được liệt kê trong Bảng 1. Tốc độ tuần hoàn hạt được ước lượng bằng việc đo vận tốc của các hạt cát di chuyển qua mặt cắt ngang của một ống Perspex đặt đứng tại phía dưới của ống xuống. Vận tốc hạt được ước lượng như là vận tốc trung bình theo thời gian của hạt lưu chuyển trong một

khoảng cách cho trước trong ống xuống. Khối lượng riêng của lớp hạt được xác định dựa trên khối lượng hạt và thể tích nó chiếm chỗ khi vận hành ở chế độ sôi tuần hoàn. Nghiên cứu đã đề xuất biểu thức thực nghiệm xác định tốc độ tuần hoàn hạt (G_p) như sau.

$$G_p = \rho_s (1 - \varepsilon_m) V_s = \rho_b V_s, (\text{kg/s.m}^2) \quad (1)$$

Trong đó:

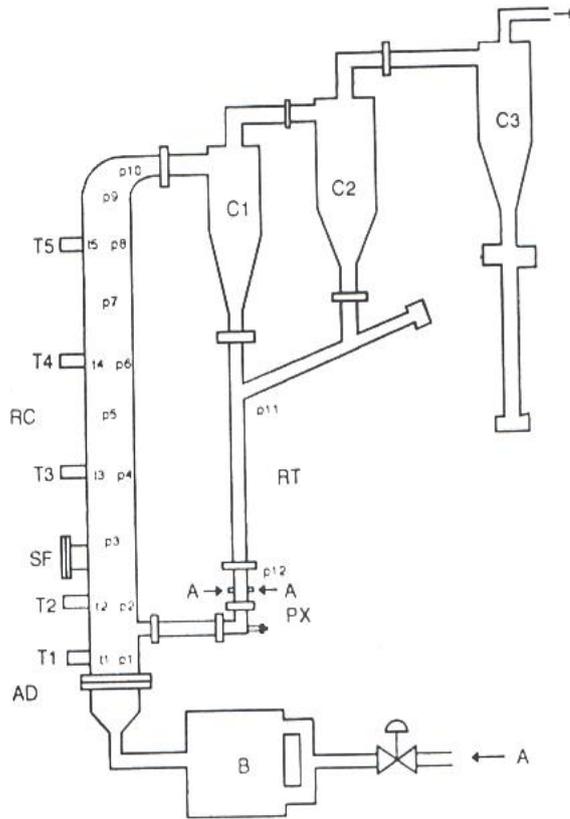
V_s : vận tốc rơi trung bình của hạt trong ống xuống (m/s);

ε_m : độ rỗng của lớp hạt di chuyển trong ống xuống;

ρ_b : khối lượng riêng lớp hạt (kg/m^3).

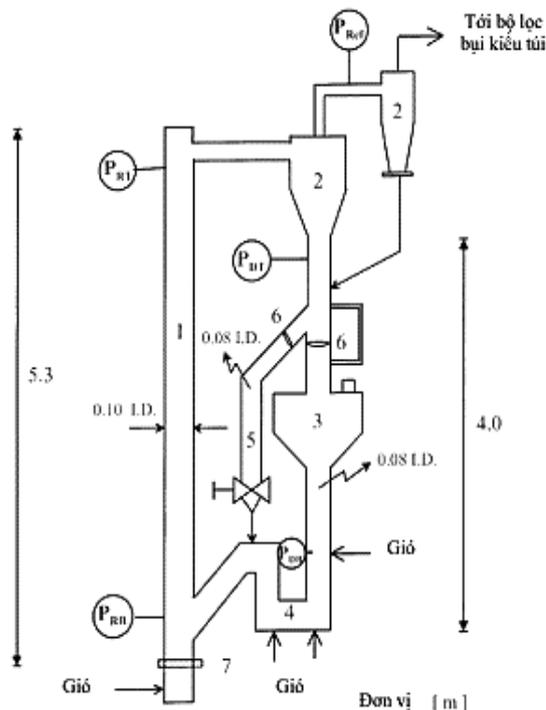
Kết quả thực nghiệm cho thấy tốc độ tuần hoàn hạt trong CFB tăng cùng với tốc độ gió sơ cấp và khối lượng lớp hạt. Với cùng một giá trị của tốc độ gió sơ cấp và với kích thước hạt xác định, tốc độ tuần hoàn hạt tăng cùng với khối lượng lớp hạt, và sẽ giảm khi tăng kích thước hạt trong điều kiện giữ nguyên các thông số vận hành khác.

Kim và Kim [2] đã nghiên cứu quá trình tuần hoàn hạt trong ống xuống của một CFBC được làm bằng ống nhựa trong suốt (Hình 2) và có các thông số mô hình và thông số vận hành được thể hiện tại Bảng 1. Tại trạng thái ổn định, tốc độ tuần hoàn hạt được xác định bằng việc đo thời gian rơi xuống của hạt trên một khoảng cách nhất định đã biết khối lượng riêng của lớp hạt khi vận hành tại ống đo trong suốt được lắp trên thiết bị. Kết quả nghiên cứu cho thấy tốc độ tuần hoàn hạt tăng khi tăng tốc độ gió tuần hoàn hạt qua van L và khi giảm đường kính hạt.



LEGEND A: Air; AD: Air Distributor; B: Preheater; C1-C3: Cyclone; p1-p12: Pressure Probe; t1-t5: Wall Temperature Probe; T1-T5: Bed Temperature Probe; SF: Sand Feed Port; RT: Return Leg; RC: Riser Column; PX: Perspex Section

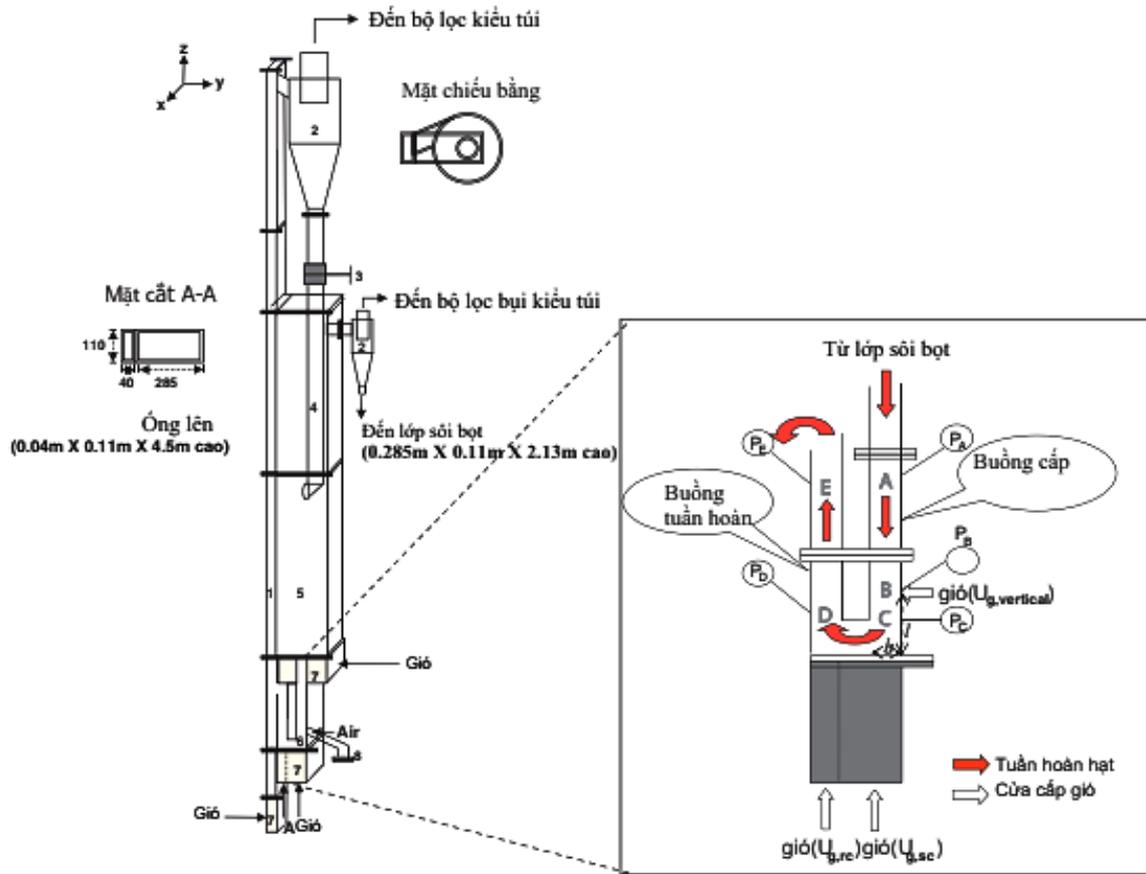
Hình 1. Mô hình lạnh CFBC của Phạm và Bhattacharya [1]



Hình 2. Mô hình lạnh CFB của Kim và Kim;
1. ống lên; 2. Cyclone; 3. Phễu; 4. Van L; 5. Cửa lấy mẫu; 6. Van

Seo và cộng sự [3] đã sử dụng một buồng phản ứng lớp sôi tuần hoàn kép (Hình 3) với ống lên và lớp sôi bột có các thông số mô hình và thông số vận hành như được thể hiện tại Bảng 1. Vận tốc khí trong lớp sôi được thay đổi từ 0 - 0,27m/s, vận tốc khí ở buồng cấp khí đẩy hạt được vận hành ở dải từ $0,5U_{mf}$ đến $1,5 U_{mf}$, vận tốc khí ở buồng tái tuần hoàn hạt được thay đổi từ 0 đến 0,36 m/s. Tổng khối lượng lớp hạt được duy trì là 35kg. Tốc độ tuần hoàn hạt được xác định bằng cách đo thời gian rơi của hạt trên một đoạn chiều dài ống đo đã biết ở ống xuống và khối lượng riêng của lớp hạt khi vận hành. Kết quả thực nghiệm cho thấy tốc độ tuần hoàn hạt tăng khi tăng tốc độ gió sơ cấp. Ở điều kiện của thí nghiệm, tốc độ gió tuần hoàn hạt có quan hệ tuyến tính với giá trị của tốc độ tuần hoàn hạt đến giá trị $45\text{kg/m}^2.\text{s}$. Nếu tăng tiếp tốc độ gió tuần hoàn hạt sẽ hình thành các lớp hạt rời rạc (slugging) trong buồng cấp của van L, và do vậy làm giảm tốc độ tuần hoàn hạt.

Lim và cộng sự [4] đã nghiên cứu, xây dựng một mô hình lạnh CFB dựa trên thiết bị khí hóa sử dụng lớp sôi nhanh tuần hoàn bên trong để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số vận hành như lưu lượng dòng khí sơ cấp, thứ cấp đối với tốc độ tuần hoàn hạt (Hình 4). Các thông số mô hình thí nghiệm, thông số vận hành được thể hiện trong Bảng 1. Ảnh hưởng của gió sơ cấp, thứ cấp và khối lượng lớp đối với tốc độ tuần hoàn hạt được xác định bằng thay đổi gió sơ cấp từ $32\text{m}^3/\text{h}$ đến $96\text{m}^3/\text{h}$ trong khi giữ nguyên lưu lượng gió thứ cấp và lưu lượng khí qua van L tương ứng với các giá trị $171\text{m}^3/\text{h}$ và $6\text{m}^3/\text{h}$. Nghiên cứu được thực hiện với các khối lượng lớp là 6, 8 và 10 kg. Tốc độ tuần hoàn hạt từ ống lên về ống xuống được đo bằng cách ngắt dòng về van L để giữ các hạt rắn không di chuyển về van L, sau đó xác định khối lượng hạt sau mỗi một khoảng thời gian là 10 giây. Trong nghiên cứu này, gió sơ cấp được giữ



Hình 3. Mô hình lạnh CFB của Seo và cộng sự.

1. Ống lên; 2. Cyclone; 3. Van bi; 4. Ống xuống; 5. Lớp sôi bột; 6. Van L; 7. Hộp gió; 8. Đường xả

không đổi với giá trị là 171m³/h, tốc độ gió tuần hoàn hạt được thay đổi với các giá trị 5; 7 và 9m/s. Kết quả thí nghiệm cho thấy tốc độ tuần hoàn hạt cũng tăng cùng với tốc độ gió tuần hoàn hạt và khối lượng lớp sôi.

Kalita và cộng sự [5] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số vận hành đối với tốc độ tuần hoàn và đối với trao đổi nhiệt trong một lớp sôi tuần hoàn (Hình 5) có các thông số mô hình và thông số vận hành như được trình bày tại Bảng 1. Thí nghiệm được tiến hành với 05 khối lượng lớp khác nhau là 400, 500, 600, 800 và 1000gram và với 03 giá trị áp suất khác nhau là 1, 3 và 5bar. Tất cả các thí nghiệm được tiến hành với 03 giá trị tốc độ gió sơ cấp khác nhau là 5, 6 và 7m/s và với dòng nhiệt không đổi là 830W/m². Kết quả thực nghiệm của Kalita cho thấy, tốc độ tuần hoàn hạt tăng cùng với áp suất, và khối lượng lớp. Kalita cũng đã đề xuất biểu thức xác định tốc độ tuần hoàn hạt theo biểu thức (2).

$$G_p = \frac{\rho_p L_a A_D (1 - \epsilon_{mf})}{A_B t} \quad (2)$$

Trong đó:

ϵ_{mf} : Độ rỗng lớp sôi tại vận tốc sôi tối thiểu;

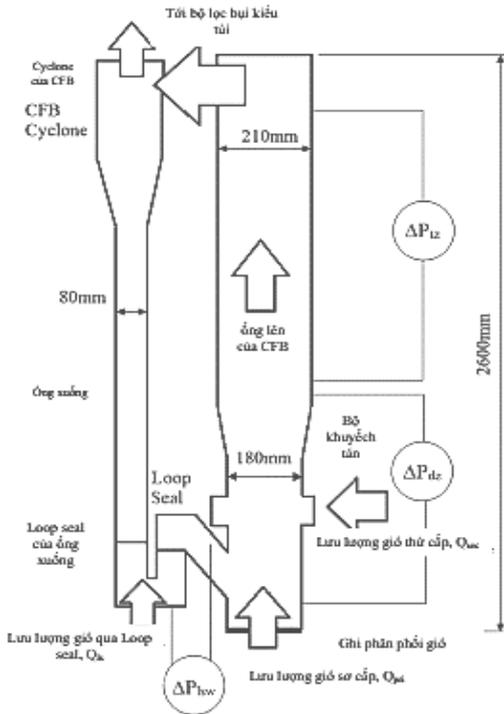
A_B : Diện tích mặt cắt ngang của lớp (m²);

A_D : Diện tích mặt cắt ngang của ống xuống (m²);

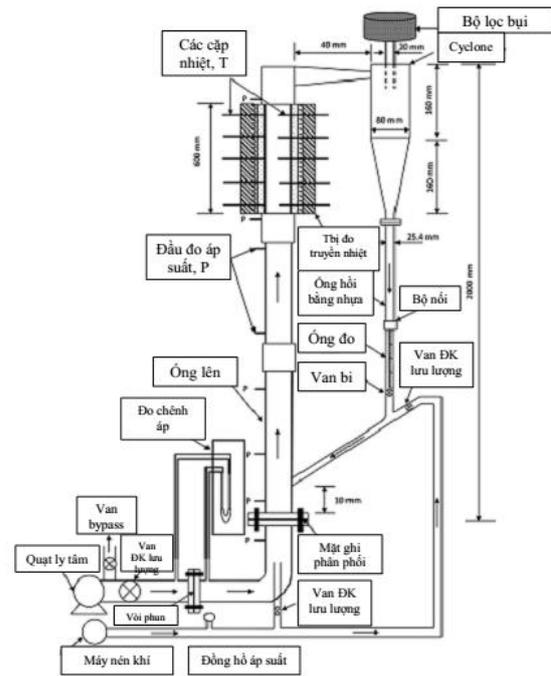
t: Thời gian hạt rơi theo chiều cao ống sau khi đóng van (s)

Tatjana và cộng sự [6] đã sử dụng mô hình CFB (Hình 6) có thông số kích thước và thông số vận hành như được trình bày tại Bảng 1 và Hình 7. Nghiên cứu đã sử dụng phần mềm phân tích hình ảnh Sigma Scan để đo thời gian rơi của hạt được đánh dấu trên một đoạn ống có chiều dài cho trước để xác định tốc độ trung bình của hạt. Tatjana đề xuất biểu thức thực nghiệm xác định tốc độ tuần hoàn hạt là hàm số của đường kính hạt và tốc độ khí trên bề mặt ghi của CFB, và có dạng như sau.

$$G_p = 1,568 \cdot \rho_p U_t (1 - \epsilon)^{4/3} \times \left[(\text{Re}_t (\mu / \mu_{H20})^{1,19})^{-0,636} \left(\frac{U_E}{U_{mf}} \epsilon^n - 1 \right) \right]^{2/3} \quad (3)$$



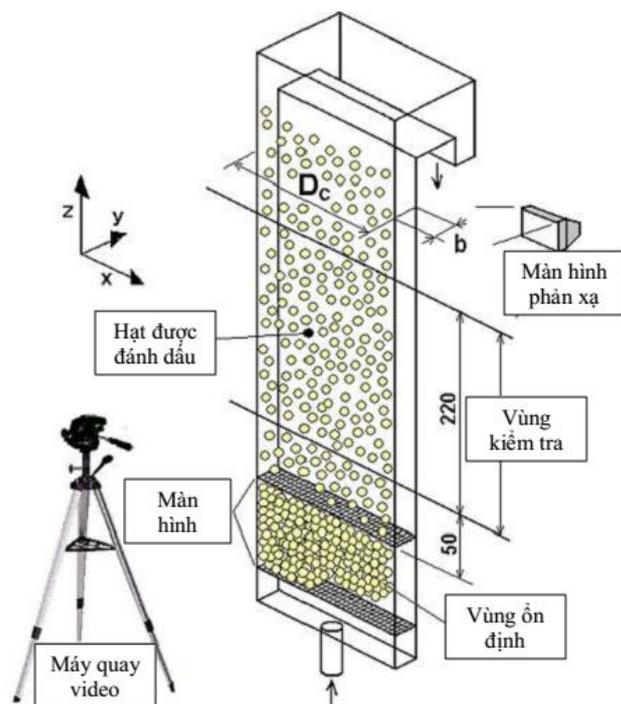
Hình 4. Mô hình lạnh CFB của Lim và cộng sự



Hình 5. Mô hình lạnh CFB của Kalita và cộng sự

Bảng 1. Chi tiết các nghiên cứu thực nghiệm về tốc độ tuần hoàn hạt trong CFB

TT	Tác giả	Vật liệu buồng đốt; Đường kính (m); Chiều dài (m)	Điều kiện vận hành; Vật liệu lớp; Đường kính hạt; Áp suất (bar); Nhiệt độ (°C); Khối lượng riêng hạt (kg/m ³)	Các thông số vận hành
1	H-L Phạm và Bhattacharya [1]	đường kính 0,15m, cao 4-5m	Cát thạch anh dp = 200µm, 400µm, 500µm Áp suất khí quyển Nhiệt độ môi trường 1400 - 200 lít/phút 2600 kg/m ³	Đường kính hạt, khối lượng lớp, gió sơ cấp
2	Sung Won Kim và cộng sự [2]	ống nhựa, 0,1m 5,3 m	Cát - nhóm Geldart A có đường kính 78, 101, 157 và 239µm và hạt FCC - nhóm Geldart B có đường kính 65µm U _o = 4,5m/s; W = 40kg	Tốc độ gió tuần hoàn hạt, khối lượng lớp, đường kính hạt
3	Myung Won Seo và các cộng sự [3]	CFB kép với ống lên và lớp sôi bột có dạng hình chữ nhật: (DxRxX) = 0,04 x 0,11 x 4,5 m; (DxRxX) = 0,285 x 0,11 x 2,13m	Cát Geldart B dp= 239µm Áp suất khí quyển Nhiệt độ: 27°C - 2466 kg/m ³	Tốc độ gió sơ cấp
4	Tzeng Lim và cộng sự [4]	đường kính 0,18m, cao 2,6m	Hạt đồng dp = 138 µm, Không đề cập Không đề cập 8.940 kg/m ³	Tốc độ gió tuần hoàn hạt, khối lượng lớp
5	Kalita, và cộng sự [5]	ống thép 54 mm 2.000 mm	Cát - 278, 307 và 469µm 1, 3, 5 bar Không đề cập 5, 6, 7m/s 25 - 65°C - 2.300 kg/m ³	Áp suất, đường kính hạt, khối lượng lớp, vận tốc khí trên bề mặt,
6	Tatjana và cộng sự [6]		Hạt thủy tinh dp = 1,94; 2,98; 4,00 và 6 mm; Không đề cập Không đề cập mật độ hạt tương ứng với dp: 2507; 2507; 252; 2515 kg/m ³ U _{mf} tương ứng với các đường kính hạt: 3,2; 4,31; 5,3; 7,0 cm/s; Tốc độ cấp nước vào ống lên: U ₀ = 8,04; 10,8; 11,25; 11,75; 14,68; 17,31 cm/s. Môi trường thí nghiệm: nước, nhiệt độ nước: 20°C (ρ _f = 1000 kg/m ³ , μ = 11,674.10 ⁻³ kg/ms)	Tốc độ sơ cấp, đường kính hạt



Hình 6 - Mô hình lạnh CFB của Tatjana và cộng sự

3. Kết luận

Các nghiên cứu thực nghiệm xác định tốc độ tuần hoàn hạt được các tác giả đề xuất đo và tính toán tại các vị trí khác nhau trong buồng đốt CFBC. Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm nêu trên, có thể thấy tốc độ tuần hoàn hạt phụ thuộc chủ yếu vào các thông số vận hành sau:

- i) Đường kính và khối lượng riêng của hạt rắn;
- ii) Tốc độ/lưu lượng cấp gió dưới bề mặt ghi buồng đốt CFB;
- iii) Khối lượng hạt rắn trong lớp sôi CFBC;
- iv) Các kích thước hình học của buồng đốt CFBC (chiều cao và tiết diện cắt ngang buồng đốt CFBC);
- v) Cấu trúc van L và tốc độ cấp gió tuần hoàn hạt tại van L.

Tài liệu tham khảo

1. Pham Hoang Luong and S.C. Bhattacharya (1993). A study of Solid Circulation Rate in a Circulating Fluidized Bed, International Journal of Energy Research, Vol. 17, 479-490
2. Sung Won Kim, Sang Done Kim (2002) Effects of particle properties on solids recycle in loop - seal of a circulating fluidized bed, Powder Technology 124 (2002)76-84.
3. Myung Won Seo, Thanh D.B. Nguyen, Young Il Lim, Sang Done Kim, Sunwon Park, Byung Ho Song, Yong Jeon Kim (2011) Solid circulation and loop - seal characteristics of a dual circulating fluidized bed Experiments and CFD simulation, Chemical Engineering Journal (2011) 803 - 811.
4. Tzeng Lim, Shusheng Pang, Justin Nijdam (2012) Investigation of solids circulation in a cold model of a circulating fluidized bed, Powder Technology 226 (2012) 57 - 67.
5. P.Kalita, U.K.Saha, P.Mahanta (2013) Parametric study on the hydrodynamics and heat transfer along the riser of a pressurized circulating fluidized bed unit-Experimental Thermal and Fluid Science 44 (2013) 620 - 630.
6. Tatjana, Kaluđerović Radoičić, MihalĐuriš, Radmila Garić-Grulović, Zorana Arsenijević and Željko Grbavčić (2014). Solid circulation rate and particle collisions in quasi two - dimensional water fluidized beds of spherical particles, Powder Technology 253 (2014) 295 - 303.

EXPERIMENTAL ESTIMATE OF SOLID CIRCULATION RATE IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

Pham Hoang Luong - *Hanoi University of Science and Technology*

Nguyen Minh Tien - *Department of Work Safety, Ministry of Labours, Invalids and Social Affairs*

Email: luong.phamhoang@hust.edu.vn

Abstract: Hydrodynamics of a circulating fluidized bed (CFB) combustor is normally characterized by the movement of a 2-phase flow of gas and solid particle inside CFB which is quantified by a so-called solid circulation rate (SCR) in a CFB. This article made an overview of different methods for estimate of SCR by experiment that would be very useful for interpreting heat transfer and combustion phenomena in a CFB combustor.