



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告

## 無溢流管多段流體化床之穩定性分析 (II)

### Stability analysis of perforated plate type suspension fluidized bed without Downcomer (II)

計劃編號：NSC 90-2214-E-002-018

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：呂維明 教授

研究生：朱曉萍、盧昱彰、朱福盛

執行機構：台灣大學 化學工程學系

#### 一、計畫摘要：

本研究計畫首先將就單段無溢流管式流體化床系統中，一典型穩定懸浮床之形成機制作完整之描述，再綜合所有單段系統實驗數據與現象觀察，歸納出單段系統穩定可操作範圍以及所出現的各種不同型態懸浮床；最後根據粒子排泄現象提出一簡單理論模式以模擬懸浮床形成過程中壓力降隨時間變化之情形，並將懸浮床穩定壓力降與系統變數進行串聯，以期能由系統變數預測懸浮床穩定壓力降與懸浮床床高。

關鍵詞：無溢流管、流體化床、形成機制

#### 二、緣由與目的

流體化床在工業上不論在乾燥、造粒、結晶、氣體污染物的吸收甚至在汽電共生系統與焚化爐的設計上均多所應用。在多段流體化床系統上，主要可區分為無溢流管式與溢流管式流體化床兩大系統，本研究採用無溢流管式流體化床系統，此系統構造簡單、維修拆裝簡易，且兼具流體化床之優點(混合效果好，熱、質傳係數高)，但其操作範圍狹窄且較難預估，加上影響其穩定性之變數較多，研究不易，以致目前對此系統操作特性的了解有限，導致其較難穩定且廣泛的應用於工業界。故藉此研究，吾人期能更加瞭解此一系統之操作特性(懸浮床形成機制，操作範圍)，以便廣泛應用於業界。

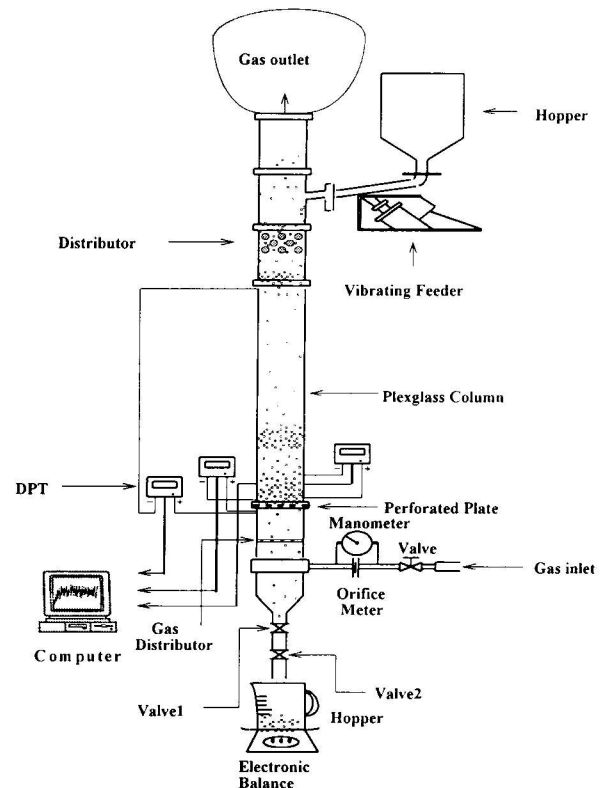
另外，本研究最終目的，便是希望在完整瞭解單段系統操作特性之後，能以電腦模擬的方式與實驗結合，建立一套雙向流模擬系統以節省因實驗所耗費之時間。

#### 三、研究方法

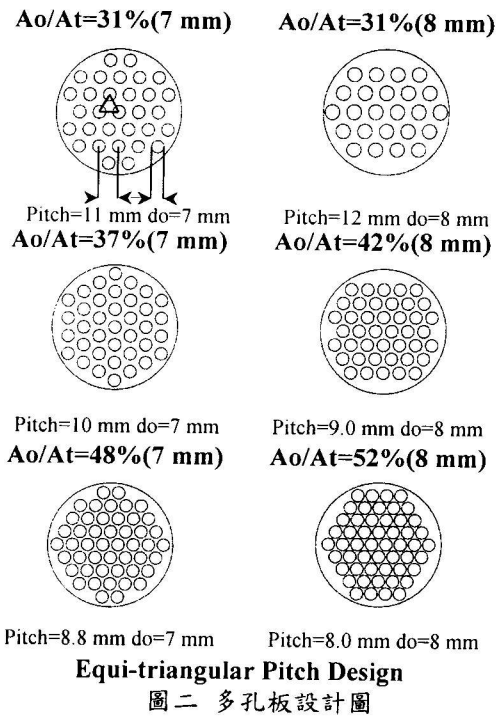
#### 實驗裝置及步驟

本實驗所探討的為多段無溢流管之流體化床，主要採取塔總高度 1280(厘米)，內徑 70(厘米)的壓克力管柱，系統之裝置圖如圖一。而相關之多孔板設計如圖二揭示。

單段系統中，2 mm 的聚苯乙烯粒子，經由進料器輸入，針對不同的多孔板，改變進料速率與氣體風速使形成懸浮床，得到淨壓降對時間的關係圖。同時由單段實驗的過程中，找出適當開孔比，適當操作條件，操作於多段之系統，同單段系統方法進行探討分析。



圖一 實驗裝置圖



圖二 多孔板設計圖

#### 四、結果與討論

##### 一. 單段雙向流多孔板式懸浮床系統

##### 1. 典型懸浮床之形成機制

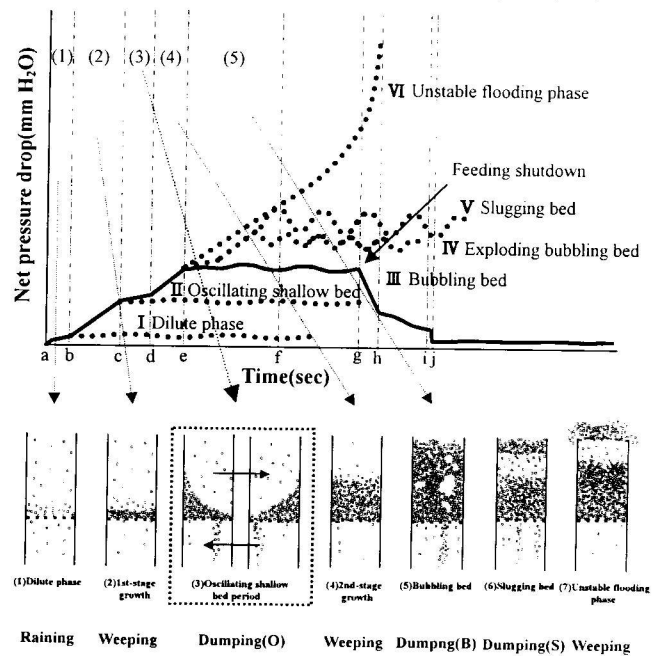
圖三揭示為一典型懸浮床形成過程中，各個階段時期懸浮床壓力降隨時間變化之情形。Curve III代表一典型氣泡床(Bubbling bed)的形成機制，懸浮床自空床開始會經歷稀釋相時期(Dilute phase)、第一階段成長期(First stage growth period)、振盪淺床暫態期(Oscillating shallow bed period)、第二階段成長期(Second stage growth period)最後形成穩定氣泡床。

##### 2. 懸浮床型態與排泄特性

並非在所有的操作條件下皆可形成氣泡床，當操作條件不適時，其最後達至穩定之懸浮床型態可能會停滯在振盪淺床(Oscillating shallow bed, Curve II)，或粒子滯留量超越氣泡床轉變成劇烈式氣泡床(Exploding bubbling bed, Curve IV)、湧騰床(Slugging bed, Curve V)，甚至湧出系統之外形成不穩定溢流現象(Unstable flooding phase, Curve VI);在開孔比太大或供料速率與氣體流速太低時，在多孔板上則是僅能形成稀釋相(Dilute phase, Curve I)。

粒子排泄方式是影響懸浮床穩定狀態是否能維持的關鍵因素，懸浮床在成長期或是

不穩定溢流現象發生時的粒子排泄方式皆為 Weeping type，粒子因受到其他相鄰粒子的碰



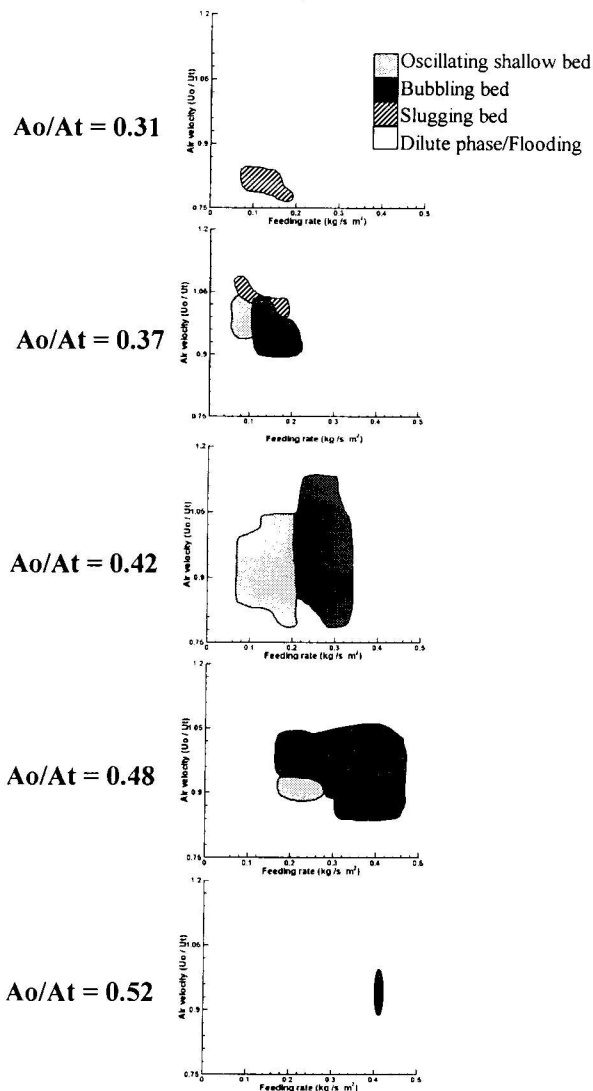
圖三 典型懸浮床形成示意圖

撞推擠而自銳孔邊緣滾落排出，Weeping type的粒子排泄量非常小，大部分的粒子都滯留在多孔板上以供懸浮床成長;懸浮床在穩定狀態時的粒子排泄方式皆為 Dumping type，粒子會一整群的自銳孔排出，為了維持懸浮床的穩定狀態，Dumping type的粒子排泄量會比 Weeping type 來的大許多;Dumping type的粒子排泄方式產生原因會因不同型態懸浮床其多孔板上粒子運動方式的不同而有所不同，氣泡床的粒子排泄方式稱之為 Dumping(B)，其 Dumping 的產生是由於懸浮床內部產生渦漩式氣泡，氣泡到達表面時發生破裂運動並對底部粒子產生擠壓力量所造成;振盪淺床的粒子排泄方式稱之為 Dumping(O)，其 Dumping 的產生是由於懸浮床主體沿著管壁進行高低交互變化運動所造成，Dumping 發生在懸浮床高度變化至低處的區域，懸浮床主體自外觀看來像是在旋轉;湧騰床的粒子排泄方式稱之為 Dumping(S)，其 Dumping 的產生是由於懸浮床主體在進行上下大幅度跳躍運動之際對底層粒子產生擠壓力量所造成;另外懸浮床處於稀釋相時期的粒子排泄方式稱之為 Raining type，粒子會如雨落下般機率性的自

銳孔排出。

### 3. 2 mm Polystyrene 粒子穩定可操作範圍

在改變開孔比( $A_o/A_t$ )、進料速率( $Fa/\rho_p U_i$ )以及氣體流速( $U_o/U_t$ )等三個系統變數的情況下,可繪出如圖四揭示之 2 mm Polystyrene 粒子單段系統穩定可操作範圍。由圖中可看出開孔比 42%(7 mm)的穩定可操作範圍最大,開孔比 31%(7 mm)與 52%(7 mm)的穩定可操作範圍則十分狹窄,不是僅能形成稀釋相就是易產生不穩定溢流現象;而符合工業界操作上實際需求之氣泡床則多集中在開孔比 42%(7 mm)與 48%(7 mm)的操作上。綜觀於各開孔比操作下,2 mm 聚苯乙烯粒子最小起始形成懸浮床氣體流速集中在  $U_o/U_t=0.80 \sim 0.90$  之間。



圖四 2 mm Polystyrene 粒子單段系統穩定可操作範圍

### 4. 懸浮床壓力降理論預測模式

#### 懸浮床形成過程壓力降變化模擬

懸浮床的壓力降主要是由多孔板上方的滯留粒子所造成,而粒子的排泄方式會影響懸浮床在多孔板上方的粒子滯留量,根據實驗觀察我們假設懸浮床在形成過程中的粒子排泄方式有二,分別是 Raining type 以及 Dumping type, 以下是懸浮床在兩種不同粒子排泄方式下之粒子排泄速率假設( $t_1$  為懸浮床進行粒子排泄方式轉變的時間點):

#### Raining type( $t_r < t_1$ ):

$$D_1 \propto \frac{\left(\frac{A_o}{A_t}\right) \times \left(\frac{d_c}{d_o}\right)^2 \times \pi \left(\frac{d_o - d_p}{2}\right)^2}{\frac{\pi d_c^2}{4}} = \left(\frac{A_o}{A_t}\right) \left(1 - \frac{d_p}{d_o}\right)^2 \quad (1)$$

#### Dumping type( $t_r > t_1$ ):

$$D_2 \propto \frac{W(t)}{\frac{1}{2} \rho_g U_o^2} \quad (2)$$

根據上述假設可以推導懸浮床形成過程中壓力降隨時間變化的關係如方程式(3),(4)所示:

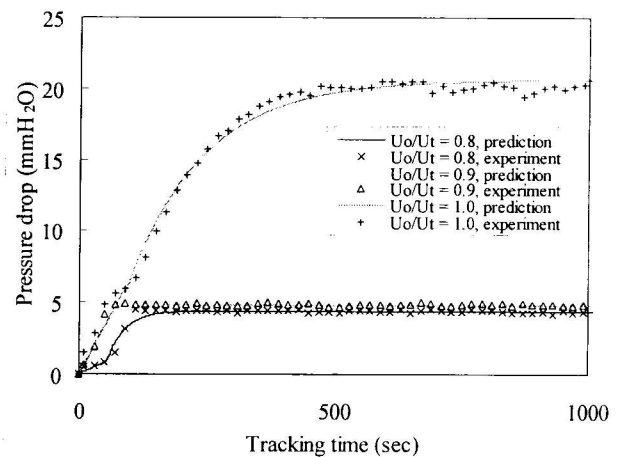
#### Raining type( $t_r < t_1$ ):

$$\Delta P = KF(t)gt_r - KK_1 F(t)mg \left(1 - \frac{d_p}{d_o}\right)^2 t_r \quad (3)$$

#### Dumping type( $t_r > t_1$ ):

$$\Delta P = \frac{K\rho_f U_o^2}{2g\rho_p mK_2 \sqrt{g(d_o - d_p)^{2.5}}} \left[ F(t)A_c g - e^{-\left(\frac{2g\rho_p mK_2 \sqrt{g(d_o - d_p)^{2.5}}}{A_c \rho_f U_o^2}\right) \times (t + C^*)} \right] \quad (4)$$

將理論模式與實驗數據相比較如圖五揭示,可以發現理論模式與實驗結果相當的吻合。



圖五 理論模式與實驗數據比較圖

### 懸浮床穩定壓力降與床高預測

$t_r > t_1$  時,懸浮床的壓力降變化可以方程式

(4)表示之，當  $t \rightarrow \infty$  時，懸浮床穩定壓力降可由方程式(4)改寫如方程式(5)所示：

$$\Delta P = \frac{KF\rho_f U_o^2 A_c}{2\rho_p m K_2 \sqrt{g(d_o - d_p)^{2.5}}} \quad (5)$$

我們再將系統變數 ( $A_o/A_t, Fa/\rho_p U_t, U_o/U_t$ ) 與理論模式參數 ( $K, K_1, K_2, C^*$ ) 進行串聯，如此一來便可將實驗結果與理論模式結合，直接由系統變數預測懸浮床穩定壓力降，系統變數與理論模式參數的關聯式如方程式(6)所示：

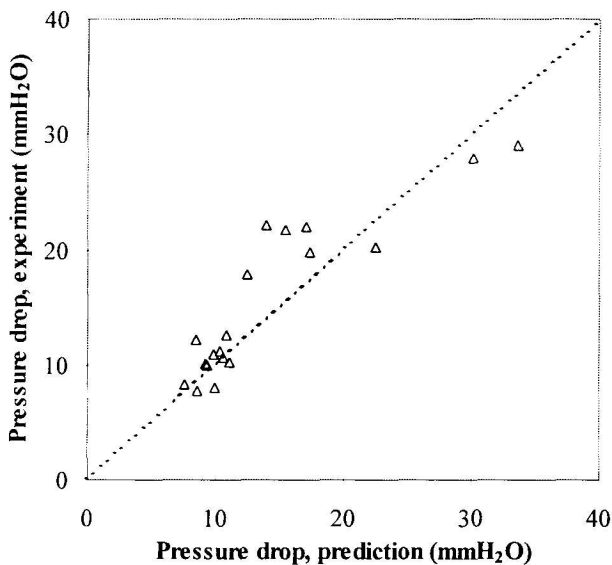
$$K = 0.408 m^{-0.051} \left(\frac{F}{\rho_p U_t}\right)^{-0.045} \left(\frac{U_o}{U_t}\right)^{-0.003} \left(\frac{U_s}{U_t}\right)^{-0.098}$$

$$K_1 = 1.321 \times 10^{-3} m^{0.09} \left(\frac{F}{\rho_p U_t}\right)^{0.031} \left(\frac{U_o}{U_t}\right)^{-1.22} \left(\frac{U_s}{U_t}\right)^{-2.634}$$

$$K_2 = 3.33 \times 10^2 m^{4.893} \left(\frac{F}{\rho_p U_t}\right)^{1.155} \left(\frac{U_s}{U_t}\right)^{-0.408}$$

$$C^* = -6.08 \times 10^{-2} m^{-1.8} \left(\frac{F}{\rho_p U_t}\right)^{-0.344} \left(\frac{U_s}{U_t}\right)^{-2.523} \quad (6)$$

圖六揭示為使用理論模式預測一連串氣泡床穩定壓力降並與實驗相互比較之結果，結果顯示理論預測與實驗結果相當吻合。



圖六 理論模式預測懸浮床穩定壓力降與實驗比較圖

懸浮床床高 ( $L_s$ ) 在反應器的設計上是項相當重要的資訊，它可藉由懸浮床穩定壓力降以及局部固體粒子濃度以方程式(7)進行預測：

$$(1 - \varepsilon) = \frac{\Delta P_{sus}}{\rho_p L_s} \quad (7)$$

方程式(7)可在改寫成：

$$L_s = \frac{KF\rho_f U_o^2 A_c}{2K_2 \rho_s m (\rho_p - \rho_f)(1 - \varepsilon)(d_o - d_p)^{2.5} g^{1.5}}$$

## 二、三段雙向流多孔板式懸浮床系統

由於在開孔比 42%(7 mm) 的操作上，單段系統各變數較容易控制且能獲得最為符合工廠實際操作需求之穩定氣泡床，故選定開孔比 42%(7 mm) 之多孔板改變氣體流速與進料速率以進行多段系統操作。

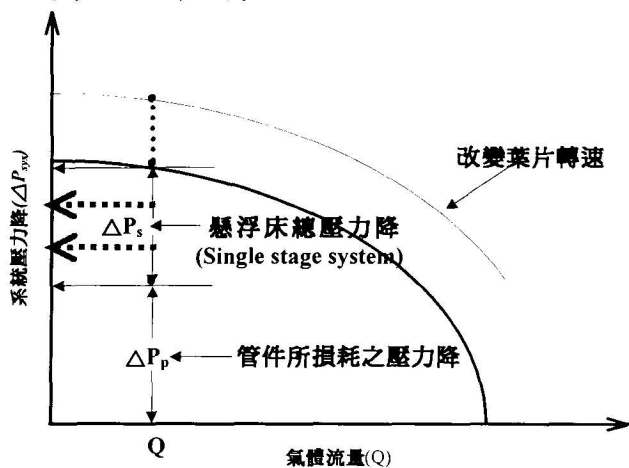
在多段系統實驗中，我們有兩項發現：

### 1. 多段系統等量懸浮床形成機制：

三段系統形成懸浮床的先後次序是第一段先形成穩定氣泡床之後，緊接著第二段再接受由第一段排出掉落的粒子而形成穩定氣泡床，最後第三段接受來自第二段排出掉落的粒子形成穩定氣泡床；三段床形成的速度相當快。並非單段系統中可穩定操作之條件在多段系統中均可形成各段等粒子滯留量之懸浮床，就開孔比 42%(7 mm) 的操作而言，等粒子滯留量氣泡床發生在進料速率 ( $Fa=0.24 \text{ kg/s m}^2 \sim 0.32 \text{ kg/s m}^2$ ) 和氣體流速 ( $U_o/U_t=0.95 \sim 1.05$ ) 的操作上。

### 2. 鼓風機(Blower)的限制：

受限於鼓風機的特性曲線，如圖七揭示，會限定該氣體流量下該系統壓力降，也就是該氣體流量下所承受之懸浮床總粒子滯留量會受到鼓風機的限制，因此發生多段系統總粒子滯留量與單段系統粒子滯留量相當的現象，如圖八揭示。



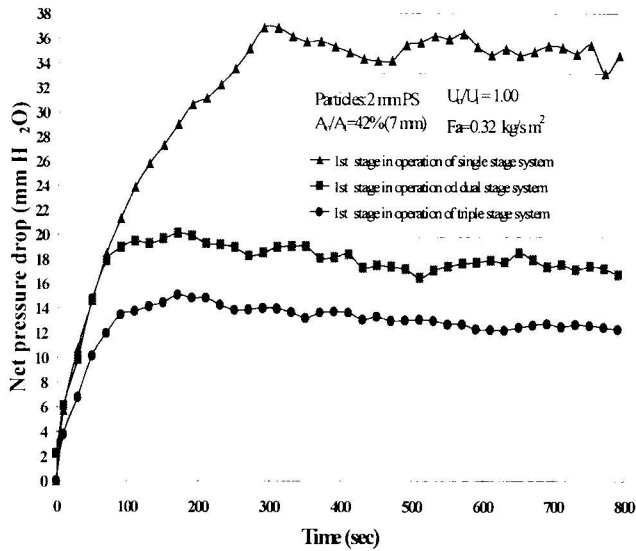
圖七 鼓風機特性曲線 ( $\Delta P_{sys}$  V.S.  $Q$ )

解決此問題的方法有二：

(1) 加裝變頻器改變鼓風機葉片轉速，也就是

設法改變鼓風機的特性曲線。

- (2) 將兩台股風機串聯，並將部分氣體旁通 (Bypass)，同樣也是希望能夠設法改變鼓風機的特性曲線。



圖八 單段與多段系統等量懸浮床之粒子滯留量比較

## 五、結論

綜合了所有 2 mm 聚苯乙烯粒子單段系統的操作結果與現象觀察，確立了一典型懸浮床(氣泡床)的形成機制，一懸浮床從空床，開始先經過稀釋相、第一階段成長期、振盪淺床暫態期、第二階段成長期然後進入穩定的氣泡床；亦整理了所有的操作條件繪出單段系統穩定可操作區塊，發現開孔比 42%(7 mm)的操作範圍最大，符合工廠操作需求的氣泡床則集中在開孔比 42%(7 mm)與 48%(7 mm)的操作上，最後並提出一模擬懸浮床形成過程中壓力降變化情形與預測懸浮床床高之理論預測模式，使得理論模式與實驗獲得相當好的結合。在多段系統的操作上則發生了不等量的現象，初步認為是粒子的排泄頻率符合該段的穩定粒子排泄狀態，進而使得該段懸浮床不再成長。

## 六、計劃成果自評

實驗部分單段方面再加入 2 mm 的玻璃珠、小米粒以及分子篩就可對 D 類粒子作一完整討論，系統變數方面加入密度、銳孔徑/粒徑以及孔板設計等因素將使單段系統討論更臻完整；多段方面對各段進行粒子排泄頻率分析，若系統各段頻譜分析結果顯示各段

粒子排泄頻率同相，則將可進一步對不等量懸浮床的產生原因進行解釋。

理論模擬部分，已有單段系統懸浮床形成過程模擬基礎，正在進行的有不同型態懸浮床壓力擾動頻譜分析、多段系統懸浮床形成過程模擬模式建立，最後必能建立一套二相流模擬系統。

## 七、參考文獻

- R. Toei, T. Akao, Multi-stage fluidised bed apparatus with perforated plates, IChemE Symposium Series 30 (1968) 34-42.
- Y. Varma, Pressure drop of the fluid and the flow patterns of the phases in multistage fluidisation. Powder Technol. 12 (1975) 167-174.
- H. Brauer, J. Mühle, M. Schmidt, Untersuchungen an einer mehrstufigen rieselboden - Wirebelschicht, Chem. Ing. Tech. 42 (1970) 494-502.
- J. Raghuraman, Study of pressure drop and residence time distribution in multi-stage fluidised beds, M. S. Thesis, Indian Institute Technology, Madras (1971).
- C.S. Kannan, S.S. Rao, Y.B.G. Varma, A study of stable range of operation in multistage fluidised beds, Powder Technol. 78 (1994) 203-211.
- I. Tanaka, T. Ishikura, A. Uchiyama, H. Shinohara, Fluid characteristic of continuous multi-perforated plate stage fluidized beds without downcomer, Kagaku Kogaku Ronbunshu 5 (1979) 397-403 (in Japanese).
- P.S. Pillay, Y.B.G. Varma, Pressure drop and solids holding time in multistage fluidisation, Powder Technol. 35 (1983) 223-231.
- G.A. Serviant, M.A. Bergougnou, C.G.J. Baker, W. Bulani, Grid leakage in fluidized beds, The Can. J. of Chem. Eng. 48 (1970) 496-501.
- C.L. Briens, M.A. Bergougnou, Grid leakage (weeping and dumping) in a pilot plant size gas fluidized bed, The Can. J. of Chem. Eng. 62 (1984) 455-463.
- P. Guigon, J.F. Large, M.A. Bergougnou, C.G.J. Baker, Particle interchange through thin and thick baffle plates in multistage gas fluidized beds, Fluidization, Cambridge University Press (1978) 134-139.
- K. Sankaran, Y.B.G. Varma, R.C. Yalamanchili, Investigation into solids discharge from fluidized beds through multi-orifice plate, Gas-Particle Flows ASME 228 (1995) 227-231.
- D. Geldart, Gas Fluidization Technology, Geldart, D. (ed.), Wiley, Chichester (1986).
- C.L. Briens, A.K. Tyagi, M.A. Bergougnou, Pressure drop through multiorifice gas distributors in fluidized bed columns, The Can. J. of Chem. Eng. 66 (1988) 740-748.