

## การประยุกต์ใช้วิธีฟลูอิดไดเซชันสำหรับการอบแห้งดินเหนียว Application of Fluidization for Drying Kaolin clay

อภิสิทธิ์ วงศ์สิริวิทยา<sup>1</sup> ชินรักษ์ เขียรพงษ์<sup>2</sup> พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>3</sup>  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
กรุงเทพ 10520  
โทร 0 23269987 ต่อ 109 e-mail : [kppongje@kmitl.ac.th](mailto:kppongje@kmitl.ac.th)<sup>3</sup>

Apisit Wongsirivitya<sup>1</sup> Chinnarak Thienpong<sup>2</sup> Pongjet Promvongse<sup>3</sup>  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok 10520  
Tel: 0 23269987 ext 109 e-mail : [kppongje@kmitl.ac.th](mailto:kppongje@kmitl.ac.th)<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีฟลูอิดไดเซชันเพื่อใช้ในการอบแห้งดินเหนียวโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งดินเหนียว เช่น ขนาดของดินเหนียว ความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิลมร้อนทั้งขาเข้าและขาออกจากห้องทดลอง อัตราการหลุดลอย เวลา เศษตกค้าง รวมทั้งความชื้นสุดท้ายที่ได้ เป็นต้น รวมทั้งศึกษาถึงอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมในการอบเม็ดดินที่มีขนาดต่างๆกัน การทดลองทำโดยป้อนดินเหนียวความชื้นสูงประมาณ 20 – 25 % ที่ผ่านการคัดขนาดแล้วประมาณ 3-5 มิลลิเมตร และ 5-10 มิลลิเมตร ลักษณะตาม Geldart D อย่างละกลุ่มเข้ามาในห้องทดลองและป้อนอากาศร้อน 70 และ 80 องศาเซลเซียส รวมทั้งแปรเปลี่ยนความเร็วลมเป็น 4 ช่วงคือ 1.25, 1.5, 1.75 และ 2  $U_{mf}$  ตามลำดับ ที่ด้านล่างของห้องทดลองเพื่อให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ถ่ายเทความร้อนและมวลจนความชื้นในดินเหนียวลดลง น้ำหนักและขนาดจะลดลงกลายเป็นผงมีลักษณะตาม Geldart A และหลุดลอยไปตามลมร้อนขึ้นสู่ด้านบนของห้องทดลอง ผลการศึกษา พบว่าที่มวลเท่ากัน ขนาดของเม็ดดิน อุณหภูมิลมและความเร็วลม มีผลอย่างมากต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งรวมทั้งอัตราการหลุดลอยของอนุภาคของเม็ดดินภายในห้องทดลอง จากการทดลองพบว่าความชื้นสุดท้ายที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ คือ อยู่ในช่วง 3-5 % ของน้ำหนักสุดท้าย

### Abstract

This research study has been applied the fluidization for drying the Kaolin clay. The objectives are to study and investigate the influential drying parameters such as clay size, initial moisture content, hot air inlet and outlet temperature, elutriation rate, time, residual and final moisture content including to investigate appropriate drying temperature and fluidization velocity for each clay size for instance. The experiment was made by fed the grading clay 3-5 mm. and 5-10 mm. with 20 – 25% moisture content according to Geldart D into the chamber together with hot air temperature both 70 and 80 degree C° including vary the flow velocities from 1.25, 1.5, 1.75 and 2  $U_{mf}$  accordingly are entering into the bottom in order to generate fluidization effect for heat and mass transfer until moisture and size has been decreased and became powder according to Geldart A. before elutriation at the chamber exit. The results have been indicated that at the same mass clay size, hot air temperature and fluidization velocity are the significant influential parameters for drying time and elutriation rate of the particles inside the chamber. The experimental indicate that final moisture content was found to be 3-5% satisfaction by final weight respectively.

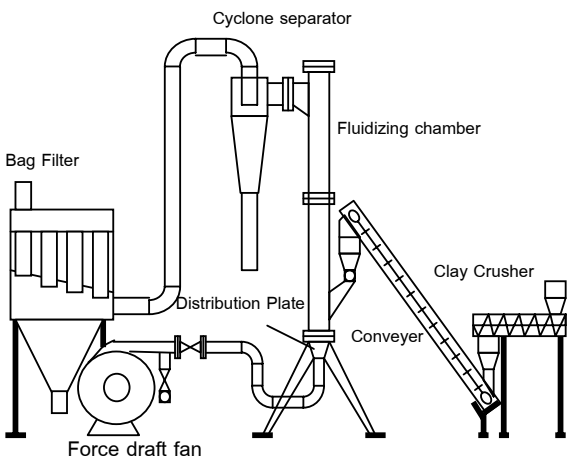
\* Corresponding Author

### 1. บทนำ

ดินเหนียว หนึ่งแ่งมีคุณสมบัติฟุ้งกระจายได้ดี อนุภาคมีขนาดเล็ก ละเอียด ความหนาแน่นสูงประมาณ 675 กก/ลบ.ม ดูดซึมน้ำได้มาก มีปริมาณธาตุอลูมิเนียมค่อนข้างสูงนิยมใช้เป็นอาหารสัตว์ แต่ขณะเปียก(ที่ความชื้น 20-25 %) จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปเป็นคล้ายดินเหนียวแต่เปราะกว่าเล็กน้อย ความหนาแน่นสูงประมาณ 1,375 กก/ลบ.ม โดยทั่วไปในการอบแห้งดินชนิดนี้ในปริมาณมากๆ จะอาศัยแสงแดดจากธรรมชาติเป็นหลักซึ่งใช้เวลานานมากประมาณ 5-7 วันเป็นอย่างน้อย รวมทั้งการควบคุมคุณสมบัติต่างๆทำได้ยาก เช่น ความชื้น ขนาด ปริมาณ ดังนั้นการอบแห้งดินเหนียวโดยวิธีฟลูอิดไดเซชันจะสามารถควบคุมคุณสมบัติต่างๆข้างต้นได้สม่าเสมอกว่ารวมทั้งเพิ่มปริมาณการผลิตได้มากภายในเวลาอันสั้น รวมทั้งสามารถแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรในรูปของดินก้อนไปเป็นดินผงเพื่อสะดวกต่อการขนส่งรวมทั้งเพิ่มมูลค่าสินค้าได้ในตัว การทดลองทำโดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 2 ช่วงคือ ประมาณ 70 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วฟลูอิดไดเซชัน 4 ช่วงคือ 1.25, 1.5, 1.75 และ 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ทันทีไว้ก่อนหน้านั้นแล้วตามลำดับ จากนั้นจึงทดลองและเก็บผลลัพธ์ของค่าตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งข้างต้นเพื่อนำมาใช้พิจารณาหาจุดเหมาะสมในการออกแบบรวม ทั้งปรับปรุงอุปกรณ์เตาอบแบบฟลูอิดไดเซชันในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

### 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในขั้นแรก ทำการบดดินเหนียวแล้วคัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการคือ 5 – 10 มม. และขนาดเล็กกว่า 5 มม. ลงมาอย่างละกลุ่ม หลังจากนั้นจึงนำไปทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิด ฟลูอิดไดเซชัน โดยใช้เวลาในการทดลองแต่ละกรณีไม่เกิน 30 นาทีอุปกรณ์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดทดลองการอบแห้งดินเหนียวแบบฟลูอิดไดเซชัน

### 3. สมการที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

สมการที่เกี่ยวข้องกับการทดลองส่วนใหญ่จะเป็นเรื่องเกี่ยวกับการความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชัน หรือ ( $u_{mf}$ ) สมการการเปลี่ยนแปลงของความเร็วฟลูอิดไดเซชัน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงความดันของเบตในสภาวะฟลูอิดไดเซชันเป็นหลัก ซึ่งสมการต่างๆสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \right) \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \left( \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right) \dots (1)$$

หรือ

$$\left( \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \right) \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{p,mf} = \text{Ar} \dots (2)$$

โดยที่ Archimedes number สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{Ar} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \dots (3)$$

โดย

$u_{mf}$  คือ ความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งที่บรรจุอยู่ในภาชนะเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชันอยู่เช่นนั้นโดยที่ ความดันจะไม่เปลี่ยนแปลงตามอีกต่อไปแม้ว่าจะเพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนต่อไป

$\epsilon_{mf}$  คือสัดส่วนช่องว่างของเบตในหอตทดลองในขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

$\phi_s$  คืออัตราส่วนพื้นที่ผิวของทรงกลมต่อพื้นที่ผิวอนุภาคที่ปริมาตรเดียวกัน

$\mu$  คือความหนืดของลมร้อน

$d_p$  คือขนาดของเม็ดดินที่ใช้ทดลอง

$\rho_g$  คือความหนาแน่นของลมร้อน

$\text{Re}_{p,mf}$  คือตัวเลขค่าเรโนลด์ขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

### 4. วิธีการทดลอง

การทดลองจะใช้มวลคงที่ ที่ 5 กิโลกรัมทั้ง 2 กลุ่มโดยเติมลงไปในหอตทดลองจะได้ความสูงของเบต 120 มม. และ 100 มม. ในขณะที่เดินพัดลมไว้ที่ความเร็วและอุณหภูมิที่ต้องการตามลำดับ จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของเบต ความดัน ความเร็วลม อุณหภูมิของลมที่ออก น้ำหนักของอนุภาคหลุดลอยที่จับได้หลังจากการอบ และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทุก 1- 2 นาที เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 14 กรณีศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.25  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
2. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.25  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
3. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.50  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.

4. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.50  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
5. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.75  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
6. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.75  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
7. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 2.0  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
8. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 2.0  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
9. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.5  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 3 - 5 มม.
10. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.5  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 3 – 5 มม.
11. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ ที่ 1.50  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
12. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ ที่ 1.50  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
13. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ ที่ 1.75  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.
14. อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ ที่ 1.75  $u_{mf}$  ขนาดเม็ดดิน 5 – 10 มม.

โดยกรณีศึกษาที่ 9 และ 10 ถูกใช้ทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการนี้ที่ 1 – 8 ในกรณีที่ขนาดของเบดเปลี่ยนไป ส่วนกรณีศึกษาที่ 11-14 เป็นการรักษาระดับความเร็วลมที่ใช้ในระหว่างการทดลองให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับเบดที่ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จาก กรณีศึกษาที่ 1 - 8

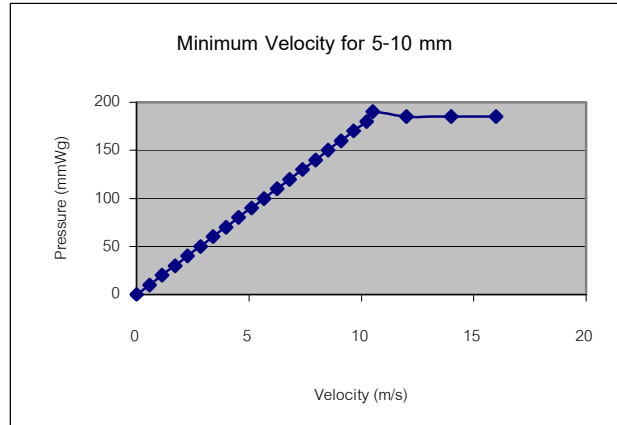
## 5. ผลการทดลอง

### 5.1 ผลการทดลองสำหรับการหาค่า $u_{mf}$ และผลของขนาดดิน

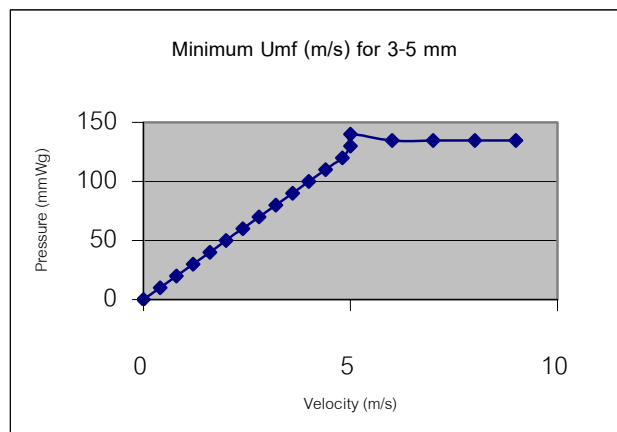
จากผลการทดลอง ข้างต้น สามารถหาค่า  $u_{mf}$  สำหรับขนาด 5 – 10 มม. และน้อยกว่า 5 มม. รวมทั้งสามารถที่จะสร้างแผนภูมิเพื่ออธิบายผลการทดลองต่างๆได้ดังนี้

จากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของดินแต่ละขนาดจะมีค่าไม่เท่ากันถึงแม้ว่ามวลจะเท่ากันก็ตามโดยขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเม็ดดินเป็นหลัก โดยจากการทดลองจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันหรือ  $u_{mf}$  มี 2 ค่า ตามขนาดของเม็ดดินคือ สำหรับขนาด 5 – 10 มม มีค่า  $u_{mf}$  เท่ากับ 10.48 เมตร/วินาทีที่ความดัน 180 มม.น้ำ หรือ 1,765 Pa (g) และสำหรับขนาด 3 – 5 มม. มีค่า  $u_{mf}$  เท่ากับ 5 เมตร/วินาที ที่ความดัน 135 มม. น้ำ หรือ

1,325 Pa (g) ตามลำดับ โดยที่ขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่าจะได้ค่า  $u_{mf}$  ต่ำกว่าประมาณ 50% ที่เดียว และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดของเม็ดดินโตขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 2 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับขนาด 5-10 มม.



รูปที่ 3 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับขนาด 3 - 5 มม.

### 5.2 ผลต่ออัตราการหลุดลอยของเบดเมื่อ อุณหภูมิคงที่-ความเร็วลมแปรเปลี่ยน

จากการทดลองพบว่าความเร็วลม อุณหภูมิ รวมทั้งขนาดของเม็ดดิน มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความดันและการลดลงของเบด(อัตราการหลุดลอย)ในหอตลอดอย่างมาก โดยอัตราการหลุดลอยหรือความสูงของเบดจะลดลงแปรผันโดยตรงกับความเร็วของลม แต่จะแปรผกผันกับขนาดของเม็ดดิน กล่าวคือความเร็วลมสูงกว่าการหลุดลอยออกจากหอตลอดของอนุภาคดินก็จะมีมากกว่าที่อุณหภูมิเดียวกันเนื่องจากการกระทบแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆของเม็ดดินอันเกิดจากความปั่นป่วนในหอตลอดและความชื้นสุดท้ายก็มากกว่าด้วย

### 5.3 ผลต่ออัตราการหลุดลอยของเบดเมื่อ ความเร็วคงที่-อุณหภูมิแปรเปลี่ยน

จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่าที่ขนาดของเบดเดียวกัน อุณหภูมิที่สูงกว่าก็จะเป็นตัวเร่งให้อุณหภูมิเหล่านั้นแห้งและเบาเร็วขึ้น จึงขจัดและหลุดลอยไปกับกระแสลมร้อนได้ง่ายกว่า อัตราการหลุดลอยของเบดจึงสูงกว่าในเวลาเท่ากัน แต่ที่ความเร็วลมเดียวกันและอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส การหลุดลอยของอนุภาคจะลดลง เนื่องจากผิวชั้นนอกของดินแห้งและแข็งอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อน เกินจุดวิกฤติ ทำให้ การแตกตัวเป็นไปค่อนข้างช้ากว่า จึงกล่าวได้ว่าที่ขนาดของเม็ดดินเดียวกันอัตราการหลุดลอยจะมีค่าสูงที่ความเร็วลมสูงๆ และจะมีค่าลดลงหากอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิวิกฤติส่วนปริมาณความชื้นสุดท้ายที่ได้ระหว่าง อุณหภูมิ 70 และ 80 องศา แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ไม่ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายที่ได้จากการอบเหลือเพียง 3 – 5 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิเท่าไร

#### 5.4 ผลต่ออัตราการหลุดลอยของเบดเมื่อขนาดของเบดเปลี่ยนที่อุณหภูมิเดียวกัน

เมื่อขนาดเบดลดลงเหลือ 3 -5 มม. สิ่งที่แตกต่างกันเป็นนัยสำคัญคือการความดันของเบดและความเร็วลมที่ใช้ที่ลดลงเป็นอย่างมาก ตามรูปที่ 3 ดังนั้น อัตราการหลุดลอย ในช่วง 6 นาทีแรกแทบจะไม่มีและจะเป็นการถ่ายเทความร้อนเสียมากกว่า หลังจากนั้นเมื่อเบดแห้งดีแล้วเวลา 4-6 นาทีที่เหลือจึงเป็นการถ่ายเทมวลออกจากห่อ โดยที่ ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเบดขนาดใหญ่ ความชื้นที่เหลือก็อยู่ในเกณฑ์ 3 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน

#### 5.5 ผลต่อเวลาของการอบแห้งของเบดเมื่อ อุณหภูมิ-ความเร็วแปรเปลี่ยน

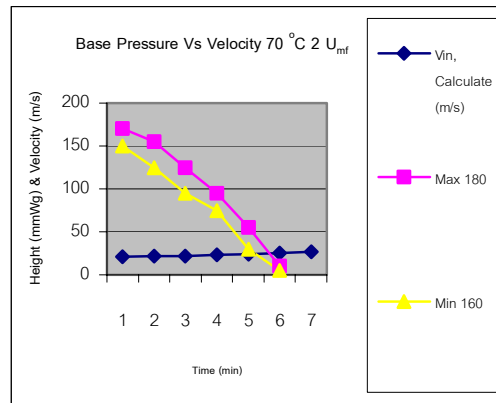
สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเบดขนาดเดียวกันนั้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิและความเร็วลมโดยที่อุณหภูมิสูงและความเร็วที่สูงกว่าแต่ต้องใช้ให้เหมาะสมกับขนาดของเบด เนื่องจากเบดขนาดต่างกันจะมีค่าอุณหภูมิวิกฤติและความเร็ววิกฤติแตกต่างกัน

#### 5.6 ผลต่ออัตราการหลุดลอยของเบดเมื่อ อุณหภูมิคงที่-ความเร็วลมคงที่

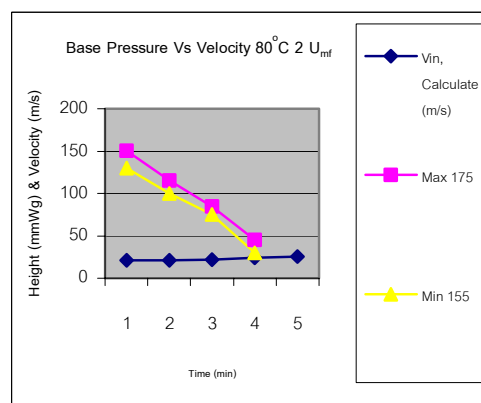
จากการทดลองเมื่อพยายามปรับอัตราความเร็วลมให้ลดลงสอดคล้องกับปริมาณเบดที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง พบว่าอัตราการหลุดลอยก็จะลดลงอย่างมากและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็เพิ่มขึ้นเป็น 3 ถึง 5 เท่า โดยขึ้นอยู่กับความเร็วลมและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ตามลำดับ

#### 5.7 การเปลี่ยนแปลงความดันของเบดเมื่อเทียบกับความเร็วและเวลา

จากรูปที่ 5 ที่ความเร็ว 2  $u_{mf}$  80 องศาเซลเซียสจะพบว่าความดันของเบดลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เส้นความดันตกลงมากเมื่อเทียบกับเวลาอนุภาคที่ได้ในช่วงนี้จะมีมากขึ้นต่ำกว่าความชื้นที่มีอยู่ในเม็ดดินก่อนทดลองเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าเป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลมากกว่าการถ่ายเทความร้อนและดีขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนลดลง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าทั้งอุณหภูมิและความเร็วลมนั้นอาจจะเกินค่าวิกฤติ ผลลัพธ์ที่ได้จึงไม่ตึง



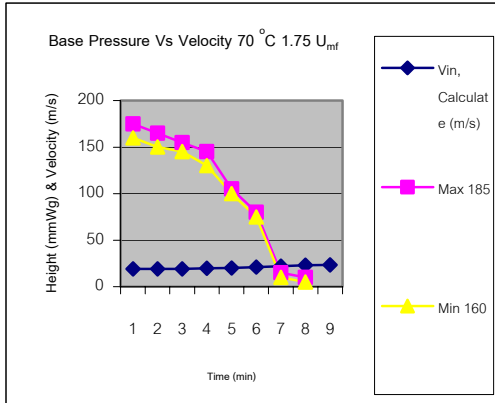
รูปที่4 การเปลี่ยนแปลงความดันของเบดที่อุณหภูมิ 70องศาที่ความเร็ว 2  $u_{mf}$



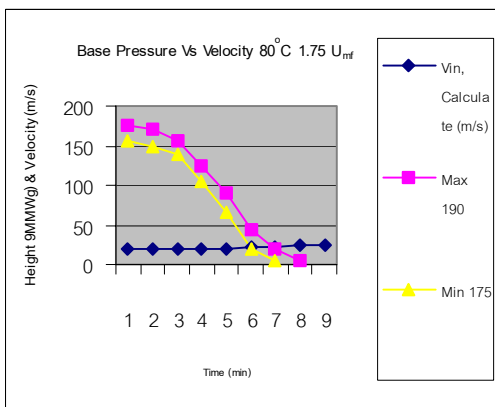
รูปที่5 การเปลี่ยนแปลงความดันของเบดที่อุณหภูมิ 80องศาที่ความเร็ว 2  $u_{mf}$

สำหรับที่ความเร็ว 1.75  $u_{mf}$  อุณหภูมิ 80 และ 70 องศาเซลเซียส ตามรูปที่ 6 และ 7 ในช่วง 3 นาทีแรก จะลดลงไม่มากนักเนื่องจากเป็นช่วงของการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนเข้าสู่เม็ดดินที่ขึ้นจะเห็นว่าความดันเปลี่ยนแปลงน้อยและความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงเลยแสดงให้เห็นว่าเป็นปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการถ่ายเทมวล เมื่อพ้นจาก 3 นาทีไปแล้วจนถึงนาทีที่ 8 เส้นความดันตกลงอย่างรวดเร็วขณะที่เส้นความเร็วเพิ่มขึ้นจนแตะระดับ 2 เท่าของความเร็วเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลออกจากห่อทดลอง โดยน้ำหนักของอนุภาคที่วัดได้มีค่าสูงที่

สุดในช่วง 5 นาทีนี้เอง อุณหภูมิที่ได้มีความชื้นต่ำมาก ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่านั้น



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความดันของเบตที่อุณหภูมิ 70 องศาที่ความเร็ว 1.75  $u_{mf}$



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความดันของเบตที่อุณหภูมิ 80 องศาที่ความเร็ว 1.75  $u_{mf}$

### 5.8 ผลต่อการไหลเวียนและอัตราการหลุดลอยของเบต ที่ความเร็วลมต่ำ ๆ (ต่ำกว่า $1.5 u_{mf}$ )

สำหรับที่ความเร็ว  $1.5 u_{mf}$  อุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส ให้ผลคล้ายกับ ที่ความเร็ว  $1.75 u_{mf}$  แต่เวลาในการถ่ายเทมวลออกจากหอตลอดจะนานกว่า 2 นาทีสำหรับที่ 70 องศา และ 4 นาทีสำหรับ 80 องศาตามลำดับ มีการไหลเป็นก้อนๆ บ้างช่วงเริ่มต้น

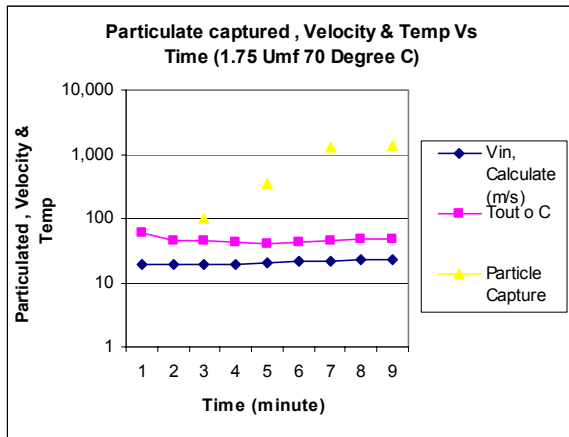
ส่วนที่ความเร็ว  $1.25 u_{mf}$  อุณหภูมิ 80 และ 70 องศาเซลเซียส ความดันเบตคงที่สม่ำเสมอเกิด การไหลเป็นก้อนๆ (slug flow) บ้างเป็นครั้งคราว 6 – 8 นาทีแรกเป็นการถ่ายเทความร้อนให้แก่เบต อีก 6 ถึง 8 นาที จึงจะเป็นการถ่ายเทมวลออกจากเบต ซึ่งจะ

เห็นว่าใช้เวลานานกว่าที่ความเร็วลมค่าอื่น ๆ มากอันเป็นผลมาจากปริมาณลมที่น้อยกว่านั่นเองทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลใช้เวลานานกว่า

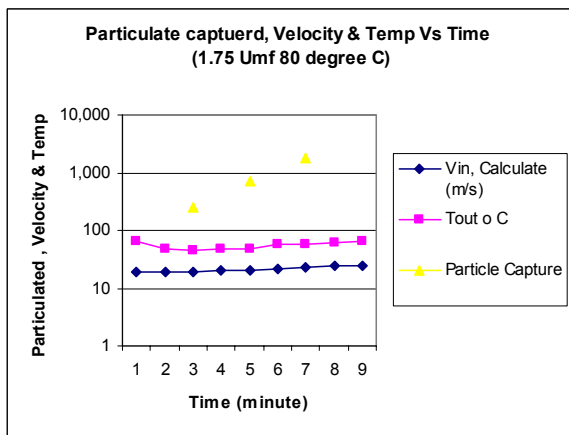
### 6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง สามารถที่จะวิเคราะห์เพื่อหาข้อสนับสนุนเพื่อสรุปผลได้ดังนี้

1. ที่มวลเท่ากัน ขนาดของเม็ดดินกาลินมีผลต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิด ฟลูอิดไอเซชัน โดยขนาดที่ใหญ่กว่าต้องการความเร็วสูงกว่า อันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่มากกว่าแรงต้านจึงมากตามลำดับ
2. เวลาในการอบแห้งเป็นฟังก์ชันของ  $u_{mf}$  ขนาดของเม็ดดิน ความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นก่อนอบ
3. ดินขนาดต่างๆกัน จะมีค่าวิกฤตต่างๆ กัน คือ อุณหภูมิ และความเร็วที่เหมาะสมต่อการอบไม่เท่ากัน
4. ดินขนาดเล็กจะใช้พลังงานในการอบน้อยกว่าดินขนาดใหญ่ที่เวลาของการอบโดยให้ได้อัตราการหลุดลอยเท่าๆกัน
5. อัตราการหลุดลอยเป็นฟังก์ชันของ ความเร็วลม และ อุณหภูมิ เป็นหลัก โดยที่ ที่ความเร็วลมสูงจะมีอัตราการหลุดลอยมาก และต้องมีอุณหภูมิสูงไม่เกินอุณหภูมิวิกฤติ มิฉะนั้นอัตราการหลุดลอยจะลดลงเนื่องจากผิวของดินแข็งเร็วเกินไป ดูรูป ที่ 8 และ 9 ประกอบ
6. อุณหภูมิที่หลุดลอยออกมามีขนาดเล็กมากจนดูเหมือนผงแบ่งซึ่งเป็นไปนามนิยามของ Geldart A
7. อุณหภูมิและความเร็วที่เหมาะสมแก่การอบแห้งดินกาลินที่มีขนาด 5 – 10 มม. สามารถที่จะแจกแจงได้ดังต่อไปนี้คือ
  - $1.75 u_{mf}$  / 70 - 80 องศาเซลเซียส ดีที่สุด ได้อัตราการหลุดลอยสูงที่สุดภายใน 8 นาทีเท่านั้น
  - $1.25 u_{mf}$  / 70 องศาเซลเซียส ดี โดยได้อัตราการหลุดลอยสูงพอสมควร ในเวลา 12 นาที
  - $1.5 u_{mf}$  / 70 - 80 องศาเซลเซียส ไม่ดี ได้อัตราการหลุดลอยต่ำที่สุดและมีตกค้างมาก
  - $2 u_{mf}$  / 70 - 80 องศาเซลเซียส แย่ที่สุดโดยได้อัตราการหลุดลอยสูงที่สุดแต่มีปริมาณความชื้นสูงที่สุดเช่นเดียวกัน
8. ปรากฏการณ์ไหลเป็นก้อน (Slug flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของลมต่ำกว่า  $1.5 u_{mf}$  เป็นต้นไป
9. อัตราการหลุดลอยจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อมีความพยายามที่จะปรับความเร็วลมร้อนให้คงที่สัมพันธ์กับปริมาณเบตในหอตลอดอันเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและการแตกหักที่ลดลงนั่นเอง
10. เวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีความสัมพันธ์กับปริมาณลมร้อนอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิลมร้อนต่างกันไม่มาก ปริมาณลมร้อนจะมีอิทธิพลต่อการอบแห้งมากที่สุด โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากปริมาณเบตที่ติดค้างอยู่ในหอตลอด



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอัตราการหลุดลอย อุณหภูมิ และความเร็วของเบดเมื่อเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 70 องศา ที่ความเร็ว 1.75  $u_{mf}$



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงอัตราการหลุดลอย อุณหภูมิ และความเร็วของเบดเมื่อเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 80 องศา ที่ความเร็ว 1.75  $u_{mf}$

#### เอกสารอ้างอิง

1. กัญจนนา บุญเกียรติ, เชื้อเพลิงและการเผาไหม้, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544, กรุงเทพฯ. หน้า 190-197.
2. Daizo, K. and Octave, L., (1991), *Fluidization engineering 2<sup>nd</sup> edition*, Butterworth-Heinemann, USA. pp. 61-90.
3. Perry, R.H. and Green, D.W. (1997), *Perry's Chemical Engineer's Handbook, 7<sup>th</sup> International edition*, McGraw-Hill, USA. pp. 17/1 – 17/19.