

## การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในฟลูอิดไรซ์เบดที่ใช้อบแห้ง เมล็ดข้าวโพดโดยใช้พลังงานจากฮีตปั๊ม

### STUDY TEMPERATURE PROFILES IN FLUIDIZED BED OF CORN DRYING USING HEAT PUMP

จิระเมธา สังข์เกษม

อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250, gerametha.sun@kbu.ac.th

Gerametha Sungkasem

Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Kasem Bundit University, 1761 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok Thailand 10250,  
gerametha.sun@kbu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้นำเสนอการกระจายตัวของอุณหภูมิในฟลูอิดไรซ์เบดในแนวตั้ง โดยใช้พลังงานจากฮีตปั๊มที่เป็นความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่เพื่ออบแห้งเมล็ดข้าวโพดในฟลูอิดไรซ์เบด การศึกษาได้มุ่งเน้นไปที่การกระจายตัวของอุณหภูมิในฟลูอิดไรซ์เบด ความร้อนทิ้งจากฮีตปั๊มสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่แต่มีอุณหภูมิที่ไม่คงที่ เนื่องจากควบคุมการทำงานของเครื่องปรับอากาศมีการตัดต่อการทำงาน การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากฮีตปั๊มจะไม่คงที่เหมือนกับพลังงานฮีตเตอร์ที่ใช้เทอร์โมสแตทควบคุม แต่ข้อได้เปรียบของพลังงานความร้อนจากฮีตปั๊มคือเป็นพลังงานที่ได้เปล่าไม่มีต้นทุนเนื่องจากเป็นความร้อนทิ้งของเครื่องปรับอากาศ ฮีตปั๊มสามารถใช้อบแห้งเมล็ดข้าวโพดหรือเมล็ดพืชเล็กๆ ชุดทดลองประกอบด้วย 1.เครื่องปรับอากาศขนาด 18,000 Btu/hr 2. พัดลมอัดอากาศขนาด 1 แรงม้า 3.ฟลูอิดไรซ์เบด และ 4. ลิน์ปีกผีเสื้อสำหรับควบคุมความเร็วของอากาศร้อนที่ทางเข้าเบด การทดลองโดยอ้างอิงความเร็วของอากาศร้อนที่ทางเข้าเบด 7 m/s จากแหล่งพลังงานของฮีตปั๊มเพียงอย่างเดียวใช้เวลาอบแห้ง 420 นาที สำหรับจุดกักเก็บที่น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% moisture content dry-basis) [1] ผลการทดลองที่ได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด  $\Delta T = 13.42 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที และหลังจาก 60 นาที จนถึง 420 นาที ผลความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันน้อยมากประมาณ 1-2  $^{\circ}\text{C}$

**คำสำคัญ:** การกระจายตัวของอุณหภูมิ, ฮีตปั๊ม, ฟลูอิดไดซ์เบด, เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก, อัตราส่วนความชื้น

### ABSTRACT

This research proposed distribution of the Temperature profiles in vertical fluidized bed. The corn drying in fluidized bed used energy recovery from heat pump. Study focused on the distribution of temperature profiles in fluidized bed. Waste energy from the heat pump for recovery heat but the temperature profiles are not constant, due air conditioner control operate on-off of heat pump. The temperature profiles are not constant as the heater used thermostat to control, but the recovery heat from the heat pump advantages without cost from the waste energy of air conditioners. Therefore can be used to corn drying or small seeds. The experiment group compose 1. Air conditioner 18,000 Btu/hr 2. Blower 1 hp 3. Fluidized bed and 4. Damper for control velocity of hot air at inlet bed. The experiment group reference speed of hot air velocity at inlet bed 7 m/s using energy only from the heat pump. The drying time was 420 minutes for storage point less than 12% moisture content dry-basis [1]. The resultant maximum mean temperature occurred  $\Delta T = 13.42$  °C at 10 minutes and after 60 minutes to 420 minutes, the temperature difference is very small, approximately 1-2 °C.

**KEYWORDS:** Temperature profiles, Heat pump, Fluidized bed, % Moisture content dry-basis, %Moisture content wet-basis, Moisture ratio

### 1. บทนำ

การศึกษาวิจัยฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้กระบวนการฟลูอิดไดเซชันเป็นกระบวนการซึ่งทำให้เมล็ดข้าวโพดซึ่งเป็นของแข็งสัมผัสกับอากาศร้อนที่มีความเร็วสูง และมีความดันในการยกตัวให้เมล็ดข้าวโพดลอยขึ้น จากนั้นอากาศร้อนจะขับเคลื่อนให้เมล็ดข้าวโพดไหลเวียน ลอยหมุนวน และหมุนควงคล้ายกับการไหลของของไหล เพื่อให้เมล็ดข้าวโพดสัมผัสกับอากาศร้อนได้มากกว่าต้อบโดยทั่วไป เบดอบแห้งที่ใช้อบแห้งเมล็ดพืชต่างๆ เช่นเมล็ดข้าว เมล็ดพริกไทยและ เมล็ดข้าวโพดซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดของแข็งหรือเป็นอนุภาคของแข็ง จากงานวิจัยต่างๆ ได้ใช้เบดอบแห้งแบบแนวตั้งและใช้แหล่งความร้อนจากฮีตเตอร์หรือแหล่งพลังงานความร้อนแหล่งเดียวซึ่งมีต้นทุนทางพลังงานแต่มีข้อดีคือสามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ [2, 3] ส่วนงานวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบแหล่งพลังงานความร้อนจากฮีตปั๊มสำหรับอบแห้งเมล็ดข้าวโพดเพียงแหล่งเดียว ซึ่งแหล่งพลังงาน

ความร้อนจากฮีตปั๊มที่ใช้อบแห้งเป็นพลังงานความร้อนทั้งจากเครื่องปรับอากาศขนาด 18,000 Btu/hr จึงเป็นพลังงานความร้อนที่ได้เปล่าโดยไม่มีต้นทุน แต่มีความไม่เสถียรของอุณหภูมิเนื่องจากภาระของการตัดต่อการทำงานของคอมเพรสเซอร์เครื่องปรับอากาศเพื่อรักษาอุณหภูมิในห้องปรับอากาศ ในส่วนการควบคุมความเร็วของอากาศร้อนที่เข้าสู่ฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้ลิ้นปีกผีเสื้อควบคุมความเร็วและอัตราการไหล โดยการไหลของอากาศร้อนที่เข้าสู่เบดเป็นแบบปั่นป่วนเมื่อผ่านลิ้นปีกผีเสื้อจะทำให้เกิดการหมุนวนเพื่อบังคับให้เมล็ดข้าวโพดเคลื่อนที่แบบหมุนวนและหมุนควงด้วยเช่นกัน ซึ่งมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนการพาความร้อนและการแลกเปลี่ยนอากาศร้อนระหว่างข้าวโพดอากาศทำให้น้ำในเมล็ดข้าวโพดระเหยอย่างรวดเร็ว

## 2. ทฤษฎีและการออกแบบ

ขนาดต่างๆ ของอุปกรณ์ในฟลูอิดไดซ์เบดเป็นการไหล ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดแบบต่อเนื่อง (Steady flow) สามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีของฟลูอิดไดซ์เบดดังนี้

### 2.1 การคำนวณหาสถานะของฟลูอิดไดซ์เบด

การคำนวณหาขนาดต่างๆ ของชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้อบแห้งเมล็ดข้าวโพด ปัจจัยหลักที่สำคัญอันดับแรกคือ การคำนวณหาความเร็วของอากาศร้อนต่ำสุดและความสูงของเบดต่ำสุดที่ทำให้เกิดสถานะฟลูอิดไดซ์เบดทำให้เมล็ดข้าวโพดเริ่มขยับตัวจากสมการของ Ergun [4] ซึ่งเขียนในเทอมของความดันตกคร่อมเบดดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})(D_p U_{mf} \rho_g)}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf} \mu} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2} \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์รูปร่าง  $\phi_s$  และ ค่าของสัดส่วนช่องว่างต่ำสุด  $\varepsilon_{mf}$  เขียนได้ดังนี้ [4]

$$\phi_s = \frac{A_{sp}}{A_{sq}}, \quad \varepsilon_{mf} = \sqrt[3]{\frac{1}{14\phi_s}} \quad (2)$$

จากนั้นหาความสูงของเบดต่ำสุดของเบดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดจากสมการ [4]

$$L_{mf} = \frac{(1-\varepsilon)L_o}{(1-\varepsilon_{mf})} \quad (3)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  คือ สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย (ไม่มีหน่วย)  
 $\varepsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด (ไม่มีหน่วย)  
 $\phi_s$  คือ แฟคเตอร์รูปร่าง (ไม่มีหน่วย)  
 $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพด ( 1,446 kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.127 kg/m<sup>3</sup>)  
 $\mu$  คือ ความหนืดของอากาศ (1.91 x 10<sup>-5</sup> kg/m.s)  
 $D_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดข้าวโพด (m)  
 $g_c$  คือ อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s<sup>2</sup>)  
 $L_{mf}$  คือ ความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (m)  
 $L_o$  คือ ความสูงของเม็ดข้าวโพดที่ใส่ในเบต (m)  
 $U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบต (m/s)

การหาตัวแปรต่างๆ เริ่มต้นจากการสุ่มเมล็ดข้าวโพดจำนวน 100 เมล็ด  $D_p = 0.011$  m แล้วทำการหาปริมาตรเมล็ดข้าวโพดเทียบเท่าทรงกลมและ พื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพดซึ่งมีรูปทรงซึ่งไม่เป็นเรขาคณิตหาได้จากเครื่องมือวัดพื้นที่ (Polar Planimeter) เมื่อแทนในสมการที่ (2) จะได้ผลลัพธ์ของแฟคเตอร์รูปร่าง  $\phi_s = 0.1489$  และ สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด  $\varepsilon_{mf} = 0.7828$  จึงนำไปแทนค่าในสมการที่ (1) ได้ค่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน  $U_{mf} = 2.394$  m/s และ คำนวณหาความสูงต่ำสุดของเบตที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน  $L_{mf} = 0.538$  m [1]

## 2.2 การหาความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในฟลูอิดไดเซชันเบต

ความดันตกคร่อมเบตเป็นปัจจัยที่สำคัญในการหาขนาดของพัดลมอัดอากาศ (Blower) โดยความดันตกคร่อมเบตสามารถเชื่อมโยงไปหาความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศได้จากรูปที่ 1 ความดันและความดันตกคร่อม ณ ตำแหน่งต่างๆ 5 ตำแหน่ง ประกอบด้วย 1. ความดันของพัดลมอัดอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าและ ทางออกของพัดลมอัดอากาศ กำหนดให้เป็น  $P_1$  และ  $P_2$  ตามลำดับ 2. ความดันของเบต ณ ตำแหน่งทางเข้าและ ทางออกเบต กำหนดให้เป็น  $P_3$  และ  $P_4$  ตามลำดับ 3. ความดันตกคร่อมเบต กำหนดให้เป็น  $\Delta P_b$  4. ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศให้เป็น  $\Delta P_d$  และ 5. ความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ ให้เป็น  $\Delta P_f$  [1]

### 2.2.1 การหาความดันลดในเบต ( $\Delta P_b$ )

ความดันลดในเบต คือผลต่างของความดัน ณ ตำแหน่งทางออกของเบต  $P_4$  ที่มีปลายเปิดสู่บรรยากาศกับความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าของเบต  $P_3$  ของฟลูอิดไดเซชันเขียนสมการได้ดังนี้ [4]

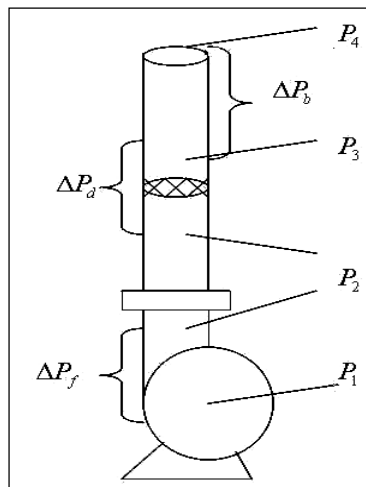
$$\Delta P_b = P_3 - P_4 = L_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (4)$$

เมื่อ  $\Delta P_b$  คือ ความดันลดภายในเบด ( $N/m^2$ )

$P_3$  คือ ความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าเบด ( $N/m^2$ )

$P_4$  คือ ความดัน ณ ตำแหน่งทางออกของเบด ( $N/m^2$ )

แทนค่า  $\rho_s = 1,446.47 \text{ kg/m}^3$  และ  $\rho_g = 1.127 \text{ kg/m}^3$  และ  $\varepsilon_{mf}$  และ  $L_{mf}$  และ ความดันลดในเบดคำนวณหาได้เท่ากับ  $\Delta P_b = 171.23 \text{ N/m}^2$  และ ความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดคำนวณหาได้  $P_3 = 1.03 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  [1]



รูปที่ 1 ความดันลดในเบด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ [1]

### 2.2.2 การหาความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ ( $\Delta P_d$ )

ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศที่ตีไม่ควมเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของความดันตกคร่อมเบด ดังนั้นค่าของ  $\Delta P_d = 294.68 \text{ N/m}^2$  คำนวณได้จากสมการ [1] ดังนี้

$$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b = P_2 - P_3 \quad (5)$$

เมื่อ  $\Delta P_d$  คือ ความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลม ( $N/m^2$ )

$P_1$  คือ ความดันของเครื่องอัดอากาศ ( $N/m^2$ )

$P_2$  คือ ความดันในท่อทางเข้าสะเป้าเต็ดเบด ( $N/m^2$ )

ความดัน ณ ตำแหน่งทางออกของพัดลมอัดอากาศ  $P_2 = 1.03175 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

### 2.2.3 การหาขนาดของพัดลมอัดอากาศ ( $\Delta P_f$ )

สามารถหาขนาดเล็กสุดที่ทำให้เกิดสถานะฟลูอิดไดเซชันของพัดลมอัดอากาศจากสมการที่ (6) และความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศจาก  $\Delta P_f = 1850.19 \text{ N/m}^2$

$$Power = Q_2(\Delta P_f) \quad (6)$$

โดยที่

$$Q_2 = U_{mf} A_t \frac{P_3}{P_2} \quad (7)$$

เมื่อ  $A_t$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด ( $\text{m}^2$ )

$\Delta P_f$  คือ ความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ ( $\text{N/m}^2$ )

$Power$  คือ กำลังของพัดลมอัดอากาศ (hp)

$Q_2$  คือ อัตราการไหลที่ทางเข้าของพัดลมอัดอากาศ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

คำนวณกำลังของพัดลมอัดอากาศ ได้ 0.454 hp จึงเลือกใช้ขนาด 1 hp [1]

### 2.3 การคำนวณหาสัดส่วนรูเจาะของตะแกรง

รูเจาะของตะแกรงมีอิทธิพลอย่างมากต่อความเร็วของการไหลและการลอยตัวของเมล็ดข้าวโพดในเบด กล่าวคือถ้ารูเจาะน้อยเกินไปเมล็ดข้าวโพดจะไม่ลอยตัวขึ้น ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ตะแกรงที่มีสัดส่วนรูเจาะให้เหมาะสมกับพัดลมอัดอากาศที่ได้ออกแบบไว้ใน หัวข้อ 2.2.3 โดยหาได้จาก [4]

$$\frac{U_o}{U_{or}} = \text{สัดส่วนของพื้นที่รูเจาะต่อพื้นที่ทั้งหมด} \quad (8)$$

เมื่อ  $U_o$  คือ ความเร็วของอากาศในเบดว่างเปล่า ( $\text{m/s}$ )

$U_{or}$  คือ ความเร็วอากาศที่ผ่านแผ่นกระจายลม ( $\text{m/s}$ )

ตัวแปรที่ใช้หาสัดส่วนรูเจาะของตะแกรงคือความเร็วสำหรับเบดว่างเปล่า  $U_o$  ซึ่งได้มาจากสมการ Ergun [4] ดังนี้

$$\frac{\Delta P_b g_c}{L_0} = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_0}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf}) \rho_g U_0^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)} \quad (9)$$

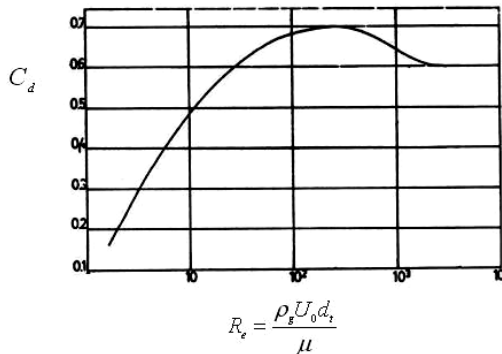
ค่าความเร็วในเบตว่างเปล่าคำนวณได้  $U_0 = 5.41$  m/s ส่วนความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรูเจาะของตะแกรง [4] หาได้จาก

$$U_{or} = C_d \left[ 2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของตะแกรงกระจายอากาศ  $C_d$  โดยกำหนด  $d_t = 0.25$  m แล้วแทนค่าหาเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $R_e$ ) ดังนี้

$$R_e = \frac{\rho_g U_0 d_t}{\mu} = 26,308.06 \quad (11)$$

- เมื่อ  $C_d$  คือ สัมประสิทธิ์ของแผ่นกระจายอากาศ (ไม่มีหน่วย)
- $d_t$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบต (m)
- $R_e$  คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (ไม่มีหน่วย)

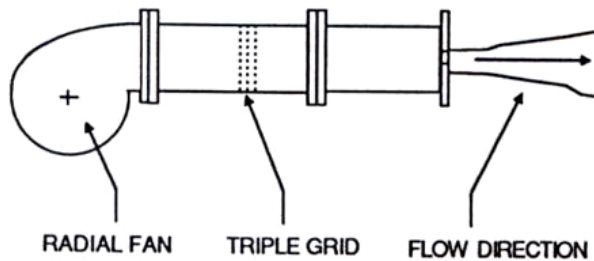


รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ตะแกรงกระจายอากาศ  $C_d$  [1]

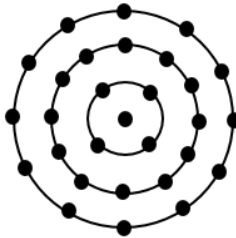
จากรูปที่ 2 ลากเส้นจะได้ค่า  $C_d = 0.6$  แล้วแทนค่า  $U_0$  และ  $U_{or}$  ลงใน (8) จะได้สัดส่วนพื้นที่ต่อรูเจาะ = 52.13 เปอร์เซนต์ต่อพื้นที่ทั้งหมด [1]

## 2.4 การวัดการไหลแบบปั่นป่วนที่ทางเข้าเบต

การวัดความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเบตซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีความเร็วของการไหลไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเมื่อไหลผ่านลิ้นปีกผีเสื้อในลักษณะของ Wake จึงได้ใช้วิธีการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยแบบ Triple grid ดังรูปที่ 3 โดยเจาะรู ณ ตำแหน่งทางเข้าเบต โดยรอบจำนวน 3 แถว และวัดโดยรอบที่ความลึกในท่อ 3 ระดับ [5] โดยการศึกษานี้จะใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการที่ (11) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $R_e = 26,308$  เป็นการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 3 วิธีวัด Triple grid ของการไหลแบบปั่นป่วน [5]



รูปที่ 4 แพลนการวัดความเร็วอากาศในหน้าตัดท่อที่ความลึก 3 ระดับรวม 29 จุด

## 3. ข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้า

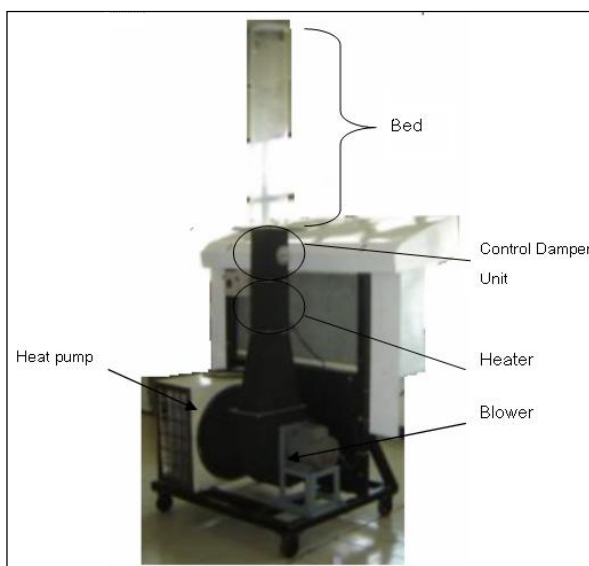
งานวิจัยเรื่องนี้ได้ต่อยอดและขยายผลเพิ่มเติมมาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้เรื่อง “การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้ฮีตเตอร์เป็นความร้อนเสริมในฟลูอิดไดซ์เบตที่ใช้ฮีตปั๊ม” [1] โดยมุ่งเน้นประเด็นไปที่การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเบต ซึ่งเป็นผลมาจากฮีตปั๊มซึ่งมีความไม่เสถียรของอุณหภูมิ จึงได้ใช้ชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบตจากงานวิจัยก่อนหน้ามาทำการทดลองเพิ่มเติมซึ่งมีข้อสรุปของการออกแบบซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมดังนี้



## ตารางที่ 1 ผลการออกแบบ [1]

รายการ	ขนาดที่เลือกใช้
1. พัดลมอัดอากาศ	1 hp
2. เส้นผ่านศูนย์กลางเบด	25 cm
3. ความสูงของเบด	1 m
4. ส่วนตะแกรงต่อรูเจาะ	52.13 %

เครื่องอบแห้งที่นำมาประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วดังแสดงในรูปที่ 5

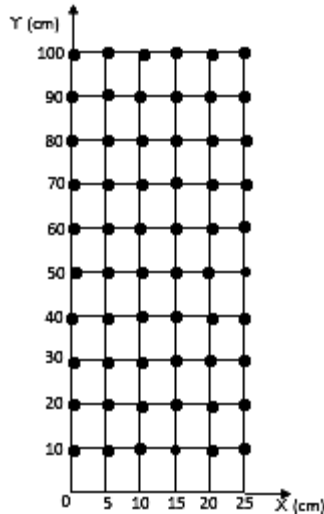


รูปที่ 5 ชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบความร้อนเสริม [1]

โดยข้อสรุปจากผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร้อนที่ช่องทางเข้า 2.5 m/s เป็นความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ผลปรากฏว่าความเร็วอากาศร้อนจากฮีตปั๊มเพียงอย่างเดียวที่ 7.0 m/s ณ ตำแหน่งทางเข้าเบดเป็นความเร็วต่ำสุด ที่เวลา 420 นาที ที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นก็กเก็บต่ำกว่า 12% moisture content dry-basis [1] ตามมาตรฐานการกักเก็บ และเป็นเวลาที่ดีที่สุดที่เครื่องปรับอากาศสามารถทำงานได้ตามปกติ โดยไม่เกิดตัดการทำงานของคอมเพรสเซอร์เนื่องจากความร้อนที่ตัวฮีตปั๊มสูงมากเกินไป จึงใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อขยายผลเพิ่มเติมการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่ในหัวข้อถัดไป

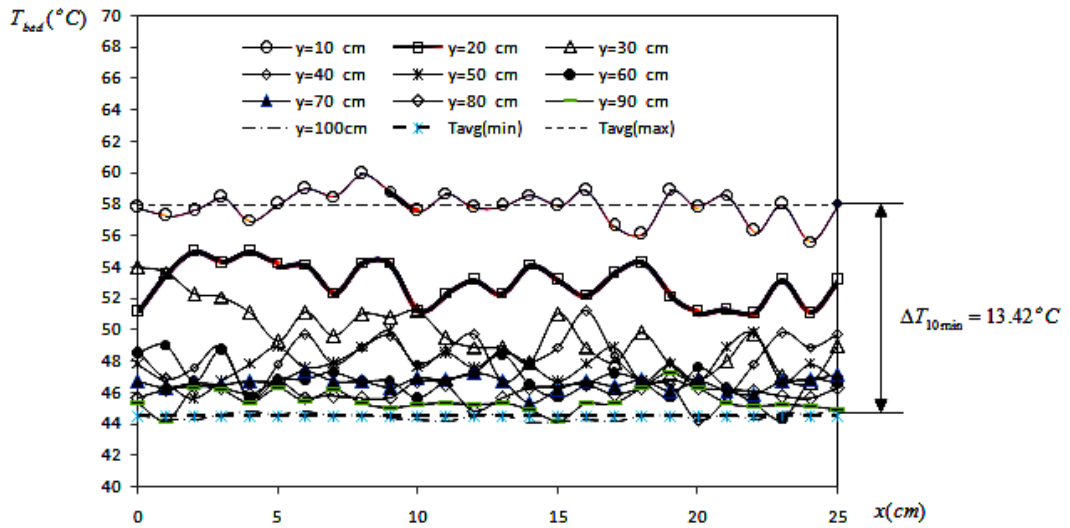
#### 4. ผลการทดลอง

การทดลองได้เจาะรูที่เบตทั้งหมด 60 รูเจาะโดยมีระยะห่างที่สมมาตรกันและใช้เทอร์โมคัปเปิลเสียบที่ตำแหน่ง 60 รูเจาะในระนาบของ x-y ดังรูปที่ 6 จากนั้นเปิดชุดทดลองฟลูอิดไดเซชันโดยปรับตั้งลิ้นปีกผีเสื้อที่ความเร็วอากาศ 7.0 m/s แล้วบันทึกผลของอุณหภูมิแต่ละจุดทุกๆ 1 นาทีจนถึงเวลา 420 นาที ที่จุดกักเก็บ

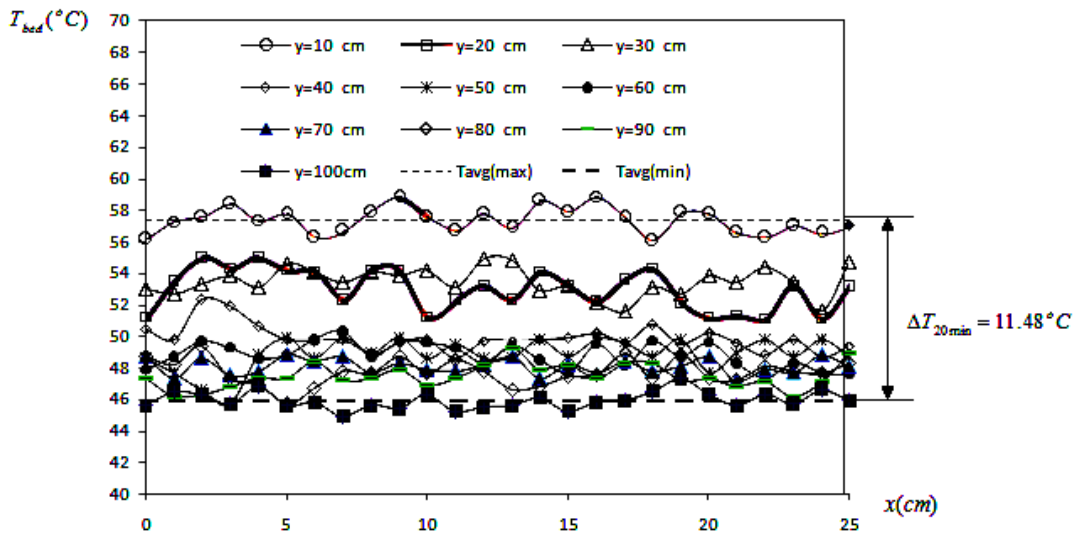


รูปที่ 6 ตำแหน่งการเจาะเบตจำนวน 60 รูเจาะ

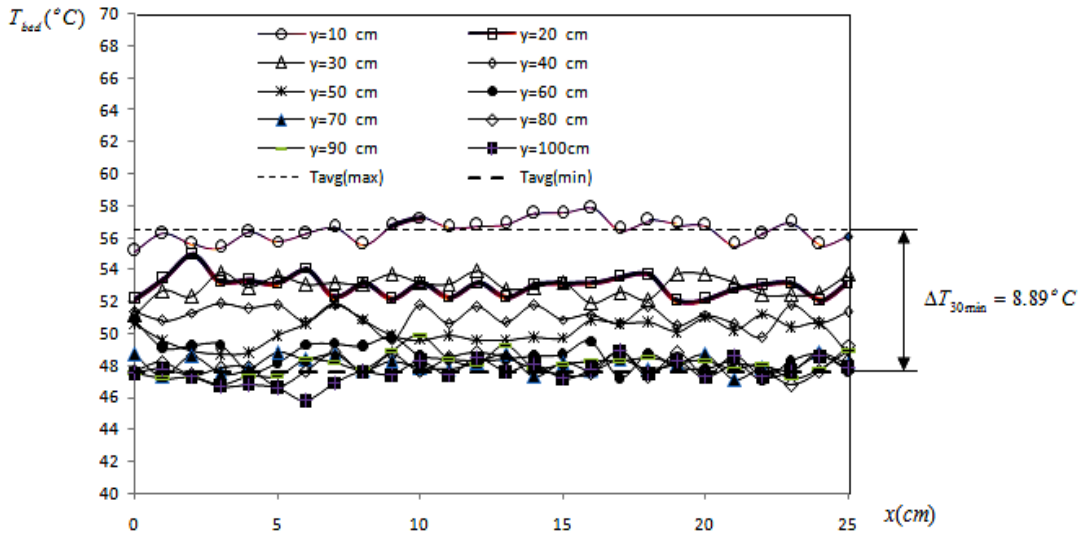
รูปที่ 7 ถึง รูปที่ 12 ผลการทดลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความเร็วของอากาศร้อน 7 m/s และผลของอุณหภูมิในเบต ณ ตำแหน่งต่างๆจากการทดลองที่ใช้ฮีตปั๊มเพียงอย่างเดียว การทดลองใช้เปรียบเทียบและศึกษาผลต่าง  $\Delta T = \Delta T_{max} - \Delta T_{min}$  ของการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบต ที่ระยะ x ต่างๆ ของเบต โดยใช้เบตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ที่ความสูงเริ่มต้น  $y = 10$  cm โดยเริ่มต้นข่าวโพดในเบตมีความชื้นสูงจึงเกาะตัวกันแน่นทำให้อากาศร้อนไหลผ่านข่าวโพดได้ยาก ดังนั้นอุณหภูมิต่ำสุดจึงอยู่ที่ปลายทางออกของเบตที่ความสูง  $y = 100$  cm ผลการทดลองจากรูปที่ 11 และ 12 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยลดลง เนื่องจากความชื้นที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง (Critical drying) นำที่ผิวของเมล็ดข่าวโพดจะระเหยได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการกระจายของข่าวโพดจนกระทั่งเป็นอิสระจากกัน ผลของรูปที่ 9-12 ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 30-60 นาที ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  ลดลงเนื่องจากการถ่ายเทมวลข่าวโพดลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ โดยมีแนวโน้มของ  $\Delta T$  ลดลงหลังจากผ่านไป 60 นาทีจนถึงเวลา 420 นาที ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T_{60-420min}$  น้อยมากจะอยู่ในช่วง 1-2 °C เท่านั้น



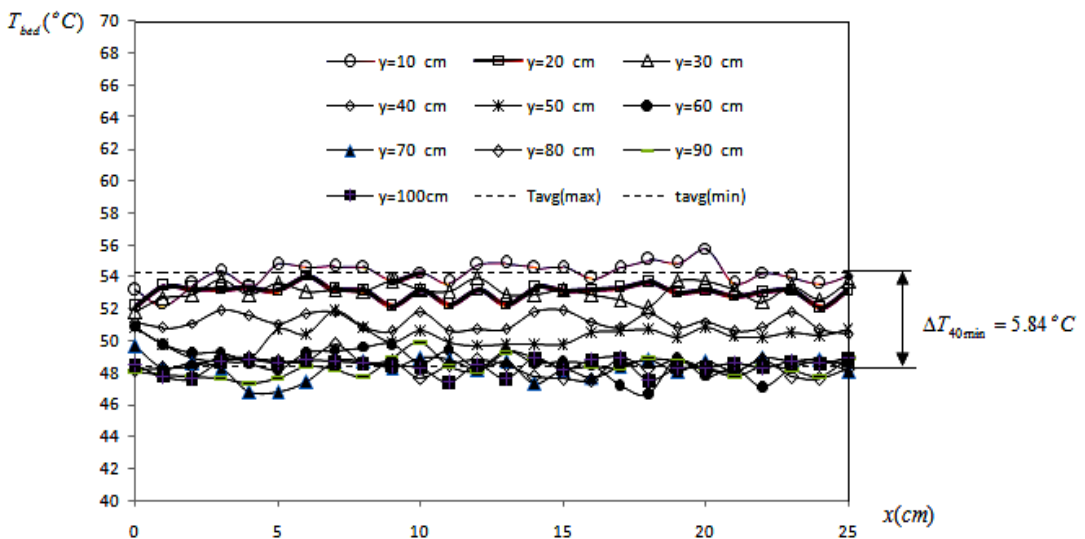
รูปที่ 7 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิณตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบด ที่เวลา 10 นาที



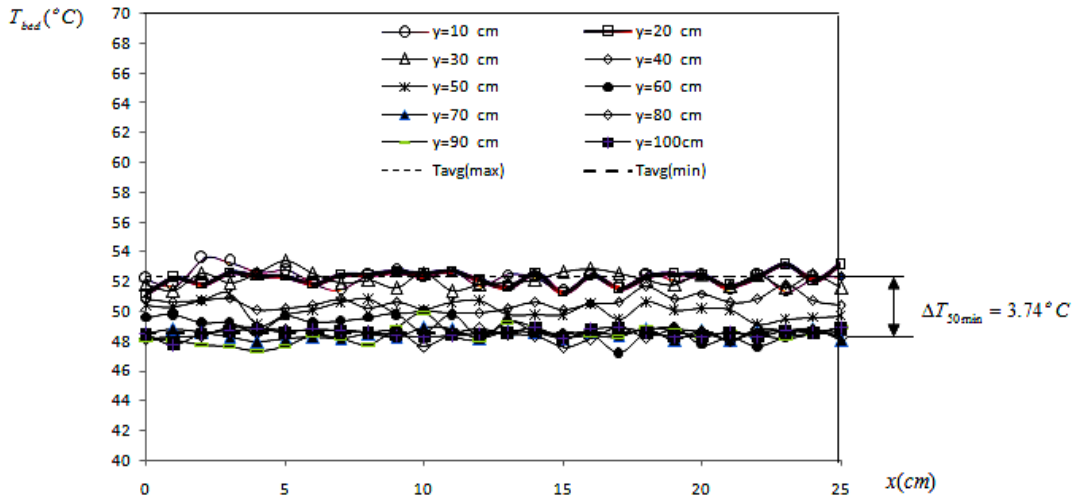
รูปที่ 8 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิณตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบด ที่เวลา 20 นาที



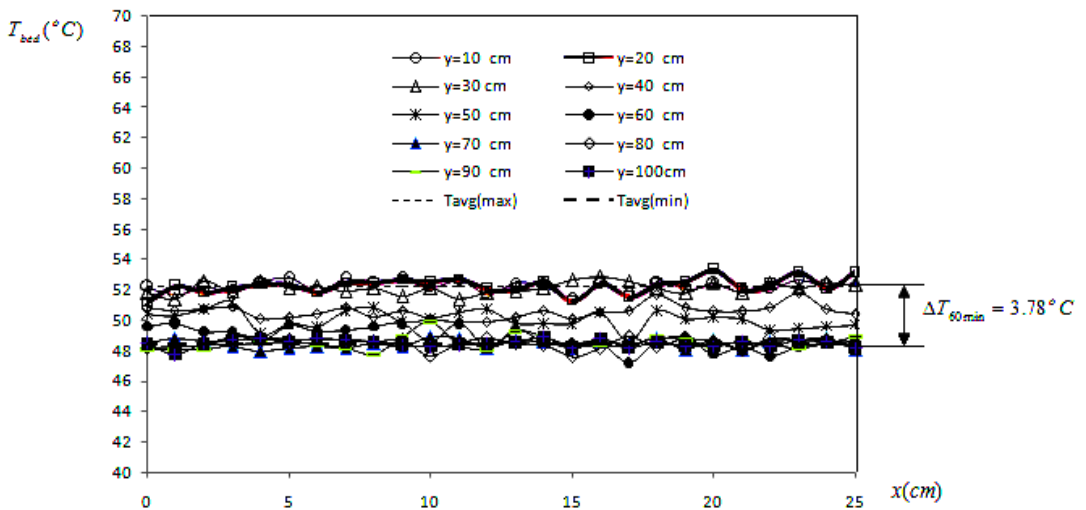
รูปที่ 9 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบด ที่เวลา 30 นาที



รูปที่ 10 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบด ที่เวลา 40 นาที

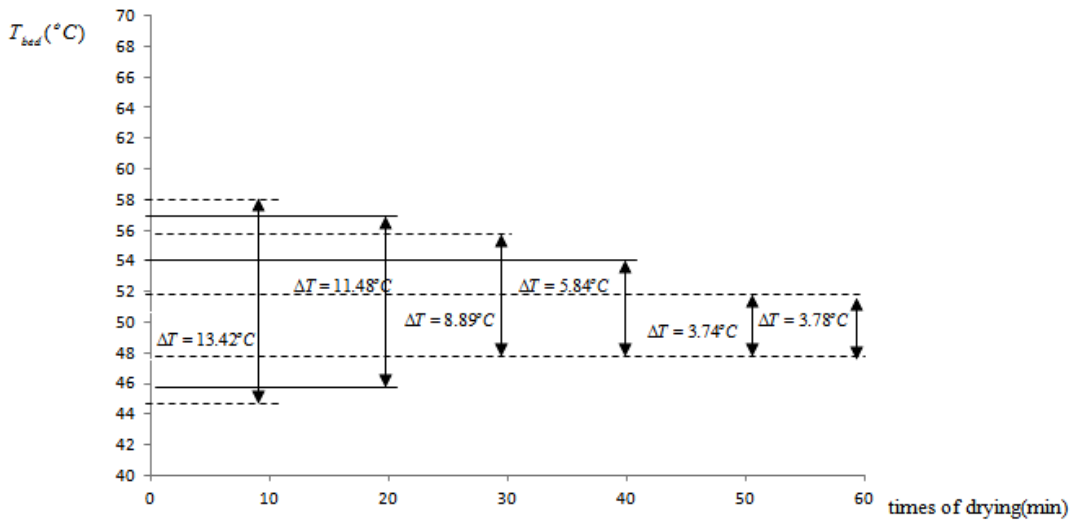


รูปที่ 11 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิณตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบด ที่เวลา 50 นาที



รูปที่ 12 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิณตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเบด ที่เวลา 60 นาที

รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T = \Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}$  ภายในเบดโดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่มองเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนที่สุดที่เวลาอบแห้งจาก 10 นาทีถึง 60 นาที หลังจากนั้นจนถึง 420 นาที มีผลความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยมาก



รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในเบดที่เวลา 10-60 นาที

## 5. สรุปผลการวิจัย

อุณหภูมิที่ทางเข้าเบดมีผลต่ออัตราการระเหยและการถ่ายเทมวล ดังนั้นแหล่งความร้อนจากอุณหภูมิของฮีตปั๊มเพียงอย่างเดียวใช้เวลาอบแห้ง 420 นาที สำหรับจุดกักเก็บที่น้อยกว่า 12 % moisture content dry-basis และผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด  $\Delta T = 13.42^{\circ}C$  เกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที หลังจาก 60 นาทีจนถึง 420 นาที ผลความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันน้อยมากประมาณ 1-2  $^{\circ}C$  จึงไม่ได้แสดงผลไว้ในกราฟ

## References

- [1] Sungkasem G. Efficiency Increasing for Corn Drying from Heater Preheat for Fluidized bed using Heat pump. In: The 20<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2006 Oct 18-20; Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. p.1315-61. (In Thai)
- [2] Surbkar R. Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles. Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering 2012;18(1):24-33. (In Thai)
- [3] Boonloi A. Drying of pepper corns in a fluidized-bed with helical distributor plate. In: The 20<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2006 Oct 18-20; Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. p.1184-87 (In Thai)

- [4] Somsak Damronglerd. Fluidization. Bangkok: Chulalongkorn University Press; 1985. (In Thai)
- [5] Diodati P, Paone N, Rossi GL. Comparison of velocity measurement by laser-dropper velocimetry hotwire anemometry and particle image velocimetry in a fully developed turbulent jet turbulent flows. Proceedings of the SPIE 1993;2052:315-22.

#### ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรเมธา สังข์เกษม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต จบการศึกษา วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ความเชี่ยวชาญ: เทคโนโลยีการอบแห้งและเครื่องจักรกลในการแปรรูปอาหาร

---

#### Article History:

Received: March 29, 2019

Revised: August 13, 2019

Accepted: August 22, 2019