

การระบายความร้อนจากอนุภาคนมผงโดยใช้เทคนิคฟลูอิดิเซชัน Cooling of Milk Particles by Fluidization

อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล^{1*} ณรงค์ฤทธิ์ ทองชุม² ณัฐนันท์ ไพรัตน์² และ ปิ่นสุภา ปิตรีกษ์สกุล³
Anurak Petiraksakul^{1*} Narongrit Thongchum² Nuttanun Pairut² and Pinsupha Petiraksakul³

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาการระบายความร้อนของนมผงโดยใช้เทคนิคฟลูอิดิเซชัน เบดที่ใช้ในการทดลองนี้สร้างขึ้นจากพลาสติกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้ ส่วนบรรจุอนุภาค (ความสูง 500 mm) ส่วนกระจายลม และห้องกระจายอากาศ ในการทดลองแต่ละครั้งใช้นมผงปริมาณ 400 g ในการศึกษาความดันลดตกคร่อมเบดของการเกิดฟลูอิดิเซชัน ความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของอากาศที่ทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 m/s ถึง 0.47 m/s ผลการทดลองพบว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชัน (U_{mf}) ให้ค่าเท่ากับ 0.08 m/s และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณจากสมการ Modified Ergun ให้ค่าเท่ากับ 0.088 m/s ซึ่งให้ค่าผิดพลาด 9.21% ในการทดลองระบายความร้อนจากนมผง โดยทำการทดลองลดอุณหภูมินมผงเริ่มต้นจาก 55°C จนถึง 37°C ที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในช่วง 0.32-0.47 m/s (10.19-14.97 m²-s) พบว่าการใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากสมการ Kothari ($Nu = CRe^{1.3}$) ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อ $C = 0.022$ และการใช้สัดส่วนมวลในการคำนวณในแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ดี

คำสำคัญ: ฟลูอิดิเซชัน การระบายความร้อน นมผง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อนุภาค

Abstract

The objective of this research purposes to investigate the process of milk cooling using fluidization technique. The 200-mm diameter, acrylic plastic fluidized bed dryer contains 3 sections, i.e. a 500 mm high particle chamber, a distributor and an inlet air chamber. In each experiment, the amount of 400g of milk powder was filled into the bed. To measure the pressure drop across the bed, air superficial velocity in the fluid bed was varied, ranging from 0.01 m/s to 0.47 m/s. The minimum fluidization velocity (U_{mf}) achieved was 0.08 m/s. In comparison with the 0.088 m/s estimation value from the modified Ergun equation, an error of 9.21% was observed. Through the cooling technique, milk powder was cooled down from 55°C to 37°C. The process was operated in the superficial velocity range of 0.32 to 0.47 m/s (10.19-14.97 m²-s). By using the heat transfer coefficients

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์และพลังงานหมุนเวียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8247, E-mail: arp@kmutnb.ac.th

calculated from the modified Kothari's equation ($Nu = CRe^{1.3}$), the decrease of bed temperature was best predicted when the average constant C was 0.022. The mathematical model also showed the better results when mass fractions were included in the calculation.

Keywords: Fluidization, Cooling, Milk Powder, Heat Transfer Coefficient, Particles

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากของเหลวหรือสารแขวนลอยให้เป็นผง ทำให้ง่ายต่อการเก็บรักษา การขนส่ง และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ คือการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นจึงช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างดี อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะสะสมที่ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) และไซโคลน (Cyclone) [1] ในขณะที่เดินเครื่องอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและไซโคลนยังสูงมากทำให้ความร้อนเกิดการถ่ายเทเข้าสู่ผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง สำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิดมีความไวต่อความร้อนมาก เมื่อได้รับความร้อนในช่วงเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ แนวทางการแก้ไขคือต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเครื่องอบแห้งรวมทั้งการลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านการทำให้เร็วที่สุด เทคนิคในการลดอุณหภูมิของอนุภาคผงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization) และการระบายความร้อนแบบพาหะลม (Pneumatic Cooling)

กระบวนการฟลูอิดิเซชันนี้เป็นกระบวนการที่ผ่านของไหลเข้าไปยังเบดหรือคอลัมน์ที่บรรจุอนุภาคไว้ เมื่อเพิ่มความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของของไหลเข้าไปยังเบดจนกระทั่งอนุภาคเริ่มมีการขยายตัวและเคลื่อนที่อย่างอิสระ อนุภาคที่เป็นของแข็งจะมีประพฤติกรรมคล้ายของเหลว ซึ่งเรียกความเร็วที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ณ

จุดนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum Fluidization Velocity, U_{mf}) และเมื่อเพิ่มความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของของไหลขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคหลุดออกจากเบดไปกับของไหล เรียกความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล ณ จุดนี้ว่าความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดิเซชัน (Terminal Fluidization Velocity, U_t) ซึ่งกระบวนการฟลูอิดิเซชันนี้จะทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างของไหลกับอนุภาคโดยตรงและทั่วถึง จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลขึ้นระหว่างอนุภาคกับของไหล หากของไหลที่ผ่านเข้าไปยังคอลัมน์เป็นอากาศแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยลดทั้งอุณหภูมิและความชื้นของอนุภาค เนื่องจากผงผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่แสดงพฤติกรรมทั้งเทอร์โมพลาสติกและไฮโกรสโคปิก (Thermoplastic and Hygroscopic Properties) หากอนุภาคมีอุณหภูมิสูงขณะออกจากห้องอบแห้ง จะทำให้ผิวของอนุภาคเหนียวและดูดซับความชื้นจากบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาค (Agglomeration) และยากต่อการชงละลายในภายหลัง [2]-[4] ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาหาสภาวะและสมการการถ่ายเทความร้อน และทำนายอัตราการลดอุณหภูมิของอนุภาคด้วยกระบวนการฟลูอิดิเซชัน

2. ทฤษฎี

2.1 ฟลูอิดิเซชัน

เมื่อของไหลมีการไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของของแข็งที่บรรจุในเบดจะเกิดความดันลดภายในเบดนั้น Ergun [5] ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของไหล (U) ที่ผ่านเบดกับความดันตกคละมเบด (ΔP) ของปรากฏการณ์ฟลูอิดิเซชัน ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = \left[\frac{150(1-\varepsilon)^2 U \mu}{\phi_s^2 \varepsilon^3 d_p^2} \right] + \left[\frac{1.75(1-\varepsilon) U^2 \rho}{\phi_s \varepsilon^3 d_p} \right] \quad (1)$$

โดย d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (m) L คือความสูงของเบด (m) g_c คือแฟกเตอร์แปลงหน่วย (Conversion Factor, $kg \cdot m / N \cdot s^2$) U คือความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลที่

ไหลผ่านเบต (m/s) ϵ คือช่องว่างในเบต (Void Fraction) μ คือความหนืดของของไหล (kg/m-s) ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m³) และ ϕ_s คือค่าแฟกเตอร์รูปร่างของอนุภาค

ความดันลดในเบตสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{(1-\epsilon_{mf})(\rho_p-\rho)g}{g_c} \quad (2)$$

โดย ϵ_{mf} คือช่องว่างในเบตที่เกิดฟลูอิดเซชันต่ำสุด (Void Fraction of Minimum Fluidization) และ ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m³)

ช่องว่างในเบตต่ำสุดขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดเซชันจะมีค่ามากกว่าปริมาตรช่องว่างในเบตหนึ่งเล็กน้อย ในขณะที่เบตยังอยู่ที่จุดของการเกิดฟลูอิดเซชันต่ำสุดนั้น สมการของความดันตกคล่อมเบตตามสมการที่ (2) สามารถนำมาประยุกต์ใช้โดยแทนค่าความดันตกคร่อมเบตในสมการที่ (1) จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$\frac{150\mu U_{mf}}{\phi_s^2 d_p^2} \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} + \frac{1.75\rho U_{mf}^2}{\phi_s d_p} \frac{1}{\epsilon_{mf}} = g(\rho_p - \rho) \quad (3)$$

ในเบตที่มีเม็ดของแข็งขนาดเล็กความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลของของไหลเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ ดังนั้นความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลต่ำสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดเซชันนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$U_{mf} = \left[\frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \right] \left[\left(\frac{\rho_p - \rho}{\mu} \right) g \right] \left[\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right] \quad (4)$$

เมื่อ $Re < 20$ เกิดในช่วงการไหลราบเรียบ (Laminar Flow) โดยที่เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$Re = \frac{\phi_s \rho U_i d_p}{\mu} \quad (5)$$

สำหรับเบตที่มีของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็ว

ซูเปอร์ฟิเชียลของของไหลสูงมาก ๆ จึงจะทำให้ของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดเซชันคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$U_{mf}^2 = \left[\frac{\phi_s d_p}{1.75} \right] \left[\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right] g \epsilon_{mf}^3 \quad (6)$$

เมื่อ $Re > 1,000$ เกิดในช่วงการไหลปั่นป่วน (Turbulent Flow)

เมื่ออนุภาคมีขนาดไม่เท่ากันและผสมอยู่ด้วยกัน การคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันเฉลี่ยสามารถคำนวณจากผลรวมของความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันในแต่ละขนาด ($U_{mf,i}$) คูณกับสัดส่วนมวลของอนุภาคในแต่ละขนาด (w_i) ดังนี้

$$\bar{U}_{mf} = \sum_i w_i U_{mf,i} \quad (7)$$

2.2 ความเร็วปลายของอนุภาค

ความเร็วปลายของอนุภาค (Terminal Particle Velocity) มีความสัมพันธ์กับแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Force) แรงลอยตัว (Buoyancy Force) และแรงต้านทานจากการเสียดทาน (Drag Force, F_d) โดยผลต่างของแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงลอยตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) ดังนี้

$$F_G = (\rho_p - \rho)gV_p \quad (8)$$

โดย F_G คือแรงลัพธ์จากแรงโน้มถ่วงและแรงลอยตัว V_p คือปริมาตรของอนุภาค (m³) และคำนวณค่าแรงเสียดทานได้จากสมการที่ (9) ดังนี้

$$F_d = \frac{C_D A_p \rho U_p^2}{2} \quad (9)$$

โดย A_p คือพื้นที่ฉาย (Projected Area) ของอนุภาค (m²) C_D คือค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Drag Coefficient) และ U_p คือความเร็วของอนุภาค (m/s)

เมื่อแรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับแรงเสียดทานจะได้สมการความเร็วปลายของอนุภาคทรงกลม

ดังสมการที่ (10)

$$U_t = \sqrt{\frac{4g}{3C_D} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) d_p} \quad (10)$$

เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าไม่เกิน 10^4 มีความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ตามสมการที่ (11) [6]

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (11)$$

และสมการที่ (10) สามารถประยุกต์ใช้เพื่อหาความเร็วสุดท้ายของอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม ได้ดังสมการที่ (12)

$$U_t = \sqrt{\frac{4g}{3C_D \phi_s} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) d_p} \quad (12)$$

ในทำนองเดียวกันความเร็วสุดท้ายของอนุภาคที่มีขนาดไม่เท่ากันและผสมอยู่ด้วยกัน สามารถคำนวณความเร็วสุดท้ายเฉลี่ย U_t จากผลรวมของความเร็วสุดท้ายในแต่ละขนาด (U_{ti}) คูณกับสัดส่วนมวลของอนุภาคในแต่ละขนาด (w_i) ดังนี้

$$\bar{U}_t = \sum_i w_i U_{t,i} \quad (13)$$

2.3 การถ่ายเทความร้อน

Kunii [7] สรุปงานของ Kothari ในผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในก๊าซฟลูอิดไอเซนชัน

โดยค่าของเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) สามารถคำนวณตามสมการที่ (14)

$$Nu_{bed} = \frac{hd_p}{k_g} = 0.03Re^{1.3}, Re = 0.1-100 \quad (14)$$

โดย h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2-K) และ k_g คือ ค่าการนำความร้อน ($W/m-K$)

เมื่อคำนวณหาเลขนัสเซลท์ของอนุภาคที่มีขนาดไม่เท่ากันและผสมอยู่ด้วยกัน เลขนัสเซลท์เฉลี่ย Nu_{bed} ได้จากผลรวมของเลขนัสเซลท์ในแต่ละขนาด ($Nu_{bed,i}$)

คูณกับสัดส่วนมวลของอนุภาคในแต่ละขนาด (w_i) ดังนี้

$$\bar{Nu}_{bed} = \sum_i w_i Nu_{bed,i} \quad (15)$$

สมการการถ่ายเทความร้อน แสดงดังนี้

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T-T_0) \quad (16)$$

$$\text{และ } Q = m_p C_{ps}(T-T_0) \quad (17)$$

โดย Q คือค่าความร้อน (W), t คือเวลา (s) m_p คือมวลของอนุภาค (kg) A คือพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน (m^2) C_{ps} คือค่าความจุความร้อนของอนุภาค ($kJ/kg-K$) T คืออุณหภูมิของวัตถุ (K) และ T_0 คืออุณหภูมิบรรยากาศ (K)

เมื่อแทนค่า Q และอินทิเกรตจะได้สมการในการหาเวลาในการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$t = \left(\frac{m_p C_{ps}}{hA} \right) \ln \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty} \quad (18)$$

$$= \left(\frac{\rho_p d_p C_{ps}}{6\phi_s h} \right) \ln \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty} \quad (19)$$

โดย T_∞ คืออุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมขณะที่ระบายความร้อนจากวัตถุ (K)

เวลาใดๆ ที่อนุภาคเส้นผ่านศูนย์กลาง i มีอุณหภูมิลดลงจาก T_0 ถึง T คำนวณดังนี้

$$t_i = \frac{d_{pi}}{h_i} \left(\frac{\rho_p C_{ps}}{6\phi_s} \right) \ln \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty} \quad (20)$$

อุณหภูมิของอนุภาคเส้นผ่านศูนย์กลาง i ที่เวลาใดๆ ($T_{i,t}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (21)

$$T_{i,t} - T_\infty = (T_0 - T_\infty) \exp \left(- \frac{t}{\frac{d_{pi}}{h_i} \left(\frac{\rho_p C_{ps}}{6\phi_s} \right)} \right) \quad (21)$$

อุณหภูมิเบตเฉลี่ย \bar{T}_i คำนวณจากผลรวมของอุณหภูมิเบตในแต่ละขนาด ($T_{i,T}$) คูณกับสัดส่วนมวลของอนุภาคในแต่ละขนาด (w_i) ดังนี้

$$\bar{T}_i = \sum_i w_i T_{i,T} \quad (22)$$

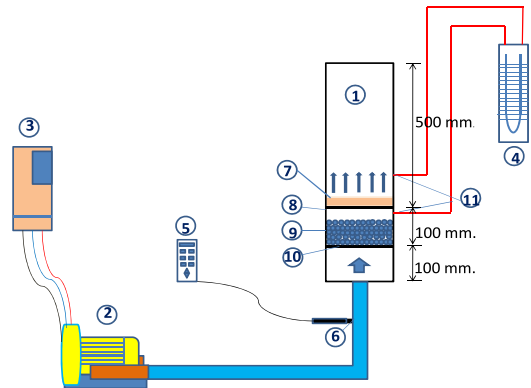
3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การหาขนาดของนมผง

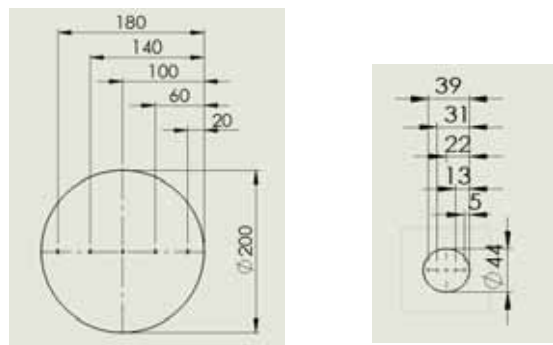
ชั่งนมผงปริมาณ 100 g นำเข้าเครื่องเขย่า (Sieve Analyzer) ที่มีตะแกรงขนาดต่างๆ ใช้ความถี่ 60 Hz เป็นเวลา 20 นาที นำนมผงที่ค้างในแต่ละภาตชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่า สัดส่วนมวล (Mass Fraction) ของอนุภาคนมผง

3.2 รายละเอียดชุดทดลองฟลูอิดไดเซชัน

รายละเอียดส่วนประกอบชุดทดลองฟลูอิดไดเซชันแสดงดังรูปที่ 1 จัดสร้างขึ้นเองประกอบด้วยหอทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm ทำจากอะคลิลิกใส แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนบน (เหนือตะแกรง 300 เมช) เป็นที่กักเก็บอนุภาค ความสูง 500 mm ส่วนตรงกลางเป็นที่บรรจุลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm เพื่อให้มีการกระจายตัวของลม และส่วนล่างเป็นช่องว่างเพื่อช่วยการกระจายลม ลมที่ไหลผ่านเบตเกิดจากพัดลม (Blower) ชนิด Ring Blower (VENTEX รุ่น 2RB410H16) กำลัง 0.85 kW ผลิตในประเทศไทย ควบคุมอัตราการไหลของลมโดยการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ จากอินเวอร์เตอร์ของ YASKAWA รุ่น F7 ผลิตในประเทศญี่ปุ่น ท่อทางเข้าของลมมีการเจาะรูเพื่อใช้วัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) Testo รุ่น 435 Vane Probe มีค่าความถูกต้อง 1.5% ของค่าที่อ่าน ผลิตในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี โดยการเลื่อนหัววัด (Sensor) ไปตามเส้นผ่านศูนย์กลางท่อแสดงตามรูปที่ 2 (ข) และระหว่างตะแกรงบน (300 เมช) ได้ติดตั้งมาโนมิเตอร์ (Manometer) เพื่อวัดความดันตกคร่อมเบต



รูปที่ 1 ชุดทดลองฟลูอิดไดเซชัน 1) หอทดลองฟลูอิดไดเซชัน 2) พัดลม 3) เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Inverter) 4) มาโนมิเตอร์ 5) เครื่องวัดความเร็วลม 6) หัววัดความเร็วลม 7) นมผงปริมาณ 400 g สูงจาก Plate ที่รองรับอนุภาค 27 mm 8) Plate 300 mesh 9) ชั้นลูกแก้วกระจายอากาศความสูง 70 mm 10) แผ่นกระจายอากาศสร้างจากอะคลิลิกใสเจาะรูแบบส้อมขนาด 3 mm 11) จุดวัดความดันตกคร่อม 2 จุด คือสูงจาก Plate 50 mm และต่ำจาก Plate 15 mm โดยมีตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอนุภาคนมผงและความเร็วลมแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ก) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอนุภาคนมผงขนาดหน้าตัด 200 mm ข) ตำแหน่งการวัดความเร็วลมผ่านหน้าตัดท่อขนาด 44 mm

3.3 การทดลองระบายความร้อน

ซึ่งนมผง 400 g ใส่บีกเกอร์ขนาดปริมาตร 1,000 ml อบไว้ที่ 120°C ประมาณ 30 นาที นมผงในบีกเกอร์มีอุณหภูมิประมาณ 57°C นำนมผงที่ผ่านการอบจากตู้อบเทลงในหอยทอทดลองฟลูอิดิเซชัน ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดค่าอุณหภูมิได้แก่ อุณหภูมิอากาศภายนอกหอยทอทดลอง ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่หอยทอทดลอง อุณหภูมิอนุภาคในเบตวัดค่า 5 ตำแหน่งตามเส้นผ่านศูนย์กลางแสดงตามรูปที่ 2ก และอุณหภูมิอากาศภายในหอยทอทดลองที่ตำแหน่งสูงจากผิวหน้าตัดเบต 100 mm ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศขาออกหลังจากผ่านเบต การทดลองนี้วัดความเร็วลมเฉลี่ยจากเครื่องวัดความเร็วลมและปรับความเร็วลมโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์

4. ผลการทดลอง

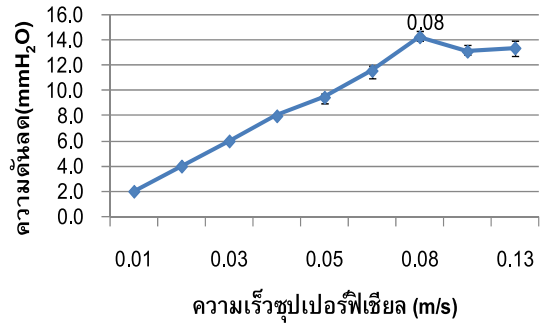
4.1 ขนาดและสัดส่วนมวลของนมผง

จากการทดลองจะพบว่าอนุภาคของนมผงมีขนาดในช่วง 180 μm –1 mm เกิดการกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของเบต เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศ ความดันตกคร่อมเบตมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง ณ ความเร็วหนึ่งที่มีความดันตกคร่อมมีค่าสูงสุด และลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วลมมากขึ้นอีก จากนั้นความดันตกคร่อมจะกลับมามากขึ้นโดยมีการเพิ่มหรือลดเพียงเล็กน้อย จากรูปที่ 3 พบว่าที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลเท่ากับ 0.08 m/s คือจุดซึ่งแสดงถึงความเร็วต่ำสุดที่เริ่มเกิดฟลูอิดิเซชัน (\bar{U}_{mf})

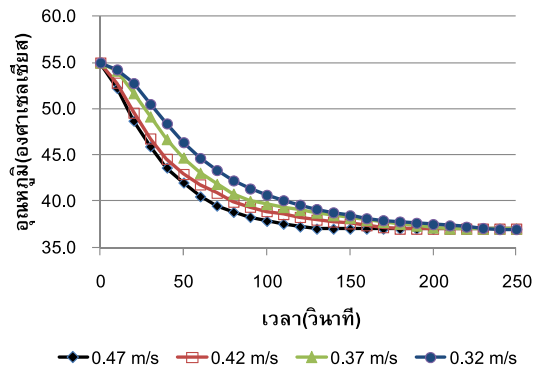
จากการคำนวณค่า ด้วยสมการ (3) และ (7) โดยใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 2 ให้ค่า $\bar{U}_{mf} = 0.08$ m/s และจากการทดลองมีค่า $\bar{U}_{mf} = 0.088$ m/s จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความผิดพลาดเท่ากับ 9.21 % Error

ตารางที่ 1 ขนาดและสัดส่วนมวล (Mass Fraction) ของนมผง

ขนาด (mm)	สัดส่วนมวล (w_i)
1.000	0.05
0.500	0.45
0.355	0.27
0.180	0.23
รวม	1.00



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลกับความดันตกคร่อมของเบตสำหรับการทดลองการเกิดฟลูอิดิเซชันของนมผง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเบตของการทดลองการถ่ายเทความร้อน

ตารางที่ 2 สมบัติของสาร [8]

พารามิเตอร์	ค่า
ρ_p (kg/m ³)	1,076
ρ (kg/m ³)	1.1281
μ (kg/m-s)	189.32×10^{-7}
ϕ_s	0.53
\mathcal{E}_{mf}	0.727
C_{ps} (kJ/kg-K)	3.818
k_g (W/m-K)	26.89×10^{-3}

4.3 ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อน

ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนของนมผงด้วยก๊าซฟลูอิดิเซชัน โดยใช้นมผงน้ำหนัก 400 g ความสูงของ

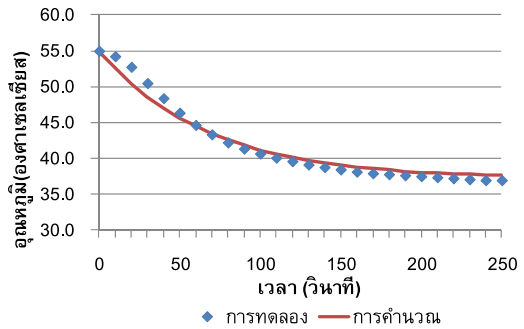
เบดประมาณ 27 mm ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยของเบดลดลงเมื่อเวลาในการระบายความร้อนเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าที่มีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิบรรยากาศ โดยการเพิ่มความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียลของอากาศส่งผลให้การระบายความร้อนเกิดขึ้นได้ดีและเร็วขึ้น โดยผลการทดลองที่ความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียลของอากาศเท่ากับ 0.47 m/s ให้ผลที่เร็วกว่าที่ความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียลของอากาศเท่ากับ 0.32 m/s

4.4 ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อน

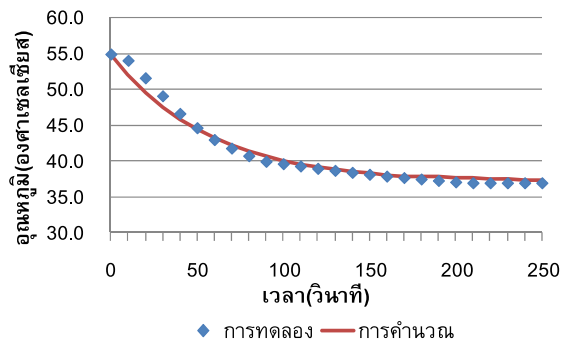
การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของนมผงด้วยก๊าซฟลูอิดไอซ์เซชัน โดยใช้สมการจากการศึกษาของ Kothari [7] และสมการการถ่ายเทความร้อน เป็นหลักการในการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการลดลงของอุณหภูมินมผง ตามสมการ (14), (21) และ (22) พบว่าผลการทดลองมีค่าต่างจากการคำนวณอย่างไรก็ตามเมื่อปรับสมการ (14) เป็นสมการทั่วไปดังนี้ $Nu_{bed} = CRe^{1.3}$ โดย C คือค่าคงที่ เมื่อนำผลการทดลองมาทำ Curve fitting พบว่าค่าคงที่ C ที่ให้ค่าการคำนวณการลดลงของอุณหภูมิเบดเฉลี่ยต่อเวลามีค่าขึ้นกับความเร็วลมขาเข้า โดยผลการคำนวณทั้งหมดในช่วงความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียล 0.32-0.47 m/s ให้ C ในช่วง 0.021-0.023 และให้ค่าเฉลี่ยที่ 0.022 ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 5-8 และตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียล ค่าคงที่ C

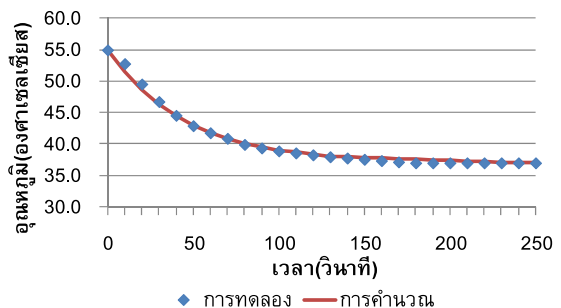
velocity (m/s)	C	sum square of error	C (ave)	sum square of error
0.32	0.021	20.6	0.022	21.8
0.37	0.021	14.8	0.022	16.5
0.42	0.022	4.2	0.022	4.2
0.47	0.023	6.9	0.022	7.2



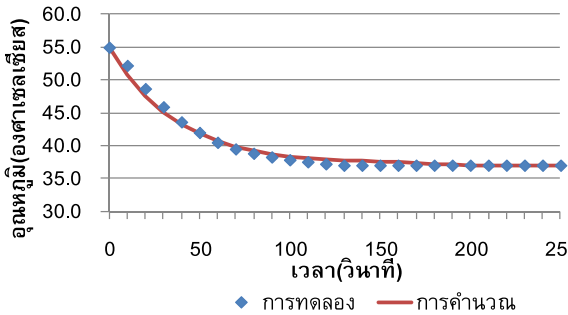
รูปที่ 5 เปรียบเทียบระหว่างผลจากการคำนวณกับการทดลอง ที่ความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียล 0.32 m/s และค่า $C = 0.021$



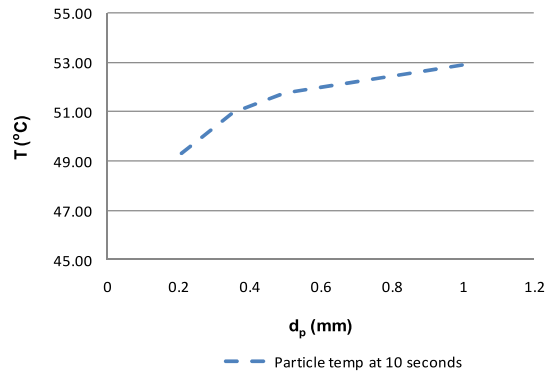
รูปที่ 6 เปรียบเทียบระหว่างผลจากการคำนวณกับการทดลอง ที่ความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียล 0.37 m/s และค่า $C = 0.021$



รูปที่ 7 เปรียบเทียบระหว่างผลจากการคำนวณกับการทดลอง ที่ความเร็วซูปเปอร์ฟิเซียล 0.42 m/s และค่า $C = 0.022$



รูปที่ 8 เปรียบเทียบระหว่างผลจากการคำนวณกับการทดลอง ที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล 0.47 m/s และค่า $C = 0.023$



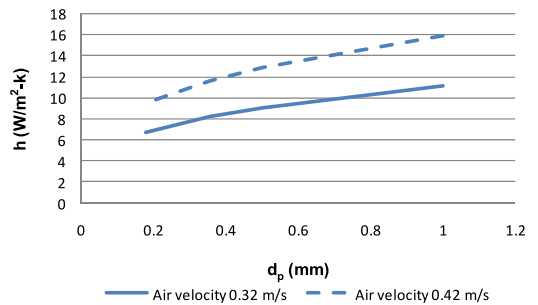
รูปที่ 9 การระบายความร้อนจากเบดที่มีอนุภาคขนาดต่างกัน ณ เวลาผ่านไป 10 วินาที ที่อุณหภูมิอนุภาคเริ่มต้น 55°C

5. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชันมีค่าเท่ากับ 0.08 m/s และจากการคำนวณด้วยการตัดแปลงสมการ Ergun ได้ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชันเฉลี่ยเท่ากับ 0.088 m/s ซึ่งการทดลองมีค่าความผิดพลาด 9.21 %

ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเซชันมีค่าขึ้นกับขนาดอนุภาค โดยการใช้ค่าสัดส่วนมวลมาคำนวณเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดจะให้ค่าที่ถูกต้องกว่าการคำนวณจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

สมการทำนายค่าอุณหภูมิของเบดเป็นฟังก์ชันขึ้นกับขนาดของอนุภาค โดยที่เวลาหนึ่งๆ การระบายความร้อนจากเบดที่มีขนาดอนุภาคต่างกันทำให้อนุภาคมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูปที่ 9 โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่า อีกทั้งมีความร้อนสะสมภายในอนุภาคน้อยกว่า เมื่อมีการระบายความร้อนจึงส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กมีอุณหภูมิต่ำกว่า ในแบบจำลองคณิตศาสตร์อนุภาคที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้เลขเรย์โนลด์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงตามลำดับ (แสดงตามรูปที่ 10) การระบายความร้อนจากอนุภาคจึงเกิดไม่เท่ากัน ดังนั้น สมการที่ใช้คำนวณโดยใช้ค่าสัดส่วนมวลตามสมการ (22) จึงให้ค่าที่ดีกว่าการคำนวณโดยใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย



รูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอนุภาคขนาดต่างกัน

อย่างไรก็ตามค่าคงที่ C ตามสมการ $Nu_{bed} = CRe^{1.3}$ ตามผลงานของ Kothari [7] ในการทดลองนี้พบว่า $C = 0.022$ ให้ค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุดในการทำนายผลการระบายความร้อนจากอนุภาคเริ่มต้น 55°C ถึง 37°C ในช่วงความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล 0.32-0.47 m/s (หรือความเร็วลมต่อพื้นที่หน้าตัดของเบด 10.19-14.97 m/m²·s)

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Masters, *Spray Drying Handbook*, 5th ed., London: Longman Scientific & Technical, 1991.
[2] S. Mani, S. Jaya, and H. Das, "Sticky Issues



- on Spray Drying of Fruit Juices,” The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems, presentation at the 2002 ASAE/CSAE North-Central Intersectional Meeting, Parktown Hotel, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2002.
- [3] J. A. Grabowski, V.-D. Truong, and T C. R. Daubert, “Spray-Drying of Amylase Hydrolyzed Sweet potato Puree and Physicochemical Properties of Powder,” *Journal of food Science*, vol. 71, Nr. 5, E209-E217, 2006.
- [4] A., Gianfrancesco, C. Turchiulin, and E. Dumoulin, “Powder agglomeration during the spray-drying process: measurements of air properties,” *Dairy Science Technology*, vol. 88, pp.54-64, 2008.
- [5] W.L. McCabe and J. C. Smith, *Unit Operation of Chemical Engineering*, 7th ed., New York: Mc Graw-Hill, 2005, pp.177-187.
- [6] Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment and Reuse*, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2004, pp.362-367.
- [7] D. Kunii, *Fluidization Engineering*, 2nd ed., Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.
- [8] Narongrit Thongchum and Nuttanun Pairut, “Cooling of particles using fluidization,” The project report for the Bachelor’s Degree, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2009.