

การอบแห้งถั่วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน

Application of the Rotating Fluidized Bed Technique in Peanuts Drying

ร็อยทิส ญาติเจริญ^{1*} และ วัชรินทร์ ดงบัง²

Roitis Yartjaroen^{1*} and Watcharin Dongbang²

^{1*}นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

²อาจารย์ประจำ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

^{1*}Graduate students in Master of Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,
Bangsaen Rd., SaenSuk, MuangChonburi, Chon Buri, Thailand 20130

²Lecturer in Master of Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,
Bangsaen Rd., SaenSuk, MuangChonburi, Chon Buri, Thailand 20130

*Corresponding author, E-mail: yart_3@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารอบแห้งถั่วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน โดยอบแห้งแบบเป็นงวด อุณหภูมิที่ศึกษาแบ่งเป็น 3 ระดับคือ 60, 70 และ 80°C อัตราการไหลของลมร้อนอยู่ที่ 0.09 kg/s, 0.10 kg/s และ 0.11 kg/s ฝักถั่วลิสงมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 56%wb ต้องการอบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 12%wb ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิลมร้อน และอัตราการไหลของลมร้อนมีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงและถั่วมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับสีของถั่วที่ผ่านการตากแดด อัตราส่วนการอบแห้งได้ไฟต์เข้ากับแบบจำลองของ Lewis และ Page พบว่า แบบจำลองทั้ง 2 สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การอบแห้ง ฟลูอิดไดซ์เบด แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

Abstract

This paper presents the study of peanuts drying using the Rotating Fluidized bed technique. The applied conditions for drying were divided in 3 levels of hot-air temperature, that were, 60,70, and 80°C, and the applied hot-air mass flow rate were 0.09 kg/s, 0.1 kg/s, and 0.11 kg/s. The initial moisture content of peanuts were 56% (wb) and

final requirement were 12% (wb). The experimental results shown that the hot-air temperature and hot-air flow effected the drying time and quality of product. In other words, when the temperatures were increased the drying times will be reduced and the color of peanuts will be more darked. The curves were fitted to Lewis and Page models to estimate a suitable model for drying and parameters were evaluated by non-linear regression analysis. The models were compared based on their coefficient of determination. Lewis model and Page model were found satisfactorily describe the drying behavior of peanut.

Keywords: peanuts drying, fluidized bed, centrifugal force

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทั่วครั้งหนึ่งของประชากรไทยมีอาชีพเพาะปลูก ดังนั้นการพัฒนาการเกษตรจึงเป็นการพัฒนาที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะจะส่งผลให้ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศมีรายได้เพิ่มขึ้น มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ผลผลิตสินค้าส่วนใหญ่ของไทย ได้แก่ ข้าว ถั่วลิสง มันสำปะหลัง ข้าวโพด และพืชอื่นๆอีกหลายชนิด ซึ่งผลผลิตบางชนิดมีเฉพาะบางฤดูกาล แต่ความต้องการของผู้บริโภคนั้นมีตลอดทั้งปี ดังนั้นจึงต้องมีการถนอมอาหารเพื่อที่จะเก็บรักษาอาหารไว้ให้ได้ยาวนานที่สุดโดยที่ไม่เน่าเสีย อีกทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรและลดปัญหาผลผลิตล้นตลาดได้อีกด้วย สาเหตุที่สำคัญในการเน่าเสียของอาหาร คือ จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ แบคทีเรีย และเชื้อรา ดังนั้นความชื้นในผลผลิตจึงมีผลอย่างมากในการถนอมอาหาร ถ้าความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกิดจุลินทรีย์ประเภทเชื้อรา โดยเฉพาะสารอะฟลาทอกซิน (Aflatoxin) ที่อยู่ในเชื้อรา (กาญจนา บันสิทธิ์ และ คณะ, 2541) เป็นสารก่อมะเร็งที่เป็นพิษต่อผู้บริโภค เมล็ดพืชจึงจำเป็นต้องมีความชื้นสุดท้ายในการเก็บรักษาเพื่อให้ปลอดภัยจากสารดังกล่าว ดังนั้นการอบแห้งจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยถนอมอาหารและแก้ปัญหาเชื้อราในเมล็ดพืชได้ หลักการในการ

อบแห้งมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (Sébastien, 2010) ตู้ไมโครเวฟ (Kassem et al., 2011) การอบแห้งสุญญากาศ (Takahiro and Akio, 2007) เป็นต้น

เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์มากมาย เช่น พริก ข้าวโพด ถั่วลิสง เป็นต้น ซึ่งหลักการทำงานง่ายๆ คือ จะทำให้วัสดุที่อยู่ในเบด มีพฤติกรรมคล้ายของไหล โดยใช้ของไหลสร้างแรงยกตัวให้กับวัสดุ ทำให้วัสดุในเบดลอยตัวอย่างเป็นอิสระ และเทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการอบแห้งแบบอื่น คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว เพราะผิวสัมผัสระหว่างผลิตภัณฑ์และลมร้อนมีมากกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง จากที่กล่าวมาข้างต้น เป็นเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravitational Fluidized bed : GFB) แต่เทคนิค GFB ก็มีข้อจำกัดอยู่ เช่น จากความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอ จึงเกิดการขยายตัวของฟองก๊าซ ทำให้เมล็ดพืชจับตัวเป็นก้อน ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนต่ำ ทำให้เมล็ดพืชแห้งช้า และแห้งไม่สม่ำเสมอ (Nakamura et al., 2009) เป็นต้น ดังนั้นจึงเลือกเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบกังหัน (Rotating Fluidized bed : RFB) ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่า GFB ในหลายๆด้าน เช่น

ไม่มีปัญหาเรื่องการขยายตัวของฟองก๊าซ ทำให้เมล็ดพืชแห้งอย่างสม่ำเสมอ เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันที่สม่ำเสมอกว่า ใช้พลังงานน้อยกว่า เพราะความเร็วลมที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันใน RFB มีค่าน้อยกว่าความเร็วลมของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันใน GFB ทำให้ลดขนาดโบร์เวอร์ได้ทำให้ใช้พื้นที่น้อยกว่า (Ramli and Daud, 2008) ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลดีกว่า การประยุกต์ใช้ GFB ในงานด้านการอบแห้งนั้นได้พบอย่างมากมายและใช้ได้ดี แต่สำหรับ RFB นั้นยังพบว่ามีงานวิจัยน้อยทั้งที่มีข้อได้เปรียบหลายๆ ด้าน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน หรือ RFB ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าแบบ GFB อยู่หลายๆด้าน มาใช้ในการอบแห้งถั่วลิสงซึ่งมีลักษณะรูปทรงคล้ายทรงกระบอกตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งแบบชั้นบางเพื่อใช้ประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องต่อไปด้วย

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการอบแห้งฝักถั่วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน
2. เพื่อหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งฝักถั่วลิสงแบบชั้นบาง

3. ทฤษฎี

3.1 ความชื้นเริ่มต้นของถั่วลิสง

การหาความชื้นเริ่มต้นในฝักถั่วลิสงสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASAE (Joseph, 1989) โดยนำฝักถั่วลิสงมาแยกเมล็ดกับเปลือกออกจากกัน แล้วคำนวณหาความชื้นในเปลือกและเมล็ด จากนั้นจึงนำมาคำนวณความชื้นเริ่มต้นของฝักถั่วลิสง ซึ่งมีสมการต่อไปนี้

คำนวณร้อยละโดยมวลของเปลือกถั่วคังสมการ (1)

$$A = \left(\frac{m_{s.in}}{m_p} \right) * 100\% \quad (1)$$

- A คือ ร้อยละ โดยมวลของเปลือกถั่ว (%)
 $m_{s.in}$ คือ มวลเริ่มต้นของเปลือกถั่ว (g)
 m_p คือ มวลเริ่มต้นของเมล็ดและเปลือกถั่ว (g)

คำนวณร้อยละของเมล็ดถั่วคังสมการ (2)

$$B = \left(\frac{m_{k.in}}{m_p} \right) * 100\% \quad (2)$$

- B คือ ร้อยละ โดยมวลของเมล็ดถั่ว (%)
 $m_{k.in}$ คือ มวลเริ่มต้นของเมล็ดถั่ว (g)
 m_p คือ มวลเริ่มต้นของเมล็ดและเปลือกถั่ว (g)

คำนวณค่าความชื้นในเปลือกถั่วคังสมการ (3)

$$C = \left(\frac{m_{s.in} - m_{s.f}}{m_{s.in}} \right) * 100\% \quad (3)$$

- C คือ ความชื้นในเปลือกถั่ว (%wb)
 $m_{s.in}$ คือ มวลเริ่มต้นของเปลือกถั่ว (g)
 $m_{s.f}$ คือ มวลสุดท้ายของเปลือกถั่ว (g)

คำนวณค่าความชื้นในเมล็ดถั่วคังสมการ (4)

$$D = \left(\frac{m_{k.in} - m_{k.f}}{m_{k.in}} \right) * 100\% \quad (4)$$

- D คือ ความชื้นในเมล็ดถั่ว (%wb)
 $m_{k.in}$ คือ มวลเริ่มต้นของเมล็ดถั่ว (g)
 $m_{k.f}$ คือ มวลสุดท้ายของเมล็ดถั่ว (g)

คำนวณความชื้นเริ่มต้นในฝักถั่วลิสง (5)

$$M_{in} = \frac{(D * B) + (C * A)}{100} \quad (5)$$

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นในฝักถั่วลิสง (%wb)

A คือ ร้อยละโดยมวลของเปลือกถั่ว (%)

B คือ ร้อยละโดยมวลของเมล็ดถั่ว (%)

C คือ ความชื้นในเปลือกถั่ว (%wb)

D คือ ความชื้นในเมล็ดถั่ว (%wb)

3.2 แบบจำลองการอบแห้ง

งานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองการอบแห้งที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในการอบแห้งดังสมการต่อไปนี้

LEWIS Model (Lewis, 1921)

$$MR = \exp(-kt) \quad (6)$$

PAGE Model (Page, 1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (7)$$

เมื่อ k , t และ n เป็นค่าคงที่ ซึ่งหาได้จากการพิจารณาพล็อตของ อัตราการอบแห้ง (Moisture ratio, MR) หาได้จากการนำผลการทดลองมาคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (8)$$

กำหนดให้

MR คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น จากสมการที่ (5)

3.3 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) หมายถึงสัมประสิทธิ์ของตัวแปร x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร y ได้ มีรูปแบบสมการดังนี้

$$R^2 = SSR / SST \quad (9)$$

SSR คือ ความแปรปรวนของ y ที่เกิดขึ้นกับ x

SST คือ ความแปรปรวนของ y ทั้งหมด

3.4 ความดันลดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

การหาความดันลดในฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสำคัญในการออกแบบ ด้วยสมการของ Demircan (Demircan et al., 1978) ดังนี้

$$\Delta P = [(1 - \varepsilon)\rho_s + \varphi_f]Gg(r_o - r_i) \quad (10)$$

กำหนดให้

ΔP คือ ความดันลดในฟลูอิดไดซ์เบด

ε คือ สัดส่วนช่องว่างอากาศกับฝักถั่วลิสง

ρ_s คือ ความหนาแน่นของฝักถั่วลิสง

ρ_f คือ ความหนาแน่นของลมร้อน

G คือ อัตราส่วนระหว่างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกับแรงโน้มถ่วงของโลก มีสมการดังนี้

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

r_o คือ รัศมีนอกสุดของถังหมุน

r_i คือ รัศมีในสุดของถังหมุน

อัตราส่วนระหว่างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง F_c กับแรงโน้มถ่วงของโลก F_g มีสมการดังนี้

$$G = \frac{F_c}{F_g} = \frac{mr_o\omega^2}{mg} = \frac{r_o\omega^2}{g} \quad (11)$$

ความเร็วเชิงมุม ω คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (12)$$

กำหนดให้

N คือ ความเร็วรอบของถังหมุน

3.5 ความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

สำหรับการออกแบบเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน จำเป็นต้องมีการคำนวณความเร็วลมและอัตราการไหลของลม เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกขนาดของโบร์เวอร์ จึงได้คำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยสมการของ Demircan (Demircan et al., 1978) ดังนี้

$$U_{mf} = \frac{\mu_f}{d_s \rho_f} \left[\{(33.7)^2 + 0.0408Ga\}^{0.5} - 33.7 \right]$$

(13)

เมื่อ

$$Ga = \frac{\rho_f (\rho_s - \rho_f) G g d_s^3}{\mu_f^2} \quad (14)$$

และหาอัตราการไหลเชิงมวลจากสมการที่(15)

$$\dot{m} = \rho U_{mf} A \quad (15)$$

กำหนดให้

U_{mf} คือ ความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด

μ_f คือ ความหนืดของลมร้อน

d_s คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของฝักถั่วลิสง

A คือ พื้นที่รอบถังหมุน

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวล

4. ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

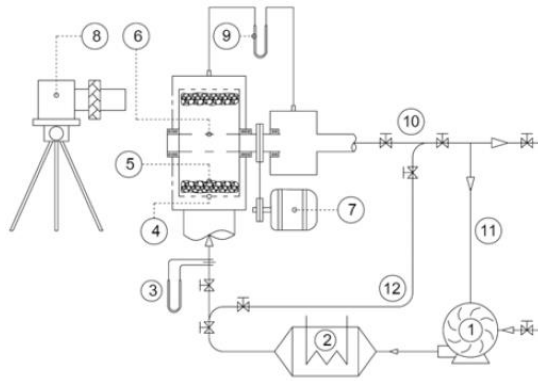
การศึกษาการอบแห้งนี้ ได้ออกแบบชุดทดลองการอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน โดยการศึกษาการอบแห้งที่อุณหภูมิระหว่าง 60, 70 และ 80°C มีการหมุนเวียนลมร้อนกลับมาใช้ซ้ำอีกประมาณ 80% โดยแต่ละอุณหภูมิมีอัตราการไหลของลมร้อนที่ต่างกัน คือ 0.09 kg/s, 0.10 kg/s และ 0.11 kg/s ตามลำดับจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (1)-(5) ทำให้ได้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 56% wb เป้าหมายการอบแห้งเพื่อลดความชื้นฝักถั่วลิสงให้เหลือประมาณ 12%wb โดยมีอุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลองดังนี้

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการศึกษาครั้งนี้ ได้ถูกสร้างขึ้นดังรูปที่ 1 ซึ่งมีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 2 โดยหมายเลขที่กำกับไว้มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 ภาพเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 2 แผนภาพเครื่องอบแห้ง

เครื่องเป่าลม(1) ทำหน้าที่เป่าลมผ่าน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า(2) จากนั้นลมร้อนจะไหลผ่านแผ่นออริฟิตซึ่งติดตั้ง ท่อรูปตัว U (3) เพื่อวัดอัตราการไหลของลมร้อน ลมร้อนจะผ่านไปยังถังหมุนที่ภายในมีเบดของถั่วลิสง (4) จากนั้นจะไหลผ่านชุดกรองอากาศ(6) โดยที่มีมอเตอร์ (7) ขับเคลื่อนถังหมุน และมีกล้องความเร็วสูง(8) บันทึกภาพพฤติกรรมเกิดการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ท่อรูปตัว U (9) เพื่อวัดความดันตกในเบด ลมร้อนจะไหลผ่านออกมายังท่อ(10) มีการปล่อยลมร้อนทิ้งบางส่วน และนำลมร้อนมาใช้ใหม่ดังท่อ(11) และท่อ(12) ทำหน้าที่เป็นทางอ้อม (bypass) ของลมร้อน

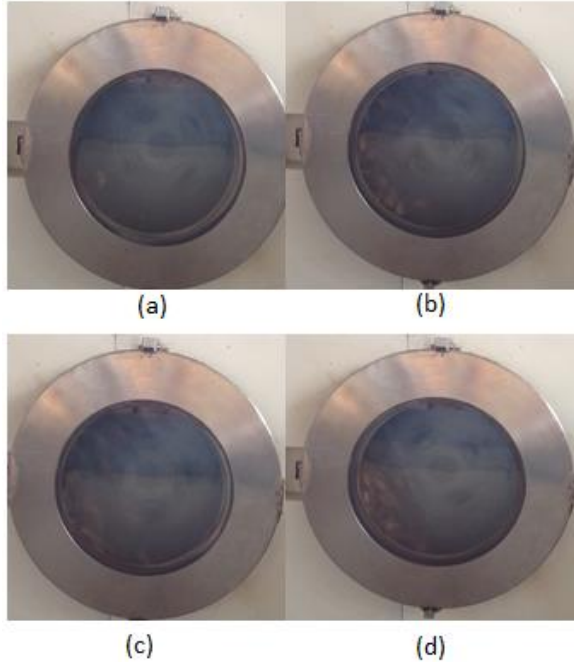
4.2 ขั้นตอนการวิจัย

ฝักถั่วลิสงถูกนำไปชั่งน้ำหนักครั้งละ 500g มีความชื้นเริ่มต้น 56 %wb จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน ที่อุณหภูมิทางเข้าเครื่องอบแห้งแต่ละระดับ โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 60°C ,70°C และ 80°C และแต่ละอุณหภูมิมีอัตราการไหลของลมร้อนต่างกัน 3 ระดับด้วยกันที่ 0.09 kg/s , 0.10 kg/s และ 0.11 kg/s ทำการบันทึกผลการทดลองโดยทุกๆ 10 นาที ทุกๆ เงื่อนไข การทดลองได้ดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาคิดค่าเฉลี่ย

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

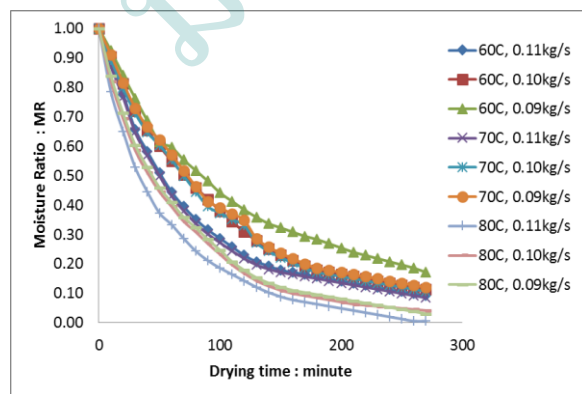
งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด โดยการแปรผันค่าอัตราการไหลของลมร้อนและความเร็วรอบของถังหมุนเพื่อหาสภาวะที่ทำให้ฝักถั่วลิสง กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกับแรงโน้มถ่วงของโลก หรือค่า G จากสมการที่ (11) มีค่า $G = 2$ พบว่า อัตราการไหลของลมร้อนที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด อยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.12kg/s พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจำแนกออกเป็น 4 รูปแบบคือ รูปที่ 3(a) Non-Fluidization คือ ฝักถั่วลิสงจะถูกเหวี่ยงให้ไปติดที่ผนังของห้องอบแห้งเนื่องจากอิทธิพลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก รูปที่ 3(b) Partial Fluidization คือ เกิดฟลูอิดไดซ์เบดเพียงบางส่วนเมื่อมีการเป่าลมร้อนด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.06 - 0.08 kg/s เนื่องจากแรงลมที่ไหลผ่านฝักถั่วลิสงในแนวรัศมีทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกับแรงโน้มถ่วงของโลกเกิดการสมดุลของได้บางส่วน รูปที่ 3(c) Uniform Fluidization คือ เกิดฟลูอิดไดซ์เบดอย่างสม่ำเสมอ ที่อัตราการไหลระหว่าง 0.09 – 0.11kg/s เป็นผลมาจากความสมดุลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง กับแรงโน้มถ่วงของโลก รูปที่ 3(d) คือ Turbulent Fluidization คือ การเกิดความปั่นป่วนภายในถังหมุน จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลมีค่ามากกว่า 0.12kg/s เนื่องจากอัตราการไหลของลมร้อนที่ค่าสูงๆมีอากาศทำให้เกิดฟองก๊าซ (bubble) ได้ง่ายกว่าความเร็วต่ำ



รูปที่ 3 (a) Non-Fluidization, (b) Partial Fluidization, (c) Uniform Fluidization, (d) Turbulent Fluidization

5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิของลมร้อน

อิทธิพลของอุณหภูมิของลมร้อนที่มีต่ออัตราการอบแห้ง จากการแปรผันอุณหภูมิของลมร้อน 3 ระดับ คือ 60 , 70 , และ 80°C อัตราการไหลของลมร้อน 3 ระดับ คือ 0.09, 0.10 และ 0.11kg/s ผลการทดลองถูกนำไปคำนวณอัตราส่วนความชื้น (MR) ด้วยสมการ (8) ซึ่งสามารถสังเกตพฤติกรรมได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งฝักถั่วลิสงด้วยลมร้อน

รูปที่ 4 พบว่า อุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มความร้อนแฝงของการระเหยน้ำให้เพิ่มขึ้นด้วย (Soponronnarit, 1997) ระยะเวลาในการอบแห้งฝักถั่วลิสงได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาการอบแห้งถั่วลิสงทั้งฝัก

อุณหภูมิ (°C)	เวลาอบแห้ง (นาที)		
	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3
60	235	155	130
70	160	150	123
80	110	103	85

หมายเหตุ อัตราการไหลเชิงมวล \dot{m}_1 , \dot{m}_2 และ \dot{m}_3

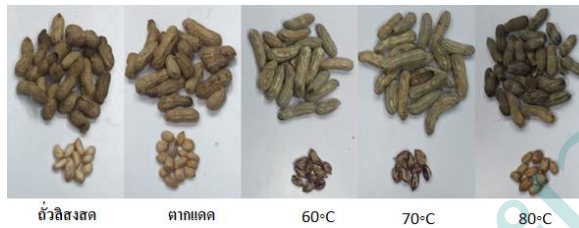
จากสมการ(15) มีค่าเท่ากับ 0.09, 0.10 และ 0.11 kg/s ตามลำดับ

5.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของลมร้อน

การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของลมร้อน เมื่อ แปรผันค่าอัตราการไหลของลมร้อน 3 ระดับ คือ 0.09, 0.10 และ 0.11kg/s พบว่า อัตราการไหลของลมร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะช่วยให้ลดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยระยะเวลาการอบแห้งสั้นที่สุดเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 0.11 kg/s อุณหภูมิ 80°C ใช้เวลาอบแห้ง 85 นาที อธิบายได้ว่า อัตราการไหลของลมร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ได้ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลให้เพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้แล้วยังช่วยให้ความหนาของฟิล์มของอากาศรอบๆฝักถั่วลิสง ซึ่งเป็นตัวต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลมีค่าบางลง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลได้ดีขึ้น จึงลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ (Soponronnarit, 1997)

5.4 คุณภาพของฝักถั่วลิสง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของถั่วจากการตากแดดโดยธรรมชาติกับการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงมีแนวโน้มทำให้สีผิวของเปลือกถั่วมีความเข้มดำมากขึ้นเมื่อเทียบกับสีของเปลือกถั่วที่ตากแดดโดยธรรมชาติเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและความร้อนที่สูงจะไปทำลายสีของถั่วลิสงให้คล้ำขึ้น ส่วนอัตราการไหลของลมร้อนไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนสีของเปลือกถั่ว เมื่อแกะดูเมล็ดถั่วลิสงก็พบว่า ถั่วที่อบด้วยอุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มแตกง่ายกว่า



รูปที่ 5 สภาพถั่วลิสงหลังการอบแห้ง

5.5 สมการอบแห้งชั้นบาง

อัตราการอบแห้ง (MR) ได้พีตเข้ากับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ดังสมการที่ (6) และ (7) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณโดยใช้ SPSS และแสดงค่าพารามิเตอร์ไว้ในตารางที่ 2 - 4 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองสมการที่ (6)

T(°C)	Parameter(Lewis Model) ,k		
	0.09 kg/s	0.10 kg/s	0.11 kg/s
60	0.01183	0.00955	0.00752
70	0.01234	0.00974	0.00918
80	0.01648	0.01515	0.01444

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองสมการที่ (7)

T(°C)	Parameter (Page Model) ,k		
	0.09 kg/s	0.10 kg/s	0.11 kg/s
60	0.02660	0.82338	0.01504
70	0.02802	0.81991	0.01524
80	0.03345	0.83861	0.02756

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองสมการที่ (7)

T(°C)	Parameter (Page Model) ,n		
	0.09 kg/s	0.10 kg/s	0.11 kg/s
60	0.90465	0.01809	0.82066
70	0.90578	0.01364	0.91719
80	0.86430	0.02467	0.87967

ตารางที่ 5 ค่า RSS และ (R²) สมการที่ (6) และ(7)

No.	Model	RSS	(R ²)
1	Lewis	0.0349	0.982
2	Page	0.019	0.989

จากตารางที่ 2 - 5 พบว่าแบบจำลองของ Page มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) มากที่สุด และ (Residuals Sum Square, RSS) ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองข้างต้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งในรูปสมการได้ดีที่สุดงานวิจัยนี้ได้นำพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ Page คือ k และ n ไปสร้างสมการโพลีโนเมียลดีกรีสอง กำหนดให้ k และ n เป็นตัวแปรตาม และกำหนดให้ อุณหภูมิ (T) และอัตราการไหล (m) เป็นตัวแปรต้น ดังรูปสมการต่อไปนี้

$$k = -111.965 + 0.971835T - 0.00714T^2 + 2257.193m - 11244.4m^2 - 19.4622Tm + 0.143077T^2m + 95.9625Tm^2 - 0.70525T^2m^2 \quad (15)$$

$$n = -152.259 + 6.925T - 0.04954T^2 + 3181.418m - 16551.2m^2 - 142.16Tm + 1.01524T^2m + 728.045Tm^2 - 0.70525T^2m^2$$

(16)

สมการที่ (15) และ (16) คือ พารามิเตอร์ของ PAGE Model ดังสมการ (7) มีค่า $R^2 = 0.989$ อุณหภูมิลมร้อน (T) ระหว่าง 60 – 80 °C อัตราการไหลเชิงมวลของ (m) มีค่าระหว่าง 0.09 – 0.11 kg/s

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งถั่วลิสงด้วยเทคนิค ฟลูอิดไดซ์เบด โดยการแปรผันอุณหภูมิลมร้อน และ อัตราการไหลของลมร้อน 3 ระดับ คือ 60, 70, 80°C และ 0.09, 0.10 และ 0.11kg/s ตามลำดับ ได้ข้อสรุปว่า อุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลของลมร้อนที่เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มความร้อนแฝงของการระเหยน้ำให้เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงและถั่วจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีสีเข้มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถั่วที่ผ่านการตากแดด เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาพิดเข้ากับแบบจำลองของ Lewis และ Page สรุปได้ว่าแบบจำลองของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมรอบแห้งของงานวิจัยนี้ได้ดีที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัย รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา

8. เอกสารอ้างอิง

กาญจนา บันสิทธิ์และคณะ (2541). คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พิมพ์ครั้งที่ 1.

Demircan N, Gibbs BM, Swithenbank J,

Taylor DS. Rotating fluidized combustor.

England: Cambridge University Press; 1978.

Kassem A.S. , Shokr A.Z. , El-Mahdy A.R., A.M.

Aboukarima ,& E.Y. Hamed .(2011)

“Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying “.Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, Vol. 10, 33-40 .

Lewis W. K., "The rate of drying of solid materials," Industrial & Engineering Chemistry, vol. 13, pp. 427-432, 1921.

Long , Takahiro ,Y., & Akio. (2007). “ Vacuum drying characteristics of eggplants “. Journal of Food Engineering ,Vol. 83 , 422-429 .

Nakamura, H., Iwasaki, T., & Watano, S.

(2009).“ Experimental analysis of bubble velocity in a rotating fluidized bed ”Chemical Engineering and Processing, 48, 178-186

Page G. E., "Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers," in Mechanical Engineering. vol. M.S. thesis Purdue, USA: Purdue University, 1949.

Ramli W. and Daud W., "Fluidized Bed Dryers- Recent Advances," Advanced Powder Technology, vol. 19, pp. 403-418, 2008.

Sébastien J., Sébastien B. ,Paul M., Luce V., & François B. (2010) “Modelling dehydration and quality degradation of maize during fluidized-bed drying “. Journal of Food Engineering ,Vol.100, 527-534 .

Soponronnarit, S., 1997, "Drying Grains and Some Types of Foods", 7th edition, KMITT, Bangkok, 338p.

St. Joseph. (1989). ASAE Standard S358.1 :Moisture Measurement – Forages, Michigan : ASAE .