

# การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแนวทางการอบแห้ง

## Corn Drying by a Rotary Dryer : A Mathematical Model and Drying Strategy

ไพบุรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย<sup>1</sup> และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>2</sup>

Paiboon Rodviboonchai and Somchart Soponronnarit

### ABSTRACT

The objectives of this study are to investigate appropriate operating conditions and to develop a mathematical model for corn drying by a rotary dryer. Experimental results showed that if feed rate, rotating speed, tilt angle of drum or air velocity increased, residence time decreased. Residence time obtained from a developed equation was agreeable with experimental result. A thin layer drying equation confirmed by equations of mass and energy balance could predict drying rate relatively well. Energy consumption varied inversely with hold-up and moisture content of corn. A volumetric heat transfer coefficient depended on hold-up, rotating speed and air velocity. To dry corn with a rotary dryer, a relatively high air temperature and high value of hold-up should be practiced. Drying at a range of low moisture content of corn should be avoided.

**Key words :** corn drying, rotary dryer

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวโพด อัตราการหมุนหรือมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก หรือความเร็วลมเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถัง (Residence time) จะมีค่าลดลง สมการอธิบายเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังที่พัฒนาได้สามารถทำนายผลได้ดี ส่วนการศึกษาการอบแห้งพบว่าสามารถนำสมการการอบแห้งแบบชั้นบางมาอธิบายการอบ

แห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุนได้โดยใช้ร่วมกับสมการสมดุลมวลและพลังงาน ความสัมพันธ์ของพลังงานของเครื่องอบแห้งพบว่าขึ้นกับมวลที่ค้างอยู่ (Hold-up) เมื่อมวลที่ค้างอยู่มาก การสิ้นเปลืองพลังงานจะน้อย และยังขึ้นกับความชื้นของข้าวโพดด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง จากการศึกษาด้านการถ่ายเทความร้อนพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เทียบต่อปริมาตรของตัวถังทรงกระบอกขึ้นกับ ความเร็วลม มวลที่ค้างอยู่ และอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก ในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนนั้น ควรใช้อุณหภูมิของกระแสอากาศร้อนที่ค่อนข้างสูง แต่ไม่ควรอบแห้งผลิต

1 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Dept. of Chemical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Thonburi

2 คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology, Thonburi

ภัณฑ์จนมีความชื้นต่ำเกินไป และควรพิจารณาการอบแห้ง ที่มวลที่ค้างอยู่มีค่าสูงด้วย

## คำนำ

เครื่องอบแห้งแบบหมุนเป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้อบแห้งวัสดุที่เป็นเม็ด เป็นสเกลและเป็นก้อน ลักษณะเด่นของเครื่องอบแห้งแบบหมุนได้แก่ มีลักษณะไม่ยุ่งยาก สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงๆ และอบแห้งอย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก อีกทั้งมีความสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งมีความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งๆ ที่ความชื้นของวัสดุที่ป้อนเข้าอาจเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ (วิวัฒน์, 2522) เครื่องอบแห้งแบบหมุนประกอบด้วยตัวถังทรงกระบอกที่ทำมุมเอียงเล็กน้อยกับแนวระดับ เมล็ดพืชขึ้นจะถูกนำเข้าทางด้านสูง และเมล็ดพืชแห้งจะออกทางด้านต่ำภายในตัวถังมีตัวดัก (Flights) ติดอยู่ที่ผนังตามแนวนอน ขณะที่ตัวถังหมุน เมล็ดพืชจะถูกดันขึ้นไปตามเส้นรอบวง และตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และปะทะกับกระแสอากาศร้อน การอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นขณะที่เมล็ดพืชตกผ่านกระแสอากาศร้อน การตกของเมล็ดพืชทำให้เมล็ดพืชเคลื่อนที่ไปตามแนวนอนของตัวถังซึ่งมีความลาดเอียง การเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชยังเนื่องมาจากการพัดพาของกระแสอากาศอีกด้วย ลักษณะการไหลของกระแสอากาศกับเมล็ดพืชแบ่งเป็นสองแบบ คือ แบบไหลตามกัน และแบบไหลสวนทางกัน การเลือกชนิดไหนนั้นขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาอบแห้ง ถ้าวัสดุมีความไวต่อความร้อนควรใช้แบบไหลตามกัน เพราะวัสดุจะสัมผัสกับอากาศที่ไม่ร้อนมากนัก เมล็ดพืชจัดเป็นวัสดุที่มีความไวต่อความร้อน (สมชาติ, 2529)

ยังยุทธ (2529) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดให้ความร้อนโดยอ้อม (โดยการนำความร้อนที่ผนังของตัวถังทรงกระบอก) พบว่า เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกแล้วนำข้าวเปลือกมาตากผึ่งลม 1 ชั่วโมงก่อนอบก็เพียงพอไป จะให้อัตราการอบแห้งสูงสุด โดยคุณภาพข้าวเปลือกดีกว่าการตากแดด และสามารถใช้แบบจำลองแบบลอการิทึมมาอธิบายการอบแห้งได้ Espanto *et al.* (1985) พบว่า คุณภาพข้าวเปลือกสำหรับการอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง (โดยการพาความร้อน) มีคุณภาพดี

กว่าการอบแห้งแบบตากในร่ม และดีกว่าการอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม ส่วนผลงานของ Jindal and Molano (1987) พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดให้ความร้อนโดยอ้อมจะสิ้นเปลืองพลังงาน 5.6 MJ ต่อกลีโกรัม น้ำที่ระเหย จากการศึกษาผลงานที่ผ่านมา พบว่าการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุนยังมีน้อย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อมุ่งศึกษาหาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนที่เหมาะสม โดยเน้นที่ความสิ้นเปลืองพลังงาน นอกจากนี้ยังพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังและอัตราการอบแห้งด้วย

## การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขณะที่เมล็ดข้าวโพดเคลื่อนที่ภายในถังหมุน ข้าวโพดบางส่วนจะแขวนลอยในกระแสอากาศในขณะที่ตกลงมาบางส่วนจะกองอยู่ที่ด้านล่างของถังในลักษณะขั้นบันได แม้ว่าลักษณะทางกายภาพจะแตกต่างจากการอบแห้งชั้นบางค่อนข้างมาก แต่ก็สามารถใช้สมการการอบแห้งชั้นบางได้ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งอัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของความชื้นในเมล็ดข้าวโพด ความเร็วของกระแสอากาศที่ผ่านผิวเมล็ดข้าวโพดมีผลค่อนข้างน้อยต่ออัตราการอบแห้ง Thompson (1967) เสนอสมการอบแห้งข้าวโพดบางในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 60-149°C ดังนี้

$$t/60 = A1 \ln(MR) + B1 (\ln MR)^2 \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } A1 = 0.00878T - 1.70562$$

$$B1 = 148.6 \exp(-0.05942T)$$

$$MR = (M - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$$

เพื่อให้สามารถคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเครื่องอบแห้งได้ จำเป็นต้องรู้ค่าเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถัง (T) ซึ่งพบว่าเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถัง มวลที่ค้างอยู่ (H) และอัตราการป้อนอนุภาค (F) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$t = H/F \quad (2)$$

มวลที่ค้างอยู่สามารถหาได้จากการหยุดเครื่องอบแห้งทันที แล้วหามวลของเมล็ดข้าวโพดที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาเวลาที่ผลิตค้างอยู่ในถังจะขึ้นกับเวลาที่เป็นผลอันเนื่องมาจาก Flight-action และ Kiln-action กับเวลาที่เป็นผลเนื่องจากความเร็วลม ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า (Perry and Chilton, 1974)

$$t = t_1 + t_2$$

$$\text{หรือ } t = A[L/N^0 D \tan(\theta)] + Bv \quad (3)$$

เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของกระแสดอากาศและผลิตภัณฑ์อบแห้งขณะไหลภายในเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องมีสมการสมดุลมวลและพลังงานร่วมในการคำนวณด้วยและเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงพิจารณาปริมาตรควบคุมดัง Figure 1 และสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลพลังงานได้ว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสดอากาศ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์และความร้อนที่สูญเสีย ย่อมเท่ากับศูนย์ และสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลได้ว่า ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวโพดย่อมเท่ากับปริมาณน้ำที่อากาศได้รับสมการทั้งสองเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & (G/60)[\{c_a T_{a,out} + (c_v T_{a,out} + h_{fg})W_{out}\} \\ & - \{c_a T_{a,in} + (c_v T_{a,in} + h_{fg})W_{in}\}] \\ & + (F/60)[(c_p + c_w M_{out})T_{s,out} \\ & - (c_p + c_w M_{in})T_{s,in}] + \text{heat loss} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$F(M_{in} - M_{out}) = G(W_{out} - W_{in}) \quad (5)$$

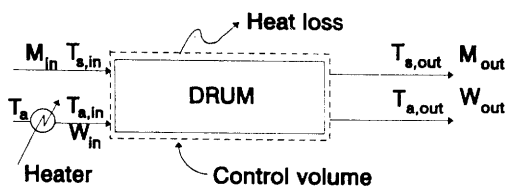


Figure 1 control volume

สมการที่ใช้ร่วมในการคำนวณ เช่น สมการความชื้นสมดุล และความร้อนจำเพาะของข้าวโพด ใช้สมการของ Henderson (1952) และ Kazarian and Hall (1965) ตามลำดับ ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$M_{eq} = (1/100)[\ln(1 - RH)/\{-1.1 \times 10^{-5}(1.8T + 491.7)\}]^{1/1.9} \quad (6)$$

$$C_s = 1.46542 + 0.03565[M/(1+M)] \quad (7)$$

## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. เครื่องอบแห้งที่ใช้ทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบหมุนที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบชนิดให้ความร้อนโดยตรง เมล็ดพืชและกระแสดอากาศไหลตามกัน ตัวถังทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 m ยาว 1.5 m สามารถปรับระดับความลาดเอียงได้ ตัวถังที่ใช้ปลายงอทำมุม 90° จำนวน 8 ตัว อัตราการไหลของข้าวโพดควบคุมด้วยตัวป้อนแบบหมุน ส่วนอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอกควบคุมโดยชุดทดรอบ อากาศแวดล้อมถูกดูดด้วยพัดลม และเป่าผ่านชุดลดความดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ละเอียด  $\pm 1^\circ\text{C}$  ก่อนไหลเข้าตัวถังหมุน

### 2. การทดลองหาเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังหมุน

ในกรณีที่ไม่วัดความเร็วลม จะเป็นการหาค่าเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังที่ขึ้นกับลักษณะของเครื่องอบแห้ง โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ อัตราการหมุนและมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก อัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพด การทดลองเริ่มโดยกำหนดให้อัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพดและมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกมีค่าคงที่ แต่เปลี่ยนค่าอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก เมื่อทดลองที่ค่าอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอกครบ ให้เปลี่ยนค่ามุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกแล้วเริ่มทดลองที่ค่าอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอกใหม่ และเมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกครบแล้วจึงเปลี่ยนค่าอัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพด ส่วนกรณีที่วัดความเร็วลม กำหนดให้อัตราการหมุนและมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกมีค่าคงที่

แต่เปลี่ยนค่าอัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพด และความเร็วของกระแสอากาศ

### 3. การทดลองอบแห้งข้าวโพด

การทดลองแต่ละครั้งใช้ข้าวโพดประมาณ 80 กิโลกรัม การอบแห้งเป็นการอบแบบต่อเนื่อง ระหว่างการทดลองได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความชื้นข้าวโพด อุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศและข้าวโพด และมวลที่ค้างอยู่ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของข้าวโพดในรูปของเมล็ดแตก

### 4. เครื่องมือวัดและควบคุม

- ความเร็วของกระแสอากาศ วัดด้วย Hot-wire anemometer,  $\pm 5\%$
- กำลังงานที่ให้แก่มอเตอร์ วัดด้วย Clip-on meter,  $\pm 0.01$  kW
- พลังงานที่ให้แกตัวทำความร้อน วัดด้วย Watt-hour meter,  $\pm 0.05$  kW-h
- ความร้อนที่สูญเสียที่ตัวถังทรงกระบอก วัดด้วย Heat-flux meter,  $\pm 1.2$  W/m<sup>2</sup>
- อุณหภูมิอากาศร้อน วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท,  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

## ผลและวิจารณ์

### 1. การวิเคราะห์หาสมการเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Residence time เป็นไปตามสมการ (3) เมื่อพิจารณาเวลาของส่วนที่ไม่ใช้ความเร็วลม โดยใส่ลอการิทึม จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\ln[t_f] = -n \ln[N] + \ln[AL/D \tan(\theta)] \quad (8)$$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln[t_f]$  กับ  $\ln[N]$  ที่อัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพด และมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกต่างๆ จะได้ค่า  $n$  และ  $A$  ที่ขึ้นกับอัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพด และมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก ดังแสดงด้วย Figure 2 ( $\theta = 0.3^{\circ}$ ) ส่วน  $\theta$  เท่ากับ 0.5 0.7

และ 1 องศา ไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ จากการทดลองพบว่าค่า  $n$  และค่ามุมเอียงมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น โดยที่ความชันและจุดตัดบนแกน  $y$  ขึ้นกับอัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพดในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$n = -(0.048081F + 0.50289) \theta + (0.0609811F - 0.42703) \quad (9)$$

จากการทดลองเช่นกันพบว่า ค่า  $\ln A$  และ  $\ln$  ของอัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น โดยที่ความชันขึ้นกับมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกในลักษณะเชิงเส้น และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln$  ของจุดตัดบนแกน  $y$  และ  $\ln$  ของมุมเอียงนั้นเป็นแบบเชิงเส้นเช่นกัน

$$\ln[A] = (0.31510 - 0.468548) \ln[F] - 1.9596 \theta^{0.393504} \quad (10)$$

พิจารณากรณีที่มีความเร็วลมในตัวถังทรงกระบอกเนื่องจากการเป็นไหลแบบตามกันระหว่างเมล็ดข้าวโพดกับกระแสอากาศ ดังนั้นผลของความเร็วลมจึงทำให้เวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังมีค่าน้อยลง จากผลการทดลองพบว่าค่าที่น้อยลงไปของเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังขึ้นกับมวลที่ค้างอยู่ที่มีความเร็วลมมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$t_2 = Bv \quad (11)$$

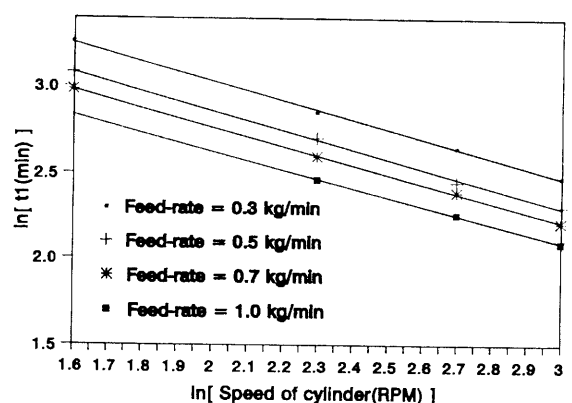


Figure 2 Effect of cylinder speed on residence time due to flight and kiln action at different feed-rate (inclination angle = 0.3)

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองระหว่าง  $t_2$  กับ  $v$  ที่อัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพดคงที่ค่าต่างๆ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ที่ค่ามวลที่ค้างอยู่ต่างๆ เพราะที่อัตราการป้อนค่าหนึ่งจะมีค่ามวลที่ค้างอยู่ค่าหนึ่ง และจากการทดลองเช่นกันพบว่า  $B$  ในสมการ (11) ขึ้นกับมวลที่ค้างอยู่ในลักษณะเชิงเส้นดังสมการ (12)

$$B = -0.13894(H) = 2.82856$$

$$\text{หรือ } B = -0.13894(t_p F) + 2.82856 \quad (12)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเวลาที่ผลิตกันที่ค้างอยู่ในถังสามารถหาได้จากผลรวมของเวลาที่ค้างอยู่อันเนื่องมาจาก Flight-action และ Kiln-action ( $t_1$ ) กับเวลาที่ค้างอยู่อันเนื่องมาจากความเร็วลม ( $t_2$ ) ดังสมการ(3) เมื่อนำผลที่ได้จากการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งไม่ใช่ผลการทดลองที่นำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่เป็นผลการทดลองอีกชุดหนึ่งต่างหากพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงใน Figure 4

## 2. การวิเคราะห์การอบแห้ง

2.1 การจำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ขั้นตอนการจำลองแบบปัญหาคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวโพดเริ่มจากการคำนวณหาเวลาที่ผลิตกันที่ค้างอยู่ในถัง [ สมการ (3)] จากนั้นกำหนดให้  $T_{out} =$

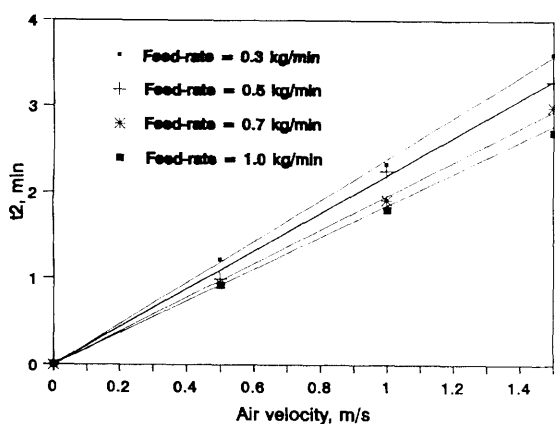


Figure 3 Effect of air velocity on residence time at different feed rate

$T_{in}$  (เมื่อ  $T_{in}$  และ  $T_{out}$  คืออุณหภูมิของอากาศที่ตรงทางเข้าและทางออกของถังทรงกระบอกตามลำดับ) นำค่าเฉลี่ยระหว่าง  $T_{out}$  และ  $T_{in}$  มาคำนวณหาความชื้นสุดท้ายของข้าวโพด โดยใช้สมการ (1) จากนั้นนำค่าความชื้นที่ได้มาคำนวณ  $T_{out}$  โดยใช้สมการสมดุลมวล (5) และพลังงาน (4) เปรียบเทียบ  $T_{out}$  ใหม่ กับ  $T_{out}$  เก่า ถ้าต่างกันเกิน 0.1 ให้นำค่า  $T_{out}$  ใหม่ไปเฉลี่ยกับ  $T_{in}$  แล้วนำค่าเฉลี่ยไปคำนวณใหม่จนกว่าค่าแตกต่างระหว่าง  $T_{out}$  ใหม่ กับ  $T_{out}$  เก่า ไม่เกิน 0.1 ค่าที่คำนวณได้ครั้งสุดท้ายจึงเป็นค่าที่ต้องการผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองแสดงอยู่ใน Figure 5 ซึ่งพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ดี

## 2.2 คุณภาพข้าวโพดภายหลังการอบแห้ง

จากการศึกษาคุณภาพของข้าวโพดพบว่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดแตกของเมล็ดข้าวโพดมีค่าไม่เกิน 2% ซึ่งถือว่าต่ำ เปอร์เซ็นต์เมล็ดแตกไม่ขึ้นกับสภาวะการอบแห้งเนื่องจากความชื้นข้าวโพดลดลงไม่มากต่อหนึ่งเกี่ยวกับการอบแห้ง และช่วงอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งค่อนข้างแคบคืออยู่ระหว่าง 100–130°C

## 2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

เครื่องอบแห้งแบบหมุนมีจุดที่ต้องใช้พลังงานอยู่สามจุด คือ ที่ตัวให้ความร้อนแก่กระแสาอากาศ ที่มอเตอร์หมุนตัวถังทรงกระบอก และมอเตอร์ที่ตัวป้อนเมล็ดข้าวโพดแบบหมุน เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงาน พบว่าตัวให้ความร้อนแก่กระแสาอากาศใช้พลังงาน = 94.34% มอเตอร์หมุนตัวถังทรงกระบอกใช้พลังงาน = 4.53% มอ-

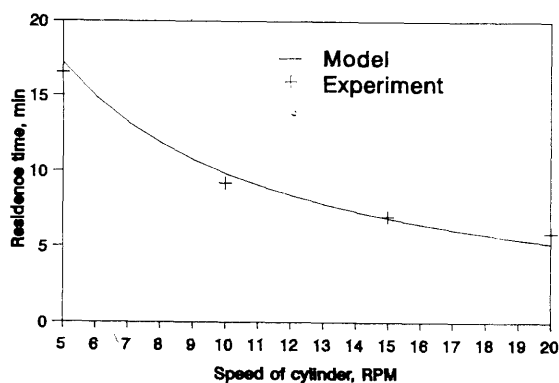


Figure 4 Comparison between experimental and simulated residence time

เตอร์ที่ตัวบ่อนเมล็ดข้าวโพดใช้พลังงาน = 1.13% เมื่อพิจารณาการสูญเสียความร้อนพบว่า ที่ตัวให้ความร้อนมีการสูญเสียความร้อนมากที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อพลังงานที่ให้แก่วัตถุให้ความร้อนเท่ากับ 33% ส่วนความร้อนที่สูญเสียไปที่ตัวถังทรงกระบอก คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อพลังงานที่ให้แก่เครื่องอบแห้งเท่ากับ 6.67% Figure 6-9 แสดงความสัมพันธ์พลังงานรวมทั้งสิ้นของการอบแห้งต่างๆ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง พลังงานที่ให้แก่วัตถุให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่กระแสอากาศนั้น เป็นการเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วย ดังนั้นเมื่อคิดพลังงานสิ้นเปลืองเทียบกับกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย พบว่าในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100-130°C อุณหภูมิไม่มีผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างชัดเจน ดังแสดงด้วย Figure 6 เมื่อลดความเร็วกระแสอากาศจาก 0.5 เมตร/วินาที (0.1414 กิโลกรัม/วินาที) เป็น 0.14 เมตร/วินาที (0.0396 กิโลกรัม/วินาที) พลังงานที่ให้แก่วัตถุให้ความร้อนจะลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงานต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหยพบว่า การเปลี่ยนความเร็วกระแสอากาศไม่มีผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน แสดงว่าที่ความเร็วกระแสอากาศสูง การสูญเสียความชื้นของเมล็ดข้าวโพดจะดีกว่าที่ความเร็วกระแสอากาศต่ำๆ เนื่องจากที่ความเร็วกระแสอากาศสูง กระแสอากาศจะช่วยพัดพาเอาไอน้ำภายในเครื่องอบแห้งออกมาได้มากกว่าการเปรียบเทียบ แสดงด้วย Figure 7

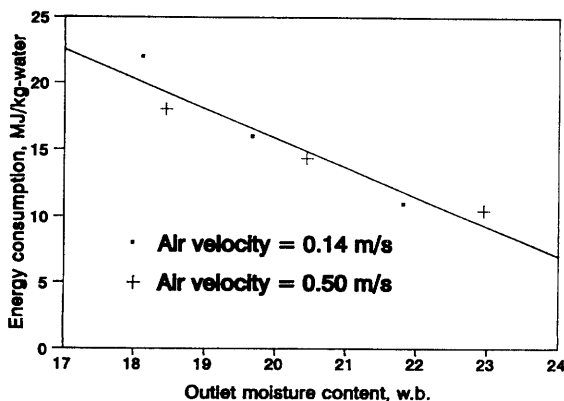


Figure 7 Effect of moisture content on energy consumption at different air velocity (inlet temperature = 120°C feed-rate = 1 kg/min, hold-up = 10.85 kg)

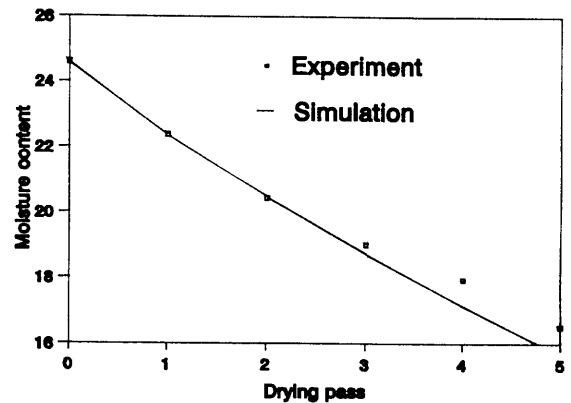


Figure 5 Comparison between experimented and simulated moisture content of corn (inlet temperature = 120°C hold-up 11.0 kg)

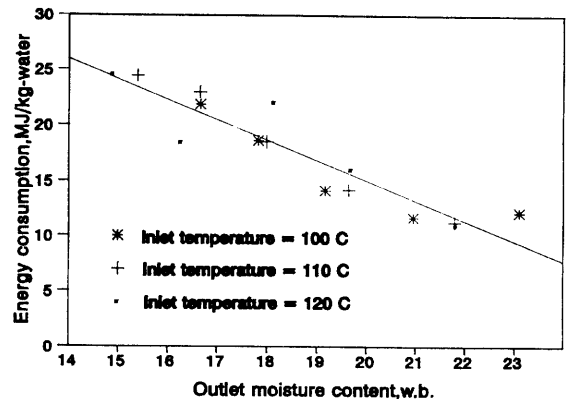


Figure 6 Effect of moisture content on energy consumption at different inlet temperature (air velocity = 0.14 m/s feed-rate = 1 kg/min, hold-up = 10.3 kg)

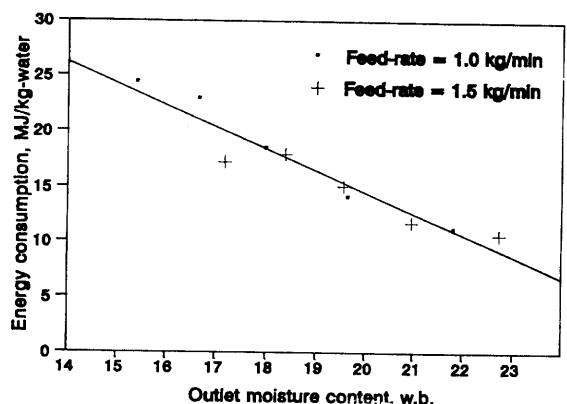


Figure 8 Effect of moisture content on energy consumption at different feed-rate (inlet temperature = 110°C hold-up = 10.65 kg, air velocity = 0.14 m/s)

จาก Figure 8 เป็นการเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงานที่อัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพดต่างๆ โดยแต่ละอัตราการป้อนมีค่ามวลที่ค้างอยู่เท่ากัน พบว่ากลุ่มข้อมูลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าที่มวลที่ค้างอยู่เท่ากัน การสิ้นเปลืองพลังงานจะเท่ากัน และจากกราฟ Figure 9 เป็นการเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงานที่มวลที่ค้างอยู่ต่างกัน พบว่าที่มวลที่ค้างอยู่ต่ำการสิ้นเปลืองพลังงานจะมากกว่าที่มวลที่ค้างอยู่มีค่าสูง เนื่องจากที่มวลที่ค้างอยู่มีค่าสูงการใช้พลังงานเพื่อระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดมีประสิทธิภาพดีกว่าที่มวลที่ค้างอยู่มีค่าต่ำ สังเกตได้จากอุณหภูมิของกระแสดอากาศหลังการอบแห้งจะมีค่าต่ำกว่า จาก Figure 6 ถึง 9 พบว่าเมื่อความชื้นของข้าวโพดลดลง การสิ้นเปลืองพลังงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เมื่อความชื้นข้าวโพดลดลง น้ำบริเวณผิวเมล็ดข้าวโพดจะระเหยออกไปมาก ดังนั้นน้ำที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวโพดจึงเริ่มแพร่มาที่ผิวของเมล็ดข้าวโพด ยิ่งการอบแห้งนานเท่าใดการแพร่ก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากระยะทางการแพร่เพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมานี้ อาจสรุปเป็นแนวทางกว้างๆ ได้ว่า ในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน ควรใช้อุณหภูมิกระแสดอากาศที่ค่อนข้างสูง หากไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพราะจะได้อัตราการอบแห้งที่สูง ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานไม่ต่างกับกรณีอุณหภูมิต่ำ สิ่งที่เราควรหลีกเลี่ยงคือ

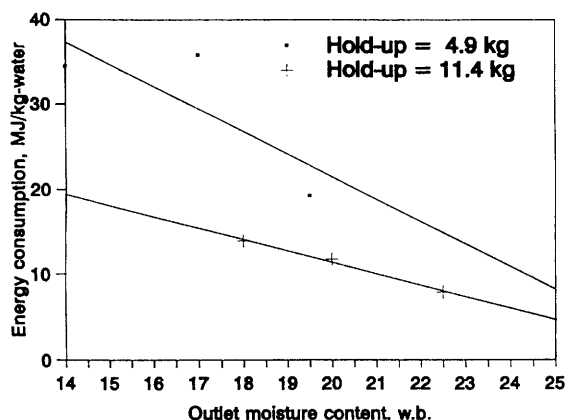


Figure 9 Effect of moisture content on energy consumption at different hold-up (inlet temperature = 100°C)

การอบแห้งจนผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำเกินไป เพราะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก นอกจากนี้ยังควรพิจารณาการอบแห้งที่มวลที่ค้างอยู่มีค่าสูงๆ ด้วยเพราะสิ้นเปลืองพลังงานน้อย

### 3. สมบัติการถ่ายเทความร้อน

แม้ว่าในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นแล้วว่าแบบจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์ของเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังและการอบแห้งมีความถูกต้องดี แต่อาจจะไม่ค่อยสะดวกนักในเรื่องการนำไปใช้งาน ในกรณีที่ต้องการความสะดวกรวดเร็ว แต่ไม่ต้องการความถูกต้องมากนัก อาจใช้วิธีการคำนวณจากอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะทำได้สามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้งต่อไปได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงการวิเคราะห์หาสมบัติการถ่ายเทความร้อนเทียบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวถังทรงกระบอกซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (13)

$$h = q/V \Delta T_{lm} \quad (13)$$

จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระแสดอากาศไม่มีผลต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อน โดยพิจารณาได้จาก Figure 10 ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่กระแสดอากาศถึงแม้ไปเพิ่มค่า  $\Delta T_{lm}$  แต่การเพิ่มอุณหภูมิก็จะไปเพิ่มปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่เมล็ดข้าวโพดด้วย และในกราฟรูปเดียวกันนี้ยังพบ

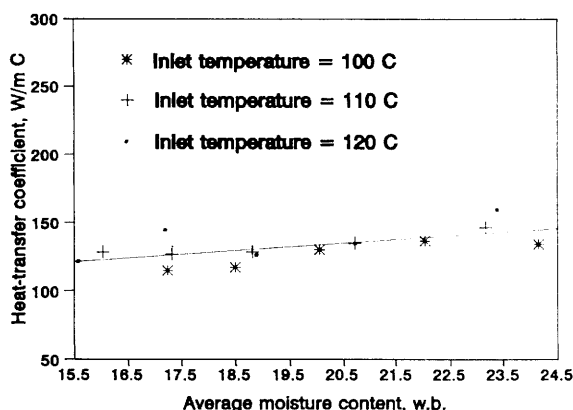


Figure 10 Effect of moisture content on heat transfer coefficient at different inlet temperature (cylinder speed = 5 RPM, air velocity = 0.14 m/s feed-rate = 1 kg/min, hold-up = 10.3 kg)

อีกว่าเมื่อความชื้นของข้าวโพดลดลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงด้วยแม้ว่าจะไม่มากนัก เป็นไปได้ว่า เมื่อความชื้นของเมล็ดข้าวโพดน้อยลง ขนาดของเมล็ดข้าวโพดก็ลดลงด้วย ดังนั้นพื้นที่ผิวในการรับความร้อนจึงลดลง (อรุณี, 2531) Figure 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วลม 0.14 เมตรต่อวินาที (0.0396 กิโลกรัมต่อวินาที) และ 0.5 เมตรต่อวินาที (0.1414 กิโลกรัมต่อวินาที) ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 3.6 เท่า พบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเล็กน้อยคือประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย ซึ่งยังไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจน

ในกรณีที่เพิ่มอัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก จะทำให้ความถี่ในการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศร้อนกับเมล็ดข้าวโพดมากขึ้น ดังนั้นเมล็ดข้าวโพดจึงมีโอกาสได้รับความร้อนจากกระแสอากาศร้อนเพิ่มขึ้น หรือการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระแสอากาศร้อนกับเมล็ดข้าวโพดดีขึ้นนั่นเอง Figure 12 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการหมุนเร็วขึ้น เมื่อพิจารณาความถี่ที่ค่าอยู่ พบว่าที่ค่าความถี่ที่ค่าอยู่ต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าที่ค่าความถี่ที่ค่าอยู่สูง เพราะว่าที่ค่าความถี่ที่ค่าอยู่สูง พื้นที่ผิวรับความร้อนมีค่าสูงกว่า ดังแสดงด้วย Figure 13

เนื่องจากความซับซ้อนของตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และ

แม้ว่าจะหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้ ก็คงจะอยู่ในรูปสมการเอมไพริคัล ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงไม่มีการสร้างสมการของสัมประสิทธิ์ดังกล่าว

## สรุป

1. จากการหาสมการอธิบายเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังของเครื่องอบแห้งแบบหมุน พบว่าเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังขึ้นกับ อัตราการป้อนข้าวโพด อัตราการหมุน และมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก และความเร็วลม สมการดังกล่าวสามารถทำนายผลได้ดี ส่วนแบบจำลองการอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยสมการการอบแห้งขึ้นทางสมการสมดุลมวลและพลังงาน สามารถทำนายผลได้ดีเช่นกัน
2. การสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนขึ้นกับมวลที่ค้างอยู่และความชื้นของข้าวโพด
3. ในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน ควรใช้อุณหภูมิกระแสอากาศที่ค่อนข้างสูง หากไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และไม่ควรรอบแห้งจนผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำเกินไป นอกจากนี้ยังควรพิจารณาการอบแห้งที่มวลที่ค้างอยู่มีค่าสูงๆ ด้วย หากต้องการลดความชื้นต่อไปจนถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา ควรใช้วิธีการอื่น เช่น การอบแห้งแบบในถังเก็บ เป็นต้น
4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อคิดเทียบต่อปริมาตรตัวถังทรงกระบอกขึ้นกับมวลที่ค้างอยู่ อัตรา

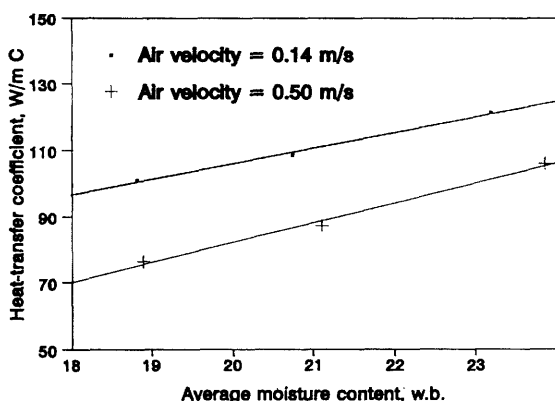


Figure 11 Effect of moisture content on heat transfer coefficient at different air velocity (cylinder speed = 5 RPM, feed-rate = 1 kg/min inlet temperature = 110 °C, hold-up = 10.85 kg)

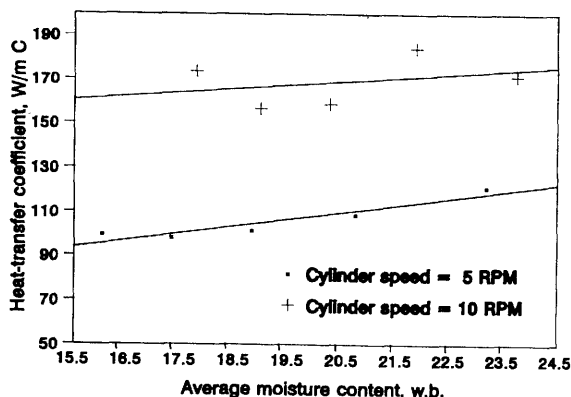


Figure 12 Effect of moisture content on heat transfer coefficient at different cylinder speed (inlet temperature = 120°C air velocity = 0.14 m/s, hold-up = 10.65 kg)

การหมุนของตัวถังทรงกระบอก และ ความเร็วลม

### รายการสัญลักษณ์

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| A, A1    | = ค่าคงที่                                        |
| B, B1    | = ค่าคงที่                                        |
| c        | = ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg°C                         |
| D        | = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังทรงกระบอก, m          |
| F        | = อัตราการป้อนข้าวโพด, kg/min                     |
| G        | = อัตราการไหลของกระแสอากาศ, kg/min                |
| H        | = มวลที่ค้างอยู่, kg                              |
| h        | = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kW/m <sup>3</sup> °C |
| $h_{fg}$ | = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ, kJ/kg           |
| L        | = ความยาวตัวถังทรงกระบอก, m                       |
| M        | = ความชื้นข้าวโพด, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง             |
| N        | = อัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก, RPM             |
| q        | = อัตราความร้อนที่ให้แก่มล็ดพืช, kW               |
| RH       | = ความชื้นสัมพัทธ์, decimal                       |
| T        | = อุณหภูมิ, °C                                    |
| t        | = เวลาอบแห้ง, min                                 |
| $t_1$    | = เวลาที่เป็นผลมาจากลักษณะของเครื่องอบแห้ง, min   |
| $t_2$    | = เวลาที่เป็นผลมาจากความเร็วลม, min               |
| V        | = ปริมาตรของตัวถังทรงกระบอก, m <sup>3</sup>       |
| v        | = ความเร็วกระแสอากาศ, m/s                         |

|          |                                          |
|----------|------------------------------------------|
| W        | = อัตราส่วนความชื้น, kg-water/kg-dry air |
| $\theta$ | = มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก, degree     |
| $\tau$   | = เวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถัง, min     |

### สัญลักษณ์กำกับล่าง

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| a   | = อากาศแห้ง             |
| eq  | = ที่สมดุล              |
| in  | = เข้าเครื่องอบแห้ง     |
| lm  | = ค่าเฉลี่ยแบบ log mean |
| out | = ออกจากเครื่องอบแห้ง   |
| p   | = อนุภาคแห้ง            |
| s   | = อนุภาค                |
| v   | = ไอน้ำ                 |
| w   | = น้ำ                   |

## เอกสารอ้างอิง

ยงยุทธ พิชกมุทร. 2529. เครื่องอบแห้งแบบหมุน. รายงานการประชุมทางวิชาการประจำปีครั้งที่ 24, วันที่ 27-29 มกราคม 2529, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. น 15-27.

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2529. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหาร. คณะพลังงานวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

วิวัฒน์ ตันพะพานิชกุล. 2522. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ. น 71-83.

อรุณี ผุดผ่อง. 2531. การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ความร้อนของเมล็ดข้าวโพด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

Espanto, I.H., S.C. Andales, A.T. Belonio and Y.W. Jeon. 1985. Performance evaluation of IRR batch-type rotary drum dryers. Research and Development on System and Linkages for a Viable Grain Post-harvest Industry in the Humid Tropics, The ASEAN Crop Post-

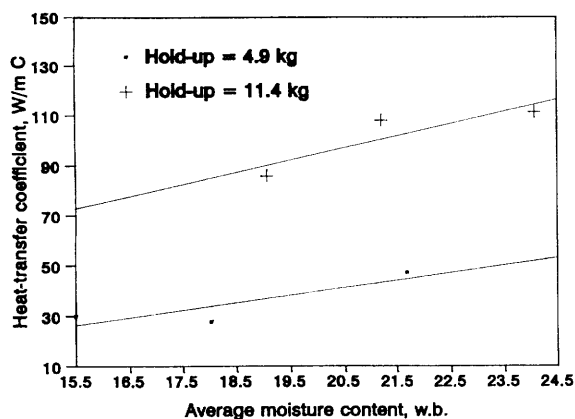


Figure 13 Effect of moisture content on heat transfer coefficient at different hold-up (inlet temperature = 100°C)

- Harvest Programme, pp. 261-268, by Semple, R.L. and A.S. Frio (eds).
- Henderson, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium. Agr. Eng. 29-31, 33.
- Jindal, V.K. and B.T. Molano. 1987. Design and development of an axial flow rotary dryer for paddy. Consultative Work-shop on Grain Drying and Milling in ASEAN, 24-27 Nov., Bangkok.
- Kazarian, E.A. and C.W. Hall. 1965. Thermal properties of grain. Trans. ASAE. 8, 33-37.
- Perry, R.H. and C.H. Chilton (eds). 1974. Chemical Engineers' Handbook. Sec. 20. McGraw-hill, New York.
- Thompson, T.L. 1967. Predicted Performance and Optimal Design of Convection Grain Dryers. Unpublished Ph.D. Thesis. Purdue Univ., Lafayette, Ind.