

## สภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบ แห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม

อัสีหะยะ สนิโซ\* ฟามิรา สะอูตี\* และ รัชดาภรณ์ ฮานาฟี\*

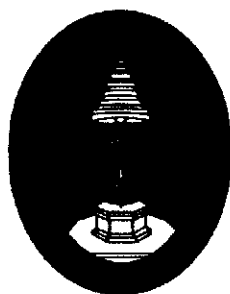
### บทคัดย่อ

การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เกษตรกรหรือผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังคงใช้วิธีตากแดดตามธรรมชาติ ถึงแม้วิธีดังกล่าวจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีการปนเปื้อนจากการรบกวนของแมลงและสัตว์ต่างๆ วิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟในช่วง 180-600 วัตต์ จากการทดลองพบว่า การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟอย่างเดียว โดยสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีก คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ ผลหมากจะเหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ 9.43 มาตรฐานแห้ง จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85+5 มาตรฐานแห้ง และแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบเอ็มพีริคัลของ Page เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีก

คำสำคัญ : หมาก พลังงานความร้อนร่วม แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

14 1306

\* ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา  
133 ถนนเทศบาล 3 อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000 E-mail: saniso.e@hotmail.com



## Optimal Condition and Drying Kinetic Modeling of Betel Nut Drying Using Combined Thermal Energy

Eleeyah Saniso\* Fameera Saudi\* and Radchadapom Hanafee\*

### Abstract

Dried agricultural products are considered as economically important of Thailand. Most of dried agricultural products are still produced using natural sun drying method. Although, it is the cheapest method, dried products are usually contaminated by insects, birds and animals. The objectives of this research were to determine the optimal condition and drying kinetic modeling for drying Betel nut using hot air, microwave and hot air-microwave combination at the air flow rate of 1 m/s. The experimental was done at the air temperature range of 60-80°C and microwave power of 180-600 W. The results showed that the drying rate of Betel nut using hot air combine with microwave was higher than the of using hot air and microwave only. The drying condition at microwave power of 450 W and air temperature of 80°C was found to be suitable for the drying method. The final moisture content of Betel nut was 9.43% d.b. as compared to initial moisture content of 85±5% d.b. The calculation data from the Page model is reasonable for describing drying kinetics of Betel nut.

**Keywords :** Betel Nut Combined Thermal Energy Drying Kinetic Modeling

\* Department of Science Faculty of Science Technology and Agriculture Yala Rajabhat University  
133 Tesaban Road 3 Amphur Muang Yala 95000 Thailand. e-mail: saniso.e@hotmail.com

## บทนำ

หมาก มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Areca catechu* L. เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลปาล์มไม่มีรากแก้ว แต่มีรากฝอยกระจายรอบโคนต้น หมากเป็นไม้ยืนต้นที่มีลำต้นเดี่ยวไม้แตกกอสูงประมาณ 20 เมตร หมากให้ผลเกือบตลอดปีขึ้นอยู่กับอายุของต้นและสภาพแวดล้อมที่ปลูก เช่น ภูมิอากาศ ดิน และน้ำ ผลหมาก (Betel nut) มีลักษณะกลมหรือกลมรี ในหนึ่งทะลายมีผลประมาณ 10-150 ผล (1) หมากเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกและดูแลรักษาง่าย โรคและแมลงรบกวนน้อย ลงทุนไม่สูง ทำรายได้สม่ำเสมอต่อเนื่อง และสามารถปลูกผสมผสานร่วมกับพืชเศรษฐกิจอื่นได้ ผลหมากประกอบด้วย 4 ส่วน คือ เปลือกชั้นนอก (เป็นเยื่อบางสีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียดและเหนียว) เปลือกชั้นกลาง (เป็นเส้นใยหนา มองเห็นชัด เมื่อผลอ่อนเส้นใยจะอ่อน และเหนียวแข็งเมื่อผลแก่) เปลือกชั้นใน (เป็นเยื่อบางละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก) และส่วนเมล็ดหรือเนื้อหมาก (เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเยื่อบางเข้าไป ผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล เมื่ออ่อนเนื้อจะนิ่ม และมีสีเหลืองอ่อนถึงสีเหลืองเข้มอมแดง)

ผลหมากมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมหลายชนิด โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมทำสี แต่ละปีประเทศไทยส่งผลหมากออกจำหน่ายต่างประเทศ คิดเป็นมูลค่าหลายล้านบาท อาทิเช่น ปี 2547 ไทยส่งออกหมาก 95,396 ตัน คิดเป็นมูลค่า 792 ล้านบาท นอกจากนี้เฉพาะเดือนมกราคม ถึง เดือนเมษายน 2549 ไทยส่งออกหมาก 8,485 ตัน คิดเป็นมูลค่า 201 ล้านบาท (2) แต่กว่าผลหมากจะไปถึงมือผู้รับต้องใช้เวลาขนส่งผลให้ผลหมากขึ้นราและเน่าเสีย เกษตรกรจึงผ่าผลหมากออกเป็น 2 ซีก แล้วตากแดดให้แห้งประมาณ 2-5 วัน แต่ประสบปัญหาเรื่องฝุ่นละออง เชื้อรา ฝนตกและความไม่สม่ำเสมอของแสงแดด จึงจำเป็นต้องนำเทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ เข้ามาช่วยในการทำแห้ง เช่น

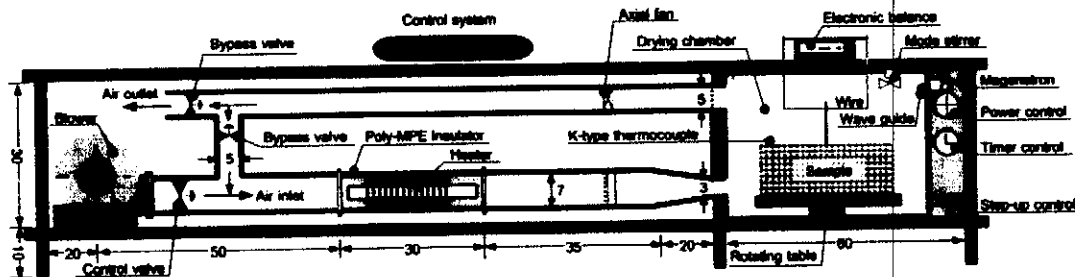
การอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าหรือก๊าซ การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบตู้หรือถาด การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง การอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง การอบแห้งแบบเยือกแข็ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อน

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ (3) อินฟราเรด แสงอาทิตย์ (3-4) และสารดูดซับความชื้น (3, 5) เข้ามาช่วยในการอบแห้งร่วมกับลมร้อนเป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุอาหารและผลผลิตทางการเกษตร (5) โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งเหลือเพียงหนึ่งในห้าเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว (3-4) และยังไม่พบรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งผลหมากที่ไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟ การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟ

## วิธีการ

## ตัวอย่างทดลอง

ตัวอย่างทดลองได้ใช้ผลหมากสดที่สังเกตเปลือกภายนอกด้วยสายตาเป็นสีเหลืองแดง คัดขนาดที่ใกล้เคียงกันมาปอกเปลือกออกแล้วนำไปบรรจุในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท แล้วเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 3-5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ระหว่างนี้ทำการเขย่าทุกวันเพื่อให้ความชื้นกระจายสม่ำเสมอ จากนั้นนำมาวางที่อุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 2-3 ชั่วโมง วัดขนาดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร แล้วนำไปหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC 2005 (6) ซึ่งผลหมากที่ได้มีความชื้นร้อยละ 85±5 มาตรฐานแห้ง



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนไมโครเวฟ : YRU- HA/MW DRYER (FR&E)

**อุปกรณ์อบแห้ง**

อุปกรณ์อบแห้งได้ใช้เครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนไมโครเวฟ YRU-HA/MW DRYER (FR&E) ซึ่งดัดแปลงจากเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ SAMSUNG รุ่น M1712N กำลังสูงสุด 800 วัตต์ ที่ผนังด้านข้างถูกเจาะเป็นรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.2 เซนติเมตร แล้วต่อเข้ากับท่อนำลมร้อนโลหะหนา 0.5 มิลลิเมตร ที่หุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ (Foil) 2 ชั้น เพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟบริเวณรอยต่อและหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนโพลีเอทรีลีน (M-PE Alumax; R-Value 20 hr.ft<sup>2</sup>.of/Btu) หนา 10 มิลลิเมตร หับบอกครั้งเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนออกสู่อากาศแวดล้อม ตรงปลายสุดของท่อโลหะเชื่อมต่อกับพัดลมเป่าอากาศ (Blower) แบบแกนนอนกำลัง 1 แรงม้า ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 รอบต่อนาที (ภาพที่ 1) อากาศในท่อโลหะถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนแบบครีป รุ่น CAL-P 1071 ยาว 30 เซนติเมตร มีกำลังเท่ากับ 1,000 วัตต์

**การทดลองอบแห้ง**

การอบแห้งผลหมากรากไม้ผ่าซีกทำได้โดยนำผลหมากรากที่ปอกเปลือกแล้วทิ้งลูกบรรจุลงในตะกร้า แล้ววางไว้ในห้องอบแห้ง โดยอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ไมโครเวฟที่กำลังเท่ากับ 180 300 450 และ 600 วัตต์ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟที่อุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส

และ 180 300 450 และ 600 วัตต์ ตามลำดับ ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer; DIGICON DA-41) ความละเอียด ±0.1 เมตรต่อวินาที ขณะทดลองอบแห้งวัดอุณหภูมิลมร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital multimeter ; UNAOHM 9400) ความละเอียด ±0.1 องศาเซลเซียส ซึ่งต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัพเปิลชนิด เค (K Type thermocouple) และชั่งน้ำหนักผลหมากรากระหว่างอบแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PB 1502 ความละเอียด 0.01 กรัม ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ย

**การวิเคราะห์การอบแห้ง**

ค่าความชื้น (Moisture content, M) คือค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุตามมาตรฐาน AOAC 2005 (6) ความชื้นในวัสดุแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, M<sub>w</sub>) และ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, M<sub>d</sub>) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ดังนี้

$$M_w(\%) = \frac{(w - d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

$$M_d(\%) = \frac{(w - d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ M<sub>w</sub> คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (ร้อยละมาตรฐานเปียก) M<sub>d</sub> คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

(ร้อยละมาตรฐานแห้ง)  $w$  คือ มวลเปียกของวัสดุ (กรัม) และ  $d$  คือ มวลแห้งของวัสดุ (กรัม)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใดๆ (3-4, 7-9) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3)$$

โดยถือว่า ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ( $M_{eq} \ll M_0$ ) และ ความชื้นที่เวลาใดๆ ( $M_{eq} \ll M_t$ ) จึงละค่าความชื้นสมดุลในสมการ (3) ข้างต้น ทำให้สามารถเขียนสมการ (3) ได้ใหม่ (3, 8, 10) ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน)  $M_0$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)  $M_t$  คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง) และ  $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งหรือรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อลดระยะเวลาและไม่ต้องทำการทดลองมาก (4) การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหามาไม่ผ่าซีก ได้ใช้สมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอ็มพิริคัล (Empirical equation) ของ Newton (3-4) Page (9) Modified Page (3, 11) Henderson & Pabis (11) และ Logarithmic (3) (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (3-4, 9, 11)

ชื่อสมการ	สมการ
1. Newton	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = \exp(-kt)$
2. Page	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = \exp(-kt^n)$
3. Modified Page	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = \exp(-(kt)^n)$
4. Henderson & Pabis	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = a \exp(-kt)$
5. Logarithmic	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = a \exp(-kt) + c$

**การวิเคราะห์สถิติ**

การทดลองนี้ได้พิจารณาค่าทางสถิติ 2 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation,  $R^2$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage of difference, %PD) เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายและทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (12) กล่าวคือ แบบจำลองที่ให้ค่า  $R^2$  สูงสุด และให้ค่า %PD ต่ำสุด จะเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (13) ผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟ ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (5) และ (6) ดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp})^2 - (\sum_{i=1}^N (MR_{exp})^2) / (N - Z)} \quad (5)$$

$$\%PD = \left| \frac{MR_{exp} - MR_{pre}}{(MR_{exp} + MR_{pre})/2} \right| \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลการทดลอง i คือ จำนวนเต็ม 0, 1, 2, ... Z คือ จำนวนค่าคงตัว ตัวห้อย exp คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง pre คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง k คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ k n และ a คือ ค่าคงตัวของสมการ

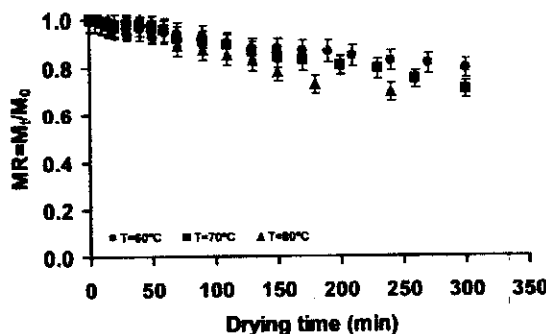
**ผล**

**สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้ง**

การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนอย่างเดียว ส่งผลให้ความชื้นของผลหมากลดลงอย่างช้าๆ โดยที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนความชื้นของผลหมากจะลดลงเร็วที่สุด (ความชื้นลดลงมากที่สุด) กล่าวคือ ที่เวลาการอบแห้งเท่ากับ 240 min ความชื้นของผลหมากจะลดลงจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85.5 มาตรฐานแห้ง เหลือร้อยละ 51.22 มาตรฐานแห้ง (ภาพที่ 2)

**แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง**

เมื่อนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) เพื่อหาค่าคงตัวของสมการสำหรับหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกแบบชิ้นบางด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟ โดยใช้สมการเอ็มพิริคัลของ Newton (3-4) Page (9) Modified Page (3, 11) Henderson & Pabis (11) และ Logarithmic (3) (ตารางที่ 1) ได้ค่าคงตัวสมการดัง ตารางที่ 2



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส

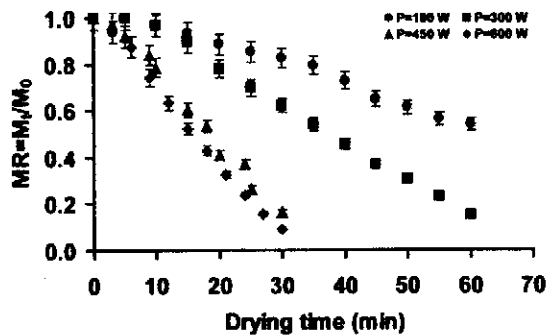
ตารางที่ 2 ค่าคงที่สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีก

สมการ	ค่าคงที่สมการ	R <sup>2</sup>	%PD
<b>อบแห้งด้วยลมร้อน (80 องศาเซลเซียส)</b>			
1. $MR = \exp(-kt)$	$k=0.001542$	0.99342	1.02730
2. $MR = \exp(-kt^n)$	$k=0.001098, n=1.067654$	0.99423	1.00000
3. $MR = \exp(-(kt)^n)$	$k=0.058767, n=0.000030$	-	53.77597
4. $MR = a\exp(-kt)$	$a=1.006181, k=0.095890$	0.99423	1.01590
5. $MR = a\exp(-kt)+c$	$a=-, k=-, c=-$	-	-
<b>อบแห้งด้วยไมโครเวฟ (450 วัตต์)</b>			
1. $MR = \exp(-kt)$	$k=0.039236$	0.94943	19.25128
2. $MR = \exp(-kt^n)$	$k=0.003554, n=1.817736$	0.99658	4.69951
3. $MR = \exp(-(kt)^n)$	$k=0.044927, n=1.819772$	0.99658	4.70034
4. $MR = a\exp(-kt)$	$a=1.113934, k=0.045766$	0.96648	15.34635
5. $MR = a\exp(-kt)+c$	$a=41.00751, k=0.000740, c=-39.9480$	0.99265	5.67133
<b>อบแห้งด้วยลมร้อน (80 องศาเซลเซียส) ร่วมไมโครเวฟ (450 วัตต์)</b>			
1. $MR = \exp(-kt)$	$k=0.039242$	0.93957	22.22875
2. $MR = \exp(-kt^n)$	$k=0.002301, n=1.961222$	0.99933	1.60638
3. $MR = \exp(-(kt)^n)$	$k=0.045162, n=1.964882$	0.99933	1.60716
4. $MR = a\exp(-kt)$	$a=1.139211, k=0.046869$	0.96208	17.57247
5. $MR = a\exp(-kt)+c$	$a=41.75673, k=0.000751, c=-40.6749$	0.99310	4.98589

**วิจารณ์**

**สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้ง**  
การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว ส่งผลให้ความชื้นของผลหมากลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 600 วัตต์ อัตราส่วนความชื้นของผลหมากจะลดลงเร็วที่สุด (ความชื้นลดลงมากที่สุด) กล่าวคือ ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 7.60 มาตรฐานแห้ง

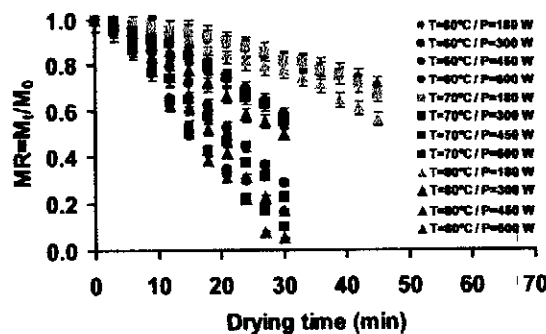
จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85+5 มาตรฐานแห้งภายในเวลา 30 นาที และผลหมากที่ได้มีรอยแตกที่บริเวณผิว ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังเท่ากับ 450 วัตต์ ความชื้นของผลหมากลดลงเหลือร้อยละ 10.26 มาตรฐานแห้ง จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85+5 มาตรฐานแห้ง ภายในเวลา 30 นาที เช่นเดียวกัน (ภาพที่ 3) โดยที่บริเวณผิวนอกของผลหมากไม่มีการรอยแตก



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งผลหมากไม้ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟกำลัง 180 300 450 และ 600 วัตต์

การอบแห้งผลหมากไม้ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟ ส่งผลให้ความชื้นของผลหมากลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 600 วัตต์ อัตราส่วนความชื้นของผลหมากจะลดลงเร็วที่สุด (ความชื้นลดลงมากที่สุด) กล่าวคือ ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 3.19 มาตรฐานแห้ง จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85.5 มาตรฐานแห้ง ภายในเวลา 30 นาที และผลหมากที่ได้มีรอยแตกที่บริเวณผิว แต่การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 450 วัตต์ ความชื้นของผลหมากลดลงเหลือร้อยละ 9.43 มาตรฐานแห้ง จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85±5 มาตรฐานแห้ง ภายในเวลา 30 นาที เช่นเดียวกัน (ภาพที่ 4) โดยที่บริเวณผิวนอกของผลหมากไม่มีรอยแตก

เมื่อเปรียบเทียบผลการอบแห้งผลหมากไม้ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟ พบว่า ที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งผลหมากไม้ผ่าซีกที่ไม่ทำให้ผลหมากเสียหาย โดยความชื้นของผลหมากจะลดลงเหลือร้อยละ 9.43 มาตรฐานแห้ง จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85±5 มาตรฐานแห้ง ภายในเวลา 30 นาที อย่างไรก็ตามการอบแห้งผลหมากด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟจะส่งผลให้สีภายในเนื้อหมากเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองเมื่อเทียบกับการตากแห้ง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ผิวนอกของผลหมากได้รับความร้อนจากลมร้อนแล้วเกิดการหดตัวอย่าง



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งผลหมากไม้ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟ 180 300 450 และ 600 วัตต์



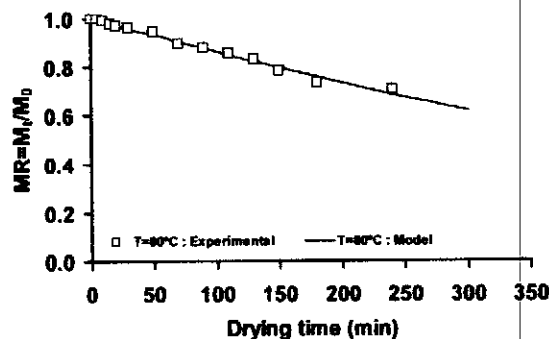
รวดเร็วทำให้การแพร่ของความชื้นจากภายในมายังบริเวณผิวนอกไม่ทันส่งผลให้สารสีของผลหมากเกาะตัวขึ้นที่เนื้อหมาก

#### แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

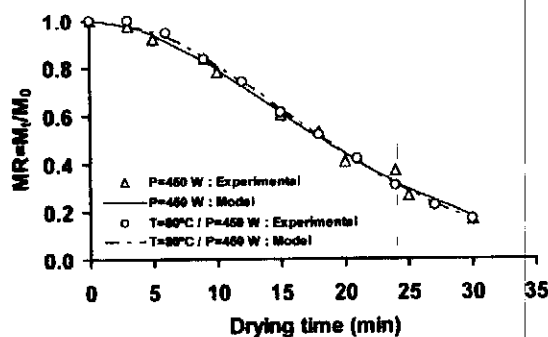
เมื่อนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) เพื่อหาค่าคงตัวของสมการสำหรับหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกแบบชั้นบางด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟ โดยใช้สมการเอ็มพิริคัลของ Newton (3-4) Page (9) Modified Page (3, 11) Henderson & Pabis (11) และ Logarithmic (3) (ตารางที่ 1) ได้ค่าคงตัวสมการดังตารางที่ 2

เมื่อนำค่าคงตัวสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางที่ได้จากการ

วิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (ตารางที่ 2) แทนกลับในสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง (ตารางที่ 1) แล้วหาค่า  $R^2$  และ %PD โดยแบบจำลองที่ให้ค่า  $R^2$  สูงสุด และให้ค่า %PD ต่ำสุด ถือเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีก (ทรงศิริ, 2549) จากการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของ Page (9) เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกที่ทุกค่าอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟ ทั้งการอบแห้งด้วยลมร้อน (ภาพที่ 5) ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟ (ภาพที่ 6) โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งให้ค่า  $R^2$  และ %PD อยู่ในช่วง 0.99423-0.9993 และ 1.00000-4.69951 (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (แบบจำลองของ Page)



ภาพที่ 6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ (แบบจำลองของ Page)

การวิจัยนี้สรุปได้ว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้ประมาณ 10 เท่า เทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และที่อุณหภูมิร้อน 80 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งผลหมาก ในขณะที่แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบเอมพิริคัลของ Page (9) เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมาก ดังนั้น การอบแห้งที่ประยุกต์ใช้พลังงานจากลมร้อนร่วมไมโครเวฟ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับการอบแห้งผลหมากซึ่งสามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง ใช้พื้นที่น้อย และใช้ได้ตลอดเวลาไม่ขึ้นกับลมฟ้าอากาศ

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อับดุลนาเซอร์ ฮายีสามะ ที่กรุณาตรวจสอบนิพนธ์ต้นฉบับ และนางสาวอามานะห์ อูมา นักวิทยาศาสตร์สาขาวิชาฟิสิกส์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์การทดลอง จนการวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- หมาก. กรมวิชาการเกษตร, (ออนไลน์) [22 เมษายน 2554]. สืบค้นได้จาก <http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=25>.
- อนาคตหมากไทยจะเป็นอย่างไร. (ออนไลน์) [2 มกราคม 2554]. สืบค้นได้จาก <http://www.Positioningmag.com/prnews/prnews.aspx?id=49268>.
- Bala, B.K. : Drying and storage of cereal grains. Oxford & IBH Publishing, New Delhi. 302 p., 1997.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ: การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร. 375 หน้า, 2540.
- Tirawanichakul, Y., Tirawanichakul, S. and Saniso, E.: Moisture removal of paddy by agricultural residues: basic physical parameters and drying kinetics modeling. Songklanakarin J. Sci. Technol., Suppl 2: 347-363, 2007.
- AOAC: Official methods of analysis. 18th Edition. Association of official analytical chemists, Washington, D.C., 2005.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W.: Drying cereal grains. 3rd Ed. The AVI publishing company, Inc., Westport, Connecticut. 265 p., 1981.
- Crank, J.: The mathematics of diffusion. Oxford University Press, London. 414 p., 1975.
- Ibrahim, D.: Drying behavior of green beans. Journal of Food Engineering 69: 161-165, 2005.
- Jena, S. and Das, H.: Modeling for vacuum drying characteristics coconut presscake. Journal of Food Engineering 79: 92-99, 2007.
- Sacilik, K.: Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). Journal of Food Engineering 79: 23-30, 2007.
- ทรงศิริ แต้สมบัติ: การพยากรณ์เชิงปริมาณ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร. 487 หน้า, 2549.
- Singh, B. and Gupta, A.K.: Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. Journal of Food Engineering 79: 459-470, 2007.