

---

การอบแห้งชั้นบางชิ้นสั้มแขก : แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่  
Thin Layer Drying of *Garcinia atroviridis* Slice : Drying Kinetic Model and Diffusion Coefficient

อีลีหัยะ สนิโซ\* และ มะรุดีง กาช่า

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

Eleeyah Saniso\* and Maruding Kasa

Department of Science, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University,

---

### บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้นำเสนอการอบแห้งแบบชั้นบางของชิ้นสั้มแขกหั่นบาง มีความหนา 0.50 เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้น 82.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ที่ช่วงอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 45.0-120.0 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.3-1.2 เมตร/วินาที จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งที่อาศัยพลังงานความร้อนร่วมมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์แบบเอ็มพีริคัลที่ดัดแปลงของ Page สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชิ้นสั้มแขกได้ดีที่สุด และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมมีศักยภาพในการลดพลังงานกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวร้อยละ 28.1 ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที มีค่าเท่ากับ  $8.51 \times 10^{-4}$  และ  $5.67 \times 10^{-4}$  ตารางเซนติเมตร/นาที ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การอบแห้งชั้นบาง ผลสั้มแขก พลังงานความร้อนร่วม

### Abstract

This research present a thin layer drying technique for *Garcinia atroviridis* slice. The thickness and initial moisture content of the thin slice samples were 0.50 cm and 82.0% w.b., respectively. Drying experiments were set by varying the inlet air temperature of 45.0-120.0°C and air velocity of 0.3-1.2 m/s. The results show that this drying technique produced higher drying rate of samples, compared to the ones using convectional air drying technique. The simulation data of the Modified Page model is reasonable for describing drying kinetic behavior of these thin slice samples. The combined heating energy dryer is also an alternative technique to reduce the input energy of 28.1% by comparing with the one of a hot air drying technique. The effective moisture diffusivities coefficient were  $8.51 \times 10^{-4}$  and  $5.67 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/min at the temperature of 80°C and air velocity of 1.0 m/s for combined heating energy and convectional air drying, respectively.

**Keywords :** combined heating energy, garcinia fruit, thin layer drying.

---

\*Corresponding author. E-mail : saniso.e@hotmail.com

ส้มแขกเป็นไม้ยืนต้นในสกุลการ์ซีเนีย (*Garcinia*) จัดอยู่ในวงศ์ Guttiferae พบมากใน 2 แหล่ง คือ ทางภาคใต้ของประเทศไทยโดยเฉพาะจังหวัดยะลา ปัตตานีและนราธิวาส ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Garcinia atroviridis* Griff. และประเทศอินเดียมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Garcinia cambogia* Desr. (สถาบันการแพทย์แผนไทย, 2550) ในภาคใต้ของประเทศไทยได้มีการตั้งกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรเพื่อแปรรูปส้มแขกในรูปแบบต่างๆ เช่น กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.ยะติยะ อ.รามัน กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.ท่าสาบ และ ต.ลำพะยา อ.เมือง และกลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.ตาชี อ.ยะหา จ.ยะลา กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.พร่อน อ.ตากใบ และกลุ่มแม่บ้านร่อนพัฒนา ต.ตันหยงมัส อ.ระแงะ จ.นราธิวาส ส้มแขกที่แปรรูปออกมามีส่วนใหญ่อยู่นำมาตากแห้งโดยการตากแดดที่ร้อนจัดประมาณ 3 วัน เมื่อส้มแขกแห้งสนิทแล้วนำไปบรรจุและเก็บไว้ในภาชนะที่สามารถป้องกันความชื้นเพื่อรอการจำหน่ายหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ส้มแขกบดผงสำเร็จรูป ชาขิงส้มแขกและผลิตภัณฑ์ส้มแขกชนิดแคปซูล การทำส้มแขกแห้งของเกษตรกรจะประสบปัญหาในเรื่องของแสงแดดที่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละวันทำให้ต้องใช้เวลานานในการตากแห้งนาน 3-7 วัน ส่งผลให้การผลิตส้มแขกแห้งเป็นไปอย่างล่าช้าและมีคุณภาพต่ำขายได้ในราคาไม่คุ้มค่าที่ควร ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ผลส้มแขกสดที่รอการหั่นและที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดความหนาประมาณ 4-7 มิลลิเมตร เพื่อนำมาตากแห้งเกิดการเน่าเสียเนื่องจากส้มแขกสดจะมีน้ำ (ความชื้น) เป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมากประมาณ 50.0-90.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และสามารถเก็บได้ประมาณ 1-2 วันเท่านั้น นอกจากนี้ส้มแขกแห้งที่ได้จากการตากแดดจะมีฝุ่นละอองและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ด้วย การศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการทำแห้งส้มแขกในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ให้ลดเวลาการทำแห้งประหยัดค่าใช้จ่าย และคงคุณภาพของส้มแขกแห้งไว้ให้มากที่สุดเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ในขณะที่เดียวกันการทำนายแนวทางหรือหาเงื่อนไขการอบแห้ง เช่น อัตราการไหลของลมร้อน อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น อัตราส่วนความชื้น สัมประสิทธิ์การแพร่ อุณหภูมิ และความหนาของวัสดุ เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบการอบแห้งที่เหมาะสม จึงจำเป็นต้องทราบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งส้มแขกที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดระยะเวลาและไม่ต้องทำการทดลองมาก (สมชาติ, 2540) ดังนั้น รายงานวิจัยนี้จึงมุ่งนำเสนอผลการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนา

รูปแบบการอบแห้งและหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งส้มแขก ที่เหมาะสมด้วยการอบแห้งแบบชั้นบางที่อาศัยพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนและแสงอาทิตย์กับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการอบแห้งชั้นส้มแขกที่มีประสิทธิภาพและเผยแพร่สู่กลุ่มเกษตรกรในพื้นที่ได้

### 1. การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ กระบวนการลดความชื้นของวัสดุรูปแบบหนึ่งส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ซึ่งกำหนดด้วยวิธีการถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ การพา (Convection) การนำ (Conduction) และการแผ่รังสี (Radiation) ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลน้ำของวัสดุกับอากาศแวดล้อม การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) อาจเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนแบบการพา การนำ และการแผ่รังสีความร้อน หรือผสมกันทั้งสามแบบก็ได้ ขึ้นกับการออกแบบเครื่องอบแห้ง (Dryer) โดยความร้อนจะถ่ายโอนสู่ผิวของวัสดุเพื่อระเหยน้ำที่ผิวออกไปและจะถ่ายโอนต่อไปยังภายในวัสดุเพื่อเพิ่มความดันไอน้ำภายในวัสดุต่อไป ส่วนการถ่ายโอนมวลน้ำ (Mass transfer) จะขึ้นอยู่กับกลไก 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนย้ายของมวลน้ำภายในวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นภายในวัสดุ และการเคลื่อนย้ายของไอน้ำจากผิวของวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นของอากาศ อัตราการไหลของอากาศและพื้นที่ผิวของวัสดุ (สมชาติ, 2540; Brooker et al., 1981) การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุมีค่าชี้วัดที่สำคัญหลายประการ ซึ่งจะแตกต่างกันและเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด (สมชาติ, 2540; Bala, 1997) อาทิเช่น

1.1 ค่าความชื้น (Moisture content, M) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุ ตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis,  $M_w$ ) และ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis,  $M_d$ ) 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 คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) ตัวห้อย w คือ มวลเปียกของวัสดุ (กรัม) และ d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กรัม)

1.2 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปที่เวลาต่างๆ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

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

เมื่อ M คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน) ตัวห้อย 0 คือ เวลาเริ่มต้น (นาที) t คือ เวลาที่ใดๆ (นาที) และ eq คือ ที่สมดุล

ในกรณีที่ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content,  $M_{eq}$ ) มีค่าน้อยมากๆ เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ( $M_{eq} \ll M_0$ ) และความชื้นที่เวลาใดๆ ( $M_{eq} \ll M_t$ ) จะทำให้เขียนสมการ (3) ได้ใหม่ (สมชาติ, 2540; Bala, 1997; Jena & Das, 2007; Sacilik, 2007) ดังนี้

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

เมื่อ M คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน) ตัวห้อย 0 คือ เวลาเริ่มต้น (นาที) และ t คือ เวลาที่ใดๆ (นาที)

1.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient,  $D_{eff}$ ) คือ สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วของกระแสอากาศ พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคค์ (Fick's second law of diffusion) ที่สมมติว่าการแพร่ของมวลน้ำหรือความชื้นจากวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น (สมชาติ, 2540; Bala, 1997; Crank, 1975) ซึ่งเขียนในรูปสมการ ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)  $D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเซนติเมตร/นาที) x, y, z คือ แกนพิกัด และตัวห้อย t คือ เวลาที่ใดๆ (นาที)

เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงตัว วัสดุจะเกิดการกระจายความชื้นสม่ำเสมอ วัสดุไม่หดตัว และไม่เกิด

ความต้านทานของการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุรวมถึงอุณหภูมิคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของชั้นสัมผัสที่เป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite slab) (Crank, 1975; Jena & Das, 2007) จะคำนวณได้จากผลเฉลยของสมการ (5) คือ

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \left[ \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ - (2i+1)^2 D_{eff} \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2 t \right] \right] \quad (6)$$

หรือ

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \left[ \exp \left( - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) + \frac{1}{9} \exp \left( - \frac{9\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) + \frac{1}{25} \exp \left( - \frac{25\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \right] \quad (7)$$

เนื่องจากพจน์ท้ายๆ ของสมการ (7) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึงประมาณค่าโดยพิจารณาพจน์แรกเพียงพจน์เดียว ซึ่งเขียนได้เป็น

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \left[ \exp \left( - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \right] \quad (8)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน) t คือ เวลาที่ใดๆ (นาที) L คือ ความหนา (เซนติเมตร)  $D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเซนติเมตร/นาที) และ i คือ จำนวนเต็ม 0, 1, 2,....

## 2. แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบาง ได้ใช้สมการเอมพิริคัล (Empirical equation) ที่เป็นมาตรฐาน 4 สมการ ได้แก่ แบบจำลองของ Newton (สมชาติ, 2540; Bala, 1997), Page (Jena & Das, 2007), Modified Page (Bala, 1997; Sacilik, 2007) และ Henderson & Pabis (Sacilik, 2007) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

## 3. สถิติวิเคราะห์

การทดลองนี้ได้พิจารณาค่าทางสถิติ 2 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation,  $R^2$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage of difference, PD) เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง กล่าวคือ แบบจำลองที่ให้ค่า  $R^2$  สูงสุด และให้ค่า PD ต่ำสุด จะเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ

ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นสัมผัสแห้งบาง (ทรงศิริ, 2549; Singh & Gupta, 2007) ซึ่งคำนวณได้ ดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre} - MR_{exp})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp})^2 - (\sum_{i=1}^n (MR_{exp})^2 / (N - Z))} \quad (9)$$

$$PD = \left| \frac{MR_{exp} - MR_{pre}}{(MR_{exp} + MR_{pre})/2} \right| \times 100 \quad (10)$$

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

#### 4. เครื่องอบแห้ง

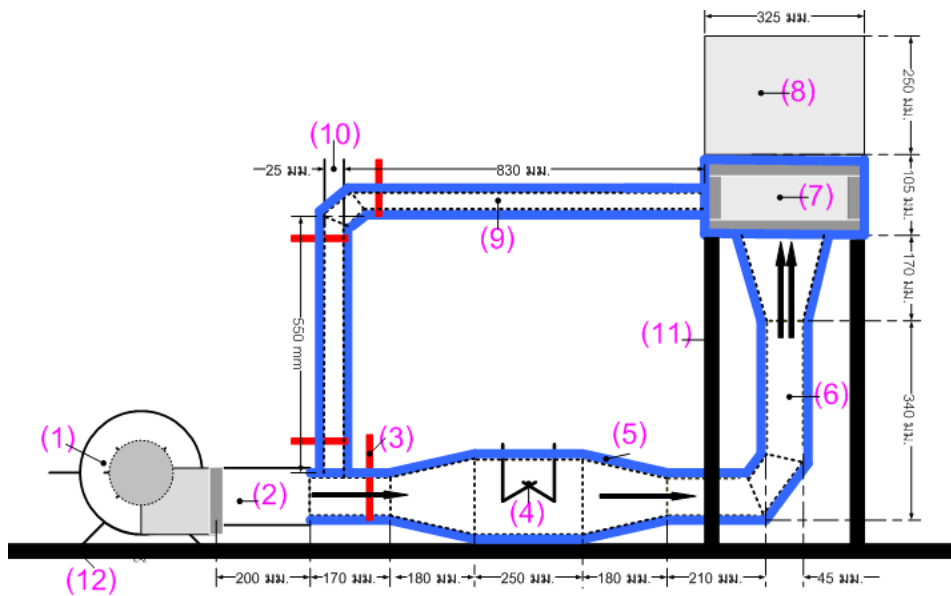
การทดลองนี้ใช้เครื่องอบแห้งชั้นบางพลังงานความร้อนร่วม โมเดล YRU-TLD#1(R&E) (อีลีหิยะ และคณะ, 2551) ลักษณะห้องอบแห้งเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนชนิดโพลีเอทิลีน (M-PE Alumax ; R-Value 20 hr.ft<sup>2</sup>.°f/Btu) ความหนา 1.00 เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น พื้นที่ภายในห้องอบแห้งขนาด 32.50 x 26.00 x 10.50 ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังคาปิด

ด้วยกระจก (Sheet glass) หนา 3.00 เซนติเมตร ขนาด 32.50 x 28.00 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่นประกบกันเป็นทรงหน้าจั่ว ทำมุม 60 องศาต่อกัน ทำหน้าที่รับรังสีแสงอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้ง ดังภาพที่ 1 ควบคุมความร้อนอัตโนมัติด้วย EGO Thermostat (50-300°C) ขดลวดความร้อนแบบขด (φ=132 mm ขนาด 240 W) พัดลมเป่าอากาศ YAMAGUSHI Electric Blower (โมเดล KY-20/220V/50Hz) และมีเตอร์ไฟฟ้า (โมเดล DD 28/220V/5(10)A/50Hz)

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

#### 1. การเตรียมตัวอย่างทดลอง

การทดลองนี้ใช้ผลส้มแขกสุกลักษณะภายนอกเป็นสีเหลืองอ่อนสม่ำเสมอ จากตลาดเมืองใหม่ อ.เมือง จ.ยะลา เมื่อใช้มีดตัดที่ผิวผลไม่เกิดรอยยุบ โดยเริ่มจากล้างผลส้มแขกสดด้วยน้ำสะอาดแล้วหั่นเป็นชิ้นบางประมาณ 0.50 เซนติเมตร ที่วัดด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นสัมผัสแช่ที่ได้ไปหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) โดยความชื้นเฉลี่ยของชิ้นสัมผัสที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 82.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก



- |                       |                        |                                 |
|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| (1) พัดลม             | (5) ฉนวนความร้อน       | (9) ท่อนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ |
| (2) ท่อนำอากาศแวดล้อม | (6) ท่อนำอากาศร้อน     | (10) ท่อระบายอากาศออก           |
| (3) วาล์วผีเสื้อ      | (7) ห้องอบแห้ง         | (11) เสายึดห้องอบแห้ง           |
| (4) ขดลวดความร้อน     | (8) กระจกรับแสงอาทิตย์ | (12) ฐาน                        |

ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งชั้นบางพลังงานความร้อนร่วม YRU-TLD#1(R&E) (อีลีหิยะ และคณะ, 2551)

## 2. วิธีการทดลอง

การทดลองอบแห้งเริ่มโดยนำชิ้นส้มแขกที่เตรียมตัวอย่างไว้ประมาณ 300 กรัม มาอบแห้งโดยอาศัยพลังงานความร้อนร่วม (Out door) กับลมร้อนอย่างเดียว (In door) ด้วยเครื่องอบแห้ง YRU-TLD#1(R&E) ที่อุณหภูมิ 45, 75, 80, 90, 110 และ 120 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.3, 0.8, 1.0 และ 1.2 เมตร/วินาที ณ ชั้นดาดฟ้า อาคาร 9 ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ทำการวัดอุณหภูมิลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งด้วยเครื่อง Flash Link Data Logger รุ่น Delta TRAK ความละเอียด 0.01 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 10 นาทีในช่วง 1 ชั่วโมงแรก และหลังจากนั้นทำการวัดค่าทุกๆ 20-30 นาที ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PB 1502 จานครบ 180 นาที โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำการคำนวณค่าเฉลี่ย จลนพลศาสตร์การอบแห้ง สมการที่เหมาะสมและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลอง พบว่า การอบแห้งที่ความเร็วลม 0.3 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 45 และ 75 องศาเซลเซียส ชิ้นส้มแขกที่ได้มีความชื้นสูง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.0 และ 25.5 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ตามลำดับ หลังจากเก็บไว้ 2-3 วัน ชิ้นส้มแขกจะขึ้นรา ส่วนการอบแห้งที่ความเร็วลม 0.3 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 90, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ชิ้นส้มแขกที่ได้จะแห้งและแข็งโดยมีความชื้นเฉลี่ยในช่วง 1.0-2.5 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก แต่จะเกิดรอยไหม้เป็นสีน้ำตาลจนถึงสีดำบริเวณผิวที่สัมผัสกับลมร้อน ดังภาพที่ 2 (ก) ในขณะที่เดียวกันเมื่อความเร็วลมเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 1.0 และ 1.2 เมตร/วินาที มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 110 และ 120 องศาเซลเซียส ผิวด้านล่างของชิ้นส้มแขกเกิดรอยไหม้ ดังภาพที่ 2 (ข) จากการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว จะได้ว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และการอบแห้งชิ้นส้มแขกด้วยพลังงานความร้อนร่วมที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที มีความเหมาะสมที่สุด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 1. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งชิ้นส้มแขกหั่นชิ้นบางด้วยเครื่องอบแห้ง YRU-TLD#1(R&E) ที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)

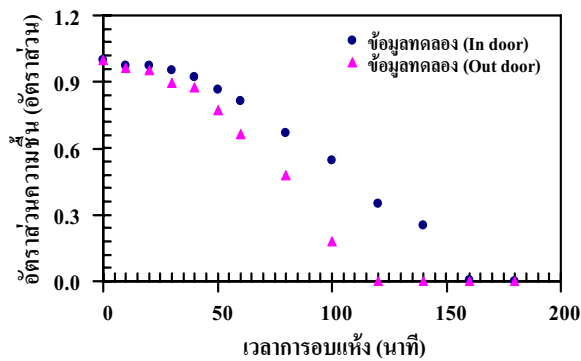
ภาพที่ 2 ชิ้นส้มแขกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ก) ความเร็วลม 0.3 เมตร/วินาที และ (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที

ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที พบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียวจะมีอัตราส่วนความชื้นคงที่ในช่วง 20 และ 30 นาทีแรก ตามลำดับ จากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงนาทีที่ 120 และ 180 ตามลำดับ หลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นจะเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุล ดังภาพที่ 3 การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมที่เวลา 120 นาที ชิ้นส้มแขกแห้งจะมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 5.6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตชิ้นส้มแขกแห้งตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชน (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2552) ที่กำหนดค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 7.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวชิ้นส้มแขกจะมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 14.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเมื่อเก็บไว้ 2-3 วัน ชิ้นส้มแขกจะขึ้นรา

#### 2. แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

เมื่อนำข้อมูลการทดลองอบแห้งชิ้นส้มแขกแบบชิ้นบางด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที มาวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ได้ค่าคงตัวของสมการดังตารางที่ 2 แทนค่าคงตัวลงในสมการในตารางที่ 1 จากนั้นนำ





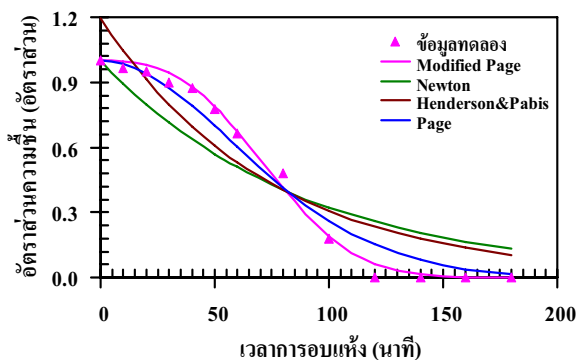
ภาพที่ 3 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งขึ้นสัมแชกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที

ตารางที่ 1 สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบาง

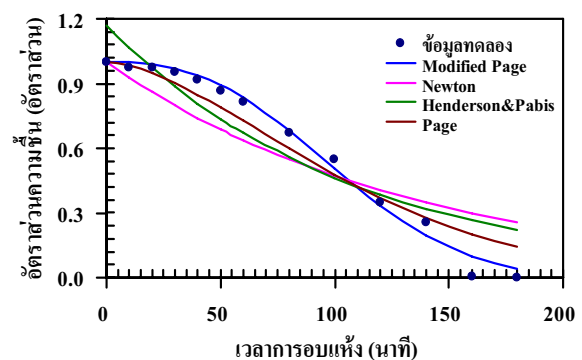
ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
Newton	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = \exp(-kt)$
Page	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = \exp(-(kt)^n)$
Henderson & Pabis	$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) = a \exp(-kt)$

ข้อมูลที่ได้อมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งจะได้ดังภาพที่ 4 (ก) และ (ข) เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ โดยพิจารณาค่า  $R^2$  และ PD พบว่า สมการเอ็มพีริคัลที่ดัดแปลงของ Page ให้ค่า  $R^2$  และ PD ต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Newton, Page และ

Henderson & Pabis โดยการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมสมการที่ดัดแปลงของ Page ให้ค่า  $R^2$  และ PD เท่ากับ 0.99692 และ 0.36160 ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวสมการที่ดัดแปลงของ Page ให้ค่า  $R^2$  และ PD เท่ากับ 0.99437 และ 0.35270 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 อัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งขึ้นสัมแชกแบบชั้นบางเมื่อ (ก) อบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม และ (ข) อบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นสัมผัสแบบชั้นบางที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอย

รูปแบบสมการ	ค่าคงตัวสมการ	R <sup>2</sup>	PD
MR = (M <sub>t</sub> -M <sub>eq</sub> )/(M <sub>0</sub> -M <sub>eq</sub> ) = exp(-kt)	In door k=0.007525	0.89827	1.86155
	Out door k=0.011271	0.91175	2.10351
MR = (M <sub>t</sub> -M <sub>eq</sub> )/(M <sub>0</sub> -M <sub>eq</sub> ) = exp(-kt <sup>n</sup> )	In door k=0.000384 n=1.643070	0.97211	0.76900
	Out door k=0.000216 n=1.896215	0.98615	0.87689
MR = (M <sub>t</sub> -M <sub>eq</sub> )/(M <sub>0</sub> -M <sub>eq</sub> ) = exp(-(kt) <sup>n</sup> )	In door k=0.008624 n=2.600429	0.99437	0.35270
	Out door k=0.011967 n=2.800257	0.99692	0.36160
MR = (M <sub>t</sub> -M <sub>eq</sub> )/(M <sub>0</sub> -M <sub>eq</sub> ) = aexp(-kt)	In door a=1.170685 k=0.009291	0.92728	1.48885
	Out door a=1.190937 k=0.013591	0.93482	1.81200

### 3. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ (m) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามสมการ (8) จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งชั้นสัมผัสที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$m = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (11)$$

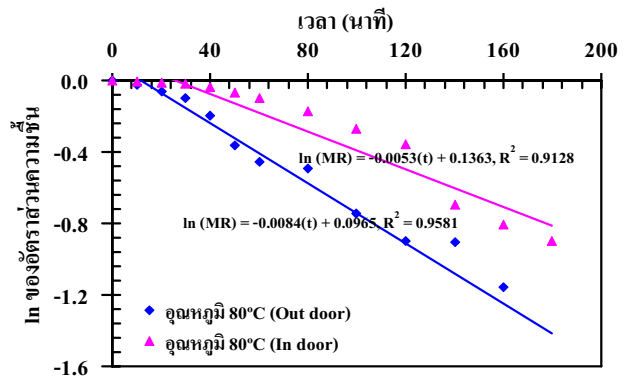
หรือ

$$D_{eff} = -\frac{4mL^2}{\pi^2} \quad (12)$$

เมื่อ D<sub>eff</sub> คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเซนติเมตร/นาทึ) L คือ ความหนา (เซนติเมตร) และ m คือ ความชัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง ดังภาพที่ 5 พบว่า มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น และค่าความชันจะใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลตามสมการ (12) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยของ

การอบแห้งชั้นสัมผัสด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียวเท่ากับ 8.51 x 10<sup>-4</sup> และ 5.67 x 10<sup>-4</sup> ตารางเซนติเมตร/นาทึ ตามลำดับ นอกจากนี้การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมทำให้ประหยัดพลังงานกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวร้อยละ 28.1 กระบวนการอบแห้งชั้นสัมผัสสำหรับเกษตรกรนั้นควรอบที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ในรูปลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง เมื่ออบแห้งชั้นสัมผัสด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว

## สรุป

การอบแห้งขึ้นสัมผัสด้วยพลังงานความร้อนร่วมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที มีความเหมาะสมที่สุด และขึ้นสัมผัสแห้งที่ได้มีความชื้นเฉลี่ย 5.6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ การอบแห้งที่ดัดแปลงของ Page เหมาะสมที่สุดในการทำนาย ผลการทดลองทั้งการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและ ลมร้อนอย่างเดียว นอกจากนี้การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อน ร่วมประหยัดพลังงานกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว เฉลี่ยร้อยละ 28.1 ในขณะที่การอบแห้งขึ้นสัมผัสด้วยพลังงาน ความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว มีสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยเท่ากับ  $8.51 \times 10^{-4}$  และ  $5.67 \times 10^{-4}$  ตารางเซนติเมตร/นาที่ ตามลำดับ ดังนั้น ห้องอบแห้งแบบเรือน กระจกร่วมกับลมร้อนที่ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความเหมาะสมกับเกษตรกรในชุมชน ต.ลำพะยา อ.เมือง จ.ยะลา ซึ่งเป็นพื้นที่เป้าหมายในการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนใน ท้องถิ่นตามพันธกิจของมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลาที่มุ่งเน้นการ วิจัยเพื่อพัฒนาท้องถิ่น

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ บำรุงการศึกษา (บกศ.) ประจำปีงบประมาณ 2551 จากสถาบัน วิจัยและพัฒนาชายแดนภาคใต้ (Southernmost Research and Development Institute, S.R.D.I.) มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

## เอกสารอ้างอิง

- ทรงศิริ แต่สมบัติ. (2549). *การพยากรณ์เชิงปริมาณ*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันการแพทย์แผนไทย. *สัมผัส*. วันที่เข้าถึง 22 กุมภาพันธ์ 2550. เข้าถึงได้จาก URL: [http://ittm.dtam.moph.go.th/product\\_champion/herb9.htm](http://ittm.dtam.moph.go.th/product_champion/herb9.htm).
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหาร บางประเภท*. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน : สัมผัสแห้ง (มพช. 476/2547)*. วันที่เข้าถึง 26 พฤษภาคม 2552. เข้าถึงได้จาก URL: [http://www.tisi.go.th/otop/pdf\\_file/tcps476\\_47.pdf](http://www.tisi.go.th/otop/pdf_file/tcps476_47.pdf)

- อีลีหัยะ สนิโซ มะรุดีง กาศา และมุฮัมมัดรูสตี เจ๊ะเต๊ะ. (2551). การพัฒนาเครื่องอบแห้งชั้นบางพลังงานความร้อนร่วม YRU-TLD#1 (R&E). วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 3(2), 87-96.
- AOAC. (2005). *Official methods of analysis. (18<sup>th</sup> edition)*. Washington, D.C. : Association of official analytical chemists.
- Bala, B.K. (1997). *Drying and storage of cereal grains*. Oxford & IBH Publishing.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. (1981). *Drying cereal grains. (3<sup>rd</sup> edition)*. Westport, Connecticut : The AVI publishing company, Inc.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. London : Oxford University Press.
- Jena, S. and Das, H. (2007). Modelling for vacuum drying characteristics coconut presscake. *Journal of Food Engineering*, 79, 92-99.
- Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, 79, 23-30.
- Singh, B. and Gupta, A.K. (2007). Mass Transfer Kinetics and Determination of Effective Diffusivity during Convective Dehydration of Pre-osmosed Carrot Cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, 459-470.