

---

จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน  
Drying Kinetics of Pandanus Leaf by Infrared Radiation Combine Hot Air and Hot Air

อนุสรนา นาดิ<sup>1</sup> ยุตธนา ฐิระวณิชยกุล<sup>2\*</sup> และ สุภวรรณ ฐิระวณิชยกุล<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>2</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Anusara Nadee<sup>1</sup>, Yutthana Tirawanichakul<sup>2\*</sup> and Supawan Tirawanichakul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, 1,3Energy Technology Research Center (ETRC) Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

<sup>2,3</sup>Plasma and Energy Technology Research Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University .

---

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% มาตรฐานแห้ง และ 8-12% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง การทำนายผลของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว คือ แบบจำลอง Logarithmic ส่วนแบบ จำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลองของ Page โดยผลการทดลองที่ค่าใกล้เคียงกับ แบบจำลองดังกล่าว ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ร้อยละการคืนตัวและค่าสีในระบบ CIE (L\*, a\* และ b\*) ของใบเตยอบแห้ง ในทุกกรณีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05)

**คำสำคัญ :** จลนพลศาสตร์การอบแห้ง รังสีอินฟราเรด ใบเตย คุณภาพ

---

\*Corresponding author. E-mail: yutthana.t@psu.ac.th

## Abstract

The objective of this research was to study drying of Pandanus leaf for herbal tea by infrared radiation (IR) combine hot air (HA). Determination of drying kinetics, physical quality and specific energy consumption were presented. The experiments were carried out under the conditions of drying temperature range between 45 and 65°C and infrared radiation power value of 500 and 1,000 W. Initial moisture content and final moisture content of Pandanus leaf was between 400 and 600% dry-basis and of 8-12% dry-basis, respectively. The experimental results showed that drying rate increased with increase of drying temperature whilst specific energy consumption proportionally decreased with increase of drying temperature. Determination of drying kinetic of Pandanus leaf replied that simulated data using Logarithmic model for IR 1,000 W combined with HA drying and HA drying and the simulated data using Page's model for IR 500 W combined with HA had a good relation to experimental data. For product quality analysis, the results stated that the percentage of rehydration and the colorness value ( $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  value of CIE Lab) of all Pandanus leaf drying conditions were significantly different ( $p < 0.05$ ).

**Keyword :** Drying kinetics, Infrared radiation, Pandanus, quality

## บทนำ

ใบเตย (*Pandanus odoratus Ridic.*) เป็นพืชสมุนไพรจำพวกหญ้า มีสารหอมระเหย กลิ่นหอม และมีสารสีเขียวเป็นคลอโรฟิลล์ ใบเตยมีสรรพคุณทางยา คือ ช่วยลดอาการกระหายน้ำ บำรุงหัวใจและช่วยให้สดชื่น เป็นต้น (ศูนย์ข้อมูลสมุนไพร, 2552) ในปัจจุบันสมุนไพรไทยกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยมีสรรพคุณเป็นยาแผนปัจจุบันและการแพทย์แผนไทย ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งการบำบัด รักษาโรค และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ อาทิเช่น ใบเตย ดอกกระเจี๊ยบ ดอกคำฝอย ตะไคร้ ถูกแปรรูปในรูปแบบผลิตภัณฑ์ใบชาสำเร็จรูป ซึ่งนอกจากจะเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาแล้วยังสามารถใช้เป็นเครื่องดื่มสุขภาพนอกฤดูการเก็บเกี่ยวอีกประการหนึ่ง (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2546 และ 2548) อย่างไรก็ตามก็พบว่า การลดความชื้นในวัสดุอาหารเมล็ดพืชสด พืชสมุนไพรและอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้วรวมทั้งใบเตยนั้นมีความสำคัญ เพราะปัจจัยเรื่องปริมาณความชื้นมีผลโดยตรงต่อการคงคุณภาพของสรรพคุณยา กรรมวิธีส่วนใหญ่ที่ปฏิบัติกันทั่วไป จะใช้วิธีการตากแดดให้แห้ง ซึ่งมักประสบปัญหาหลักๆ 2 ประการ ได้แก่ ประการที่หนึ่ง ผลิตภัณฑ์จะมีการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรก เนื่องจากกรรมวิธีการตากกลางแจ้งจนสถานที่สำหรับใช้ในการตากแห้ง ซึ่งอาจเกิดการรบกวนจากสัตว์และแมลง ประการต่อมา คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตากแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากระยะเวลาในการตากแห้งอาจไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของแสงอาทิตย์และการไหลของกระแสอากาศในแต่ละวัน แต่ละพื้นที่ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

เทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสม มาใช้ในกระบวนการอบแห้ง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการกระบวนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรดและรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การอบแห้งชาใบหม่อนด้วยรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวความถี่จะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Wanyo *et al.*, 2009) การอบแห้งใบกระเพราแดงด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบลมร้อน และยังสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (Apintanapong, 2009) สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพสีและอัตราการคืนตัวของวัสดุหลังการอบแห้ง เมื่ออบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนพบว่า เมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังอินฟราเรด

ไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดง และอัตราการคืนตัว พบว่ากำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลมเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการคืนตัว (Nuthong *et al.*, 2011) ด้วยเหตุนี้การใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนจึงมีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาหาแนวทางการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด และรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพของใบเตย ได้แก่ สี และร้อยละการคืนตัวของใบเตย และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### วัสดุ

ใบเตยที่ใช้ในการทดลองจัดหาจากตลาดสด อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา นำมาล้างให้สะอาด และตัดให้มีขนาด  $1 \times 1.5 \text{ cm}^2$  และหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (1995)

### อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมาโดยมีแหล่งพลังงานความร้อน 3 แหล่ง คือ พลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อน พลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรด และพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้

1) ห้องอบแห้งมีปริมาตร  $60 \times 80 \times 158.5 \text{ cm}^3$  ภายในบุฉนวนใยแก้ว หนา 5 cm

2) เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าขนาด 1,000 W จำนวน 10 ตัว

3) แผงรังสีอินฟราเรดขนาด 500 W จำนวน 3 แผงวางในแนวขนานกับถาดอบแห้งและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.12 m

4) แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด  $32.5 \times 133 \times 240 \text{ cm}^3$  วางทำมุมเอียง 14 องศา กับแนวระดับ

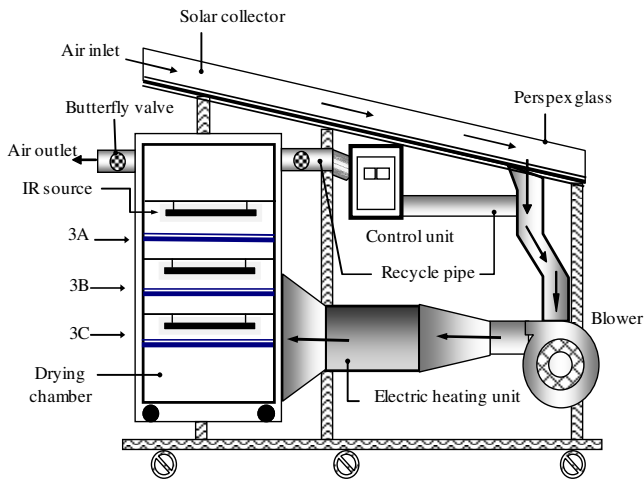
5) ถาดอบแห้งสแตนเลสขนาด  $44 \times 70 \times 5 \text{ cm}^3$  จำนวน 3 ถาด ดังรูป (3C เป็นถาดล่าง 3B เป็นถาดที่ 2 และ 3A เป็นถาดที่ 3)

6) พัดลม มีใบพัดแบบโค้งหน้าขนาด 1 hp 1 เครื่อง

7) ท่ออากาศไหลกลับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm จำนวน 2 ท่อ

2. เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด  $\pm 0.1 \text{ g}$

3. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิต่อกับเทอร์โมคัปเบิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิกระเปาะเปียก



ภาพที่ 1 รายละเอียดของเครื่องอบแห้ง

## วิธีการวิจัย

### การทดลองอบแห้งใบเตย

1. นำใบเตยที่หั่นแล้ว ใส่ถาดอบแห้ง ถาดละ 330 กรัม เกลี่ยให้ทั่วถาด ทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65°C ความเร็วลมร้อน 1.1 m/s สำหรับรังสีอินฟราเรดทดลองที่กำลังรังสีอินฟราเรด 500 W และ 1000 W

2. บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักกับเวลา อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตู้อบแห้ง ในตอนเริ่มต้นการทดลองเก็บข้อมูลทุก 10 นาที หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการเก็บข้อมูลทุก 20 นาที กำหนดความชื้นสุดท้ายใบเตยช่วง 8-12% มาตรฐานแห้ง

3. บันทึกปริมาณพลังงานที่ใช้ด้วย Watt-hour meter

### การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

1. การวิเคราะห์ห้อตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง (Hii et al., 2009; Tirawanichakul et al., 2009)

Name of model	Model equation	
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(3)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(4)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(5)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(6)
Two term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	(7)
Logistic	$MR = a / (1 + \exp(kt))$	(8)

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดในแต่ละสถานะ เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Drying rate} = \frac{(M_{in} - M_f) W_d}{\text{Drying time}} \quad (1)$$

$$\text{SEC} = \frac{3.6 E_p}{(M_{in} - M_f) W_d} \quad (2)$$

เมื่อ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kW-h),  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของใบเตย (% dry-basis),  $M_f$  คือ ความชื้นสุดท้ายของใบเตย (% dry-basis),  $W_d$  คือ น้ำหนักแห้ง (kg) และ 3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

### 2. การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 1

จากการนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบไม่เชิงเส้นเพื่อเลือกสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของสมการที่ (3) ถึง (8) ในตารางที่ 1 จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ที่สูงสุดและค่าค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9a) และ (9d) ตามลำดับ

$$\therefore R^2 = r^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{bSS_{xy}}{SS_{yy}} \quad (9a)$$

และค่า SSR, SST, SSxy และ b แสดงรายละเอียดได้ดังสมการที่ (9b)

$$SST = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

$$SSR = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = bSS_{xy} = \frac{(SS_{xy})^2}{SS_{xx}} \quad (9b)$$

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = SS_{yy} - 2bSS_{xy} + bSS_{xy}$$

$$= SS_{yy} - \frac{(SS_{xy})^2}{SS_{xx}}$$

$$SS_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}$$

$$SS_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n}$$

$$SS_{yy} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \quad (9c)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (9d)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $X_i, Y_i$  คือ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที i ใดๆ  
 $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระ  
 $\bar{Y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม  
 $\hat{Y}_i$  คือ ค่าตัวแปรตามที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ค่า i ใดๆ  
 $MR_{exp,i}$  และ  $MR_{pre,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองและผลจากการทำนายที่ค่า i ใดๆ ตามลำดับ

## การวิเคราะห์คุณภาพใบเตยหลังการอบแห้ง

### 1. การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสี

การวัดสีของใบเตยก่อนและหลังการอบแห้ง ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น Color Flex ก่อนการวัดสีแต่ละตัวอย่างจะทำการเทียบกับจานสีมาตรฐาน ( $X = 77.69, Y = 82.57, Z = 87.92$ ) ตามมาตรฐานระบบ CIE ( $L^*, a^*$  และ  $b^*$ ) โดยค่า  $L^*$  แสดงค่าความสว่างและสีค่า  $a^*$  แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า  $b^*$  แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำการทดสอบ ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

### 2. การวิเคราะห์ร้อยละการคืนตัว

การวิเคราะห์ร้อยละการคืนตัวของใบเตยหลังการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ทำการทดสอบโดยการนำใบเตยหลังการอบแห้งมาแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ  $90 \pm 3^\circ\text{C}$  ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นรินน้ำออกและทำการซับน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหลังการคืนตัว คำนวณร้อยละการการคืนตัวตามสมการที่ (10)

$$\%Rehydration = \frac{m_f}{m_d} \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ  $m_d$  และ  $m_f$  คือ น้ำหนักของใบเตยก่อนและหลังกระบวนการคืนตัว (g) ตามลำดับ

## ผลการวิจัยและอภิปราย

### จลนพลศาสตร์การอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล

จากผลการทดลองการอบแห้งใบเตย โดยใช้สภาวะการอบแห้งต่างๆ และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่างๆ ดังสมการที่ (11) และผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2

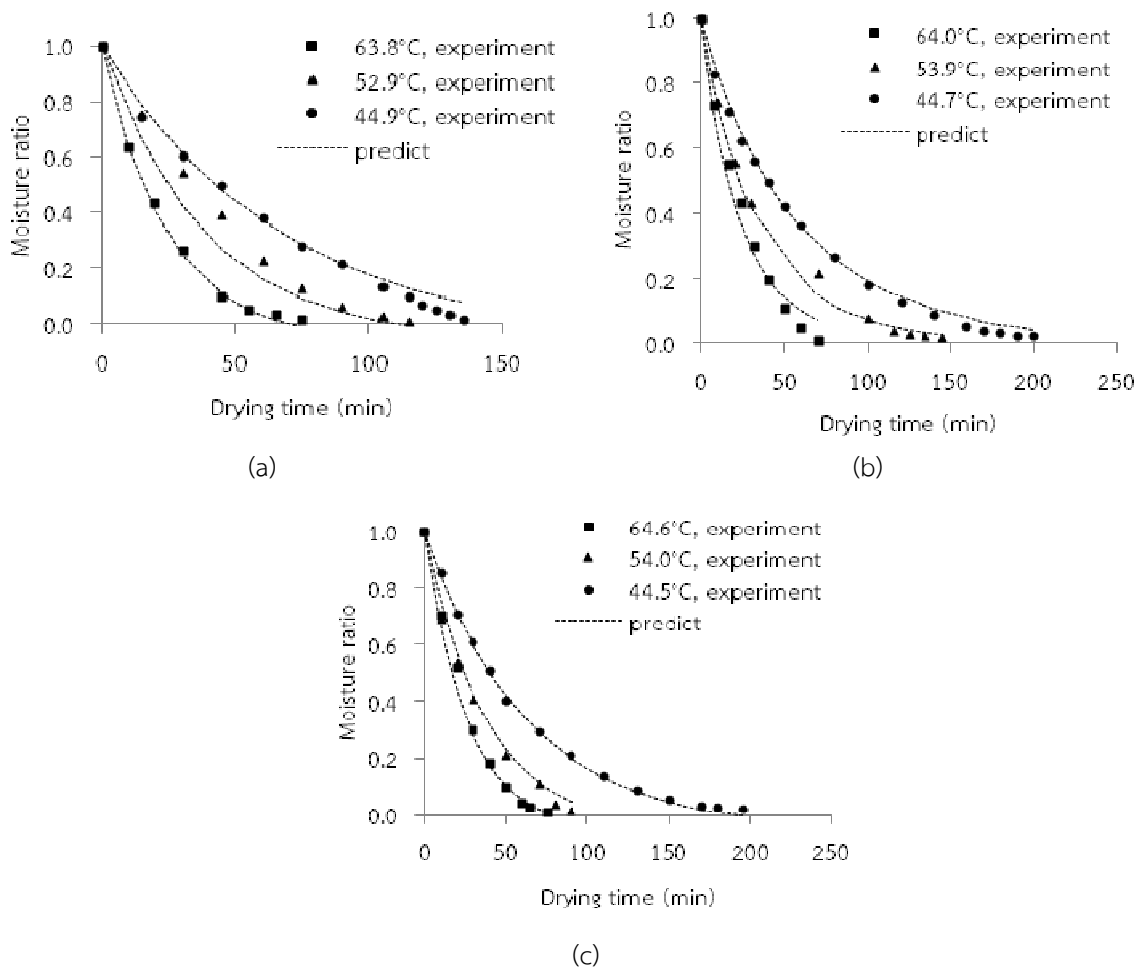
$$MR = \text{Moisture ratio} = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (11)$$

เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% dry-basis),  $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (% dry-basis),  $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis), RH (Relative Humidity) คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (0.1-0.9) และ T คือ อุณหภูมิอบแห้ง ( $^\circ\text{C}$ ) โดยค่า  $M_{eq}$  หาได้จากสมการของ BET (Brunauer-Emmett-Teller) (อนุสรนาตี และคณะ, 2554) ดังรายละเอียดดังสมการที่ (12)

$$\ln \frac{RH}{(1 - RH)M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(c - 1)RH}{M_m C} \quad (12)$$

โดย  $M_m = 0.066 - (7.9T \times 10^{-6})$  และ  $C = 40.559 - 0.00015T$  (อนุสรนาตี และคณะ, 2554)

จากภาพที่ 2(a) ถึง 2(c) แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย โดยมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 400-600% dry-basis และ ความชื้นสุดท้ายหลังอบแห้งแต่ละกรณีอยู่ในช่วง 8-12% dry-basis จากกราฟทั้งสามรูปย่อย จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้นเกรเดียนท์ของอุณหภูมิระหว่างแหล่งพลังงานและวัสดุจะเพิ่มมากขึ้น อัตราการถ่ายโอนความชื้นยิ่งสูงมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น สำหรับผลการทำนายการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อนและลมร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่าผลการคำนวณจากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic มีค่าใกล้เคียงกับ



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W (a) และ 500 W (b) ร่วมกับลมร้อน และลมร้อนเพียงอย่างเดียว (c)

ผลการทดลองที่สุด ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือแบบจำลองของ Page โดยสามารถแสดงดังตารางที่ 2

จากการทดลองสามารถหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้ โดยพิจารณาค่า  $R^2$  และ RMSE โดยที่

$$k = X_0 + X_1 T \quad (13)$$

เมื่อ  $X_0$  และ  $X_1$  คือ ค่าคงตัว และ  $T$  คือ อุณหภูมิอบแห้ง ( $^{\circ}\text{C}$ )  
**อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง**

จากผลการทดลองแสดงอัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานในแต่ละส่วนของระบบ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ของ

ระบบอบแห้งแต่ละเงื่อนไขที่ทำการทดลอง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง  $45\text{--}65^{\circ}\text{C}$  และกำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 และ 500 W พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้ง โดยพบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ  $64.0^{\circ}\text{C}$  มีอัตราการอบแห้งสูงสุด เนื่องจากระบบทำการอบแห้งเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนไปยังวัสดุพร้อมๆ กัน ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานจากลมร้อนที่ผิวสัมผัสและการแผ่รังสีความร้อน

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางของใบเตยภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ

Heat source	Model	Arbitrary constant			R <sup>2</sup>	RMSE
			X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>		
Infrared (IR) 1,000 W + Hot air (HA)	Newton	k	-0.0446	0.0014	0.9756	0.0498
	Page	k	-0.0499	0.0016	0.9726	0.0528
		n=0.9491				
	Henderson and Pabis	k	-0.0389	0.0013	0.9784	0.0469
		a=1.0222				
	Logarithmic	k	-0.0464	0.0014	0.9796	0.0455
		a=1.0654 c=-0.0623				
	Two term	k <sub>1</sub>	-0.2020	0.0048	0.9715	0.0539
		k <sub>2</sub>	-0.0674	0.0019		
		a=-0.1287 b=1.1320				
Logistic	k	-5.4756	0.0491	0.8912	0.1032	
	a=1.0498					
Infrared (IR) 500 W + Hot air (HA)	Newton	k	-0.0460	0.0014	0.9896	0.0323
	Page	k	-0.0433	0.0015	0.9930	0.0265
		n=0.9345				
	Henderson and Pabis	k	-0.0428	0.0013	0.9914	0.0293
		a=0.9997				
	Logarithmic	k	-0.0434	0.0014	0.9912	0.0297
		a=0.9872 c=0.0105				
	Two term	k <sub>1</sub>	-0.0639	0.0017	0.9866	0.0367
		k <sub>2</sub>	0.1282	-0.0015		
		a=0.6852 b=0.3500				
Logistic	k	-5.1041	0.0409	0.9363	0.0800	
	a=1.0536					
Hot air (HA)	Newton	k	-0.0538	0.0016	0.9863	0.0380
	Page	k	-0.0488	0.0016	0.9884	0.0350
		n=0.9554				
	Henderson and Pabis	k	-0.0367	0.0012	0.9921	0.0289
		a=1.0117				
	Logarithmic	k	-0.0326	0.0011	0.9945	0.0240
		a=1.0477 c=-0.0501				
	Two term	k <sub>1</sub>	-0.0366	0.0012	0.9921	0.0289
		k <sub>2</sub>	0.6124	-0.0084		
		a=1.0123 b=-0.0006				
Logistic	k	-5.3337	0.0460	0.9174	0.0934	
	a=1.0565					

Note : a, b, c, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> and n mean arbitrary constant in simulated drying equation and k, k<sub>1</sub> and k<sub>2</sub> was also represented in linear function of drying temperature (in °C)

ตารางที่ 3 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งใบเตยที่สภาวะต่างๆ

Source	Drying temperature (°C)	Drying time (min)	Drying rate (kg/h)	E <sub>p</sub> (kW•h)				SEC (MJ/kg of water evaporated)
				Blower	Heater	IR	Total	
IR 1,000W+HA	63.8	75	0.19	0.10	0.80	1.2	2.10	9.27
	52.7	105	0.17	0.40	1.20	0.7	2.30	11.90
	44.9	135	0.08	0.30	0.80	0.2	1.30	17.70
IR 500W+HA	64.0	70	0.23	0.15	0.70	0.5	1.35	10.95
	53.9	145	0.12	0.35	1.20	0.5	2.05	16.05
	44.7	200	0.09	0.55	1.10	0.5	2.15	16.33
HA	64.6	75	0.21	0.20	0.95	-	1.15	8.33
	54.0	90	0.18	0.35	1.05	-	1.40	11.37
	44.5	195	0.09	0.65	1.21	-	1.86	14.37

Note : SEC means specific energy consumption in MJ/kg of water evaporated. IR and HA mean infrared and hot air drying

ไปยังภายในวัสดุได้โดยตรง ทำให้น้ำภายในเนื้อวัสดุถูกถ่ายเทไปยังอากาศแวดล้อมเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว  
อัตราการคืนตัวและคุณภาพด้านสี

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบวัดสีของใบเตยที่สภาวะต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้ความสว่าง (L\*) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีผลต่อค่าความเป็นสีเขียว (a\*) และสีเหลือง (b\*) เพียงเล็กน้อย

ในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยประเมินข้อมูลจากร้อยละการคืนตัวของใบเตยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขึ้นไป ร้อยละการคืนตัวของใบเตยที่อบแห้งด้วยทั้งสามแหล่งพลังงานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ตารางที่ 4 ค่าสีของใบเตยหลังการอบแห้งและร้อยละการคืนตัวของใบเตยที่สภาวะอบแห้งต่างๆ

Source	Drying temperature (°C)	Colorness in CIE unit			% Rehydration
		L*	a*	b*	
HA	64.6	38.69 <sup>b</sup>	-10.35 <sup>d</sup>	20.94 <sup>a</sup>	80.37 <sup>ab</sup>
	54.7	38.68 <sup>b</sup>	-9.44 <sup>c</sup>	20.02 <sup>a</sup>	81.03 <sup>ab</sup>
	44.6	35.12 <sup>c</sup>	-8.53 <sup>c</sup>	20.04 <sup>a</sup>	78.62 <sup>b</sup>
IR 1,000W+HA	63.8	46.30 <sup>a</sup>	-5.59 <sup>a</sup>	15.67 <sup>b</sup>	80.58 <sup>ab</sup>
	52.7	38.48 <sup>b</sup>	-8.58 <sup>c</sup>	21.36 <sup>a</sup>	81.86 <sup>a</sup>
	44.9	40.01 <sup>b</sup>	-7.30 <sup>b</sup>	16.99 <sup>b</sup>	80.87 <sup>ab</sup>
IR 500W+HA	64.0	46.30 <sup>a</sup>	-5.59 <sup>a</sup>	15.67 <sup>b</sup>	82.18 <sup>a</sup>
	53.9	38.48 <sup>b</sup>	-8.58 <sup>c</sup>	21.36 <sup>a</sup>	82.24 <sup>a</sup>
	44.7	31.47 <sup>c</sup>	-8.57 <sup>c</sup>	20.80 <sup>a</sup>	82.17 <sup>a</sup>

Note : Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95% confidence level (p<0.05); IR and HA mean infrared and hot air drying, respectively



## สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของปัจจัยของการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์ใบเตยที่ได้ สามารถสรุปโดยภาพรวมของงานวิจัยนี้ออกเป็นข้อๆ ดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และระยะเวลาในการอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่ากำลังของรังสีอินฟราเรด
2. อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เหมาะสมพบว่าแบบจำลอง Logarithmic สามารถทำนายการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อน และลมร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนแบบจำลองของ Page สามารถทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อนได้อย่างครอบคลุม
3. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C และกำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 W และ 500 W พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง
4. ผลการทดสอบคุณภาพได้แก่ สีและร้อยละการคืนตัวพบว่า การใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง ส่งผลให้ความสว่าง ( $L^*$ ) สูงขึ้น และการอบแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้ร้อยละการคืนตัวของใบเตยสูงกว่าการอบแห้งที่มีรังสีอินฟราเรดร่วม

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ในการทำวิจัย และวิเคราะห์ผลด้านคุณภาพ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในโครงการทุนตรี-โท 5 ปี และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนวิจัยเงินทุนในการทำโครงการวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

ภราดร หนูทอง, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ, กอดขวัญ นามสงวน และศิระ อัจฉริยวิริยะ. (2552). จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. *เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*. 4-7 พฤศจิกายน 2552. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. (338 หน้า). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

ศูนย์ข้อมูลสมุนไพร. (2552). *สมุนไพรไทย*. สถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข.

อนุสร นาดี, สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล และยุพธนา ภูริระวิชย์กุล. (2554). การอบแห้งชาใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด. *เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9*. 2-3 พฤษภาคม 2554.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนใบเตยแห้ง. (2548). *มผช. ใบเตยแห้งที่ 735/2548*, 5 หน้า.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนใบบวบกมขงด้อม. (2546). *มผช. ใบบวบกมขงด้อมที่ 167/2546*, 5 หน้า.

AOAC. (1995). Official method of analysis, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.

Apintanapong, M. (2009). Infrared drying of holy basil leaves and its effect on sensory characteristics. *Agricultural Science Journal*, 40(Suppl. 3), 69-72.

Hii, C.L., Law, C.L. & Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90, 191-198.

Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. & Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, 102, 233-239.

Tirawanichakul, S., Linpo, P. & Tirawanichakul, Y. (2009). Influence of infrared and heat convection on drying kinetics of shrimp and quality. *Thai Journal of Physics*, 4, 116-120.

Wanyo, P., Meeso, N., Dondee, S. & Siriamornpun, S. (2009). Feasibility of mulberry tea drying using combination of far-infrared radiation and air convection. *Agricultural Science Journal*, 40(Suppl. 1), 497-500.