



## การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางของพริกชี้หนู

### The Study of Thin Layer Drying Model of Chili

นพมาศ ประทุมสูตร<sup>1\*</sup> และ ทวีเดช หมั่นภูเขียว<sup>2</sup>

Noppamas Pratummasoot<sup>1\*</sup> and Tawedach Mundpookier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

<sup>2</sup>สาขาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

<sup>1</sup>Applied Physics Program, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Khlong Luang District, Pathum Thani 13180, THAILAND

<sup>2</sup>Basic Science Program, Faculty of Allied Health Science, Patumthani University, Mueang District, Pathum Thani 12000.THAILAND

\*Corresponding author e-mail: noppamas.pra@vru.ac.th

#### ARTICLE INFO

#### ABSTRACT

Article history:

Received: 28 September, 2021

Revised: 1 November, 2021

Accepted: 8 November, 2021

Available online: 00 November, 2021

DOI: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

**Keywords:** model, thin layer drying, chili, moisture ratio

The objective of this research was to study a thin layer drying model as an efficient mathematical model in order to determine the optimize model to study the relationship between the ratio of moisture and the time for chili. The researcher brought chili, which has a mass and initial moisture value, in the range of 4.2-5.2 g and 330-380%, d.b., respectively. Then, it drying with temperature control equal to 50°C, 60°C and 70°C, and the relative humidity values of air were 10%, 20% and 30% at wind speed equal to 1 m/s. There will be a total of 9 trials. The dryer used in this experiment consisted of two main parts: 1) the relative humidity control of the air inside the machine, which is a glass chamber and ceramic packed system for producing saturated air, and 2) the control section temperature which is a temperature control button on the outside and temperature can be adjusted as needed. The experimental results found that the last moisture content ranges from 6-8%, d.b. Then, the results of the experiments were then used to calculate the moisture content and moisture ratio from the chili experiments for calculation and compared to the moisture ratio obtained from a total of 6 models. According to the results of the

model's accuracy test, the models suitable for chili for all temperatures and humidity were the Wang and Singh models, which yielded differences in the form of RMSD and MBD in the range of 2.78 – 6.86% and -0.20 – 2.95%, respectively.

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความชื้นกับเวลาสำหรับพริกชี้หนู ผู้วิจัยได้นำพริกชี้หนูซึ่งมีมวลและค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 42-52 กรัม และ 330-380%, d.b. ตามลำดับ จากนั้นนำพริกชี้หนูไปอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 50°C 60°C และ 70°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 10% 20% และ 30% ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s ซึ่งจะมีการทดลองทั้งหมด 9 ชุดการทดลอง ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ห้องอบแห้งโดยมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องมีลักษณะเป็นห้องกระจกและมีระบบเซรามิก (ceramic packed) สำหรับผลิตอากาศอิมตัว และ 2) ชุดควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งซึ่งติดตั้งอยู่ด้านนอกห้องอบแห้ง ผลการทดลองพบว่า ความชื้นสุดท้ายที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 6-8%, d.b. จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณปริมาณความชื้น และอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองของพริกชี้หนูเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองจำนวน 6 แบบจำลอง จากผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่เหมาะสมกับพริกชี้หนูสำหรับทุกอุณหภูมิและความชื้นคือ แบบจำลอง Wang and Singh ซึ่งมีค่าความแตกต่างในรูปของ RMSD และ MBD อยู่ในช่วง 2.78 – 6.86 % และ -0.20 – 2.95 % ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** แบบจำลอง การอบแห้งชั้นบาง พริกชี้หนู อัตราส่วนความชื้น

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น พริกชี้หนู ซึ่งพริกชี้หนู

ถือว่าเป็นพริกที่นิยมนำมารับประทานหรือนำมาใช้ประโยชน์มากในบรรดาพริกทั้งหลาย เนื่องด้วยเป็นพริกที่มีรสเผ็ดจัด สีแดงสดสวยงามเหมาะสำหรับการปรุงอาหารหรือนำมาแปรรูปเป็นพริกป่นสำหรับการประกอบอาหาร แต่พริกชี้หนูมีอายุในการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น จึงจำเป็นต้องมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์เพื่อยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น โดยทั่วไปเกษตรกรนิยมนำผลผลิตทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แห้งโดยนำมาตากแดดตามธรรมชาติ แต่ในการตากแดดตามธรรมชาติจะมีปัญหาในเรื่องของการปนเปื้อนของฝุ่นละออง แมลง หรือนกที่มากทำลายผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ในช่วงที่ไม่มีแดดหรือฝนตกเกษตรกรก็ไม่สามารถตากแห้งผลิตภัณฑ์ได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้น ได้มีนักวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งไทยและประเทศต่าง ๆ ได้พัฒนาวิธีการในการอบแห้งผลิตภัณฑ์จากวิธีต่าง ๆ (1) ซึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้เรียกว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Dryer) (2-8) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการตากแห้งหรืออบแห้ง โดยหลักการทั่วไปของการอบแห้งผลิตภัณฑ์จะเป็นกระบวนการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาภายนอก โดยในกรณีของผักและผลไม้ การอบแห้งหรือตากแห้งจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษา แต่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำการอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิดเท่านั้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจจะเหมาะสมกับการอบแห้งที่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทำการอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มีคุณภาพ คุณประโยชน์ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด

โดยวิธีที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์แห้งมีคุณภาพส่วนใหญ่จะใช้เครื่องอบแห้งเชิงกลซึ่งสามารถควบคุม

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งได้ นอกจากการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์แล้ว การศึกษาปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน สำหรับการศึกษาหรือทำนายปริมาณความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้มีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการการอบแห้งแบบชั้นบางใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการแห้งของผลิตภัณฑ์ (9-14) และเนื่องจากการศึกษาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางในประเทศไทยมีข้อมูลการศึกษาค่อนข้างน้อยและมีการศึกษาบางผลิตภัณฑ์เท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาสมการอบแห้งที่ใช้สมการแบบชั้นบางเพื่อนำสมการที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้พริกชี้หนูในการทดลอง

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบาง

ในการศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบางของผลผลิตต่าง ๆ ทางการเกษตรจะมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางไว้หลายสมการที่มีลักษณะแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ

MR = อัตราส่วนความชื้น (-)

M = ความชื้นขณะเวลา t (% , d.b.)

$M_e$  = ความชื้นสมดุล (% , d.b.)

$M_o$  = ความชื้นเริ่มต้น (% , d.b.)

โดยทั่วไปปริมาณของความชื้น (moist product) ของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นมวลของน้ำและส่วนที่เป็นมวลของแข็ง ซึ่งปริมาณความชื้นฐานแห้งของผลิตภัณฑ์ (moisture content ; M, % , d.b.) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$M = \frac{m - m_{solid}}{m_{solid}} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ m คือ มวลของพริกชี้หนูที่ได้จากการชั่ง (g) ทุก ๆ ชั่วโมงจนกระทั่งมวลของพริกชี้หนูมีค่าคงที่หรือไม่ลดลง และ  $m_{solid}$  คือมวลของแข็งของพริกชี้หนู (g) หาได้จากการนำพริกชี้หนูไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (15)

$$M_e = \frac{m_e - m_{solid}}{m_{solid}} \times 100 \quad (3)$$

$$M_o = \frac{m_o - m_{solid}}{m_{solid}} \times 100 \quad (4)$$

โดยปริมาณความชื้นสมดุล ( $M_e$ ) และประมาณความชื้นเริ่มต้น ( $M_o$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3) และ (4) เมื่อ  $m_e$  และ  $m_o$  คือ มวลของพริกชี้หนูสุดท้ายและมวลพริกชี้หนูเริ่มต้น ตามลำดับ

จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการ (2-4) ไปคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการ (1)

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งแบบชั้นบาง

ลำดับ	แบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง (เอกสารอ้างอิง)
1	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (10)
2	$MR = \exp(-kt)$	Newton (11)
3	$MR = (a)\exp(-kt)$	Handerson and Pabis (11)
4	$MR = (a)\exp(-kt) + c$	Logarithmic (13)
5	$MR = (a)\exp(-kt) + (b)\exp(-gt)$	Two term (9)
6	$MR = (a)\exp(-kt) + (b)\exp(-gt) + (c)\exp(-pt)$	Modifile Handerson and Pabis (12)

จากตารางที่ 1 แสดงแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางที่ได้ถูกเสนอโดยนักวิจัยท่านอื่น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับพริกชี้หนู โดยศึกษาแบบจำลองทั้งหมด 6 แบบจำลอง รายละเอียดแสดงในหัวข้อถัดไป

## 2. การอบแห้งผลิตภัณฑ์



รูปที่ 1 ตัวอย่างลักษณะของพริกชี้หนูในงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยได้เตรียมพริกชี้หนูโดยเลือกพริกชี้หนูสีแดงที่มีขนาดใกล้เคียงกันนำมาวางเรียงบนตะแกรงเป็นชั้นบาง (รูปที่ 1) ความชื้นเริ่มต้นของพริกชี้หนูมีค่า 330%, d.b. จากนั้นนำตะแกรงที่วางพริกชี้หนูไปเข้าเครื่องอบแห้ง (laboratory dryer) โดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 50°C 60°C และ 70 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 10% 20% และ 30% ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงส่งผลให้ความสามารถในการระเหยของน้ำในพริกชี้หนูได้

เร็วขึ้นจึงช่วยให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ในระหว่างการทดลองผู้วิจัยได้ทำการชั่งมวลของพริกชี้หนูทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอล และทำการชั่งมวลพริกชี้หนูจนกระทั่งมวลพริกชี้หนูมีค่าคงที่ ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 9 ครั้ง สำหรับทุกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้มวลพริกชี้หนูเริ่มต้นใกล้เคียงกันประมาณ 42-52 กรัม ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K type) ในการวัดอุณหภูมิ และใช้ไฮโกรมิเตอร์แบบคาปาซิทีฟ (ยี่ห้อ E+E Elektronik รุ่น EE23 ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm (1.3 + 0.3 \% RH)$ ) ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลรุ่น DC 100 (Yokogawa, Model DC100; ความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.0070mV$ ) และแสดงค่าผ่านทางจอของเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อให้ผู้วิจัยสังเกตตลอดเวลาที่ทำการทดลอง เนื่องจากในระหว่างทำการทดลองผู้วิจัยต้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตามค่าที่กำหนดไว้ข้างต้น

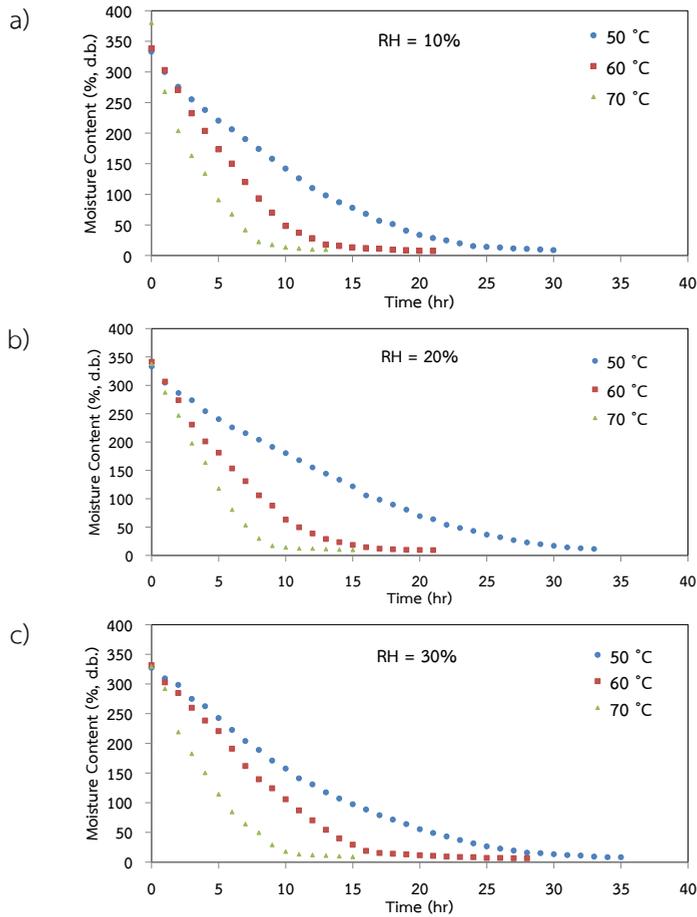
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ห้องอบแห้งโดยมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องมีลักษณะเป็นห้องกระจกและมีระบบเซรามิกสำหรับผลิตอากาศอิมตัวเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในอากาศในเครื่องอบแห้ง และ 2) ชุดควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งซึ่งติดตั้งอยู่ด้านนอกห้องอบแห้ง ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบชั้นบาง (laboratory dryer) ห้องปฏิบัติการพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

หลังจากผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลเรียบร้อยแล้วทั้ง 9 ครั้ง ผู้วิจัยได้นำพริกชี้หนูไปเข้าเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อต้องการนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมดโดยจะได้มวลของแห้งของพริกชี้หนู ( $m_{solid}$ ) หลังจากนำความชื้นออกหมด

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (M) จากการทดลองโดยใช้สมการ (2) ผลที่ได้แสดงในรูปแบบของกราฟการแปรค่าของความชื้นที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่าง ๆ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การแปรค่าของปริมาณความชื้นฐานแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง a) ความชื้นสัมพัทธ์ 10% b) ความชื้นสัมพัทธ์ 20% c) ความชื้นสัมพัทธ์ 30%

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ที่ความชื้นของอากาศเท่ากับ 10% ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูเริ่มต้นมีค่า 333%, d.b. 338%, d.b. และ 380 %, d.b. และความชื้นสุดท้ายมีค่า 8.62% 7.11% และ 8.97% สำหรับอุณหภูมิภายในเครื่องเท่ากับ 50°C 60°C และ 70°C ตามลำดับ กรณีความชื้นของอากาศเท่ากับ 20% ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูเริ่มต้นมีค่า 333%,d.b. 341%, d.b. และ 337 %, d.b. และความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 11.20% 9.01% และ 9.63% สำหรับอุณหภูมิภายในเครื่องเท่ากับ 50°C 60°C และ 70 °C ตามลำดับ และความชื้นของอากาศ

เท่ากับ 30% ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูเริ่มต้นมีค่า 327%, d.b. 331%, d.b. และ 329 %, d.b. และความชื้นสุดท้ายมีค่า 7.92% , 6.12% และ 7.47% สำหรับอุณหภูมิภายในเครื่องเท่ากับ 50°C 60 °C และ 70 °C ตามลำดับ จากทั้ง 3 อุณหภูมิของแต่ละความชื้น พบว่าการอบแห้งในสภาวะที่อุณหภูมิสูง (70°C) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำ (RH=10%) ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูมีการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำจะช่วยให้ความชื้นในพริกชี้หนูสามารถระเหยออกมาสู่อากาศ

ได้ง่ายกว่ากรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงจึงช่วยให้ความชื้นของพริกชี้หนุมีการลดตัวอย่างรวดเร็ว

จากนั้นผู้วิจัยนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับพริกชี้หนุ และในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ ผู้วิจัยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ตัวคือ ค่ารากที่สองของค่าความแตกต่างกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square difference; RMSD) และ ค่าความแตกต่างของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean bias difference ;MBD) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6)

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{model,i} - MR_{exp,i})^2}{N}}}{MR_{exp}} \times 100\% \quad (5)$$

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{model,i} - MR_{exp,i})}{N} \times 100\% \quad (6)$$

เมื่อ  $MR_{model,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง  $MR_{exp,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง  $MR_{exp}$  คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง และ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

เนื่องจากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางในตารางที่ 1 เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันทั่วไป (16) ซึ่งมีความสัมพันธ์ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ (17-18) ดังนั้นผู้วิจัยได้นำผลการทดลองการอบพริกชี้หนุไปคำนวณหา

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่อุณหภูมิและความชื้นค่าต่าง ๆ

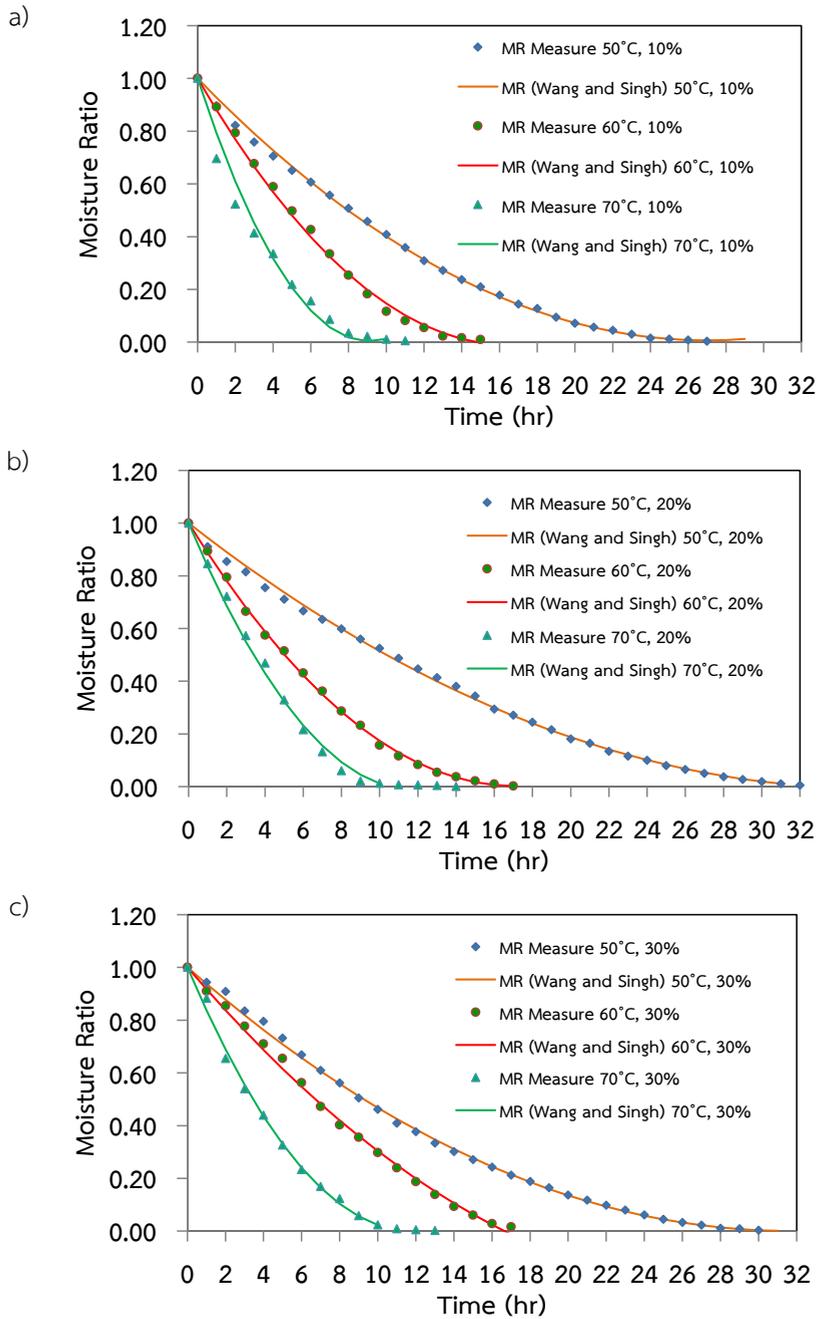
ชื่อแบบจำลอง	อุณหภูมิ (T)	ความชื้น (RH)	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง						MBD (%)	RMSD (%)
			k	a	b	c	n	g		
Wang and Singh	50	10	-0.0736	0.0014					1.2141	3.8272
	60	10	-0.1225	0.0037					-0.734	4.7032
Wang and Singh	70	10	-0.2186	0.0119					2.9584	5.2708
	50	20	-0.0565	0.0008					0.9930	3.9352
	60	20	-0.1167	0.0034					-0.203	2.7864
	70	20	-0.1719	0.0073					-0.701	8.5055
	50	30	-0.0632	0.0009					-0.627	3.2295
	60	30	-0.0839	0.0014					-0.533	3.7705
	70	30	-0.1699	0.0072					-0.339	6.8699

อัตราส่วนความชื้นโดยอาศัยสมการที่ (1) จากนั้นนำไปหาความสัมพันธ์กับสมการในตารางที่ 1 ซึ่งผู้วิจัยอาศัยโปรแกรมทางสถิติ (Statistical Software) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ โดยทำการแทนค่าอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ได้จากการทดลองลงในสมการในตารางที่ 1 จากนั้นใช้หลักการการวิเคราะห์การถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Analysis) จากโปรแกรมในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละสมการ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

จากผลในตารางที่ 2 พบว่าจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากทุกแบบจำลองไม่เกิน 20% โดยแบบจำลองที่สามารถนำไปทำนายอัตราส่วนความชื้นของพริกชี้หนุได้แม่นยำ และความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือแบบจำลองของ Wang and Singh ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูปของ RMSD และ MBD อยู่ในช่วง 2.78 – 6.86% และ -0.20 – 2.95% ตามลำดับ ผู้วิจัยได้แสดงกราฟการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง Wang and Singh ดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่า การแปรค่าของอัตราส่วนความชื้นของพริกชี้หนุมีการแปรค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (15) ซึ่งที่อุณหภูมิ 70 °C ของทุกความชื้นจะใช้เวลาในการลดลงของอัตราส่วนความชื้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์จะแห้งได้เร็วกว่าอุณหภูมิอื่น และจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูปของ RMSD และ MBD อยู่ในช่วง 2-6 % และ -0.2-2.9% ตามลำดับ

ชื่อแบบจำลอง	อุณหภูมิ (T)	ความชื้น (RH)	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง						MBD (%)	RMSD (%)
			k	a	b	c	n	g		
Newton	50	10	0.1018						1.4366	13.148
	60	10	0.1698						1.6436	18.381
	70	10	0.3178						2.6766	10.130
	50	20	0.0782						1.8377	14.452
	60	20	0.1615						1.5245	15.277
	70	20	0.2388						2.2385	20.449
	50	30	0.0875						1.2565	15.960
	60	30	0.1216						-0.041	16.766
	70	30	0.2382						3.4863	17.127
Henderson and Munro	50	10	0.1061	1.0474					2.9404	12.357
	60	10	0.1834	1.0865					4.1834	16.243
	70	10	0.9955	0.9955					2.5481	10.116
	50	20	0.0823	1.0533					3.1294	13.582
	60	20	0.1726	1.0728					3.5334	13.475
	70	20	0.2560	1.0811					4.9314	18.553
	50	30	0.0949	1.0959					4.3599	13.230
	60	30	0.1332	1.0928					2.6595	14.731
	70	30	0.2531	1.0688					5.3453	15.013
Logarithmic	50	10	0.0655	1.2365		-0.2456			0.0002	3.8515
	60	10	0.1137	1.2856		-0.2518			0.0007	7.5416
	70	10	0.2664	1.0396		-0.0637			0.0001	7.2583
	50	20	0.0467	1.2939		-0.3061			0.0009	4.1315
	60	20	0.1134	1.2327		-0.2086			0.0009	5.3483
	70	20	0.1654	1.2606		-0.2236			0.0006	10.453
	50	30	0.0616	1.2596		-0.2199			-1.116	5.6305
	60	30	0.0507	1.7914		-0.7733			0.0112	4.0516
	70	30	0.1877	1.1668		-0.1329			0.1053	6.5812
Two-term	50	10	0.1061	0.5241	0.5232			0.1060	2.9406	12.356
	60	10	0.1834	0.5362	0.5502			0.1834	4.1837	16.242
	70	10	0.3164	0.4978	0.4976			0.3164	2.5482	10.116
	50	20	0.0823	0.5264	0.5269			0.0823	3.1294	13.582
	60	20	0.1725	0.5364	0.5363			0.1725	3.5333	13.474
	70	20	0.2560	0.2783	0.8027			0.2560	4.9306	18.552
	50	30	0.0949	0.5478	0.5480			0.0949	4.3597	13.230
	60	30	0.1332	0.2825	0.8102			0.1332	2.6598	14.731
	70	30	0.2531	0.1717	0.8970			0.2531	5.3463	15.013
Modified Henderson and Pabis	50	10	0.1060	0.3813					2.9409	12.357
	60	10	0.1833	0.3772					4.1848	16.243
	70	10		-7.500					0.0487	7.457
	50	20							3.1285	13.582
	60	20							3.5336	13.475
	70	20							4.9309	18.553
	50	30							4.3592	13.230
	60	30							2.6602	14.732
	70	30							5.3456	15.014



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Wang and Singh เมื่อ a) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10% b) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 20% c) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 30%

## สรุปผล

จากการศึกษาสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยอาศัยเครื่องอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยเริ่มต้นจากการนำพริกชี้หนูที่มีความชื้นเริ่มต้นในช่วง 330 – 380%,d.b. ไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งโดยทำการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 50°C 60°C และ 70 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 10% 20% และ 30% รวมทั้งหมด 9 ชุดการทดลอง ในแต่ละชุดการทดลองผู้วิจัยจะเก็บข้อมูลมวลของพริกชี้หนูทุก ๆ 1 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายจากการอบแห้งพริกชี้หนูมีค่าประมาณ 6-8 %,d.b. ในช่วงเวลาของการอบแห้งประมาณ 15 20 และ 30 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70 °C ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองอบแห้งไปคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น และเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่เหมาะสมในการนำไปทำนายความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของพริกชี้หนูกับระยะเวลาในการแห้งคือ แบบจำลอง Wang and Singh ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดในรูปของ RMSD และ MBD เท่ากับ 2.78% และ -0.20% ตามลำดับ จากผลวิจัยแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนความชื้นของพริกชี้หนูจากการทดลองและจากแบบจำลองมีค่าสูงมากในช่วงแรกสำหรับทุกอุณหภูมิและทุกความชื้น โดยอัตราส่วนความชื้นของพริกชี้หนูมีค่าคงที่หรือเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 11-14 ชั่วโมงสำหรับที่อุณหภูมิ 70°C และ 15-17 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C และที่อุณหภูมิ 50°C อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าลดลงค่อนข้างช้าโดยใช้เวลา 30 -32 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาในการแห้งของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพที่มีความแตกต่างกับพริกชี้หนู ผู้ที่ทำการศึกษาคควรทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองสำหรับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่

เอื้ออำนวยอุปกรณ์และสถานที่ในการทดลองให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

1. Warinthorn P, Purin A, Kannapot K. Study on drying method of rose tea. RJ-RMUTT. 2017; 16(1-2):1-9.
2. Ismailova AA. Possibilities of applying solar energy to dry fruits and vegetable. Teptoenergetika. 1957;1:1-22.
3. Lof GOG. Solar energy for drying of solids. Sol Energy. 1962;6(4):122-8.
4. Khan EU. Practical devices for the utilization of solar energy. Sol Energy. 1964;8(1):17-22.
5. Lawand TA. A solar-cabinet dryer. Sol Energy. 1966;10(4):158-63.
6. Murthy MVR. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. Renew Sust Energ Rev. 2009;13(4):835-44.
7. Fudholi A, Sopian K, Ruslan H, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renew Sust Energ Rev. 2010;14:1-30.
8. Janjai S, Bala BK. Solar drying technology. Food Eng Rev. 2012;4:16-54.
9. Henderson S. Progress in developing the thin layer drying equation. T ASAE. 1974;17(6):1167-8.
10. Wang CY, Singh RP. Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying. Transactions of American Society of Agricultural Engineers. 1978;11(6):668-72.
11. Zhang Q, Litchfield J. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale

- thin layer dryer. *Dry Technol.* 1991;9(2):383-95.
12. Karathanos VT, Belessiotis VG. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J Agr Eng Res.* 1999;74(4):355-61.
  13. Togrul IT, Pehlivan D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *J Food Eng.* 2002;55(3):209-16.
  14. Das I, Das SK, Bal S. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. *J Food Eng.* 2009;95(1):166-71.
  15. Bala BK. *Solar drying systems: simulations and optimization.* 1 st Edition. Udaipur: Agrotech Publishing Academy; 1998.
  16. Khawas P, Das AJ, Dash KK, Deka SC. Thin-layer drying characteristics of Kachkal banana peel (*Musa ABB*) of Assam, India. *Int Food Res J.* 2014;21(3):975-82.
  17. Panchariya PC, Popovic D, Sharma AL. Thin layer modelling of black tea drying process. *J Food Eng.* 2002;52(4):349-57.
  18. Hii CL, Law CL, Cloke M. Modelling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *J Food Eng.* 2009;90(2):191-8.