

## การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

### Study on Drying Behavior of Pepper using Superheated Steam Drying

อรอุมา หนูทอง<sup>1,\*</sup>, และณรงค์ อึ้งกิมบัว<sup>2</sup>

Onuma Nuthong<sup>1,\*</sup>, and Narong Uengkimbuan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทย แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C การอบแห้งพริกไทยจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 410 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 %d.b. และจากข้อมูลการทดลองใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 7 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithm, Two – term, Approximation of Diffusion, และแบบจำลอง Midilliet *al.* เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยแบบจำลองที่ให้ผลการทำนายดีพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ), โคสควเรอร์ ( $\chi^2$ ) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและจากผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลอง Midilliet *al.* ให้ผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยดีที่สุด โดยที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง ให้ค่าโคสควเรอร์และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าระหว่าง  $2.90 \times 10^{-9} - 2.23 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$

**คำสำคัญ:** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ / สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล/ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

#### Abstract

The objectives of this research were to study the drying kinetics of pepper and to find out the suitable thin layer model and effective moisture diffusivity coefficient for predicting the drying kinetics of pepper using superheated steam dryer at the temperatures of 120, 140 and 160°C. Pepper was reduced from initial moisture content about 410 %d.b. to final moisture content about 17 %d.b. The several drying models such as Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithm, Two – term, Approximation of Diffusion, and Midilliet *al.* were fitted to the experimental data. The drying models were compared using the coefficient of determination ( $R^2$ ), chi-square ( $\chi^2$ ), and root mean square error (RMSE) for determination of the best suitable model. The results showed that the drying rate of pepper increased with increasing steam temperature. Midilliet *al.* model showed better fit to the experimental data as compared to other models due to the highest values of the coefficient of determination and the lowest values of the reduce chi-square and root mean square error. It was also found that effective moisture diffusivity of the pepper dried by superheated steam were in the range of  $2.90 \times 10^{-9} - 2.23 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$

**Keywords:** Effective Diffusivity / Mathematical Model / Superheated Steam

\*Corresponding author. E-mail : [nu\\_pud\\_49@hotmail.com](mailto:nu_pud_49@hotmail.com)

## 1. บทนำ

พริกไทย มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Piper nigrum* L. เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีการปลูกมากในจังหวัดจันทบุรี โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณร้อยละ 95 ของพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศ มีปริมาณการส่งออก 3,855 ตัน (สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2555)ซึ่งประโยชน์ของพริกไทยที่มาใช้ นอกจากจะใช้แต่งกลิ่น รสและถนอมอาหารแล้วยังนำมาใช้เป็นสมุนไพรได้อีกด้วย โดยมีสรรพคุณตามตำรายาไทย คือ ใช้เป็นยาขับลมแก้ท้องอืดเพื่อบำรุงธาตุ เจริญอาหาร ขับเหงื่อ ขับปัสสาวะ และกระตุ้นประสาท ชาวจีนใช้พริกไทยระงับอาการปวดท้อง แก้ไข้มาลาเรียแก้หิวาตโรค

การอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายแบบ ในกรณีที่ใช้ตัวกลางในการอบแห้งเป็นเกณฑ์นั้น สามารถแบ่งการอบแห้งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การอบแห้งโดยใช้อากาศ (Air drying) และการอบแห้งที่ไม่ใช้อากาศ (Airless drying) ในกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร่อนนั้นเป็นที่นิยม เนื่องจากระบบสามารถดำเนินการได้ง่าย และเสียค่าใช้จ่ายน้อย เช่น การตากแห้ง หรือการอบแห้งด้วยอากาศร่อนแบบดั้งเดิม (Conventional Air Drying) ซึ่งมีอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Heater) เป็นแหล่งให้ความร้อน เป็นต้น หรือแม้กระทั่งการอบแห้งที่ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนอื่นๆ เช่น การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) หรือการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared drying) ส่วนการอบแห้งที่ไม่ใช้อากาศนั้น อาจแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การอบแห้งโดยใช้ก๊าซและการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สำหรับการอบแห้งโดยใช้ก๊าซนั้น ก๊าซที่นิยมนำมาใช้ คือ ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และในปัจจุบันมีการพัฒนาการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam Drying) ลักษณะเด่นของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง คือ การใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ข้อดี คือช่วยให้สมบัติบางอย่างของอาหารเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีกว่าการอบแห้งวิธีอื่น เช่น มีการหดตัวน้อยกว่า มีความสามารถในการการดูดน้ำกลับคืนตัวสูงกว่า หรือมีความพูนมากกว่า การอบแห้งด้วยวิธีนี้จึงเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา (พนารัตน์, 2553)จึงเริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้ในการอบแห้งอาหารเช่น เนื้ออกแผ่น (จินดาพร, 2550)แอปเปิ้ล (Elustondo et al., 2001) ปลาจ๋า (ณรงค์และคณะ, 2545)มันฝรั่ง (Tang et al., 2001, Lyota et al., 2001)) กุ้ง (เยาวภา และคณะ, 2552) เนื้อหมู (Uengkimbuan et al., 2006)ปลากระตักสด (พนารัตน์, 2553) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สามารถหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสม และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยได้

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุ และอุปกรณ์

พริกไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพริกไทยแก่จากสวนของเกษตรกรจังหวัดตราด ทำการคัดแยกเฉพาะเมล็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5mm

### 2.2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะใช้เงื่อนไขในการทดลองดังนี้ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C ความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยประมาณ 410 %d.b.อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 %d.b.ซึ่งจะใช้เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบกะ (Batch Dryer) ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ขนาด 45 kg/h อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ขนาด 13.5 kW หีงอบแห้งแบบงวด (Batch Dryer) ขนาด 10 × 20 × 10 cm<sup>3</sup> และพัดลม (Blower) ขนาด 2.2 kW การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยการใช้อากาศร้อนอุณหภูมิที่ต้องการทำการอบแห้งอุณหภูมิเพื่อป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำภายในระบบขณะทำการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากนั้นปล่อยให้ไอน้ำร้อนอิมตัวจากเครื่องกำเนิดไอน้ำให้ไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน เพื่อให้ไอน้ำอิมตัวเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งไหลผ่านห้องอบแห้งในแนวขนานกับผลิตภัณฑ์ ที่ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งประมาณ 1 m/s (เยาวภา และคณะ, 2552) และอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C หลังจากนั้นนำพริกไทยที่ผ่านการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นเข้าห้องอบแห้งและนำพริกไทยออกจากห้องอบแห้งทุกๆ 10 นาที จนกระทั่งน้ำหนักพริกไทยคงที่ในการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในแต่ละอุณหภูมิจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สำหรับการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายคงที่ โดยอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) คำนวณจากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น(%d.b.),  $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ(%d.b.),  $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล(%d.b.)

### 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยทั่วไปสมการการอบแห้งมีหลายรูปแบบ เช่น สมการทางทฤษฎีซึ่งมีจำนวนเทอมในการวิเคราะห์มาก และขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ สมการกึ่งทฤษฎีเป็นการนำสมการทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องนำรูปทรงของผลิตภัณฑ์มาพิจารณาและอีกรูปแบบหนึ่งคือ สมการอบแห้งเอมไพริคัล(สิรินทร, 2551) ซึ่งมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยสมการการอบแห้งที่นำมาศึกษา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง(Qilonget *et al.*, 2013)

No.	Model Equation	Name of Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
7	Midilliet <i>al.</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ไคสแควร์ (Chi-square,  $\chi^2$ ) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงที่สุด ให้ค่า  $\chi^2$  และค่า RMSE น้อยที่สุด โดยที่  $\chi^2$  และ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2) และ (3) (วันเพ็ญและคณะ, 2554)

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp})^2}{N}} \quad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, N คือ จำนวนข้อมูล และ n คือ จำนวนค่าคงที่แต่ละแบบจำลอง

## 2.4. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion) ที่เป็นไปในลักษณะของการแพร่ของน้ำภายในวัสดุการถ่ายเทมวลภายในออบแห้งได้ด้วยการการแพร่ความชื้นที่อยู่บนพื้นฐานตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's Second Law) (สุนทร, 2554)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้พริกไทยที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere) ที่มีรัศมีเท่ากับ  $r_0$  และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่ จะได้คำตอบของสมการที่ (4) ดังสมการที่ (5)

$$MR = \frac{M_t - M_{\text{eq}}}{M_{\text{in}} - M_{\text{eq}}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{n^2} \right) \exp \left( - \frac{n^2 D_{\text{eff}} \pi^2 t}{r_0^2} \right) \quad (5)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะใช้ข้อมูลความชื้นและเวลาจากการทดลอง มาทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) และกำหนดให้  $M_{\text{eq}}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ (Prachayawarakorn et al., 2002) พริกไทยมีรัศมีเฉลี่ย ( $r_0$ ) เท่ากับ 2.64 mm

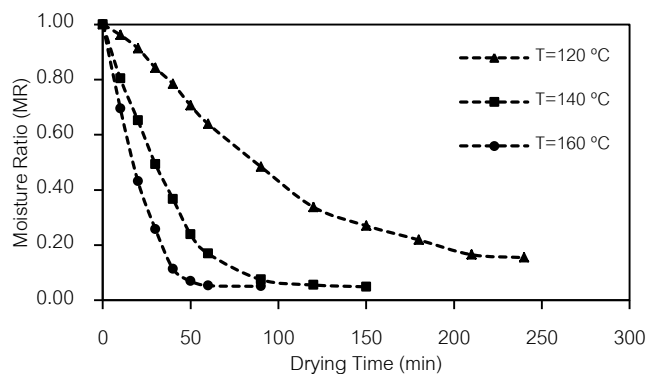
โดยที่  $M$  คือความชื้น (%d.b.),  $D_{\text{eff}}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $\text{m}^2/\text{min}$ ),  $t$  คือ เวลาในการอบแห้ง (minute)  $MR$  คืออัตราส่วนความชื้น,  $M_{\text{in}}$  คือความชื้นเริ่มต้น (%d.b.),  $M_{\text{eq}}$  คือ ความชื้นสมดุล (%d.b.),  $n$  คือจำนวนเต็ม (1, 2, 3, ...)

## 3. ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

### 3.1. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ดังแสดงรูปที่ 1 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของพริกไทยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับพริกไทยมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่ามากกว่า ทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังพริกไทย เพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า มีผลให้การระเหยของน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งยาวนานกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140 และ 160°C ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 120°C มีค่าใกล้เคียงกับจุดเดือดของน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิวของพริกไทยในช่วงแรกของการอบแห้งได้ง่ายกว่าและมากกว่า ทำให้การระเหยน้ำที่บริเวณผิวของพริกไทยเป็นได้ช้ากว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140 และ 160°C จากข้อมูลการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 240 นาที ทำให้พริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 63% d.b. ส่วนที่อุณหภูมิ 140°C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 150 นาที ทำให้พริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 18% d.b. ในขณะที่อุณหภูมิ 160°C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 120 นาที ทำให้พริกไทยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 % d.b.



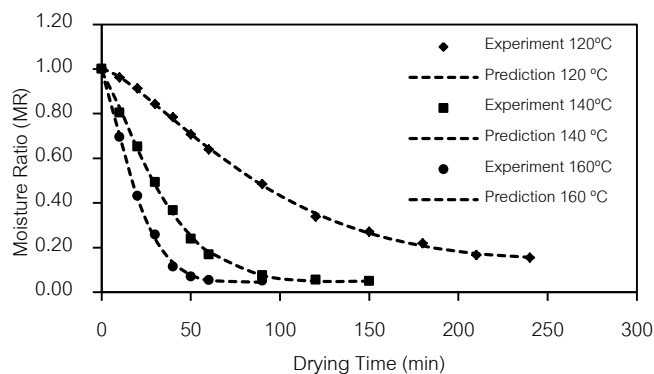
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.2. ผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยแบบจำลองการอบแห้งต่างๆ

รายละเอียดผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 1 โดยจะเห็นว่าแบบจำลองของ Midilliet *al.* จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C โดยให้ค่า  $R^2$  มากที่สุด ในขณะที่  $\chi^2$  และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE เท่ากับ 99.942%, 0.000078 และ 0.007363 ตามลำดับ ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบผลการทำนายและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่แบบจำลองของ Midilliet *al.* จะให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C โดยมีค่า  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE เท่ากับ 99.922%, 0.000265 และ 0.012619 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 160°C แบบจำลองของ Midilliet *al.* จะให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยมีค่า  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE เท่ากับ 99.888%, 0.000241 และ 0.010981 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่า  $R^2$ ,  $\chi^2$  และ RMSE ของแบบจำลองการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ

Model	Temperature (°C)	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
Newton	120	0.985910	0.001420	0.036206
	140	0.990542	0.001074	0.031097
	160	0.989508	0.001298	0.033704
Page	120	0.995306	0.000515	0.020882
	140	0.995585	0.000565	0.021268
	160	0.996543	0.000501	0.019377
Henderson and Pabis	120	0.992913	0.000779	0.025682
	140	0.991817	0.001044	0.028906
	160	0.990523	0.001026	0.032032
Logarithmic	120	0.993291	0.000812	0.024992
	140	0.991837	0.001194	0.028904
	160	0.990781	0.001596	0.031582
Two term	120	0.992913	0.000953	0.025682
	140	0.991817	0.001393	0.028906
	160	0.990523	0.002052	0.032032
Approximation of diffusion	120	0.997881	0.000256	0.014032
	140	0.996064	0.000575	0.020054
	160	0.996723	0.000569	0.018850
Midilliet <i>al.</i>	120	0.999420	0.000078	0.007363
	140	0.998441	0.000265	0.012619
	160	0.998880	0.000241	0.010981



รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง Midilliet *al.* สำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นสมบัติที่ใช้แสดงลักษณะการแพร่ในของเหลวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โมเลกุลของตัวถูกละลายจะค่อยๆ แพร่กระจายออกไปจนกว่าจะได้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันจึงหยุดการแพร่ซึ่งเป็นสภาวะสมดุล จากตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสามารถแพร่ออกมาจากพริกไทยได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	$D_{eff}(m^2/min)$	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
120	$2.8975 \times 10^{-9}$	0.848130	0.015303	0.118852
140	$1.1208 \times 10^{-8}$	0.920045	0.009088	0.090438
160	$2.2290 \times 10^{-8}$	0.933156	0.008278	0.085105

## 4. บทสรุป

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์อบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของพริกไทยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งทั้ง 7 พบว่าแบบจำลอง Midilliet *al.* ให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C และพบว่า เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยมีค่ามากขึ้นโดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอยู่ในช่วง  $2.90 \times 10^{-9} - 2.23 \times 10^{-8} m^2/min$

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในการสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทำวิจัยจนทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## 6. เอกสารอ้างอิง

- จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์. (2550). การอบแห้งเปลือกแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 38(6 พิเศษ), 127 – 130.
- ณรงค์ อึ้งกิมบัวนสมชาติ โสภณธนฤทธิ์และสมเกียรติ ปรัชญาวารการ. (2545). การอบแห้งปลาร้าด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 33(6 พิเศษ), 395-398.

- พนารัตน์ สังข์อินทร์. (2553). การอบแห้งปลากระตักสดแช่น้ำเกลือและต้มด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต., สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เยาวภา ไหวพริบ, ยามสูงเนิน, วทีญญ รอดประพัฒน์ และอนันต์ ทองทา. (2552). ผลของชนิด อุณหภูมิ และความเร็วของตัวกลางการทำแห้ง (ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน) ต่อสีของกุ้งแห้ง. ในการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 47 ระหว่างวันที่ 17 – 20 มีนาคม 2552. สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 250 – 255.
- วันเพ็ญ หวานระรื่นภาณุพงศ์ บุญเพียรและณรงค์ อึ้งกิมบัววน. (2554). แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยตู้อบลมร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 42(3 พิเศษ), 533-536.
- สิรินทร เนินซัด. (2551). จลนพลศาสตร์การอบแห้ง และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน. ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6.8 – 9 พฤษภาคม 2551, 432 - 437.
- สุนทร สืบคำ และฤทธิชัย อัครวราชันย์. (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพูน. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*. 17(1), 59 – 68.
- สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. (2555). พริกไทยจันทบุรี: พี่ชเศรษฐกิจที่ชาวสวนต้องรักษาไว้. วันที่ค้นข้อมูล 17 มิถุนายน 2555, เข้าถึงได้จาก [http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae\\_baer/ewt\\_news.php?nid=390&filename=index](http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_baer/ewt_news.php?nid=390&filename=index).
- Elustondo, D., Elustondo, M.P., and Urbicain, M.J. (2001). Mathematical modeling of moisture evaporation from foodstuffs exposed to subatmospheric pressure superheated steam. *Journal of Engineering*, 49, 15 – 24.
- Iyota, H., Nishimura, G., Elena M., Onuma, T. and Nomura, T. (2001). Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air. *Drying Technology*, Vol. 19, No. 7, pp.1411 – 1424.
- Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., and Jaisut, D., (2002). Desorption isotherm characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. *Drying Technology*, Vol, No. 3, pp. 669 – 683.
- Qilong, S., Yagin, Z. and Ya, Z. (2013). Mathematical modeling on thin – layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management*. 71, 208 – 216.
- Tang, Z., and Cenkowski, N. (2001). Dehydration Dynamics of Potato in Superheated Steam and Hot Air. *Canadian Agricultural Engineering*. 42 : 43 – 49.
- Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Nathakaranakule, A. (2006). A Comparative Study of Pork Drying Using Superheated Steam and Hot Air. *Drying Technology*. 24(12), 1665 – 1672.