

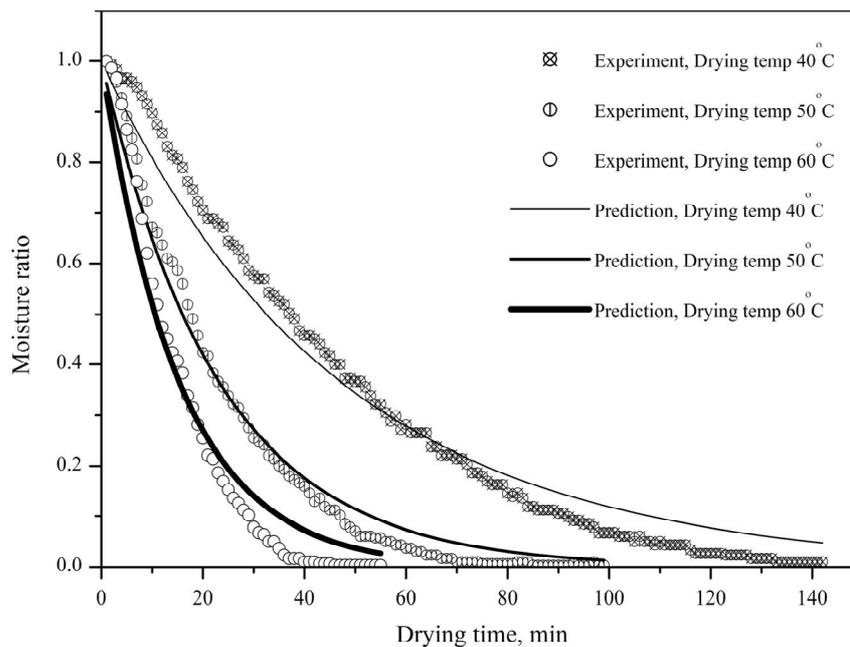
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

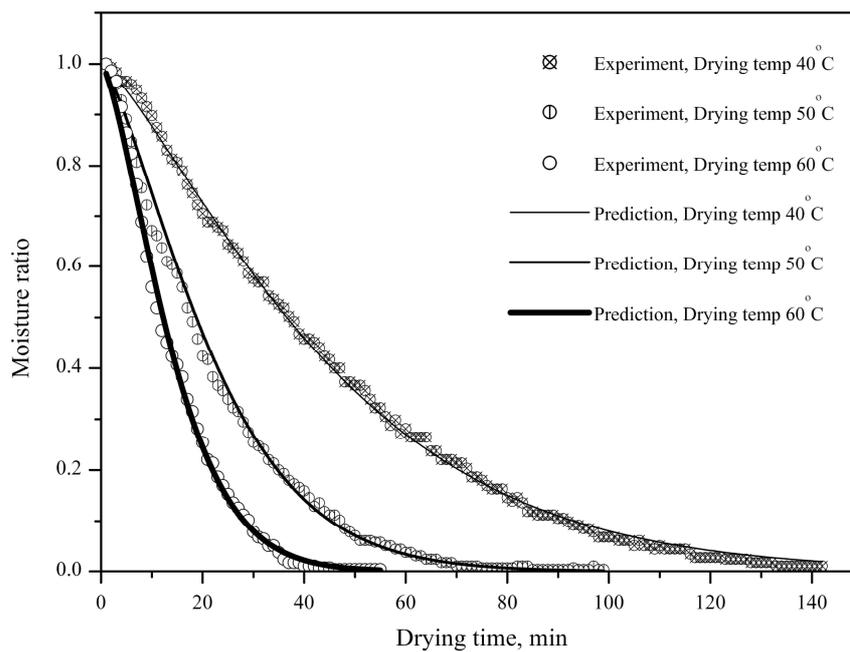
ภาพเปรียบเทียบผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยสมการอบแห้งชั้นบาง

## 1. การอบแห้งจึงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

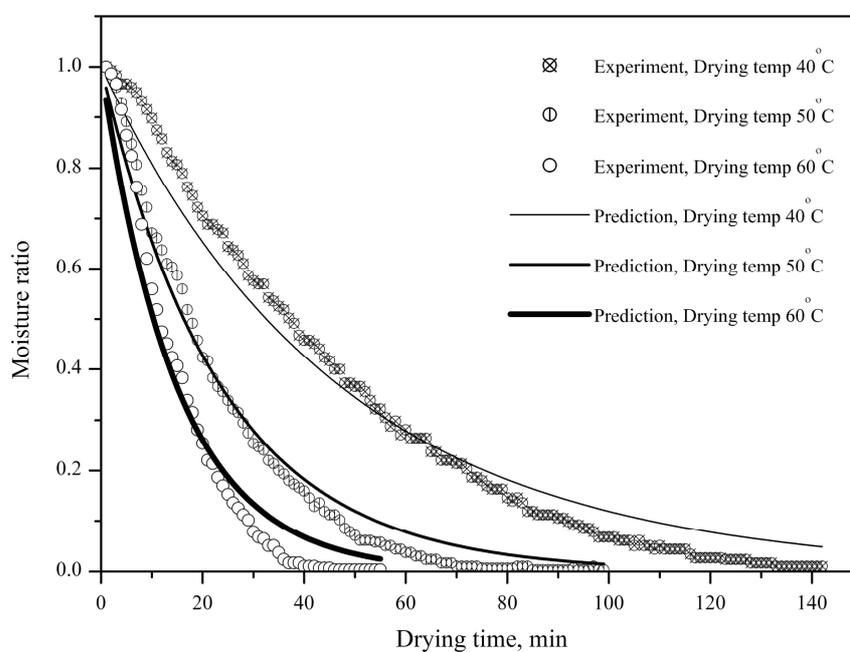
ผลการศึกษาศมการจลนศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของจึง โดยนำค่าความชื้นจากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายการอบแห้งของสมการการอบแห้งชั้นบาง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) สามารถสรุปผลได้ดังนี้



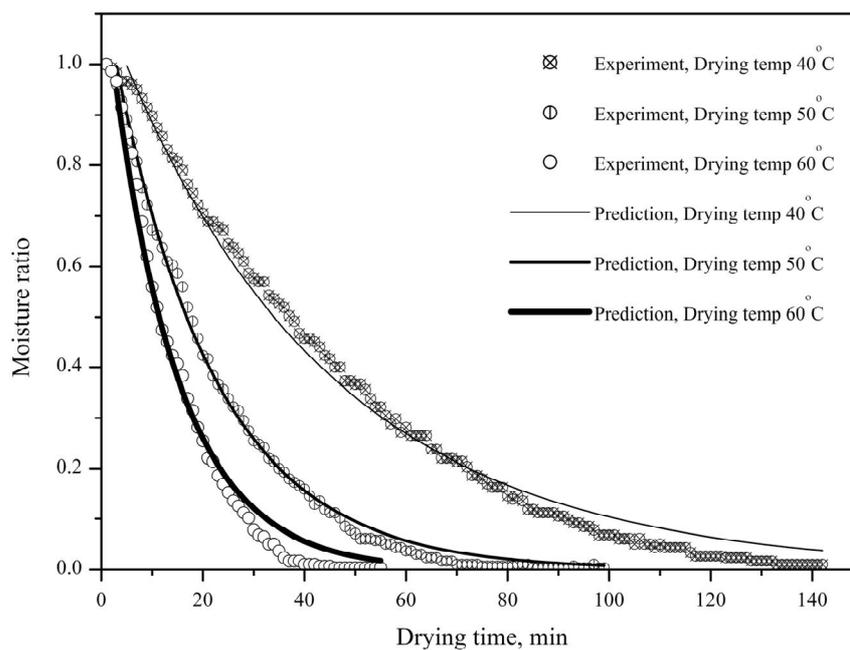
ภาพที่ ก.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Newton ที่ความดัน 5 kPa



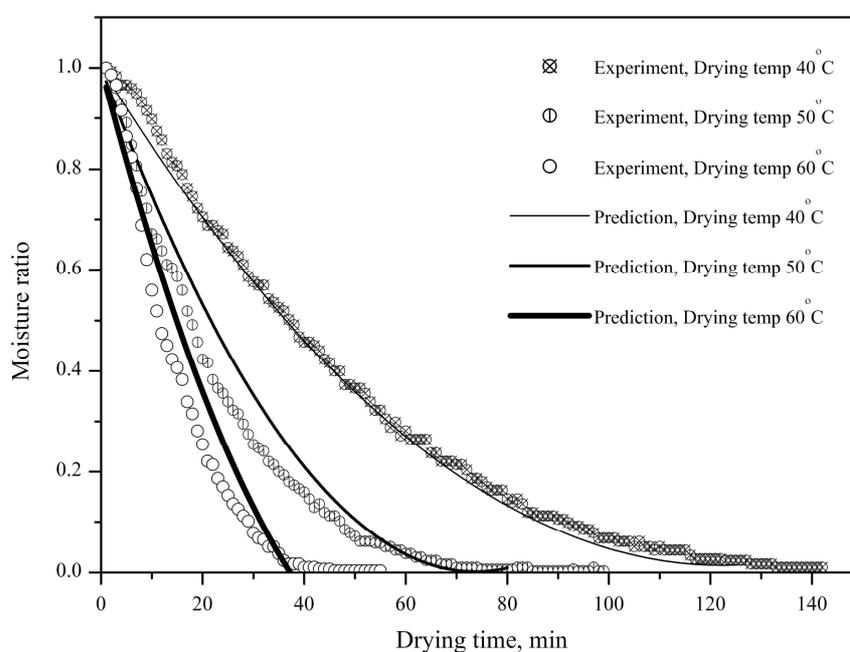
ภาพที่ ก.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Page ที่ความดัน 5 kPa



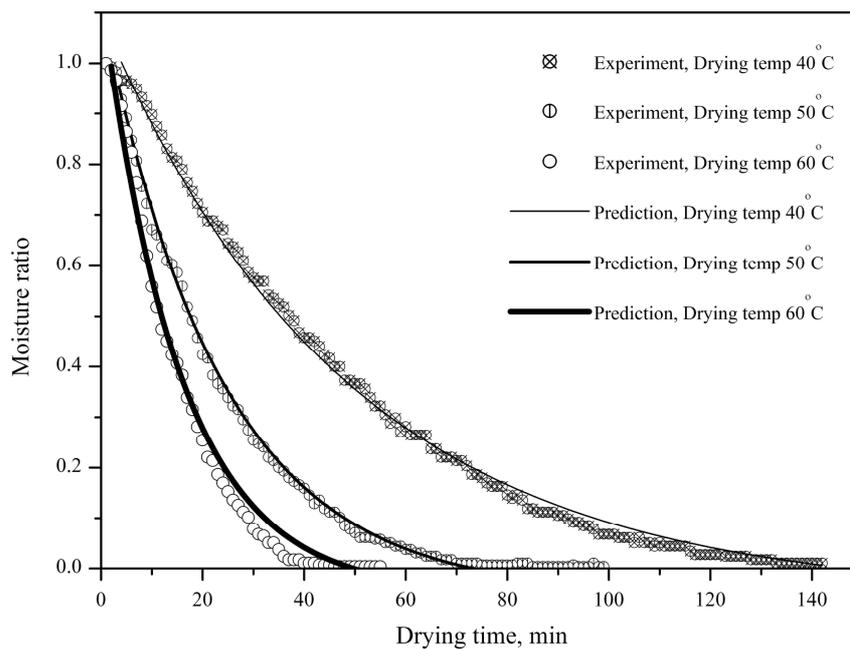
ภาพที่ ก.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Page I ที่ความดัน 5 kPa



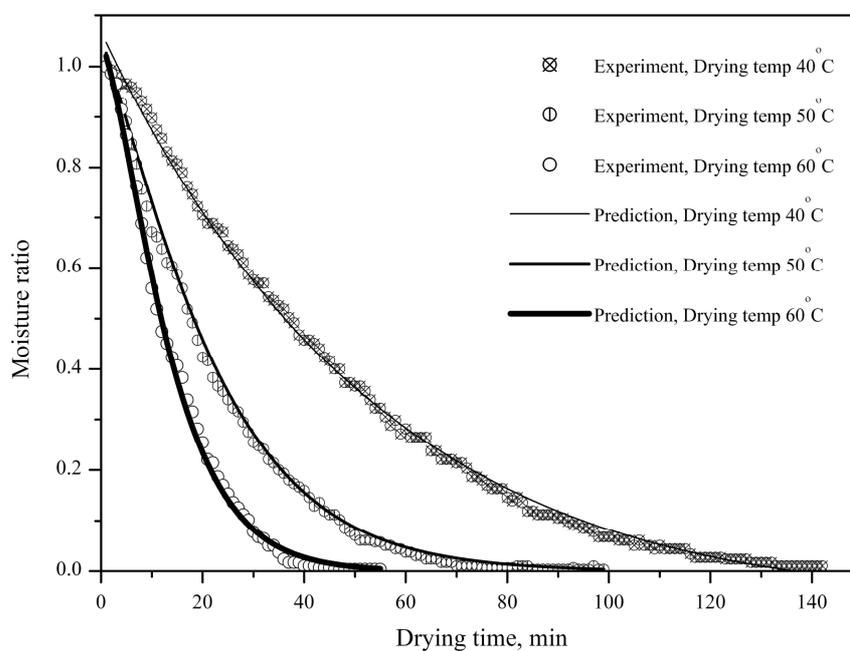
ภาพที่ ก.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa



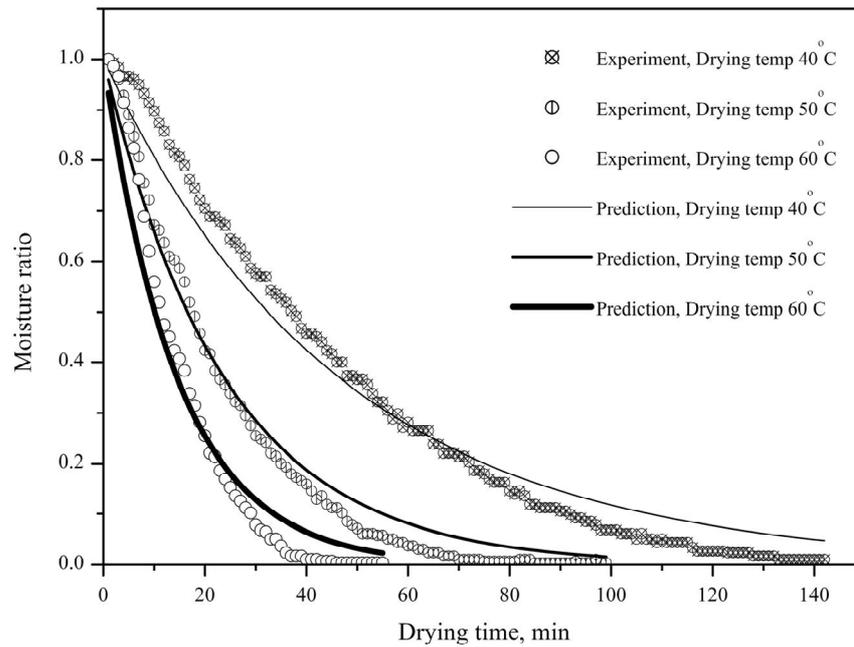
ภาพที่ ก.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Wang and Singh ที่ความดัน 5 kPa



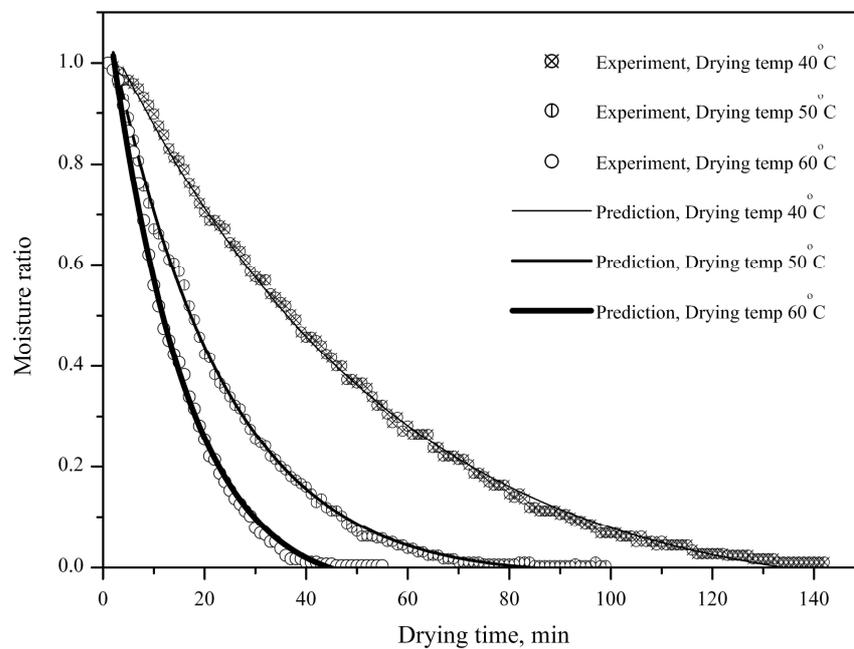
ภาพที่ 6.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa



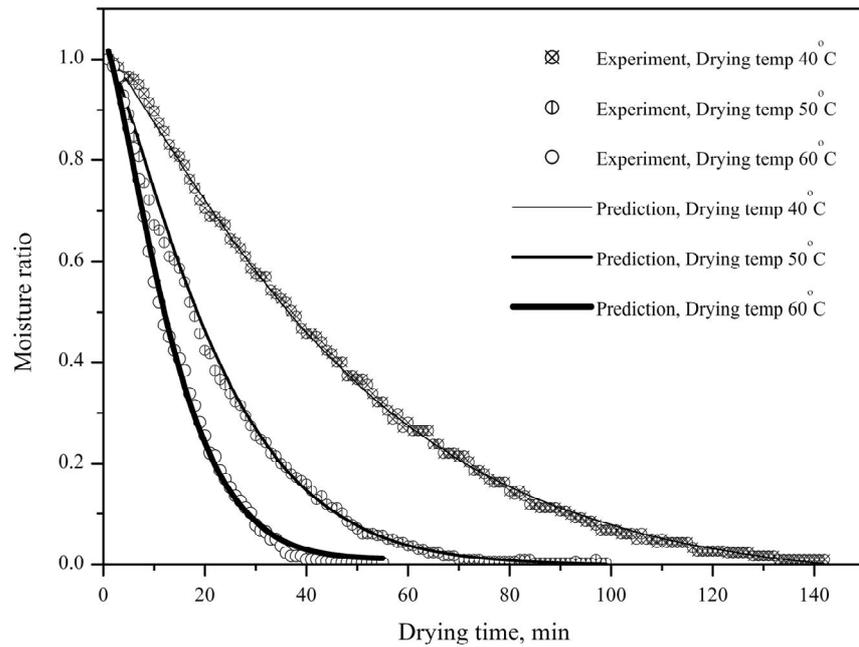
ภาพที่ 6.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความดันของการอบแห้งจึง 5 kPa



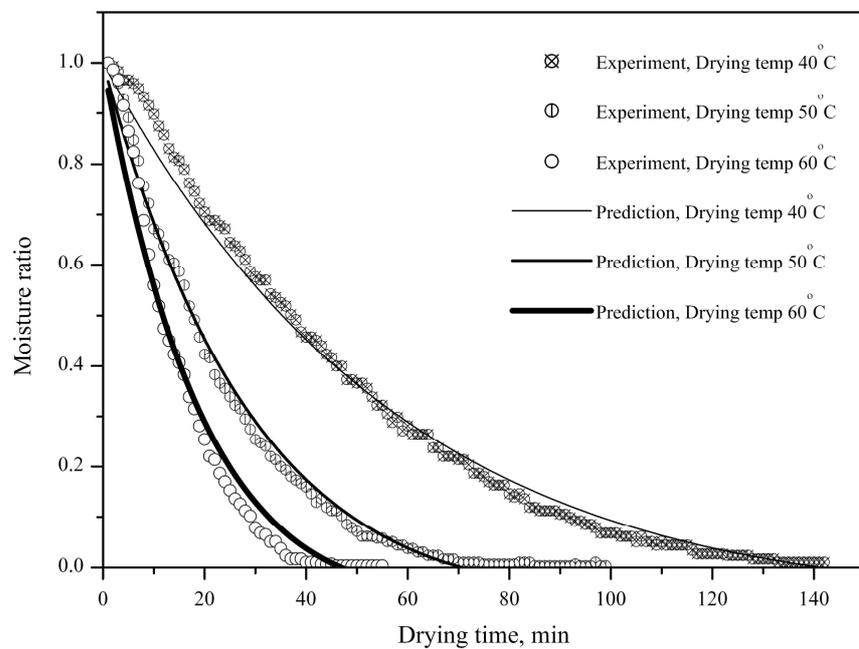
ภาพที่ 8.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term exponential ที่ความดัน 5 kPa



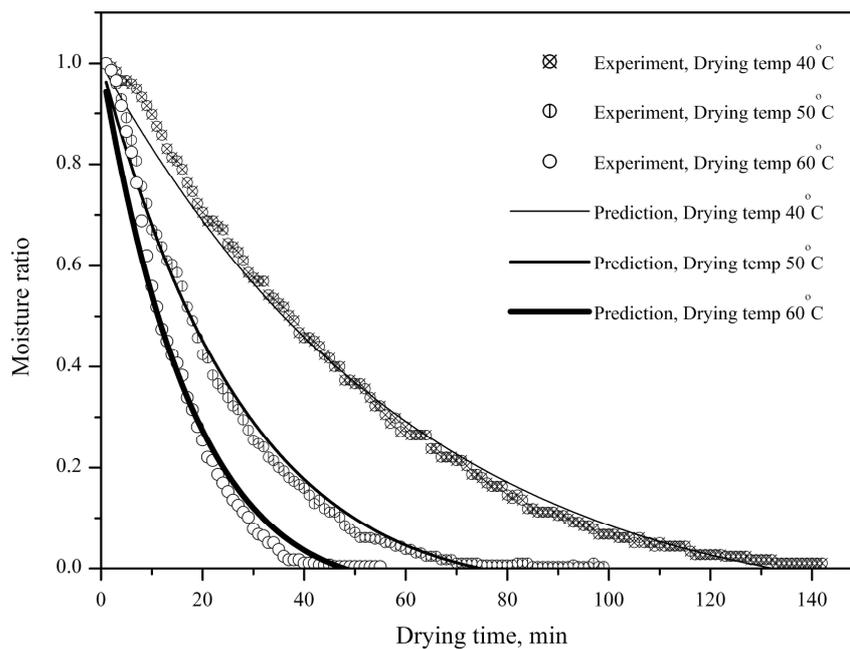
ภาพที่ 8.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa



ภาพที่ ก.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Midilli ที่ความดัน 5 kPa



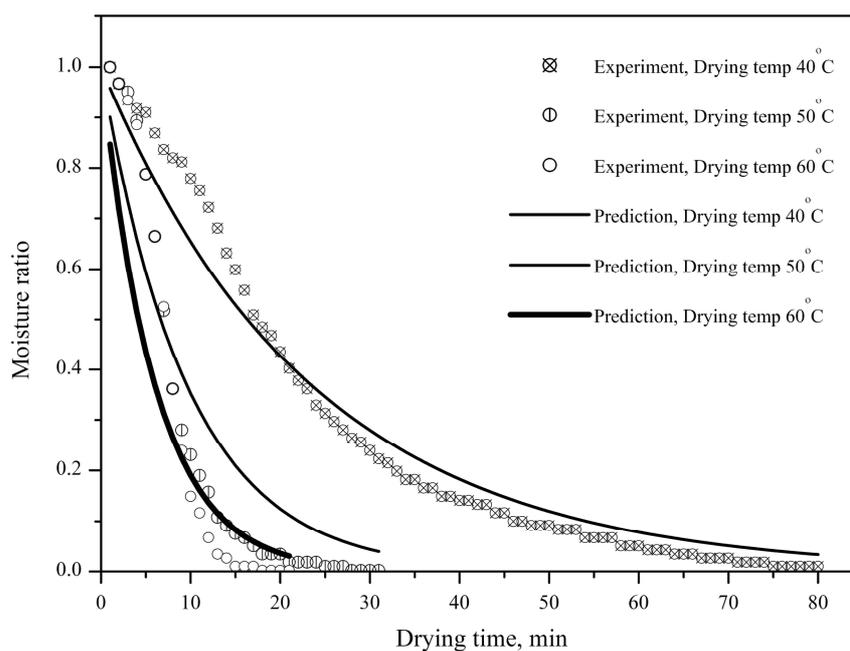
ภาพที่ ก.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Approximation of diffusion ที่ความดัน 5 kPa



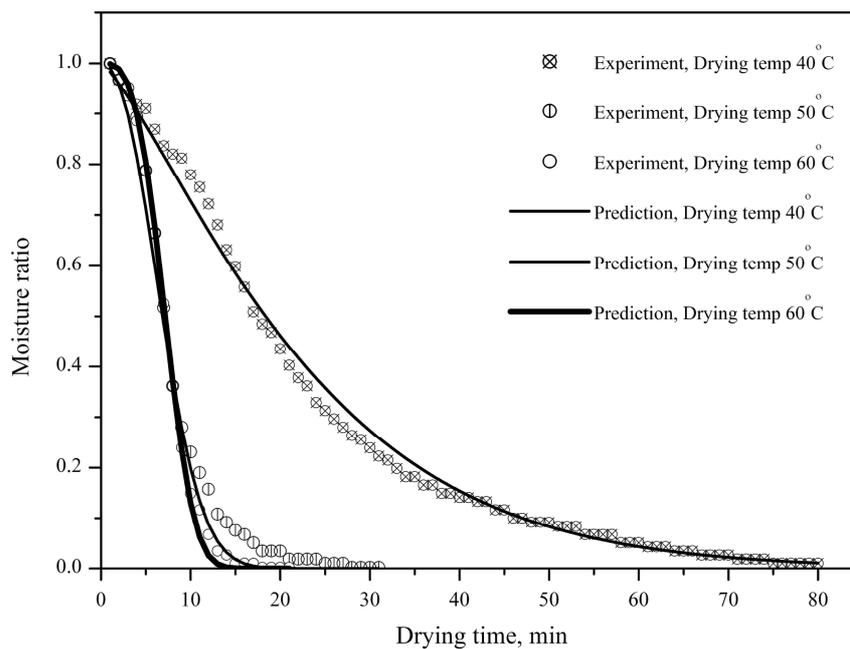
ภาพที่ ก.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Verma ที่ความดัน 5 kPa

## 2. การอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

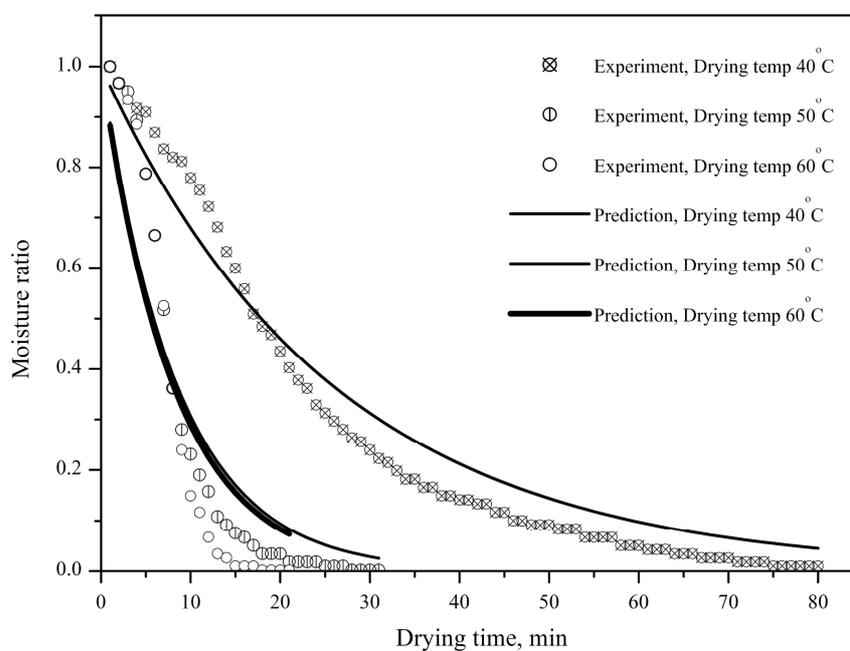
ผลการศึกษาสมการจลนศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของหญ้าปักกิ่ง โดยนำค่าความชื้นจากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายการอบแห้งของสมการการอบแห้งชั้นบาง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) สามารถสรุปผลได้ดังนี้



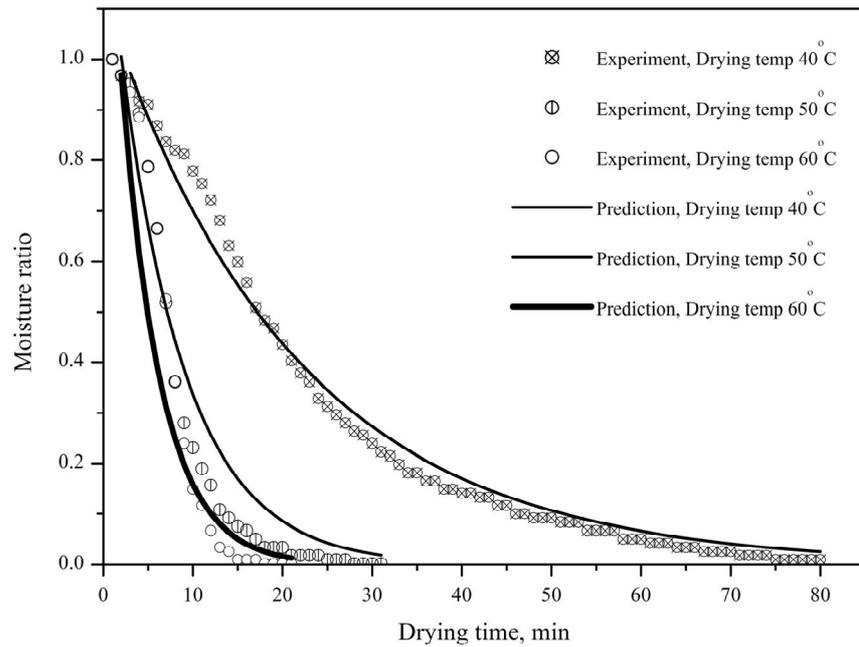
ภาพที่ ก.13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Newton ที่ความดัน 5 kPa



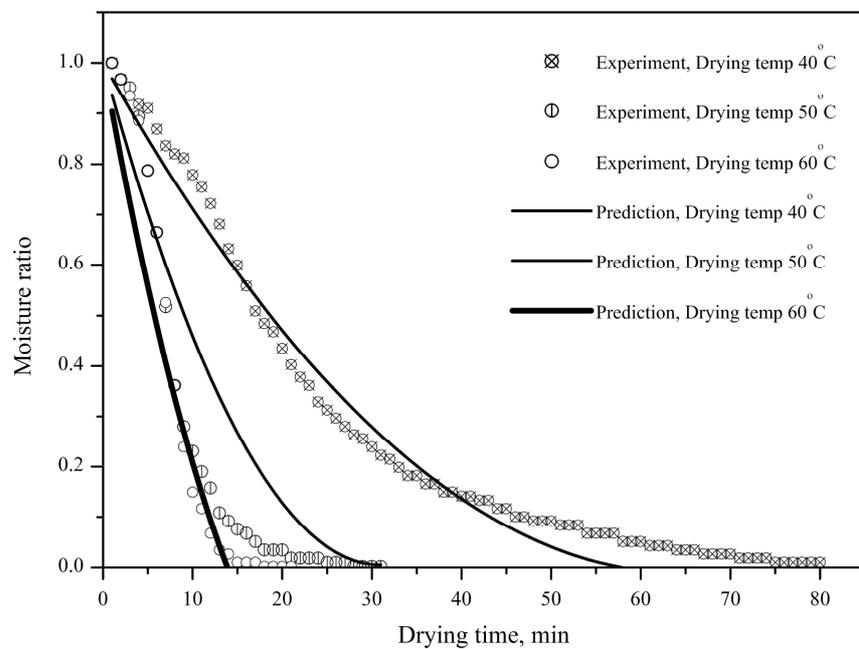
ภาพที่ ก.14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Page ที่ความดัน 5 kPa



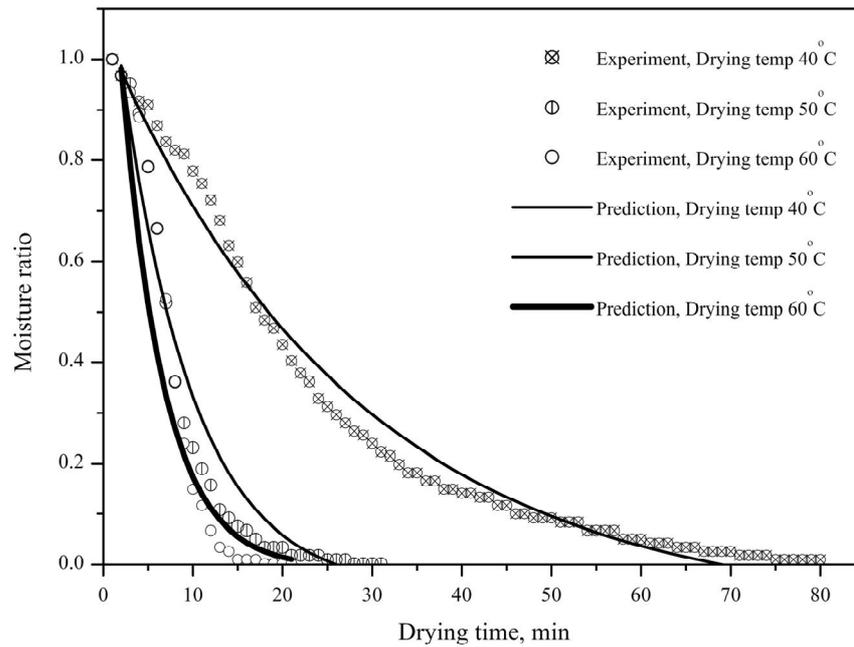
ภาพที่ ก.15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Page I ที่ความดัน 5 kPa



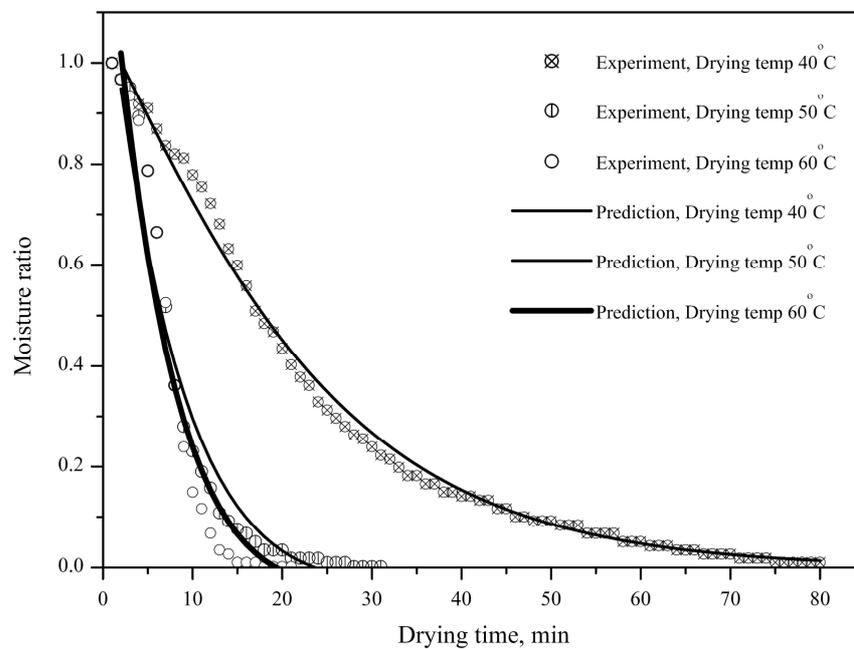
ภาพที่ ก.16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa



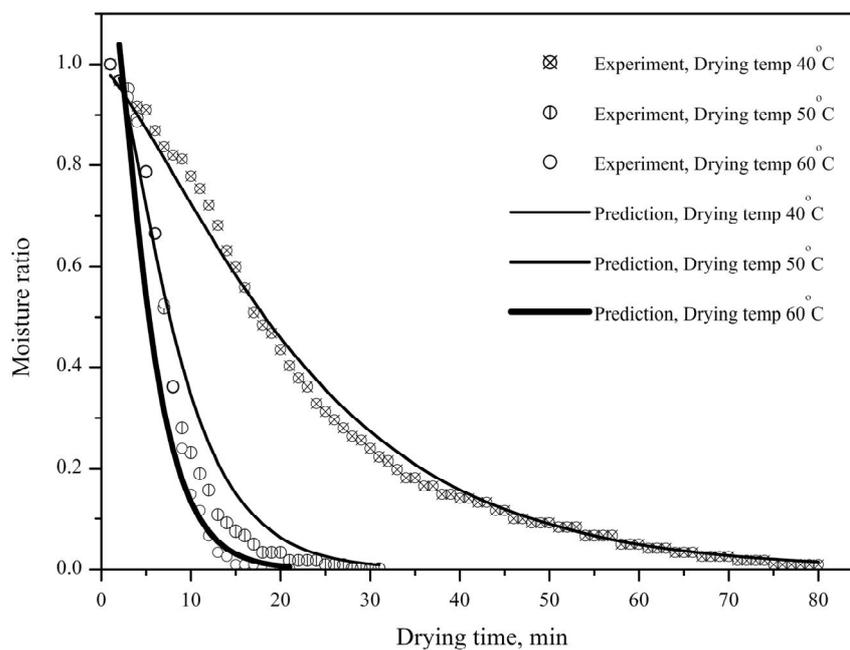
ภาพที่ ก.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Wang and Singh ที่ความดัน 5 kPa



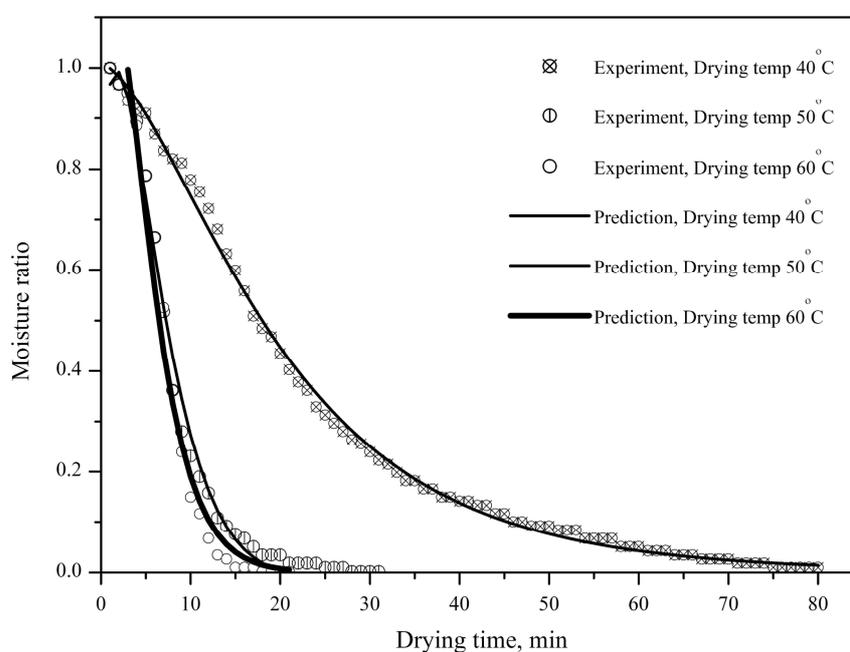
ภาพที่ ก.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa



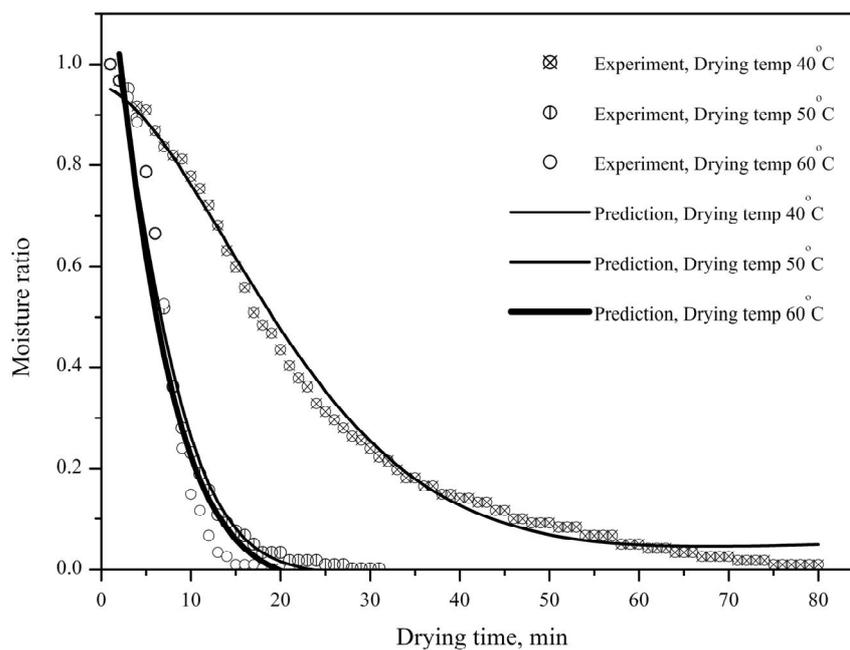
ภาพที่ ก.19 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความดัน 5 kPa



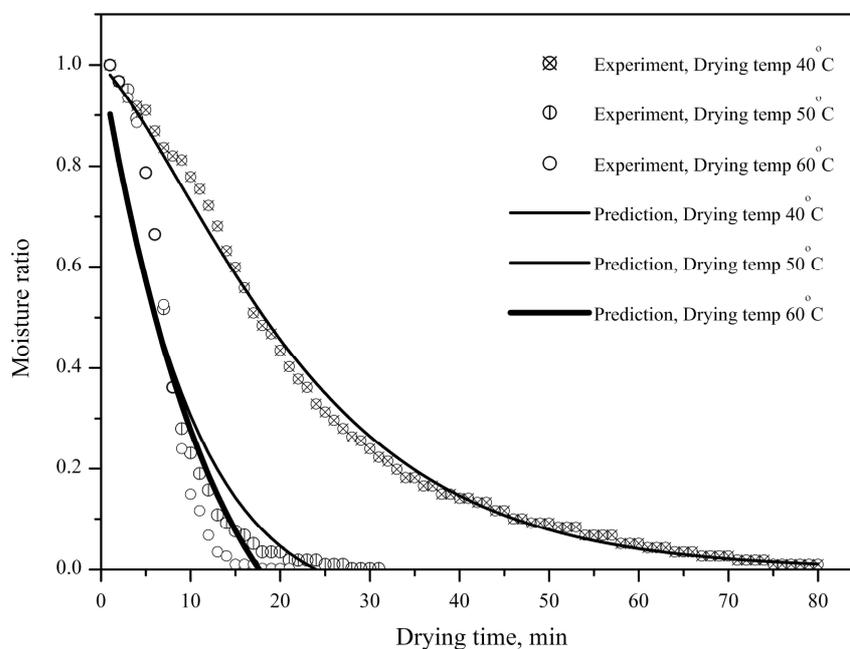
ภาพที่ ก.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term exponential ที่ความดัน 5 kPa



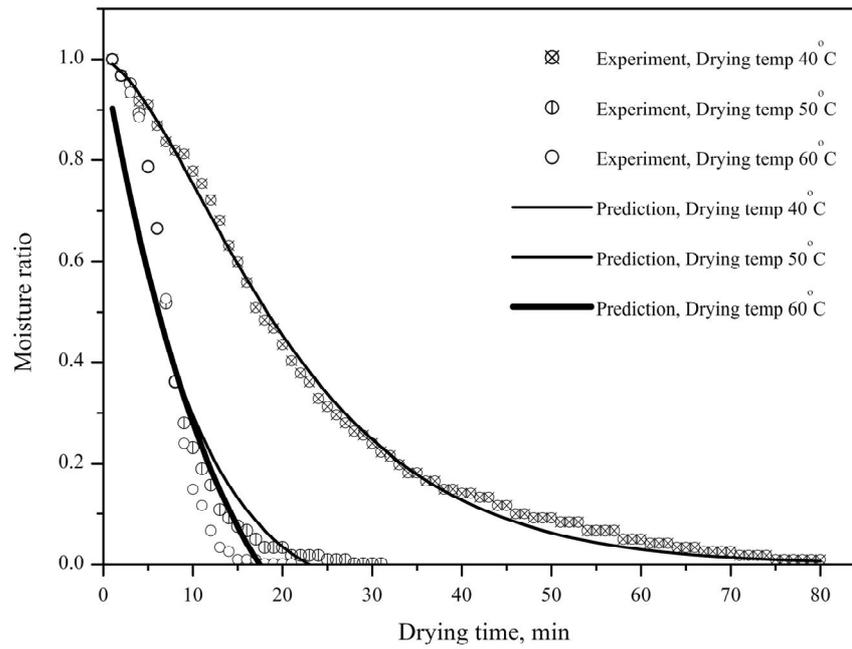
ภาพที่ ก.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa



ภาพที่ ก.22 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Midilld ที่ความดัน 5 kPa



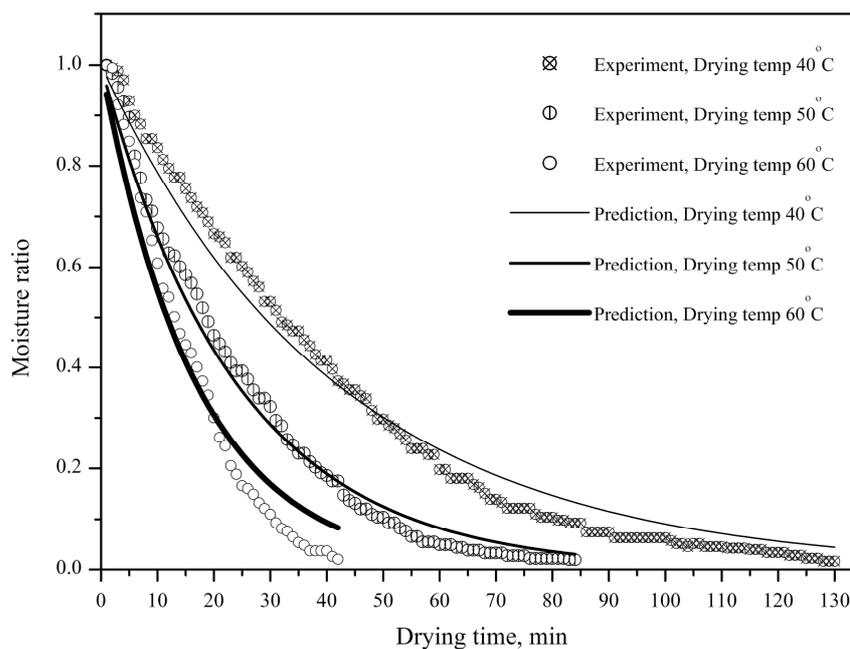
ภาพที่ ก.23 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Approximation of diffusion ที่ความดัน 5 kPa



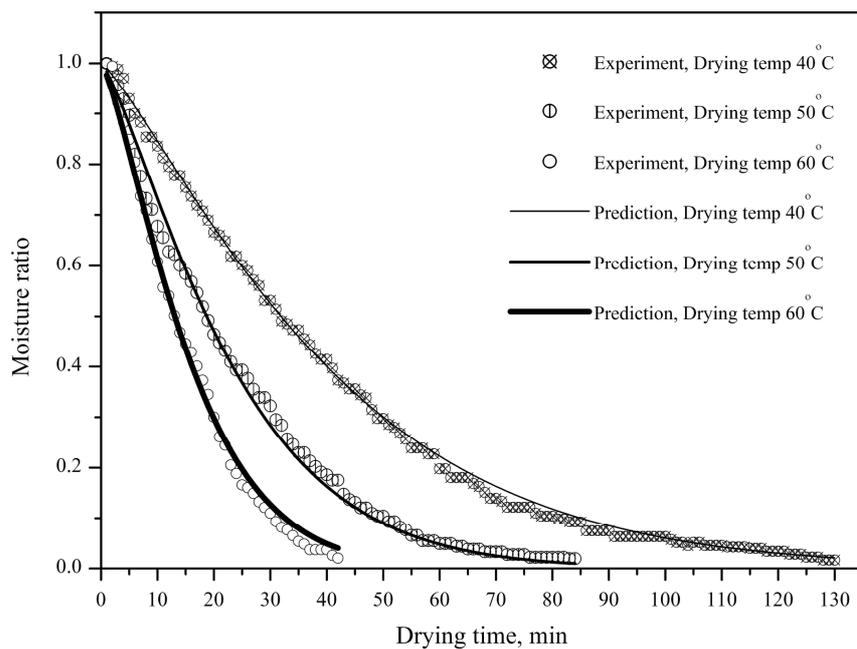
ภาพที่ ก.24 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Verma ที่ความดัน 5 kPa

### 3. การอบแห้งบอระเพ็ดด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

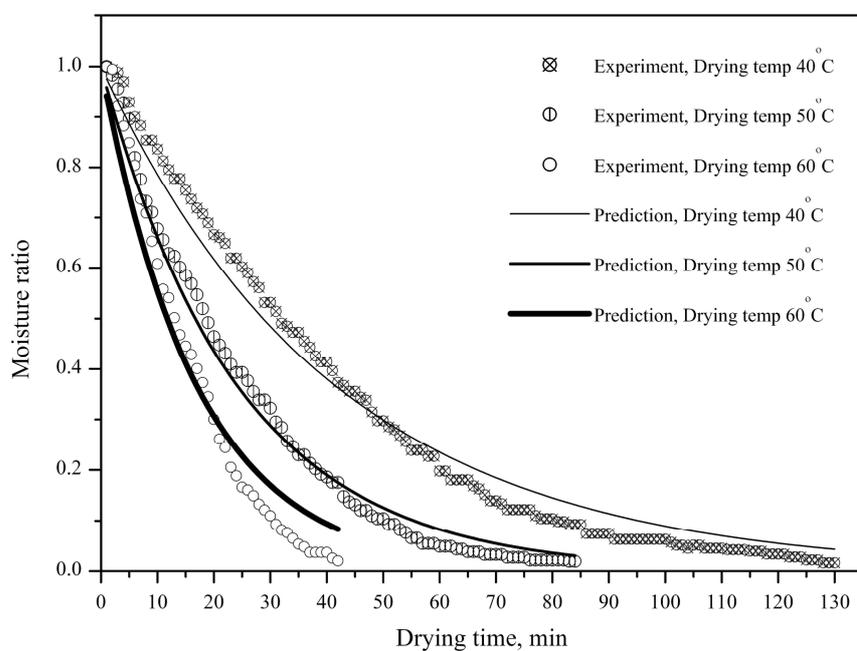
ผลการศึกษาสมการจลนศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของบอระเพ็ด โดยนำค่าความชื้นจากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายการอบแห้งของสมการการอบแห้งชั้นบาง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) สามารถสรุปผลได้ดังนี้



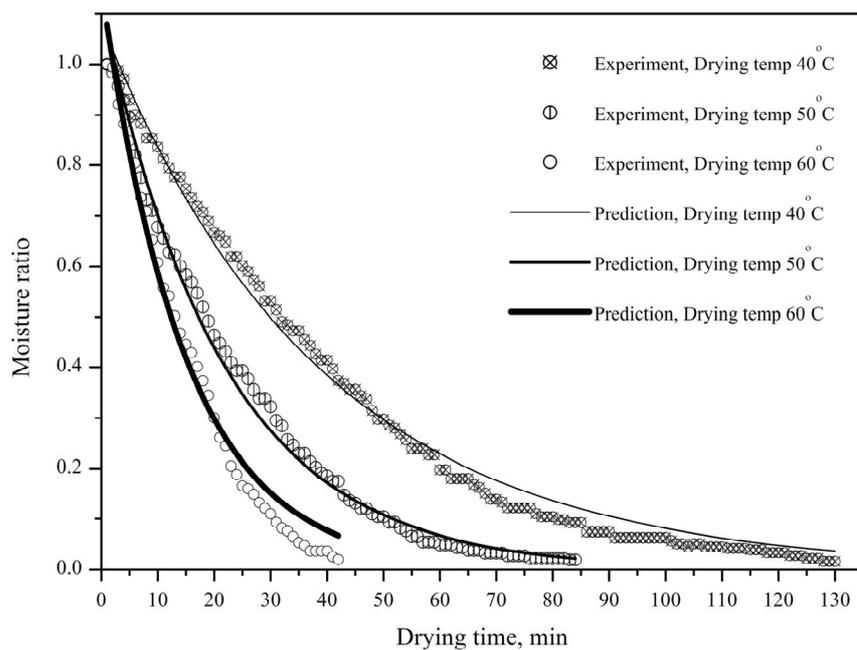
ภาพที่ ก.25 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Newton ที่ความดัน 5 kPa



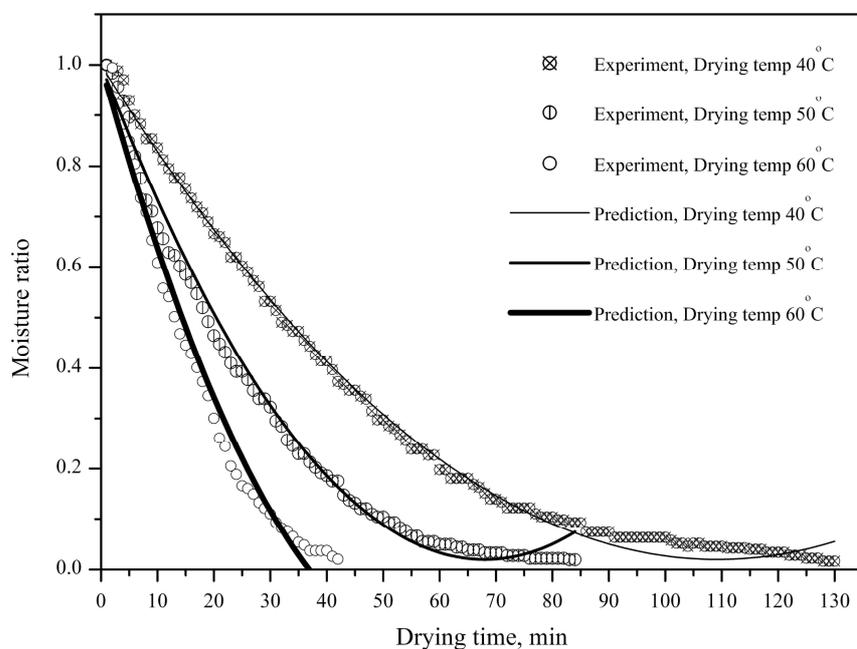
ภาพที่ ก.26 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Page ที่ความดัน 5 kPa



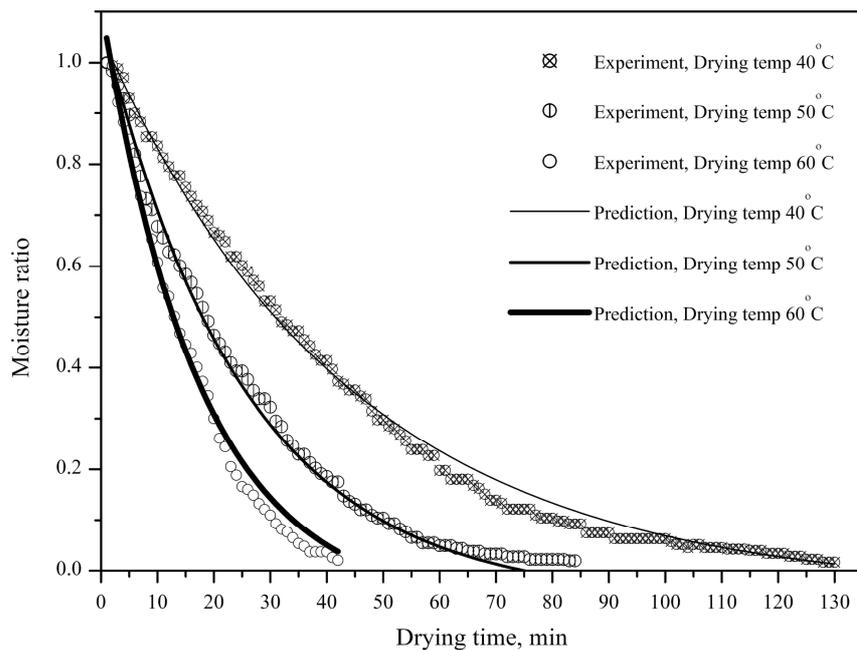
ภาพที่ ก.27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Page I ที่ความดัน 5 kPa



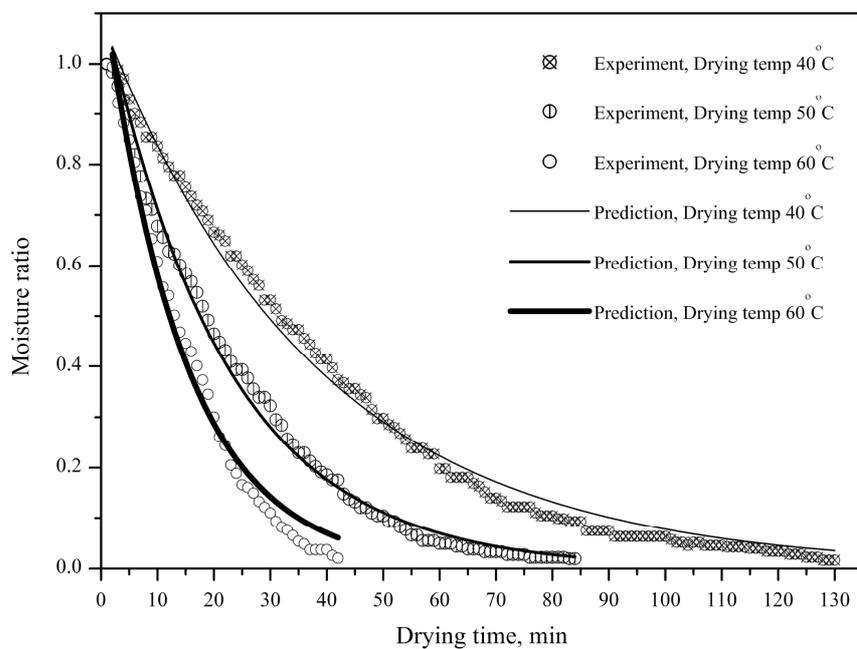
ภาพที่ ก.28 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa



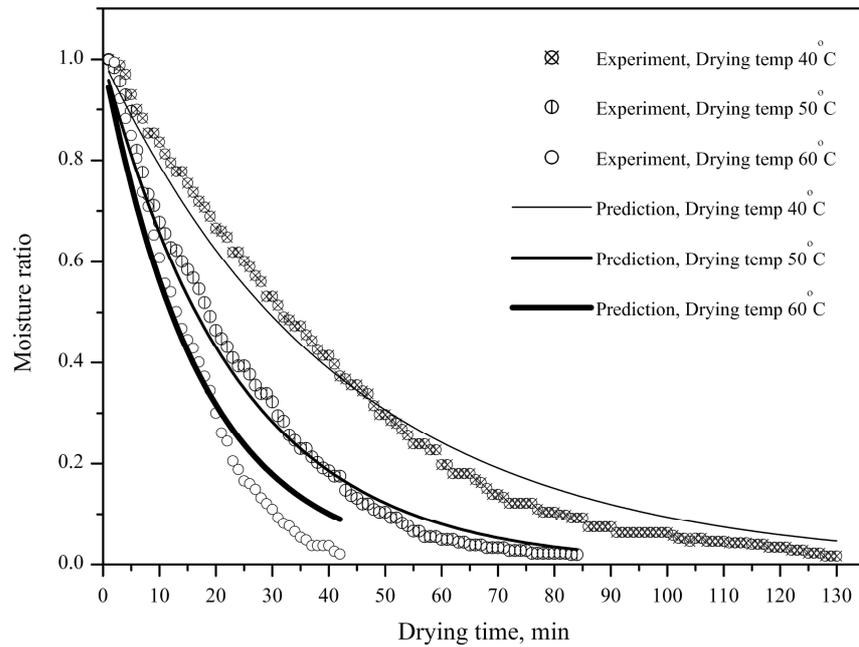
ภาพที่ ก.29 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Wang and Singh ที่ความดัน 5 kPa



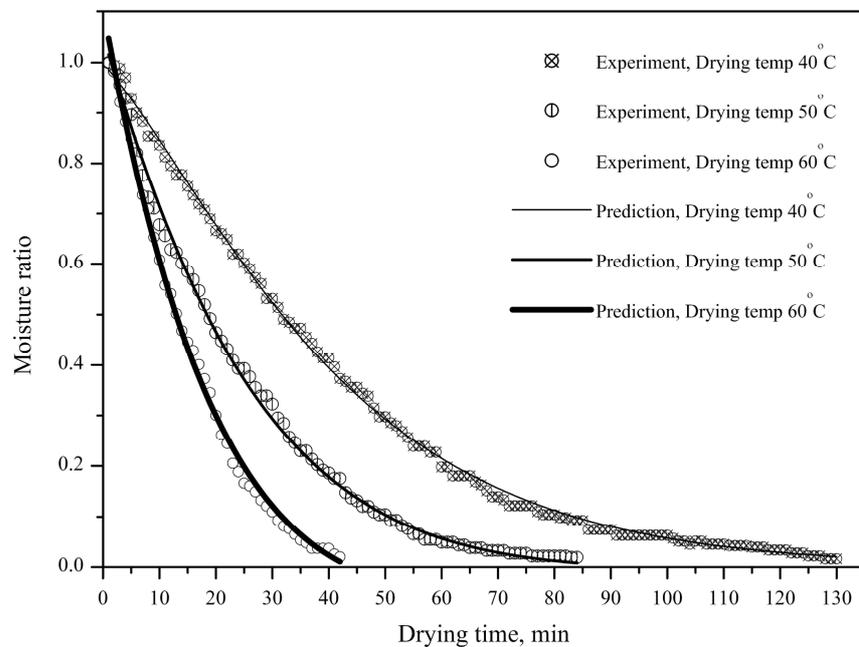
ภาพที่ ก.30 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa



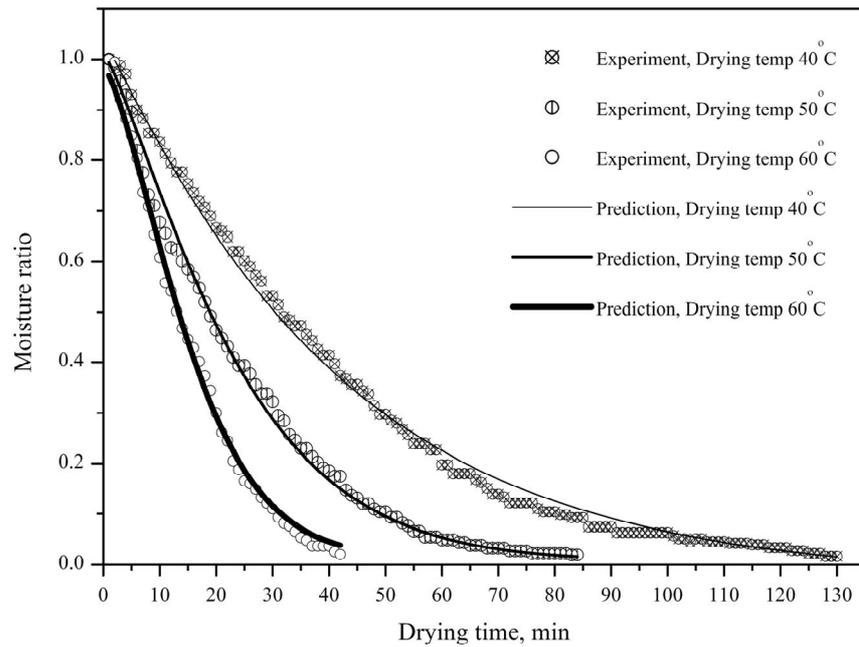
ภาพที่ ก.31 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความดัน 5 kPa



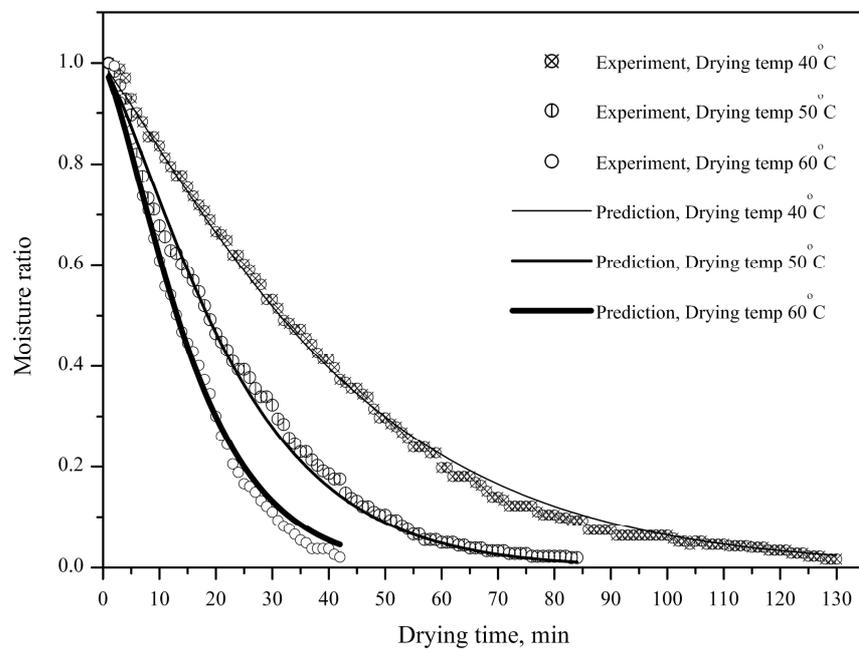
ภาพที่ ก.32 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term exponential ที่ความดัน 5 kPa



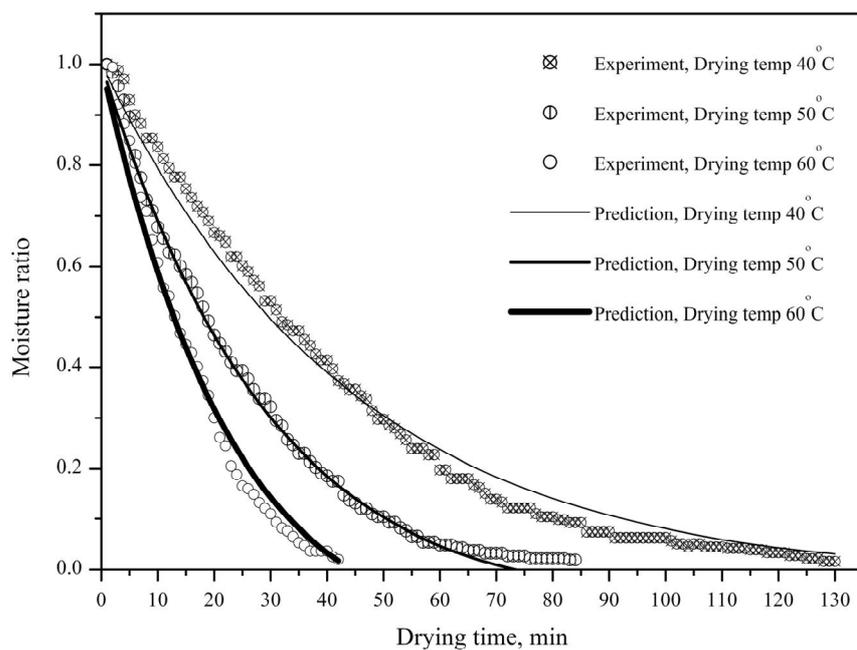
ภาพที่ ก.33 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa



ภาพที่ ก.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Midilld ที่ความดัน 5 kPa



ภาพที่ ก.35 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Approximation of diffusion ที่ความดัน 5 kPa



ภาพที่ ก.36 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Verma ที่ความดัน 5 kPa

ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

## 1. เงื่อนไขการวิเคราะห์

- (1) กรณีอบแห้ง จิง ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 60°C
- (2) ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง 39,000 บาท ( $P_w$ )
- (3) อัตราดอกเบี้ย 8 เปอร์เซ็นต์
- (4) อายุการใช้งานของเครื่องอบแห้ง 10 ปี
- (5) ค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งปีละ 5 เปอร์เซ็นต์ ของราคาต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง
- (6) มูลค่าซากเครื่องอบแห้งที่ปีสุดท้ายเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของราคาต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง ( $S=3,900$  บาท)
- (7) เวลาที่ใช้อบแห้งรวมต่อรอบการผลิต เท่ากับ 55 นาที (45+10 นาที)
- (8) คิดเวลาทำงาน 8 ชั่วโมง/วัน และ 1 ปีเท่ากับ 365 วัน
- (9) รอบการผลิต จำนวนได้ดังนี้

$$\text{รอบการผลิตต่อวัน} = \frac{60 \times 8}{55} \text{ ครั้ง/วัน}$$

$$= 8 \text{ ครั้ง/วัน}$$

$$\text{รอบการผลิตต่อปี} = 8 \times 365 \text{ ครั้ง/ปี}$$

$$= 2,920 \text{ ครั้ง/ปี}$$

- (10) น้ำหนักน้ำระเหยเท่ากับ 0.046 กิโลกรัม/รอบการผลิต (132.89 กิโลกรัม/ปี)
- (11) ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.46 kWh/รอบการผลิต (1,343.2 kWh/ปี)
- (12) ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 3 บาท/kWh

## 2. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรายปี

- (1) มูลค่าปัจจุบันต้นทุนสร้างเครื่องรายปี ( $C_p$ )

$$C_p = P_w \left( \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

$$= 39,000 \left( \frac{8(1+0.08)^{10}}{(1+0.08)^{10} - 1} \right)$$

$$= 5,812 \text{ บาท/ปี}$$

(2) ค่าบำรุงรักษารายปี ( $C_m$ )

$$C_m = 39,000 \times 0.05$$

$$= 1,950 \text{ บาท/ปี}$$

(3) มูลค่าซากเครื่องอบแห้งรายปี ( $C_s$ )

$$C_s = S \left( \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right)$$

$$= 3,900 \left( \frac{0.08}{(1+0.08)^{10} - 1} \right)$$

$$= 269 \text{ บาท/ปี}$$

(4) มูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี ( $C_e$ )

$$C_e = 1,343.2 \times 3$$

$$= 4,030.6 \text{ บาท/ปี}$$

(5) มูลค่าเงินสดที่ใช้ต่อปี ( $C_{pc}$ )

$$C_{pc} = 2,930 \text{ บาท/ปี}$$

(6) ค่าใช้จ่ายรายปีรวม ( $C_T$ )

$$C_T = C_p + C_m - C_s + C_e + C_{pc}$$

$$= 14,452 \text{ บาท/ปี}$$

3. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

$$\text{ต้นทุนการระเหยน้ำต่อหน่วย} = \frac{14,452}{132.89}$$

$$= 108.76 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

**ภาคผนวก ค**  
**รายการบทความวิจัย**

## รายการบทความวิจัย

แสดงบทความวิจัยฉบับเต็มในภาคผนวก โดยมีชื่อบทความดังต่อไปนี้

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ศักชัย จงจำ. “การอบแห้งจึงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด”, วารสาร  
วิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 ; 2553 (National journal)

ศักชัย จงจำ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา. “การอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับ  
อินฟราเรด”, วารสารวิชาการ ม.อบ., ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 ; 2553 (National journal)

ศักชัย จงจำ, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา. “การศึกษาเปรียบเทียบความสิ้นเปลือง  
พลังงานจำเพาะระหว่างการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศ  
ร่วมกับฮีตเตอร์”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานครั้งที่ 6, 2553. (National  
conference)

**การอบแห้งซิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด**  
**Ginger Drying Using Infrared-Vacuum Technique**

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา\* และ ศักชัย จงจำ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Umphisak Teeboonma\* and Sakchai Jongjam

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งซิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซิง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด

**คำสำคัญ :** การอบแห้งซิง สุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด สมการอบแห้งชั้นบาง

**Abstract**

The objectives of this research were to study ginger drying using infrared-vacuum technique and to find out the appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of ginger. To achieve these purposes, experiments were conducted on the following conditions: absolute pressures in drying chamber of 5, 10, 15 kPa and drying temperatures of 40, 50, 60°C. The effects of drying conditions on moisture ratio, drying rate and specific energy consumption were also investigated. From experimental results, it was revealed that increment of drying temperature or decrement of absolute pressure in drying chamber cause high drying rate and low specific energy consumption. Furthermore, it was found that thin layer equation providing the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) and the lowest root mean square error (RMSE) is Modified Henderson and Pabis equation.

**Keywords :** ginger drying, infrared-vacuum, thin layer equation

-----  
**Corresponding author.** E-mail: enaumpte@ubu.ac.th

## บทนำ

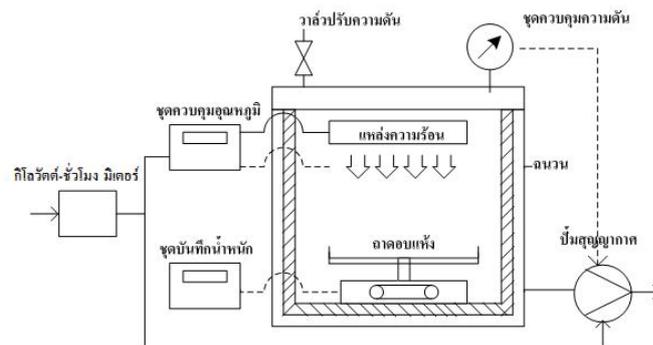
สมุนไพร ใช้เป็นยารักษาโรคมามากตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งถือได้ว่าเป็นมรดกทางภูมิปัญญาที่ทรงคุณค่ายิ่งของไทย ชิง (Ginger) เป็นพืชสมุนไพรที่มีคุณประโยชน์ เป็นทั้งอาหารและยารักษาโรคเหง้าซึ่งมีกลิ่นฉุน มีสรรพคุณช่วยขับลม แก้ท้องอืด จุกเสียดแน่นเพื่อ แก้อาการคลื่นไส้ อาเจียน และขับเสมหะ จากข้อมูลทางเภสัชวิทยา พบว่า ชิงมีฤทธิ์ด้านจุลชีววะ ลดการอักเสบ ป้องกันและบรรเทาอาการคลื่นไส้อาเจียนจากการเมาเรือ เมาเครื่องบิน แพทย์ท้อง อาการคลื่นไส้ในผู้ป่วยหลังการผ่าตัดหรือผู้ป่วยเคมีบำบัด ปัจจุบันชิงถูกนำมาแปรรูปเพื่อจุดประสงค์ทางการค้า โดยผ่านการแปรสภาพด้วยกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและการใช้ประโยชน์ ในรูปของแคปซูล ยาเม็ด หรือยาชงสมุนไพร การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรสภาพยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ เทคโนโลยีการอบแห้งนั้นมีความหลากหลาย ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญด้านต้นทุนการผลิต การอบแห้งด้วยสุญญากาศเป็นกระบวนการลดความชื้นในขณะอบแห้ง เพื่อช่วยให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ระเหยที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (Jaya & Das, 2003) อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยสุญญากาศถึงแม้ว่าในผลิตภัณฑ์จะระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อลดระยะเวลาการอบแห้งก็จำเป็นต้องใช้แหล่งผลิตความร้อนช่วย เช่นเดิม การนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับ

เครื่องอบแห้งกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวแห้ง และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง (Glouannec *et al.*, 2002; Nourhene *et al.*, 2009) นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดยังให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย ประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Vogt, 2007; Chua & Chou, 2003) จากข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งให้ความร้อนในการอบแห้งร่วมกับสุญญากาศ โดยศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งในระบบดังกล่าว

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์การทดลอง

ภาพที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอก ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนของระบบติดตั้งอยู่บนของห้องอบแห้งโดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ ใช้หัววัดอุณหภูมิ ชนิด K และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ แหล่งความร้อนและผลิตภัณฑ์มีระยะห่างเท่ากับ 15 เซนติเมตร ซึ่งนำหนักผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งโดยใช้ไหลด์เซลล์ พร้อมชุดบันทึกข้อมูล ทำภาวะสุญญากาศใน



ภาพที่ 1 ชุดทดลอง

ห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ ต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดและควบคุมความดัน วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้ กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

#### วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ชিং ซึ่งมีอายุประมาณ 10 เดือน โดยมีขั้นตอนการเตรียม คือ นำชিংมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือกให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร และใช้เครื่องหั่นตามขวางให้ได้ความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 990 - 1020 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อบจนกระทั่งน้ำหนักของชিংคงที่ โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ ความชื้นสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้งที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในระหว่างทำการทดลองได้บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และอุณหภูมิอบแห้งทุกๆ 1 นาที

#### การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตั้งแต่ช่วงความชื้นซึ่งเริ่มต้นประมาณ 990 - 1020 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์คำนวณจากสมการที่ (1)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)  
 $W_t$  คือ น้ำหนักชั่งที่เวลาใดๆ (กรัม)  
 $W_d$  คือ น้ำหนักแห้งของชিং (กรัม)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของชিং ศึกษาในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)  
 $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)  
 การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

ในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเปรียบเทียบ ดังนี้

1) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) (Kar & Gupta, 2003)

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \quad (3)$$

เมื่อ  $M_0$  คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)

$M_T$  คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

2) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_{infrared} + E_{vacuum}}{M_w} \quad (4)$$

เมื่อ  $E_{infrared}$  คือ พลังงานที่ใช้กับหลอดอินฟราเรด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$E_{vacuum}$  คือ พลังงานที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$M_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (กิโลกรัม)

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของการอบแห้งชিং ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีชี้วัดความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

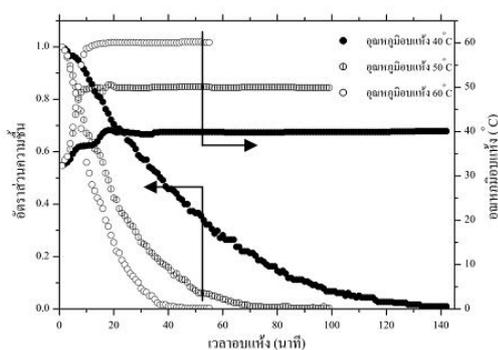
รูปแบบสมการ	ชื่อสมการ	อ้างอิง
$MR = \exp(-kt)$	Newton	Lui, 1997
$MR = \exp(-kty)$	Page	Sharma, 2001
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	Doymaz, 2004
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	Ozdemir, 1999
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential	Ruiz, 2008
$MR = \exp(-(kt)y)$	Modified Page I	Diamante, 1993
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	Togrul, 2002
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	Yaldiz, 2001
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Verma et al.	Verma, 1985
$MR = a \exp(-ktn) + bt$	Midilli	Midilli, 2002
$MR = a \exp(-k1t) + b \exp(-k2t)$	Two term	Rahman, 1998
$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis	Karathanos, 1999

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{prediction},i} - MR_{\text{experiment},i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

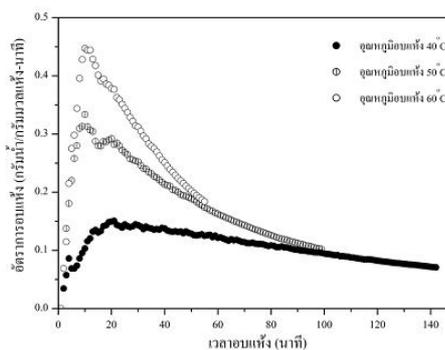
เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

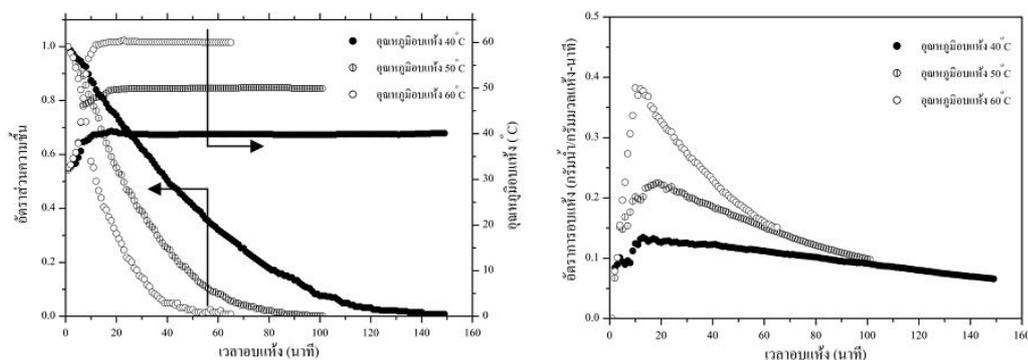
##### ผลของอุณหภูมิอบแห้ง



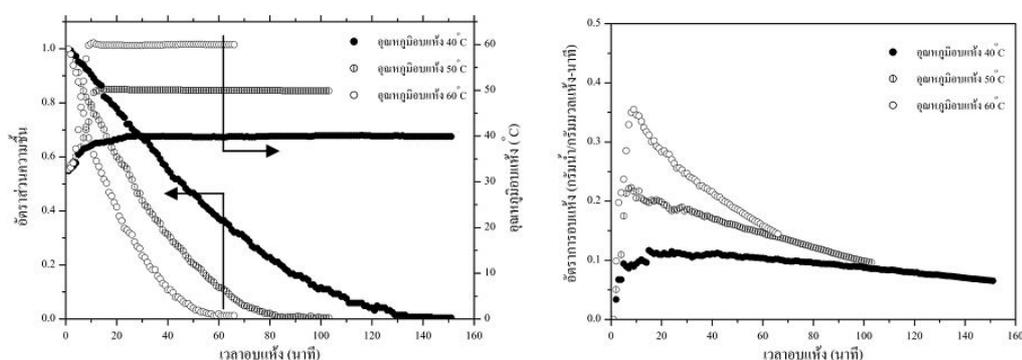
ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 กิโลปาสคาล โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และถูกดูดออกจากห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศ หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง จนคงที่ในที่สุด



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 กิโลปาสคาล



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 กิโลปาสคาล

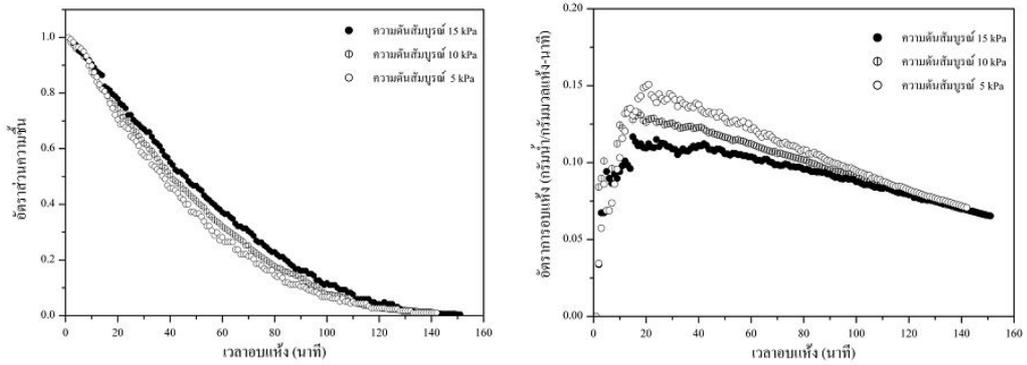
เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความชื้นลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยประมาณ 44 และ 61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ภาพที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 10 และ 15 กิโลปาสคาล ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มเหมือนกันกับการอบแห้งซึ่งที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งที่สูงที่สุดด้วย

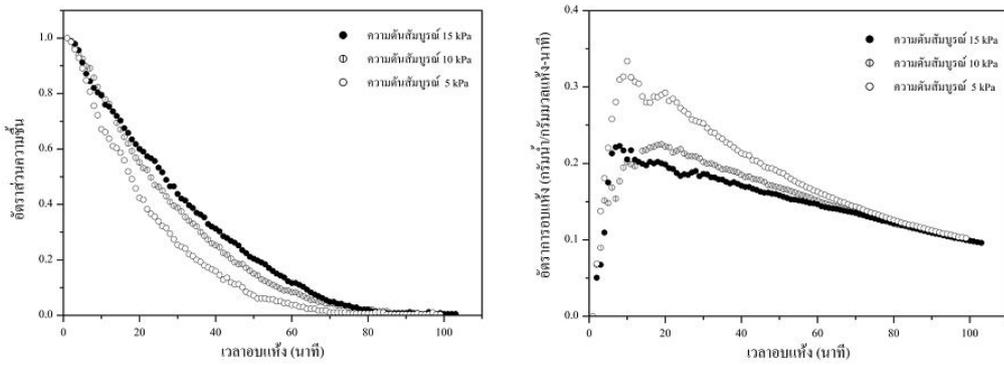
จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดยที่ภาวะความดันเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

#### ผลของความดันสุญญากาศ

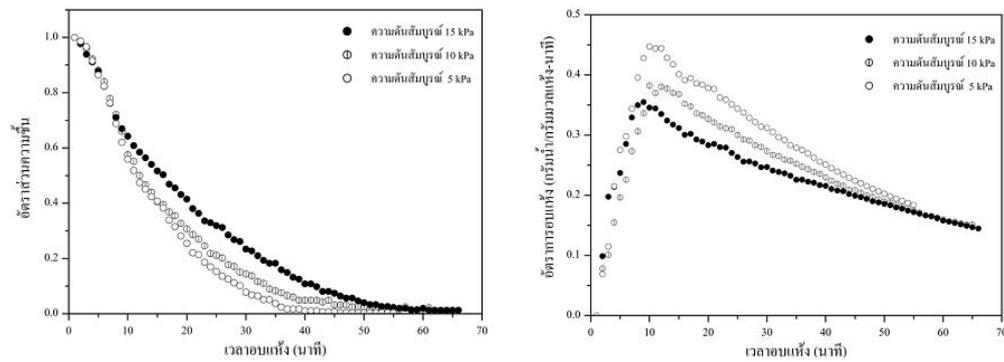
ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งซึ่งที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขภาวะความดันสัมบูรณ์ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง กล่าวคือ ที่เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล มีความชันของเส้นกราฟมากที่สุด นั่นคืออัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุดในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 15 กิโลปาสคาล มีอัตราส่วนความชื้นลดลงช้าที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะความดันสุญญากาศ มีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล มีจุดเดือดที่ 32.88, 45.81 และ



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราความอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราความอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราความอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

53.97 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความดันสุญญากาศ พบว่า ที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล มีอัตราการอบแห้งมากกว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 10 และ 15 กิโลปาสคาล โดยเฉลี่ยประมาณ 7 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยทั้ง 3 เงื่อนไขมีอัตราการอบแห้งสูงสุดหลังจากเริ่มอบแห้งประมาณ 20 นาที และค่อยๆ ลดลง โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ภาพที่ 6-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากภาพพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มลักษณะเช่นเดียวกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แต่มีอัตราการอบแห้งสูงสุดหลังจากอบแห้งผ่านไปประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นจะลดลง โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เมื่อเปรียบเทียบเวลาการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส ผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดยที่อุณหภูมิเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันสัมบูรณ์

#### ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดจากข้อมูลพบว่า ที่เงื่อนไขความดันเดียวกัน ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 40 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยประมาณ 33 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้ใช้พลังงานในส่วนของบ่มสุญญากาศน้อยลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ยังพบอีกว่า ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดัน 10 และ 15 กิโลปาสคาล โดยเฉลี่ยประมาณ 7 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาวะความดันต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ทำให้ใช้เวลาอบแห้งน้อยลง ซึ่งสรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลต่อความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ โดยความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อลดภาวะความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

#### สมการอบแห้งชั้นบาง

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง ดำเนินการโดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และความดัน ดังนั้น a, b, c, g, h, k,  $k_1$ ,  $k_2$  n, หรือ y ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ จึงได้ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งซึ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด

เงื่อนไขการอบแห้ง		ปริมาณน้ำระเหย (kg)	เวลาอบแห้ง (min)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ (kWh/kg)
ความดันสัมบูรณ์ (kPa)	อุณหภูมิ (°C)				
5	40	0.0452	142	1.01	22.35
	-	0.0455	99	0.66	14.50
	-	0.0455	55	0.46	10.11
10	40	0.0452	149	1.07	23.67
	-	0.0455	101	0.71	15.60
	-	0.0452	65	0.50	11.06
15	40	0.0454	151	1.14	25.13
	-	0.0455	103	0.93	20.44
	-	0.0449	66	0.54	12.03

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการออบแท่งชั้นบาง

ชื่อสมการ	พารามิเตอร์	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$R_2$	RMSE
Newton	k	-0.08141	0.00261	0.00286	-0.00008	0.97067	0.05120
Page	k	-0.02026	0.00070	0.00067	-0.00002	0.99478	0.02160
	y	0.90886	0.00935	0.01225	-0.00029		
Henderson and Pabis	a	0.86889	0.00616	0.02315	-0.00054	0.98536	0.03610
	k	-0.10140	0.00318	0.00407	-0.00011		
Wang and Singh	a	0.03169	-0.00123	-0.00077	0.00003	0.97658	0.04570
	b	-0.00048	0.00001	0.00001	0.00000		
Two term exponential	a	-0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.97129	0.05060
	k	-446.874	21.5198	4.69137	-0.34783		
Modified Page I	k	0.14782	0.00021	-0.01297	0.00023	0.97153	0.05040
	y	-0.51958	0.01658	0.03357	-0.00078		
Logarithmic	a	0.92691	0.00472	0.02977	-0.00058	0.99315	0.02470
	k	-0.08605	0.00273	0.00374	-0.00011		
	c	-0.02862	0.00011	-0.00862	0.00006		
Approximation of diffusion	a	2.93318	0.00906	0.03379	-0.00012	0.98881	0.03160
	b	0.82070	0.00017	-0.00572	0.00005		
	k	-0.04638	0.00152	0.00182	-0.00005		
Verma et al.	a	4.97368	-0.23305	-0.49069	0.00915	0.99115	0.02810
	g	-0.05279	0.00165	0.00168	-0.00005		
	k	-0.05243	0.00160	0.00169	-0.00005		
Midilli	a	0.86368	0.00352	0.01932	-0.00043	0.99720	0.01580
	b	-0.00034	0.00001	-0.00012	0.00000		
	k	-0.03193	0.00101	0.00187	-0.00004		
	n	0.98938	0.00665	-0.01972	0.00025		
Two term	a	-247.751	5.96819	8.18974	-0.19893	0.99650	0.01770
	b	248.822	-5.96811	-8.18257	0.19872		
	$k_1$	-0.26429	0.00697	0.00678	-0.00018		
	$k_2$	-0.26447	0.00699	0.00686	-0.00018		
Modified Henderson and Pabis	a	-17.2740	0.25480	2.96650	-0.05111	0.99783	0.01390
	b	2.23530	-0.00510	-1.20980	0.01702		
	c	15.9074	-0.24400	-1.75340	0.03390		
	g	-0.05450	0.00169	0.00050	-0.00003		
	h	-0.01713	0.00126	-0.00602	0.00008		
	k	0.01011	0.00048	-0.00522	0.00009		

กับอุณหภูมิอบแห้ง และความดัน โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = x_0 + x_1 T + x_2 P + x_3 TP \quad (6)$$

เมื่อ K คือ a, b, c, g, h, k,  $k_1$ ,  $k_2$ , n, หรือ y

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

P คือ ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสกาล)

$x_i$  คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (6)

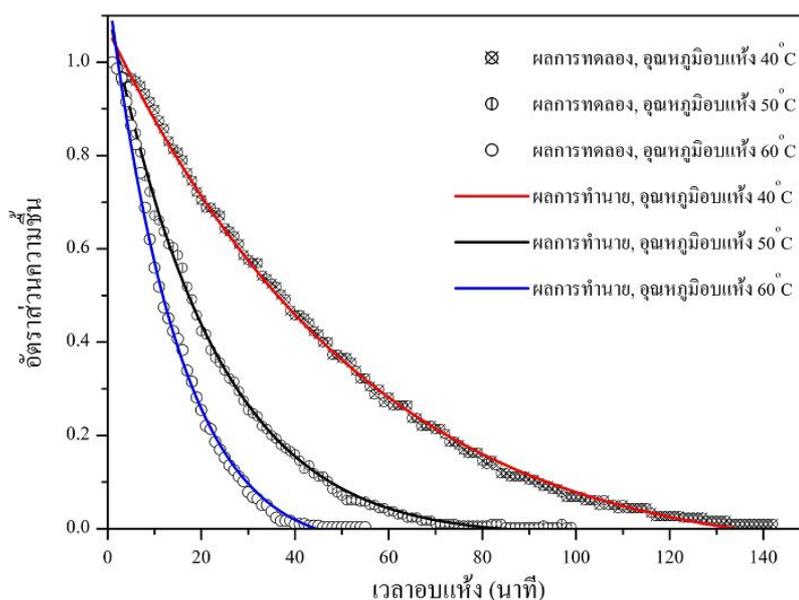
ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง,  $R_2$  และ RMSE จากการวิเคราะห์สมการทั้ง 12 สมการ พบว่าสมการ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งด้วยสัญญาณอากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  (0.99783) มากที่สุด และค่า RMSE (0.01390) น้อยที่สุด ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Modified Henderson and Pabis มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังข้อมูลซึ่งได้แสดงในภาพที่ 8-10

### สรุปผลการทดลอง

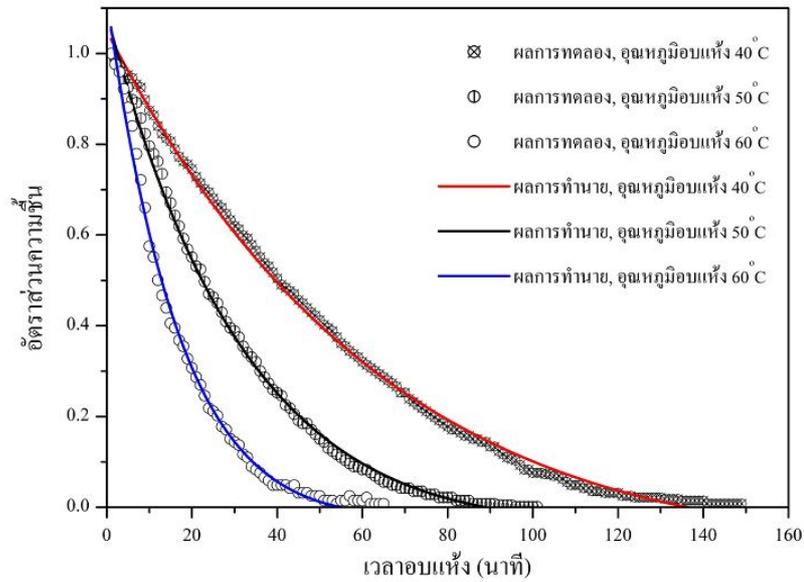
งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสัญญาณอากาศร่วมกับอินฟราเรด ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอบแห้งและภาวะความดันสัญญาณอากาศมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนี้พบว่าสมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสัญญาณอากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  (0.99783) มากที่สุด และค่า RMSE (0.01390) น้อยที่สุด

### กิตติกรรมประกาศ

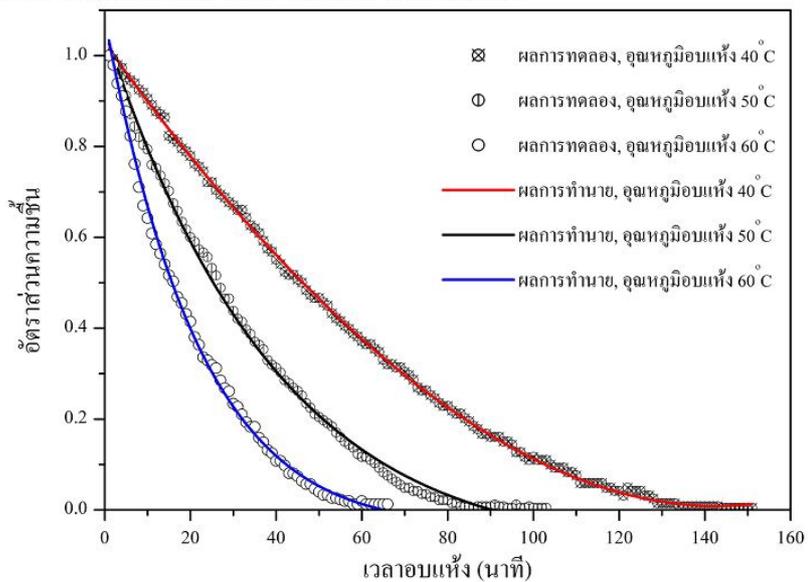
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลกรรทดลองกับผลกรรทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 10 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลกรรทดลองกับผลกรรทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 15 กิโลปาสกาล

## เอกสารอ้างอิง

- Chua, K.J., & Chou, S.K. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 519-528.
- Diamante, L.M., & Munro, P.A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51, 271-276.
- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.
- Glouannec, P., Lecharpentier, D., & Noel, H. (2002). Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Applied Thermal Engineering*, 22, 1689-1703.
- Jaya, S., & Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21(7), 1215-1234.
- Kar, A., & Gupta, D.K. (2003). Air drying of osmosed button mushroom. *Journal of Food Science and Technology*, 40(1), 23-27.
- Karathanos, V.T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39, 337-344.
- Lui, Q., & Bakker-Arkema, F.W. (1997). Stochastic modeling of grain drying, part 2: model development. *Journal of Agricultural Research*, 66, 275-280.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Nourhene, B., Neila, B., Imen B.S., & Nabil, K. (2009). Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. *Industrial Crops and Product*, 29, 412-419.
- Ozdemir, M., & Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.
- Rahman, M.S., & Perera, C.O. (1998). Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 30, 485-491.
- Ruiz, C.A., Rojas, S., & Lopez, R.L. (2008). Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 1810-1818.
- Sharma, G.P., & Prasad, S. (2001). Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50, 99-105.
- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of soar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- Verma, L. (1985). Drying effects of drying air parameters on rice drying models. *Transaction of the ASAE*, 85, 296-301.
- Vogt, M. (2007). Infrared drying lowers energy costs and drying times. *Plastics, Additives and Compounding*, 9, 58-61.
- Yaldiz, O., Erketing, C., & Uzum, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-564.

## การอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรด Murdannia Lorifomis drying using infrared-vacuum technique

ศักชัย จงจำ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งหญ้าปักกิ่ง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง พบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  (0.99377) มากที่สุด และ RMSE (0.02422) น้อยที่สุด

**คำสำคัญ:** การอบแห้งสมุนไพร, การอบแห้งสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรด, สมการอบแห้งชั้นบาง, อัตราการอบแห้ง

### Abstract

The objectives of this research were to study Murdannia lorifomis drying using infrared-vacuum technique and to find out the appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of Murdannia lorifomis. To achieve these purposes, experiments were conducted on the following conditions: absolute pressures in drying chamber of 5, 10, 15 kPa and drying temperatures of 40, 50, 60°C. In this work, effects of drying conditions on moisture ratio, drying rate and specific energy consumption were investigated. From experimental results, it was revealed that increment of drying temperature or decrement of absolute pressure in drying chamber result in high drying rate and low specific energy consumption. Furthermore, it was found that the suitable thin layer equation to predict the drying kinetic of Murdannia lorifomis providing the highest coefficient of determination ( $R^2$ , 0.99377) and the lowest root mean square error (RMSE, 0.02422) is Modified Henderson and Pabis equation.

**Keywords:** Drying rate, Herb drying, Infrared-vacuum drying, Thin layer equation

### 1. บทนำ

สมุนไพร ถูกใช้เป็นยารักษาโรคมาตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งถือได้ว่าเป็นมรดกทางภูมิปัญญาที่ทรงคุณค่ายิ่งของไทย หญ้าปักกิ่ง (Murdannia lorifomis) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่อยู่ในวงศ์ Commelinaceae ในประเทศจีน พบว่ามีการใช้หญ้าปักกิ่งรักษาอาการเกี่ยวกับโรคในระบบทางเดินหายใจ (หนันวัน, 2539) ในประเทศไทย ผู้ป่วยมะเร็งได้ใช้น้ำคั้นจากหญ้าปักกิ่งมาดื่ม เพื่อรักษาและบรรเทาอาการ

ของโรค บางรายใช้หญ้าปักกิ่งรักษาโรคร่วมกับยาแพทย์แผนปัจจุบัน เพื่อช่วยลดผลข้างเคียง ผู้ป่วยมะเร็งที่ได้ใช้หญ้าปักกิ่งรักษาตนเองได้แก่ ผู้ป่วยมะเร็งปอด มะเร็งกระเพาะอาหาร มะเร็งมดลูก มะเร็งปากมดลูก มะเร็งโพรงจมูก มะเร็งตับ มะเร็งเต้านม มะเร็งม้าม มะเร็งลำไส้ใหญ่ มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ มะเร็งต่อมหน้าเหลือง มะเร็งกระดูก เนื้ออกในสมอง และมะเร็งเม็ดเลือดขาว (วีณา, 2542) ปัจจุบัน หญ้าปักกิ่งถูกนำมาแปรรูปเพื่อจุดประสงค์ทาง

การค้ำ โดยถูกนำมาแปรสภาพด้วยกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและการใช้ประโยชน์ในรูปของแคปซูลหรือยาขงสมุนไพร

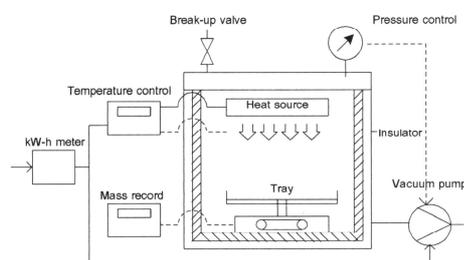
การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรสภาพยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ ซึ่งเทคโนโลยีการอบแห้งมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญด้านต้นทุนการผลิต การอบแห้งด้วยสุญญากาศเป็นกระบวนการลดความดันในขณะอบแห้ง เพื่อช่วยให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการระเหยที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (Jaya and Das, 2003) อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยสุญญากาศถึงแม้ว่าในผลิตภัณฑ์จะสามารถระเหยที่อุณหภูมิต่ำ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อลดระยะเวลาการอบแห้งก็ยังจำเป็นต้องใช้แหล่งผลิตความร้อนเช่นเดิม การนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิจึงในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ทำให้ผิวภายนอกวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวยุบ และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง (Glouannec et al, 2002; Nourhene et al, 2009) นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดยังสามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว มีการกระจายของรังสีความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย ประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Vogt, 2007; Chua and Chou, 2003) จากข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งให้ความร้อนในการอบแห้งร่วมกับสุญญากาศเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสม สำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของยาขง

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ภาพที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอก ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ระบบติดตั้งอยู่บนของห้องอบแห้งโดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด (Infrapara, รุ่น D1-500 ขนาด 500 วัตต์) ใช้หัววัดอุณหภูมิ ชนิด K

และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (HANYOUNG รุ่น DF4) ในการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง ถาดวางผลิตภัณฑ์อยู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ให้ความร้อนและถาดเท่ากับ 15 เซนติเมตร ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งโดยใช้โพลีเซลล์ (TRANSCCELL รุ่น FAD-5) พร้อมชุดบันทึกข้อมูล ทำภาวะสุญญากาศในห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ (VACVA, double stage pump, 150 ลิตร/นาที, ขนาด 550 วัตต์) โดยใช้อุปกรณ์วัดและควบคุมความดัน (COPAL ELECTRONICS รุ่น PG-30) วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้มิเตอร์ (Mitsubishi Electric, ความละเอียด 0.01 kWh)



ภาพที่ 1 ชุดทดลอง

### 2.2 วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ หนุ่ยปากกิ้ง (Murdannia loriformis) โดยนำส่วนใบของหนุ่ยปากกิ้ง มาล้างด้วยน้ำสะอาด ตัดให้ได้ขนาดความยาว 1 เซนติเมตร ทำการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1200 % d.b. อบจนกระทั่งน้ำหนักของหนุ่ยปากกิ้งที่ โดยมีเงื่อนไขในการอบแห้งคือ ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล อุณหภูมิอบแห้งที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งความร้อนถึงผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15 เซนติเมตร ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก และอุณหภูมิอบแห้งทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger

### 2.3 การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์ผลในช่วงความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1200% d.b. จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 10 % d.b. โดยความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์คำนวณจากสมการที่ (1)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ  $W_t$  คือ น้ำหนักหย้าบักกิ้งที่เวลาใด ๆ, g  
 $W_d$  คือ น้ำหนักแห้งของหย้าบักกิ้ง, g

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของหย้าบักกิ้ง  
 ศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR)  
 โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น, % d.b.  
 $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, % d.b.  
 $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, % d.b.

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็น  
 การคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล  
 โดยตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อ  
 เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

ในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง  
 ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา  
 เปรียบเทียบดังนี้

1) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตรา  
 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่ง  
 คำนวณได้จากสมการที่ (3) (Kar and Gupta, 2003)

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \quad (3)$$

เมื่อ  $M_0$  คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, g water/g dry solid  
 $M_t$  คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T, g water/g dry solid  
 T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min

2) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific  
 energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่าง  
 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย  
 ออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_{Infrared} + E_{Vacuum}}{M_w} \quad (4)$$

เมื่อ  $E_{Infrared}$  คือ พลังงานที่ใช้กับหลอดอินฟราเรด, kWh  
 $E_{Vacuum}$  คือ พลังงานที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศ, kWh  
 $M_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ, kg

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของ  
 หย้าบักกิ้ง ทำได้โดยนำค่าความชื้นจากการทดลองมา  
 เปรียบเทียบกับสมการการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับ  
 ทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการการอบแห้งแบบกึ่ง  
 ทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) โดยเป็น  
 รูปแบบของผลเฉลยอย่างง่าย รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้  
 ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ใน  
 ตารางที่ 1 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ  
 สมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความ  
 ถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression)

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

No.	Model equation	Name of model	References
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton	Lui, 1997
2	$MR = \exp(-kt^y)$	Page	Sharma and Prasad, 2001
3	$MR = \exp(-(kt)^y)$	Modified Page I	Diamante and Munro, 1993
4	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	Doymaz, 2004
5	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	Ozdemir and Devres, 1999
6	$MR = a \exp(-kt)+c$	Logarithmic	Togrul and Pehlivan, 2002
7	$MR = a \exp(-k_1t)+b \exp(-k_2t)$	Two term	Rahman and Perera, 1998
8	$MR = a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential	Sharaf-Elden et al, 1980
9	$MR = a \exp(-kt)+b \exp(-gt)+c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis	Karathanos, 1999
10	$MR = a \exp(-kt^n)+bt$	Midilli	Midilli et al, 2002
11	$MR = a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	Yaldiz et al, 2001
12	$MR = a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-gt)$	Verma et al.	Verma et al, 1985

สำหรับดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และค่า Root mean square error (RMSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ โดย RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

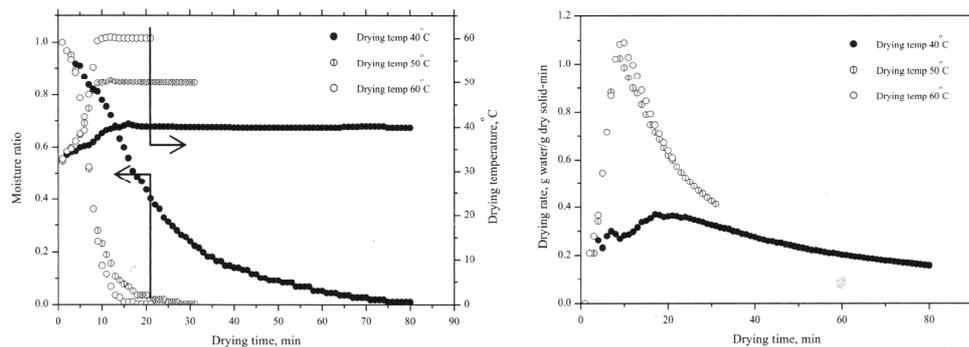
$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{Prediction, i} - MR_{Experiment, i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

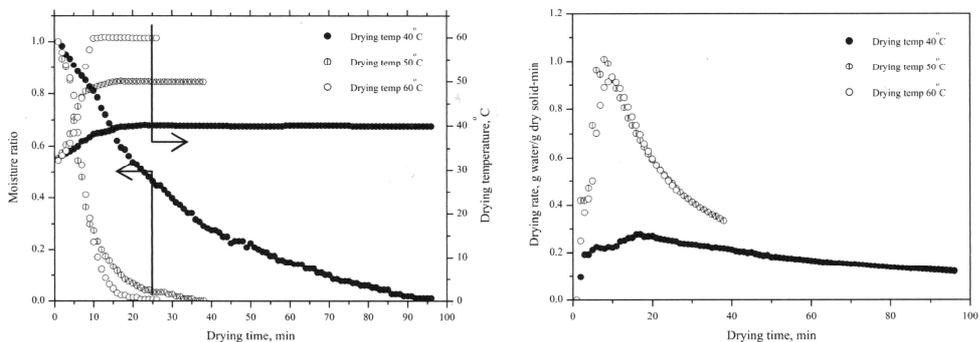
### 3. ผลและวิจารณ์

#### 3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งหญ้า

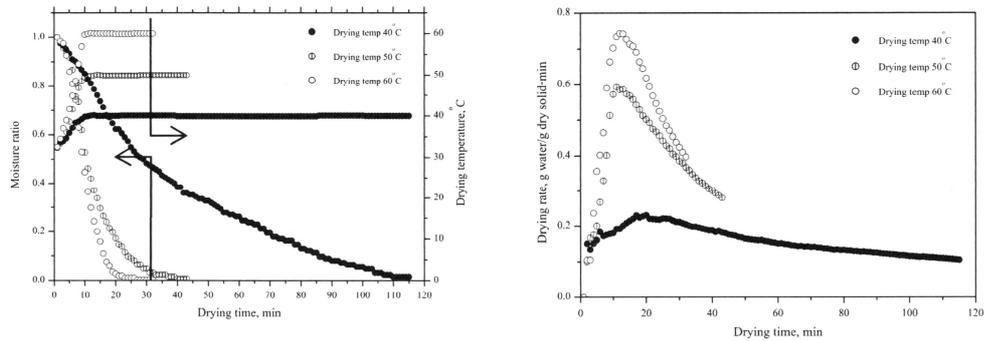


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 กิโลปาสกาล

บ่งชี้ถึงความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 กิโลปาสกาล และทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยในช่วง 10 นาทีแรกของการอบแห้ง ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และถูกดูดออกจากห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศ หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง จนคงที่ในที่สุด และจากการทดลองยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 50°C และ 40°C พบว่าการลดลงของความชื้นเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัด หลังจากผ่านช่วง 10 นาทีแรกของการอบแห้ง ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และ 40°C โดยเฉลี่ยประมาณ 6 และ 36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 กิโลปาสคาล

ภาพที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งหญาปักกิ่งที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 10 กิโลปาสคาล และ 15 กิโลปาสคาล ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเหมือนกันกับการอบแห้งหญาปักกิ่งที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 60°C ความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย

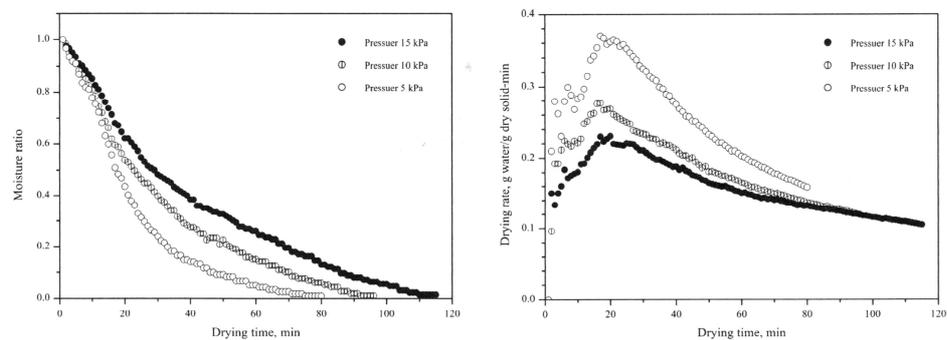
จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งหญาปักกิ่ง โดยที่ภาวะความดันเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

**3.2 อิทธิพลของความดันสูญญากาศ**

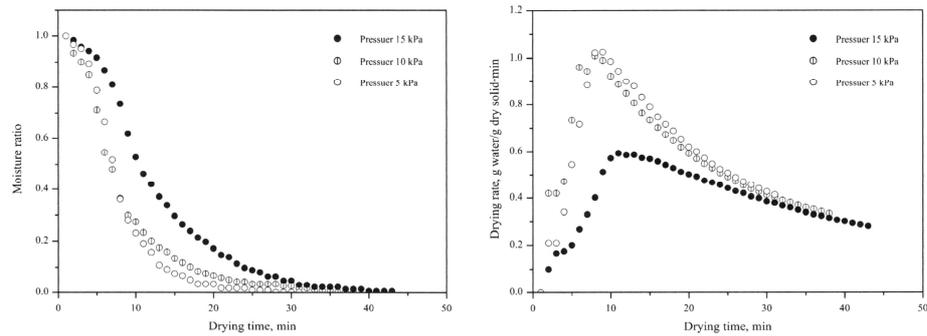
ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งหญาปักกิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 องศาเซลเซียส

ปักกิ่งที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขภาวะความดันสัมบูรณ์ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง กล่าวคือ ที่เงื่อนไขภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล มีความชันของเส้นกราฟมากที่สุด นั่นคืออัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด ในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 15 กิโลปาสคาล อัตราส่วนความชื้นลดลงช้าที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะความดันสูญญากาศ มีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสคาล มีจุดเดือดที่ 32.88, 45.81 และ 53.97°C ตามลำดับ

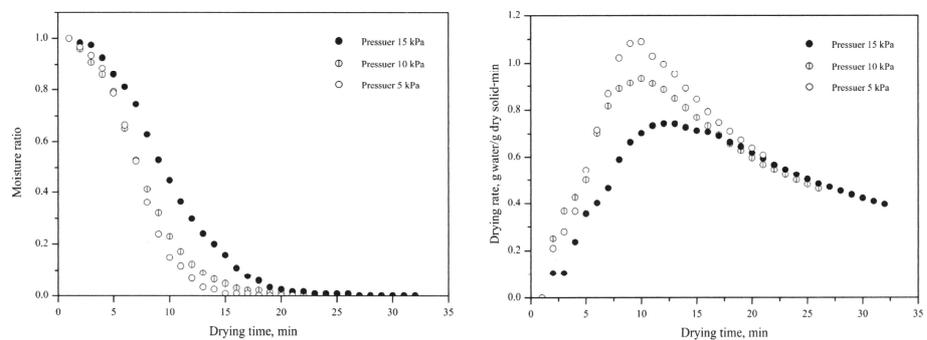
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความดันสูญญากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง พบว่า ที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล มีอัตราการอบแห้งมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ภาวะความดัน 10 และ 15 กิโลปาสคาล โดยทั้ง 3 เงื่อนไขมีอัตราการอบแห้งสูงสุดหลังจากเริ่มอบแห้งผ่านไป 20 นาที และค่อยๆ ลดลง โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 6-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60°C ตามลำดับ จากภาพพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มลักษณะเช่นเดียวกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C แต่มีอัตราการอบแห้งสูงสุดหลังจากเริ่มต้นอบแห้งประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นจะลดลง โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อเปรียบเทียบเวลาการอบแห้งแล้ว พบว่า การอบแห้งที่ความดันสมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาลใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันสมบูรณ์ 10 และ 15 กิโลปาสคาล ซึ่งผลจากการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งสุญญากาศ โดยที่อุณหภูมิเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันสมบูรณ์

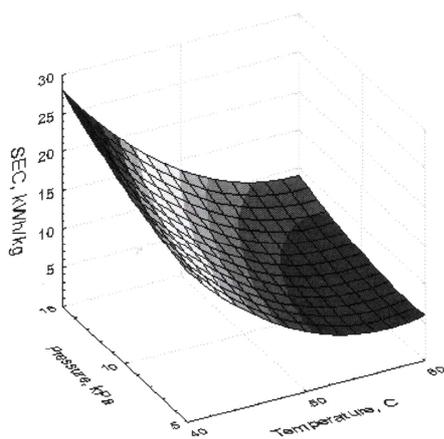
### 3.3 ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งสุญญากาศกับอุณหภูมิการอบแห้ง จากข้อมูลพบว่า ที่เงื่อนไขความดันเดียวกัน ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้ใช้พลังงานในส่วนของปั๊มสุญญากาศน้อยลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันยังพบอีกว่า ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 15 กิโลปาสคาล มีค่ามากที่สุด และที่ความดัน 5 กิโลปาสคาล มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาวะความดันต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ใช้เวลาอบแห้งน้อยลง ซึ่งสรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะ โดยความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อลดภาวะความดันสมบูรณ์ หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด

Drying condition		Extracted water (kg)	Drying time (min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/kg)
Pressure <sub>Abs.</sub> (kPa)	Temp. (°C)				
5	40	0.0279	80	0.55	19.71
	50	0.0281	31	0.23	8.18
	60	0.0281	21	0.16	5.69
10	40	0.0277	96	0.61	22.05
	50	0.0279	38	0.29	10.39
	60	0.0277	26	0.18	6.51
15	40	0.0277	115	0.80	28.91
	50	0.0277	43	0.35	12.65
	60	0.0279	32	0.26	9.32

ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิอบแห้งและความดันสัมบูรณ์ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งหญาปักกิ่ง



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะที่ความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

### 3.4 สมการอบแห้งชั้นบาง

ในการวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับหญาปักกิ่ง สามารถดำเนินการโดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบหาค่าพารามิเตอร์ของสมการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และภาวะความสุญญากาศ

สามารถกำหนดให้  $a, b, c, g, h, k, k_1, k_2, n,$  และ  $y$  เป็นค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง ( $K$ ) ซึ่งมีรูปแบบสมการค่าคงที่ดังสมการที่ (6)

$$K = x_0 + x_1T + x_2P + x_3TP \quad (6)$$

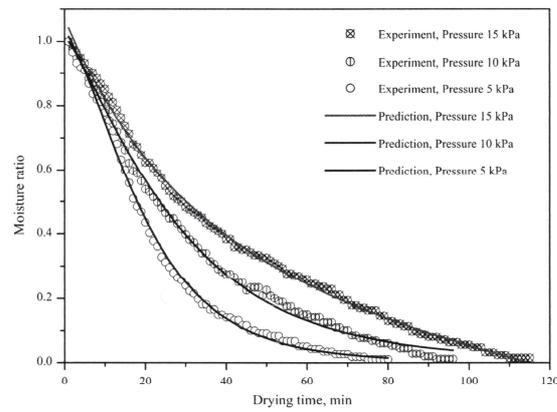
เมื่อ  $K$  คือ  $a, b, c, g, h, k, k_1, k_2, n,$  และ  $y$   
 $T$  คือ อุณหภูมิอบแห้ง  
 $P$  คือ ความดันสัมบูรณ์  
 $x_i$  คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (6)

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง,  $R^2$  และ RMSE จากการวิเคราะห์สมการทั้ง 12 สมการพบว่า สมการ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  (0.99377) มากที่สุด และค่า RMSE (0.02422) น้อยที่สุด

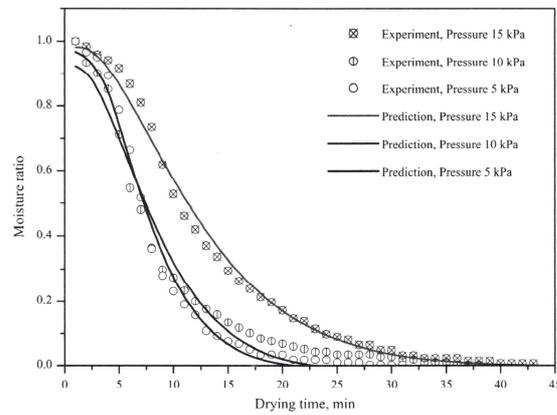
ภาพที่ 9-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟจะสังเกตเห็นว่า ผลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการออบแห้งชั้นบาง

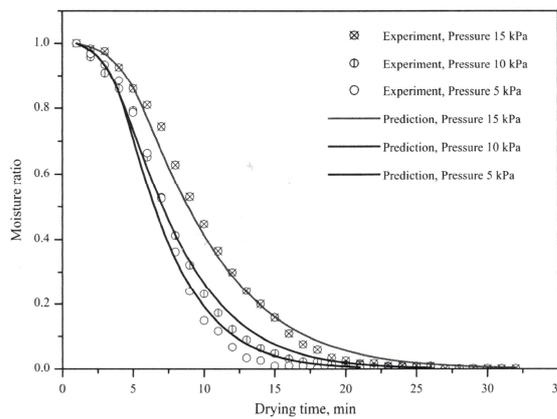
Model	Parameter	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$R^2$	RMSE
Newton	k	-0.231833	0.007092	0.005462	-0.000183	0.92733	0.08272
Page	k	0.048405	-0.000805	-0.000036	0.000004	0.99055	0.02982
	y	-3.169761	0.113759	0.108240	-0.003226		
Modified Page I	k	-0.006976	0.000189	0.000344	-0.000009	0.93531	0.07805
	y	137.248082	-2.008757	11.162308	-0.115423		
Henderson and Pabis	a	0.299067	0.021314	0.002513	-0.000220	0.96243	0.05947
	k	-0.362850	0.010522	0.010184	-0.000309		
Wang and Singh	a	0.113555	-0.003776	-0.002388	0.000091	0.91511	0.08940
	b	-0.003704	0.000101	0.000146	-0.000004		
Logarithmic	a	0.417257	0.018902	0.004186	-0.000202	0.96881	0.05419
	k	-0.385997	0.010743	0.013446	-0.000376		
	c	-0.331715	0.005871	0.009913	-0.000256		
Two term	a	-235.103256	3.322311	13.074030	-0.190005	0.98035	0.04301
	b	235.519369	-3.305267	-13.073610	0.189869		
	$k_1$	-235.103256	3.322311	13.074030	-0.190005		
	$K_2$	0.023090	0.001680	-0.003498	-0.000004		
Two term exponential	a	0.687710	0.030597	-0.045245	0.000635	0.97551	0.04802
	k	-0.464795	0.013470	0.011853	-0.000370		
Modified Henderson and Pabis	a	-560.121320	14.080363	11.621706	-0.294572	<u>0.99377</u>	<u>0.02422</u>
	b	369.058110	-9.299762	-16.340262	0.414304		
	c	192.975266	-4.803914	4.693947	-0.118966		
	g	-0.437545	0.014880	0.002697	-0.000261		
	h	-0.684405	0.018909	0.009886	-0.000374		
	k	-0.528377	0.016292	0.002488	-0.000253		
Midilli	a	0.205149	0.019303	0.010947	-0.000387	0.98142	0.04183
	b	0.005827	-0.000126	-0.000262	0.000006		
	k	-0.251828	0.006455	0.012324	-0.000313		
	n	2.926548	-0.030363	-0.093918	0.001941		
Approximation of diffusion	a	-3.128917	0.006276	-1.661523	0.024512	0.96205	0.05977
	b	-0.314285	0.029216	0.055404	-0.001194		
	k	0.242399	-0.003365	-0.013417	0.000215		
Verma et al.	a	-68.591402	1.069877	2.723347	-0.048649	0.96198	0.05983
	g	0.271223	-0.003731	-0.021532	0.000358		
	k	0.312931	-0.004631	-0.023790	0.000404		



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการอบแห้งเห็ดป่าปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอบแห้งและภาวะความดันสุญญากาศมีผลต่อ จลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดป่าปักกิ่ง และความสัมพันธ์ของ พลังงานจำเพาะ โดยเมื่อลดความดันสมบูรณ์หรือเพิ่ม อุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนี้ ผลจากการศึกษายังพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนาย จลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดป่าปักกิ่งด้วยเทคนิค สุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  (0.99377) มากที่สุด และค่า RMSE (0.02422) น้อยที่สุด

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่สนับสนุนทุน ในการวิจัย

#### บรรณานุกรม

นันทวัน บุณยะประภัศร. 2539. **สมุนไพรไม้พื้นบ้าน**. กรุงเทพฯ : บริษัท ประชาชน จำกัด

วีณา จิระจรรย์กุล. 2542. สารต้านมะเร็งจากเห็ดป่าปักกิ่ง. **จุลสารข้อมูลสมุนไพร** ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 หน้า 10-13.

Chua, K. J. and Chou, S. K. 2003. "Low-cost drying methods for developing countries", **Trends in Food Science & Technology**. 14. 519-528.

Diamante, L.M. and Munro, P.A. 1993. "Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices", **Solar Energy**. 51. 271-276.

Doymaz, I. 2004. "Convective air drying characteristic of thin layer carrot", **Journal of Food Engineering**. 61. 359-364.

Glouannec, P., Lecharpentier, D. and Noel, H. 2002. "Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material", **Applied Thermal Engineering**. 22. 1689-1703.

Jaya, S. and Das, H. 2003. "A vacuum drying model for mango pulp", **Drying Technology**. 21 (7). 1215-1234.

Kar, A. and Gupta, D. K. 2003. "Air drying of osmosed button mushroom" **Journal of Food Science and Technology**. 40 (1). 23-27.

Karathanos, V.T. 1999. "Determination of water content of dried fruits by drying kinetics", **Journal of Food Engineering**. 39. 337-344.

Lui, Q. and Bakker-Arkema, F.W. 1997. "Stochastic modeling of grain drying, part 2; model development", **Journal of Agricultural Research**. 66. 275-280.

Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. 2002. "A new model for single-layer drying", **Drying Technology**. 20 (7). 1503-1513.

Nourhene, B., Neila, B., Imen B. S., and Nabil, K. 2009. "Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves" **Industrial Crops and Products**. 29. 412-419.

Ozdemir, M. and Devres, Y.O. 1999 "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting", **Journal of Food Engineering**. 42. 225-233.

Rahman, M.S. and Perera, C.O. 1998. "Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas", **Food Research International**. 30. 485-491.

Sharma, G.P. and Prasad, S. 2001. "Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination", **Journal of Food Engineering**. 50. 99-105.

Sharaf-Elden, Y.I., Blaisdell, J.L. and Hamdy, M.Y. 1980. "A model for ear corn drying", **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. 5. pp. 1261-1265.

Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2002. "Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers", **Journal of Food Engineering**. 55. 209-216.

Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wratten, F.T. 1985. "Drying effects of drying air parameters on rice drying models", **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. 85. pp. 296-301.

การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6  
5 - 7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

**ENETT6-1073 : การศึกษาเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะระหว่างการอบแห้ง  
ด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์  
Comparative Study of Specific Energy Consumption Between Infrared-  
Vacuum and Heater-Vacuum Drying**

ศักชัย จงจำ , นันทวัฒน์ วีระยุทธ และ อัมไพศกดิ์ ทีบุญมา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190 โทร 0-4535-3309 โทรสาร 0-4535-3308 E-mail: sakchai.jong@gmail.com

Sakchai Jongjam , Nantawatana Weerayuth and Umphisak Teeboonma

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

Warinchumrab, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand Tel: 0-4535-3309 Fax: 0-4535-3308 E-mail: sakchai.jong@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพืชสมุนไพรด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ โดยมีสมุนไพรที่ใช้ในการทดลอง คือ บอระเพ็ด ซึ่งทำการอบแห้งที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์กับแหล่งความร้อนกำหนดคงที่เท่ากับ 15 เซนติเมตร ผลจากการศึกษาพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมีค่าลดลง เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และยังพบว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์

**Abstract**

The objective of this research was to comparative study on specific energy consumption (SEC) of herb drying using infrared-vacuum technique and heater-vacuum technique. In this work, heart-leaved moonseed (*Tinospora crispa*) was selected as testing product. The experiments were performed at the following conditions: absolute pressures in drying chamber ranging from 5, 10, 15 kPa and drying temperatures of 40, 50, 60°C. The distance between heat source and the product was fixed at 15 cm. From experimental results, it was revealed that SEC of herb drying decreases with decreasing absolute pressure of drying chamber or increasing drying temperature. Additionally, it was also found that SEC of herb drying using infrared-vacuum technique is lower than that using heater-vacuum technique.

**การศึกษาเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะระหว่างการอบแห้ง  
ด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์**

**Comparative Study of Specific Energy Consumption  
Between Infrared-Vacuum and Heater-Vacuum Drying**

ศักชัย จงจำ' นันทวัฒน์ วีระยุทธ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190 โทร 0-4535-3309 โทรสาร 0-4535-3308 E-mail: sakchai.jong@gmail.com

Sakchai Jongjam', Nantawatana Weerayuth and Umphisak Teeboonma  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University  
Warinchumrab, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand Tel: 0-4535-3309 Fax: 0-4535-3308 E-mail: sakchai.jong@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพืชสมุนไพรด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ โดยมีสมุนไพรที่ใช้ในการทดลอง คือ บอระเพ็ด ซึ่งทำการอบแห้งที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์กับแหล่งความร้อนกำหนดคงที่เท่ากับ 15 เซนติเมตร ผลจากการศึกษาพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมีค่าลดลง เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และยังพบว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์

#### Abstract

The objective of this research was to comparative study on specific energy consumption (SEC) of herb drying using infrared-vacuum technique and heater-vacuum technique. In this work, heart-leaved moonseed (*Tinospora crispa*) was selected as testing product. The experiments were performed at the following conditions: absolute pressures in drying chamber ranging from 5, 10, 15 kPa and drying temperatures of 40, 50, 60°C. The distance between heat source and the product was fixed at 15 cm. From experimental results, it was revealed that SEC of herb drying decreases with decreasing absolute pressure of drying chamber or increasing drying temperature. Additionally, it was

also found that SEC of herb drying using infrared-vacuum technique is lower than that using heater-vacuum technique.

#### 1. บทนำ

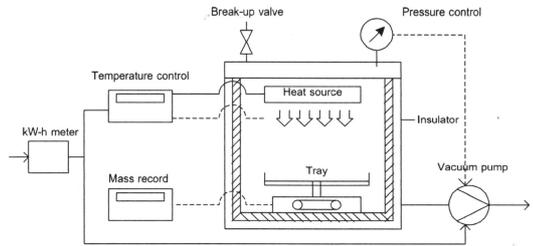
สมุนไพรไทย ถูกใช้เป็นยารักษาโรคมาตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งถือได้ว่าเป็นมรดกทางภูมิปัญญาที่ทรงคุณค่ายิ่งของไทย สมุนไพรส่วนใหญ่ถูกนำมาแปรสภาพโดยผ่านกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อการเก็บรักษาและง่ายต่อการใช้ประโยชน์ การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรสภาพยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ ซึ่งเทคโนโลยีการอบแห้งมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลากการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งถือว่ามีค่าสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญด้านต้นทุนการผลิต การอบแห้งด้วยสุญญากาศเป็นกระบวนการลดความชื้นในขณะอบแห้ง เพื่อช่วยให้น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยที่อุณหภูมิต่ำ [1] การอบแห้งด้วยสุญญากาศถึงแม้ว่าในผลิตภัณฑ์จะสามารถระเหยที่อุณหภูมิต่ำ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อลดระยะเวลาการอบแห้งก็ยังจำเป็นต้องใช้แหล่งผลิตความร้อนเช่นเดิม ซึ่งที่ผ่านมาแผ่นความร้อนหรือฮีตเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งผลิตความร้อนเสริมให้กับระบบ อย่างไรก็ตามปัจจุบันรังสีอินฟราเรดกำลังได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้แทนฮีตเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ทำให้ผิวภายนอกวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวย่น และยังสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง [2, 3] นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดยังสามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว มีการกระจายของรังสีความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย [4, 5] จากข้อ

องศาเซลเซียส และกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งความร้อนถึงผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15 เซนติเมตร ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก และ อุณหภูมิอบแห้งทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger

**2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

**2.1 อุปกรณ์การทดลอง**

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอก ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ระบบติดตั้งด้านบนของห้องอบแห้งโดยสลับเปลี่ยนระหว่างหลอดรังสีอินฟราเรด (Infrapara, รุ่น D1-500 ขนาด 500 วัตต์) และฮีตเตอร์ (Strip heater ขนาด 500 วัตต์) โดยอุปกรณ์ให้ความร้อนทั้ง 2 ชนิด ใช้หัววัดอุณหภูมิชนิด K และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ในการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง หัววัดอุณหภูมิถูกติดตั้งบริเวณใต้ถาดอบแห้ง เพื่อหลีกเลี่ยงการรับรังสีโดยตรงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และส่งสัญญาณมายังอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิให้ เปิด-ปิด อุปกรณ์ให้ความร้อน โดยตั้งค่าอุณหภูมิในช่วง ±1°C ในส่วนของถาดวางผลิตภัณฑ์ ถูกวางไว้ด้านล่างของห้องอบแห้ง ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ให้ความร้อนและถาดเท่ากับ 15 เซนติเมตร ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งโดยใช้ โทลเซลล์ (TRANSCCELL รุ่น FAD-5) พร้อมชุดบันทึกข้อมูล ทำภาวะสุญญากาศในห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ (VACVA, double stage pump, 150 ลิตร/นาที, ขนาด 550 วัตต์) โดยใช้อุปกรณ์วัดและควบคุมความดัน (COPAL ELECTRONICS รุ่น PG-30) วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้มิเตอร์วัตต์เออร์ มิเตอร์ (Mitsubishi Electric, ความละเอียด 0.01 kWh)



รูปที่ 1 ชุดทดลอง

**2.2 วิธีการทดลอง**

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้งในงานวิจัยนี้คือ บอระเพ็ด (heart-leaved moonseed) โดยคัดเลือกเฉพาะส่วนกลางเถาที่มีสีเขียวอมน้ำตาล เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด และหั่นตามขวางให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน ในส่วนของการทดลอง ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ โดยทั้ง 2 ส่วน ทำการอบแห้งบอระเพ็ดที่น้ำหนักเริ่มต้น 50 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 450-500 % d.b. อบจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายที่ 10 % d.b. หรืออัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.025 ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ อบแห้งที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล อุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60

**2.3 การวิเคราะห์ผล**

การวิเคราะห์พฤติกรรมรอบแห้งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงความชื้นเริ่มต้น 450-500 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายที่ 10 % d.b. หรือที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 1 จนถึงอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.025 โดยอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คำนวณจากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \tag{1}$$

เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น, % d.b.  
 $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, % d.b.  
 $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, % d.b.

การคำนวณอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

ในส่วนของ การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเปรียบเทียบดังนี้

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อเวลา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [6]

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \tag{2}$$

เมื่อ  $M_0$  คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, g water/g dry solid  
 $M_T$  คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T, g water/g dry solid  
 T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสำหรับการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$SEC = \frac{E_{Infrared} + E_{Vacuum}}{M_w} \tag{3}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ สำหรับการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

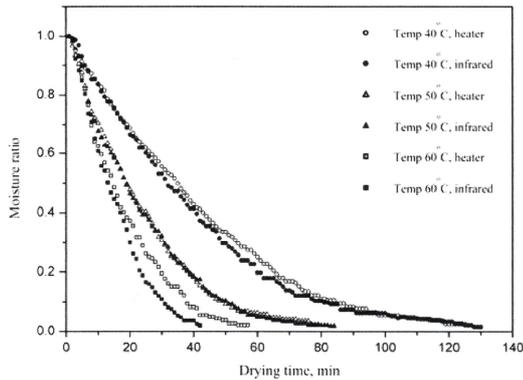
$$SEC = \frac{E_{Heater} + E_{Vacuum}}{M_w} \tag{4}$$

เมื่อ  $E_{Infrared}$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับหลอดอินฟราเรด, kWh  
 $E_{Heater}$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับฮีตเตอร์, kWh  
 $E_{Vacuum}$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับปั๊มสุญญากาศ, kWh  
 $M_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ, kg

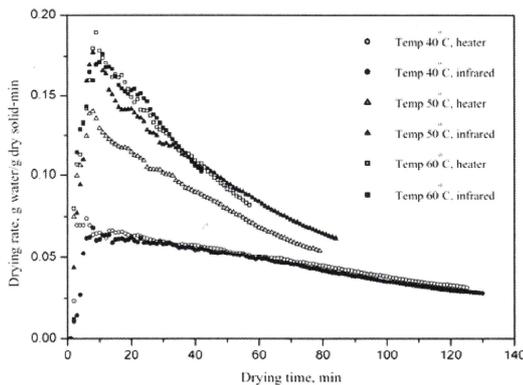
3. ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งบอระเพ็ด ด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้

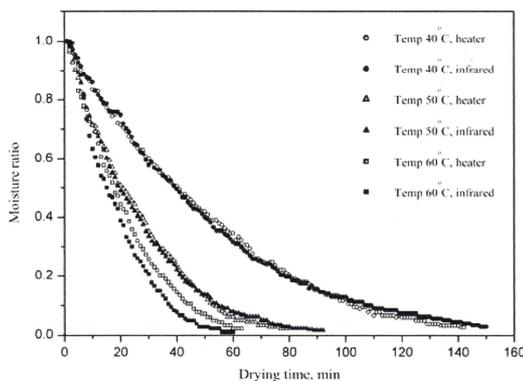
3.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้ง



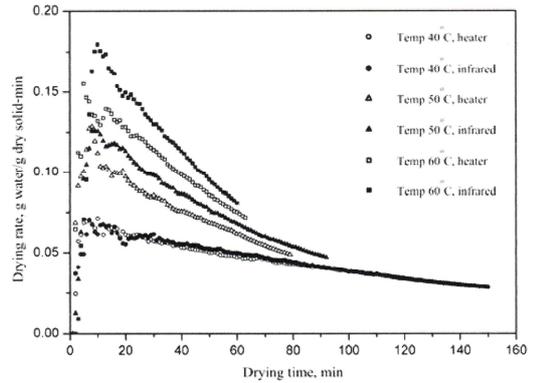
รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa



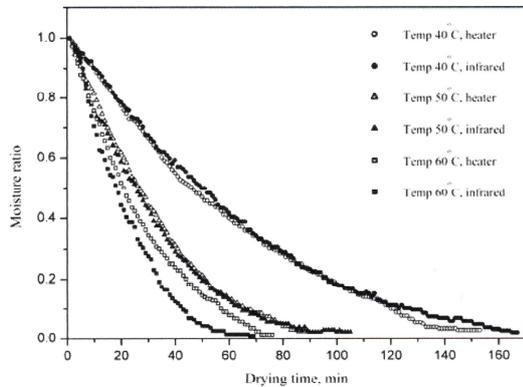
รูปที่ 3 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa



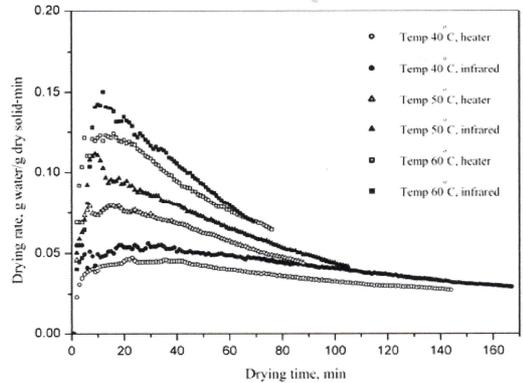
รูปที่ 4 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa

รูปที่ 2-7 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งบอระเพ็ด ที่เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ต่างๆ จากการทดลองพบว่า ที่ความดันเดียวกัน อัตราส่วนความชื้นมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง พลังงานที่ผลิตภัณฑ์ได้รับจะสูงตามไปด้วย ทำให้อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงได้เร็วกว่า โดยช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานและยังมี

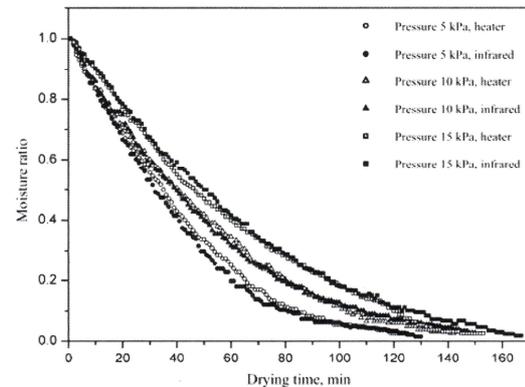
ความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และถูกดูดออกจากห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศ หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนคงที่ในที่สุด และเมื่อเทียบอัตราส่วนความชื้นที่เวลา และเงื่อนไขการทดลองเดียวกันพบว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีอัตราส่วนความชื้นน้อยกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ หรือกล่าวได้ว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการอบแห้ง พบว่า ที่ภาวะความดันเดียวกัน อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นในช่วง 10 นาทีแรก และเมื่อเทียบที่เวลาและเงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีอัตราการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรด ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแตกต่างจากฮีตเตอร์ที่ต้องถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ากรณีใช้หลอดรังสีอินฟราเรด

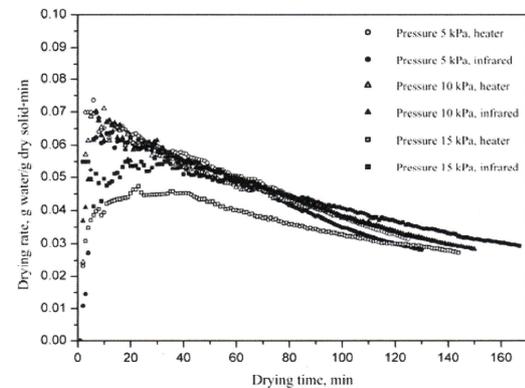
### 3.2 ผลของความดันสุญญากาศ

รูปที่ 8-13 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งบอระเพ็ด ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งต่างๆ โดยผลจากการทดลองพบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน อัตราส่วนความชื้นมีค่าลดลง เมื่อลดความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง โดยภาวะความดันสุญญากาศ มีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ ส่งผลให้ความแตกต่างของความดันไอในห้องอบแห้งและผลิตภัณฑ์ที่แต่ละความดันต่างกัน ทำให้ความสามารถในการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 กิโลปาสกาล มีจุดเดือดที่ 32.88, 45.81 และ 53.97°C ตามลำดับ และเมื่อเทียบอัตราส่วนความชื้นที่เวลา และเงื่อนไขการทดลองเดียวกันพบว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด มีอัตราส่วนความชื้นน้อยกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์

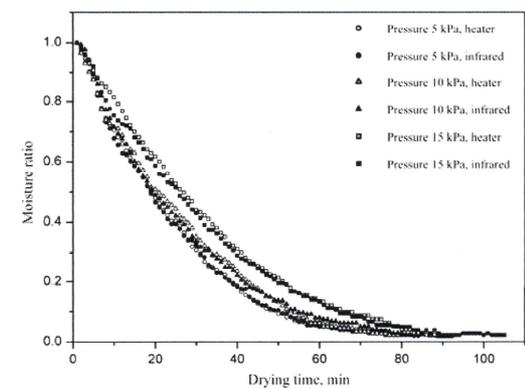
เมื่อพิจารณาถึงอัตราการอบแห้ง พบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเดียวกัน อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อลดความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง และเมื่อเทียบอัตราการอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ ที่เวลาและที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด มีอัตราการอบแห้งมากกว่า การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์



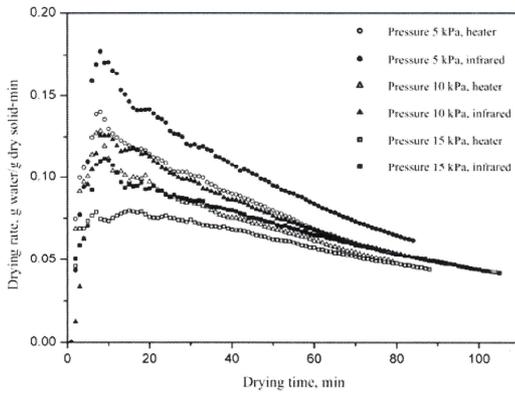
รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่อุณหภูมิ 40°C



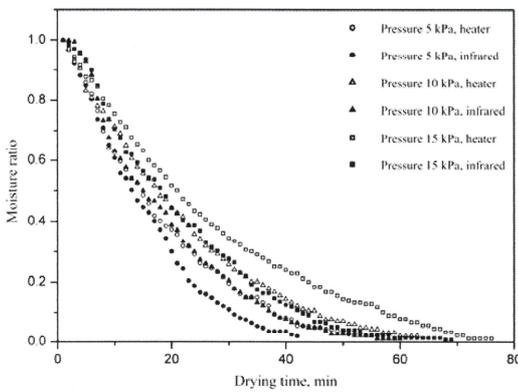
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40°C



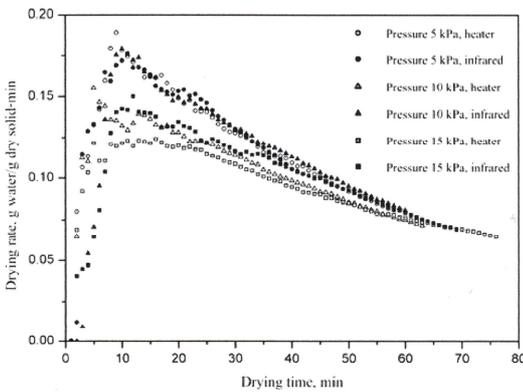
รูปที่ 10 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 11 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 13 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60°C

**3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ**

ตารางที่ 1-2 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ ผลการศึกษาทั้ง 2 ส่วน พบว่า ที่เงื่อนไขความดันเดียวกัน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งช่วยเพิ่มความสามารถใน

การระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้ใช้พลังงานในส่วนของบีบสุญญากาศน้อยลง และยิ่งพบอีกว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเดียวกัน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลงเมื่อลดความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะระหว่างการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ พบว่า ที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์

ตารางที่ 1 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

Drying condition		Extracted water (kg)	Drying time (min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/kg)
Pressure (kPa)	Temperature (°C)				
5	40	0.0395	130	0.77	19.49
	50	0.0423	84	0.48	11.34
	60	0.0412	46	0.33	8.01
10	40	0.0412	150	0.85	20.64
	50	0.0407	92	0.65	15.97
	60	0.0416	60	0.48	11.53
15	40	0.0420	167	1.05	25.02
	50	0.0414	105	0.84	20.31
	60	0.0415	69	0.60	14.46

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์

Drying condition		Extracted water (kg)	Drying time (min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/kg)
Pressure (kPa)	Temperature (°C)				
5	40	0.0402	125	0.89	22.14
	50	0.0409	79	0.61	14.93
	60	0.0415	57	0.49	11.82
10	40	0.0407	142	0.92	22.60
	50	0.0400	79	0.68	17.00
	60	0.0412	63	0.51	12.38
15	40	0.0402	144	1.19	29.63
	50	0.0401	110	0.89	22.22
	60	0.0418	76	0.61	14.61

**4. สรุป**

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพืชสมุนไพรด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ จากการศึกษาพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมีค่าลดลง เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด เท่ากับ 8.01 kWh/kg และยิ่งพบว่า ที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่า

การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้หลอดรังสีอินฟราเรดมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนมากกว่าการใช้ฮีตเตอร์ สำหรับการอบแห้งด้วยสุญญากาศ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

#### เอกสารอ้างอิง

1. Jaya, S. and Das, H. "A vacuum drying model for mango pulp", *Drying Technology*, Vol. 21 (7), pp. 1215-1234, 2003.
2. Glouanec, P., Lecharpentier, D. and Noel, H., "Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 1689-1703, 2002.
3. Nourhene, B., Neila, B., Imen B. S., and Nabil, K., "Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves", *Industrial Crops and Products*, Vol. 29, pp. 412-419, 2009.
4. Vogt M., "Infrared drying lowers energy costs and drying times", *Plastics, Additives and Compounding*, Vol. 9, pp. 58-61, 2007.
5. Chua, K. J. and Chou, S. K., "Low-cost drying methods for developing countries", *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 14, pp. 519-528, 2003.
6. Junling, S., Zhongli, P., Tara, H.M., Delilah, W., Edward, H. and Don, O., "Drying and quality characteristics of fresh and suar-infused blueberries dried with infrared radiation heating", *LWT-Fod science and Technology* , Vol. 41, pp. 1962-1972, 2008.