

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศ ร่วมกับอินฟราเรด

Mathematical Modeling of Shiitake Mushroom Drying Using Infrared-Vacuum Technique

กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตติ^{1*} ณรงค์ อึ้งกิมบัว² และ สิริชัย รุ่งสว่าง³

¹อาจารย์ ³นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Kittisak Witanantakit^{1*}, Narong Uengkimbuan² and Sittichai Rungsawang³

¹Lecturer, ³Graduate Student, Energy Technology Department,

Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Choburi 20110

²Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

169 Long-Haad Bangsaen Rd. Saensuk Subdistrict, Muang District, Choburi 20131

*Corresponding author Email: k_yong28@hotmail.com

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอม โดยทดลองอบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และความดันสัมบูรณ์ ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 4.003×10^{-9} ถึง 6.630×10^{-9} m²/s โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจากสมการของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2=0.99689$) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE=0.18370) และค่าการลดลงค่ากำลังสอง ($\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$) ต่ำที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เห็ดหอม

ABSTRACT

The objective of this research is to study the drying of shiitake mushrooms by infrared-vacuum technique. Specific energy consumption, effective moisture diffusivity coefficient and suitable mathematical models to predict the drying kinetics of shiitake mushrooms were investigated under the drying conditions with the drying temperature of 50, 60, and 70 °C and the absolute pressure in drying chamber at 10, 15, and 20 kPa. The results showed that, the increment of the temperature or the reduction of absolute pressure in the drying chamber, the drying rate was high and low specific energy consumption. Effective moisture diffusivity coefficient ranged from 1.77×10^{-9} to 2.685×10^{-9} m²/s with increasing values according to higher drying temperature and lower absolute pressure in drying chamber. Midilli mathematical model gave the most appropriate predictions due to the highest coefficient of determination ($R^2=0.99689$), the lowest root mean square error (RMSE=0.18370) and chi square ($\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$).

Keyword: Vacuum-infrared drying, Specific energy consumption, Mathematical modeling, Effective moisture diffusivity coefficient, Shiitake mushrooms.

1. บทนำ

เห็ดหอม (ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Lentinus dodes* (Berk.) Sing.) หรือเห็ดชิตาเกะ (Shiitake Mushroom) เป็นพืชตระกูลเห็ดที่นิยมบริโภคในประเทศไทย เนื่องจากมีรสชาติดี มีความหอมกว่าเห็ดชนิดอื่น สามารถนำไปประกอบอาหารได้หลากหลาย เห็ดหอมเป็นยาอายุวัฒนะ และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น ช่วยบำรุงสมอง ช่วยในระบบย่อยอาหาร ป้องกันหลอดเลือดแดงแข็งตัว โรคหลอดเลือดหัวใจตีบ โรคภัยจากเชื้อไวรัส ลดคอเลสเตอรอล ป้องกันการเติบโตของเนื้องอก ป้องกันโรคเลือด ช่วยกระตุ้นการทำงานของเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน ให้มีประสิทธิภาพในการต่อสู้กับเซลล์เนื้องอก ด้านมะเร็ง ลดความเครียด บำรุงระบบประสาท ช่วยให้หลับง่าย ฯลฯ เห็ดหอมเป็นเห็ดที่ขึ้นในที่ที่มีอากาศหนาวเย็น จึงนิยมปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ เป็นที่ต้องการของตลาดทำให้มีราคาค่อนข้างสูง สามารถจำหน่ายเป็นเห็ดสดหรือแปรรูปเป็นเห็ดชนิดแห้ง

การทำแห้งโดยทั่วไปใช้วิธีการตากแดดซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ใช้พื้นที่ในการตากแดดมาก ใช้

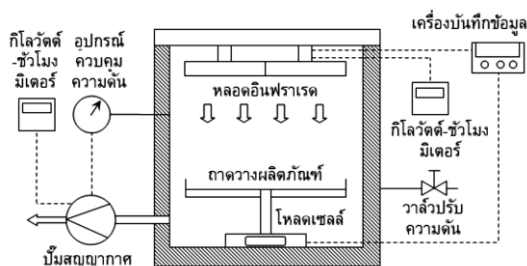
เวลานาน เห็ดหอมแห้งไม่สม่ำเสมอ และอาจทำให้เห็ดหอมมีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นการนำเทคโนโลยีการอบแห้งมาใช้ในการลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถอบแห้งวัสดุได้ในปริมาณมากและควบคุมคุณภาพของผลผลิตได้ การนำเทคนิคสุญญากาศมาใช้ในการแปรรูปผลผลิตจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจาก แรงดันไอของอากาศในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดเวลาและพลังงานในการอบแห้ง [1], [2] และวัสดุหลังอบแห้งมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังต้องใช้แหล่งให้ความร้อนเพื่อลดเวลาในการอบแห้ง ซึ่งการนำรังสีอินฟราเรดมาช่วยในการอบแห้งเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย [2]-[4] เนื่องจากการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังวัสดุ จะทำให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง ส่งผลให้การอบแห้งใช้เวลาน้อยลง และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง [3]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสมกับวิธีการและวัสดุที่อบแห้ง ในปัจจุบันมีการใช้เทคนิคต่างๆ ในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้ง ซึ่งแบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ [1], [3], [5], [6] เนื่องจากมีกระบวนการวิเคราะห์ที่ง่ายไม่ซับซ้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอก วัสดุทำด้วย Stainless steel หนา 2 cm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm ติดตั้งพัดลมร้อนขนาด 250 W จำนวน 4 พัด โดยระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์อบแห้งกับพัดลมร้อนประมาณ 20 cm และใช้สายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิดเชื่อมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Digicon

MD-400N) มีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ เพื่อควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง ทำสภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศขนาด 0.35 kW และใช้อุปกรณ์วัดร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure controller, Panasonic รุ่น DP-100) เพื่อควบคุมความดันที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ระหว่างอบแห้งด้วยโหลดเซลล์ความละเอียด 0.01 g วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วย Kilowatt hour meter ความละเอียด 0.01 kWh และบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิการอบแห้งด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger, Graphtec midi logger รุ่น GL820) ซึ่งรับสัญญาณค่าอุณหภูมิมาจากสายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ซึ่งมีความละเอียดในการบันทึกค่า 0.1°C

2.2 วิธีการทดลอง

เห็ดหอมสดที่ใช้ในการทดลองเป็นเห็ดหอมสายพันธุ์ดอนโก (Donko) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกประมาณ 4-5 cm โดยมีขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง คือ นำเห็ดหอมมาตัดขาออกให้ชิดกับดอกเห็ด นำดอกเห็ดหอมไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่าแล้วนำไปวางคว่ำในตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำโดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที จากนั้นนำเห็ดหอมไปวางเรียงบนถาดอบแห้ง นำสายเทอร์โมคัปเปิลเสียบเข้าไปในเนื้อเห็ดหอมเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งและวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเห็ดหอม ทำการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,015-1,076% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13% d.b. โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ อบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C และความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa ในระหว่างทำการอบแห้งได้บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักของเห็ดหอมทุกๆ 1 นาที โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล และบันทึกพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดรังสีอินฟราเรด และปั๊มสุญญากาศโดยใช้ Kilowatt-hour meter

2.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

เมื่อเริ่มต้นการอบแห้งความชื้นของเห็ดหอมจะมีค่าลดลงจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งการคำนวณหาความชื้นที่เวลาใดๆ ของเห็ดหอม ต้องนำเห็ดหอมไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [7] เพื่อหาน้ำหนักแห้งของเห็ดหอม แล้วนำค่าได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture content) ได้จากสมการที่ (1) [2]

$$MC = \frac{w - d}{w} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

w คือ น้ำหนักของเห็ดหอมที่เวลาใดๆ (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของเห็ดหอม (g)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [2]

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

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

ในงานวิจัยนี้ไม่คิดความชื้นสมดุล เนื่องจากความชื้นสมดุลมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3) [8]

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC, MJ/kg of water evaporated) ที่ใช้ในการอบแห้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ มวลวัสดุก่อนการอบแห้ง

และหลังการอบแห้ง และปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการอบแห้ง เพื่อนำมาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งเห็ดหอม ได้จากสมการที่ 4 [2]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเห็ดหอม (kg)

E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kW-h)

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

สมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลมีหลายรูปแบบ ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวิธีการอบแห้งหรือคุณสมบัติของวัสดุทางการเกษตร [1]-[3], [5]-[6] ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล [9]-[18]

No.	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
5	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
9	Demir et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + b$
10	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
11	Weibull distribution	$MR = a - b \exp(-(kt)^n)$

* a b c g k k_0 k_1 และ n คือ ค่าคงที่ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที)

ในการอบแห้งเห็ดหอมมีเงื่อนไขการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิการอบแห้ง ซึ่งค่าคงที่ของสมการคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่วิเคราะห์ได้จะไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรการอบแห้ง การนำค่าคงที่ไปใช้งานจึงใช้ได้เฉพาะอุณหภูมิและความดันสัมบูรณ์ที่ตรงกับเงื่อนไขการอบแห้งเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าคงที่ (constants and coefficients, coc) ในตารางที่ 1 เป็นฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิการอบแห้ง [2] ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

$$\text{coc} = x_0 + x_1 T + x_2 P \quad (5)$$

เมื่อ coc คือ ค่าคงที่ a b c g k k₀ k₁ และ n
 T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)
 P คือ ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง (kPa)
 x₀ x₁ x₂ คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (5) ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง

การวิเคราะห์รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายกระบวนการอบแห้ง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) [3], [5], [6], [8] โดยสมการที่ให้ค่า R² สูงที่สุด และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ค่า RMSE และ χ^2 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ [3]

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2 \right]} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2}{N - p} \quad (7)$$

เมื่อ MR_{exp,i} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง (decimal)

MR_{pre,i} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ (decimal)

N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละสมการ

2.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient) เป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุหรือเรียกว่าการแพร่ของของเหลว โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของเหลวสามารถเขียนสมการหลักได้จากกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งในการทดลองนี้ตั้งสมมติฐานว่าวัสดุเกิดการหดตัวขณะอบแห้งน้อยมาก มีลักษณะเป็นแผ่นบาง และมีการเคลื่อนที่ของความชื้นไปในทิศทางเดียว ซึ่งจะได้คำตอบดังสมการที่ (8) [19]

$$\text{MR} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D_{\text{eff}} t\right) \quad (8)$$

ในการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน และเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถแทนค่า n=0 ในสมการที่ (8) เพียงเทอมเดียว ซึ่งจะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (9) [20]

$$\ln(\text{MR}) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m²/s)

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาวัสดุ (m)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (sec)

จากสมการที่ (9) เมื่อวาดเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาในการอบแห้งจะได้กราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงซึ่งจะมีความลาดชันเท่ากับ $(-\pi^2 D_{eff})/(4L^2)$ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ โดยค่าที่คำนวณได้นี้เป็นค่าคงที่ที่เงื่อนไขการอบแห้งหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ทุกค่าอุณหภูมิในช่วงที่ทำการทดลอง สามารถเขียนได้ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ (11) [3], [6], [20]

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (11)$$

หรือ

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{RT_{abs}} \quad (12)$$

เมื่อ D_o คือ ปัจจัยเลขชี้กำลัง (m^2/s)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น ($kJ/kmol$)

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.314 kJ/kmol K)

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ในการอบแห้ง (K)

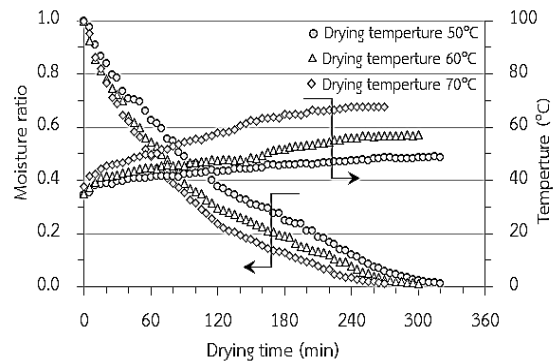
การวิเคราะห์หาพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้น (Activation energy for diffusion) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุที่อบแห้ง สามารถคำนวณได้จากความลาดชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($1/T_{abs}$) ตามสมการที่ (12) ซึ่งจะได้กราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงและมีความลาดชันเท่ากับ $(-E_a/R)$

3. ผลการทดลอง

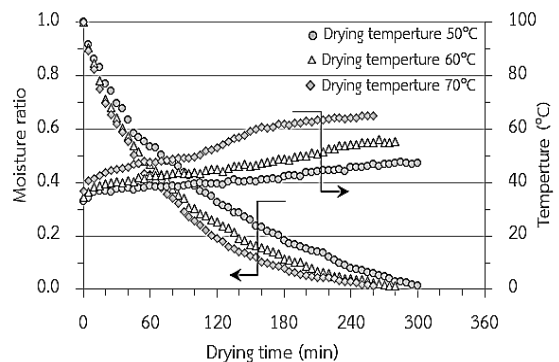
3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเห็ดหอม

จากรูปที่ 2 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นของ

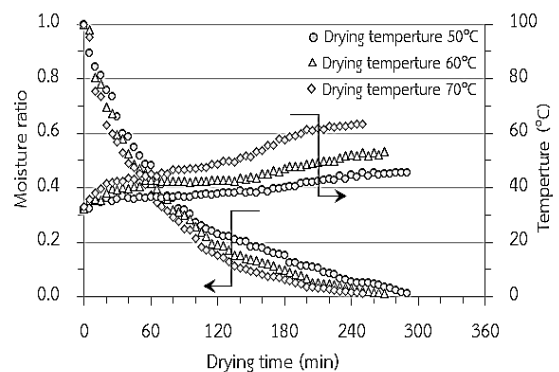
เห็ดหอมจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเห็ดหอมมีความชื้นสูงโดยเฉพาะที่ผิวของเห็ดหอม เมื่อเห็ดหอมได้รับความร้อน น้ำที่บริเวณผิวเห็ดหอมจะระเหยออกอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นของเห็ดหอมจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ [2]



(ก) ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa



(ข) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa



(ค) ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

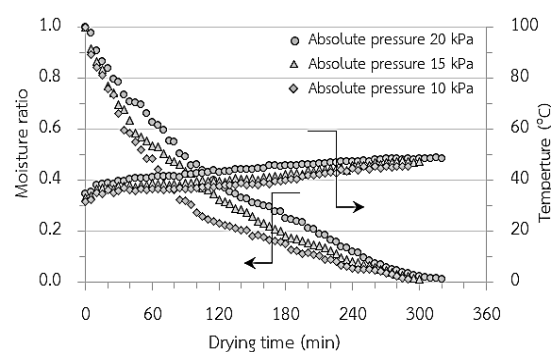
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 10 15 และ 20 kPa

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งให้สูงขึ้นจาก 50 เป็น 60 °C หรือ จากอุณหภูมิ 60 เป็น 70 °C ความชื้นของเห็ดหอมจะลดลงได้เร็วขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง [2], [13] ประมาณร้อยละ 6.6 และ 8.2 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทมวลดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเห็ดหอม พบว่า อุณหภูมิของเห็ดหอมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่าประมาณจุดเดือดของน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งนั้นๆ และค่อนข้างคงที่ เนื่องจากความร้อนส่วนใหญ่ที่เห็ดหอมได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำ หลังจากการอบแห้งผ่านไปประมาณสองชั่วโมง น้ำภายในเห็ดหอมลดลงจนเห็ดหอมใกล้แห้ง ความร้อนที่เห็ดหอมได้รับนอกจากใช้ในการระเหยน้ำที่เหลืออยู่ ความร้อนอีกส่วนหนึ่งจะทำให้เห็ดหอมมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบแห้ง โดยเฉพาะที่การอบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 70 °C จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเห็ดหอมอย่างชัดเจน ส่วนการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 15 และ 10 kPa ดังรูปที่ 2 (ข) และ 2 (ค) ก็มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิคล้ายกับการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa

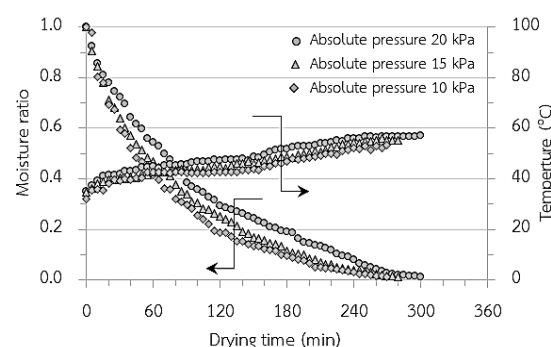
3.2 ผลของความดันสัมบูรณ์ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเห็ดหอม

จากรูปที่ 3 (ก) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอมที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงจาก 20 เป็น 15 kPa หรือจากความดัน 15 เป็น 10 kPa ความชื้นของเห็ดหอมจะลดลงเร็วกว่า และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3.6 และ 5.5 ตามลำดับ เนื่องจากที่ความดันสุญญากาศน้ำจะมีอุณหภูมิจุดเดือดต่ำกว่า 100 °C ซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 15 และ 20 kPa น้ำจะมีอุณหภูมิจุดเดือดเท่ากับ 45.8 54.0

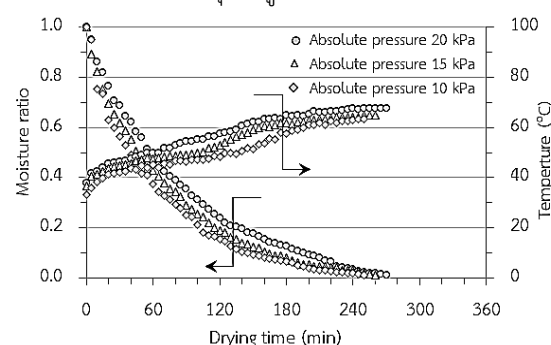
และ 60.1 °C ตามลำดับ [2], [4] ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำจึงสามารถอบแห้งวัสดุได้เร็วกว่าการอบแห้งวัสดุที่ความดันสัมบูรณ์สูง ส่วนการอบแห้งเห็ดหอมที่อบแห้ง 60 และ 70 °C ดังรูปที่ 3 (ข) และ 2 (ค) ก็มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชื้นคล้ายกับการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 50 °C



(ก) อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C



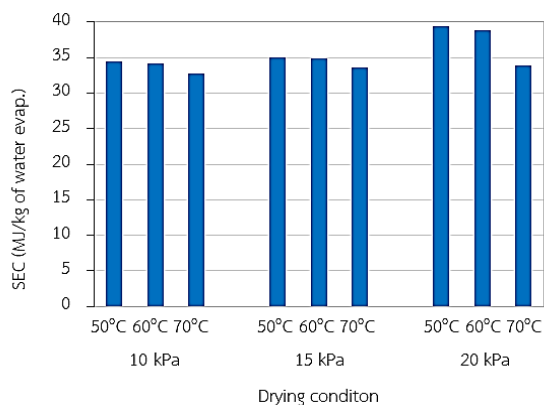
(ข) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C



(ค) อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 4 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

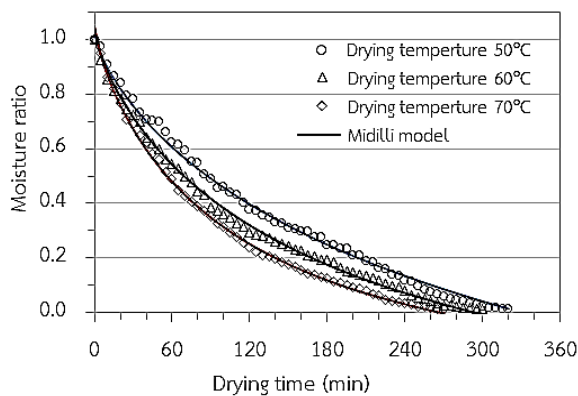
จากกราฟดังรูปที่ 4 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50 เป็น 60 °C หรือ จาก 60 เป็น 70 °C จะทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง [2] โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 1.1 และ 6.8 ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้การถ่ายความร้อนและมวลดีขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ส่วนการลดความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งจาก 20 เป็น 15 หรือ จาก 15 เป็น 10 kPa จะทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง [2] โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 2.1 และ 7.4 ตามลำดับ เนื่องจากการลดความดันสัมบูรณ์จะส่งผลให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง น้ำระเหยได้ง่ายขึ้น และทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C และความดันสัมบูรณ์ 20 kPa ใช้เวลาในการอบแห้งเห็ดหอมนานที่สุด ประมาณ 320 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2.52 kWh และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 39.43 MJ/kg_w และอุณหภูมิอบแห้ง 70 °C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa สามารถอบแห้งเห็ดหอมได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาในการอบแห้งเห็ดหอมประมาณ 250 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 1.91 kWh และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 32.71 MJ/kg_w

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

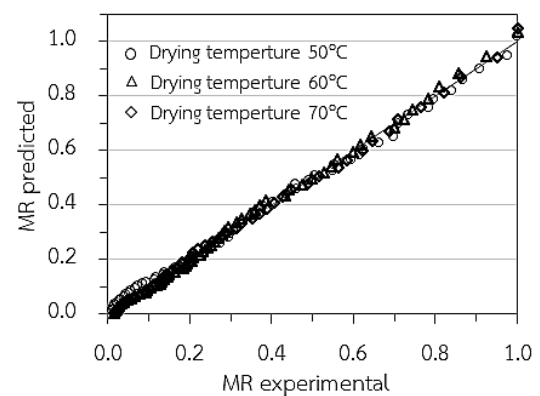
จากผลการทดลองอบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิแห้ง 50 และ 60 °C และความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa ที่แสดงผลในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการในตารางที่ 1 จำนวน 11 สมการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในแต่ละสมการเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอบแห้งและความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง ดังสมการที่ (5) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดซึ่งจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) ต่ำที่สุด [1], [3], [8] จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าการลดลงไคกำลังสองอยู่ในช่วง 0.95208-0.99689, 0.18370-0.31757 และ 0.21419×10^{-3} - 0.326792×10^{-3} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยแบบจำลองเอมพิริคัล Midilli มีความเหมาะสมสามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด [1] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2=0.99689$) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE=0.18370) และค่าการลดลงไคกำลังสองต่ำที่สุด ($\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$) สอดคล้องกับรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายของแบบจำลอง Midilli นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นกับผลการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 6 มีความสัมพันธ์ของข้อมูลค่อนข้างเป็นแนวเส้นตรง และมีความชัน 45 องศา แสดงว่าแบบจำลองของ Midilli สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ค่อนข้างแม่นยำ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอมพิริคัล

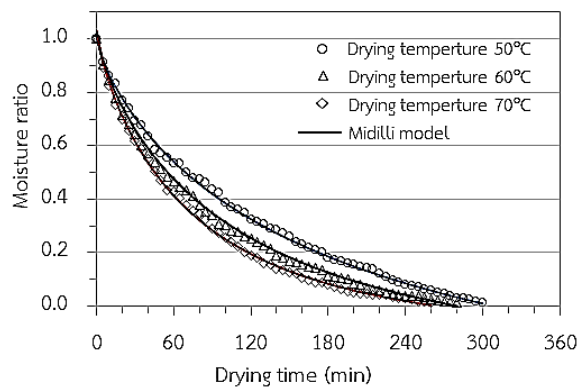
No.	Model	Parameter	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE	$\chi^2 (10^{-3})$
1	Page	k	-0.05124	0.00021	-0.00041	0.99133	0.22559	0.58765
2	Page	k	-0.03965	0.00020	-0.00079	0.99259	0.21858	0.50480
		n	0.65722	0.00068	0.00435			
3	Modified Page	k	-0.05276	0.00022	-0.00044	0.99337	0.21382	0.45215
		n	1.32684	-0.00166	0.01148			
4	Two-term	a	5.09229	-0.00572	0.12173	0.99361	0.21228	0.44128
		k_0	0.01526	0.00000	-0.00012			
		b	-4.35416	0.00625	-0.11902			
		k_1	0.03409	-0.00006	-0.00005			
5	Henderson and Pabis	a	1.09705	-0.00061	0.00461	0.99320	0.21489	0.46359
		k	-0.04860	0.00020	-0.00034			
6	Logarithmic	a	1.19804	-0.00093	0.00593	0.99094	0.22762	0.62188
		k	-0.10682	0.00037	-0.00032			
		c	-1.24800	0.00376	-0.00042			
7	Wang and Singh	a	0.02724	-0.00012	0.00022	0.95208	0.31757	3.26792
		b	-0.00013	0.00000	0.00000			
8	Midilli	a	0.48763	0.00144	0.00335	0.99689	0.18370	0.21419
		k	-0.11366	0.00044	-0.00043			
		n	0.41224	0.00139	-0.00543			
		b	-0.00334	0.00001	-0.00003			
9	Demir	a	0.95877	-0.00039	0.01859	0.99626	0.19066	0.25794
		k	-0.14141	0.00050	-0.00026			
		n	1.61011	-0.00202	-0.00717			
		b	0.02690	0.00019	-0.01324			
10	Verma et al.	a	0.29777	0.03640	-0.08811	0.99250	0.21915	0.51439
		k	-0.07305	0.00029	-0.00074			
		g	-0.07468	0.00029	-0.00077			
11	Weibull distribution	a	0.70720	-0.00221	-0.00554	0.99468	0.20460	0.36705
		b	-1.87187	0.00244	-0.00379			
		k	0.00042	0.00005	-0.00046			
		n	-0.01210	0.00203	0.01008			



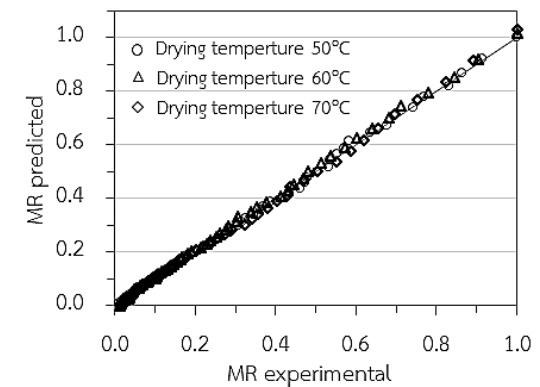
(ก) ความดันสมบูรณ์ 20 kPa



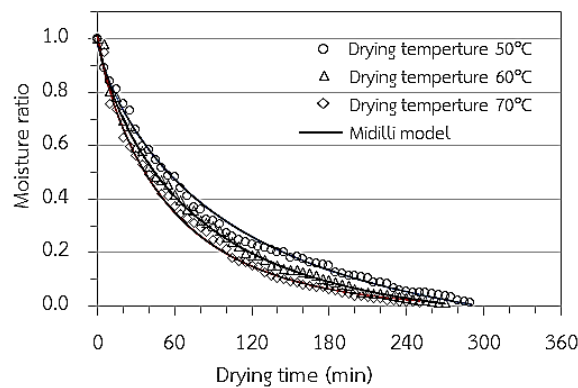
(ก) ความดันสมบูรณ์ 20 kPa



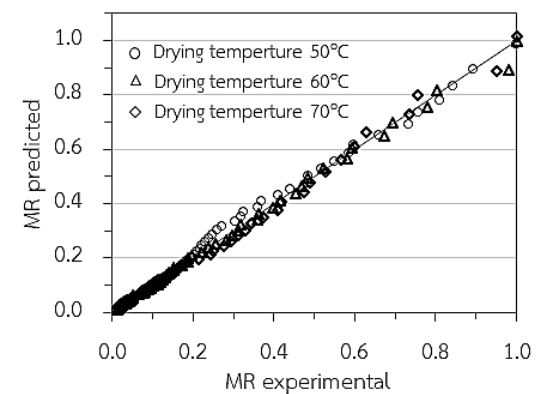
(ข) ความดันสมบูรณ์ 15 kPa



(ข) ความดันสมบูรณ์ 15 kPa



(ค) ความดันสมบูรณ์ 10 kPa



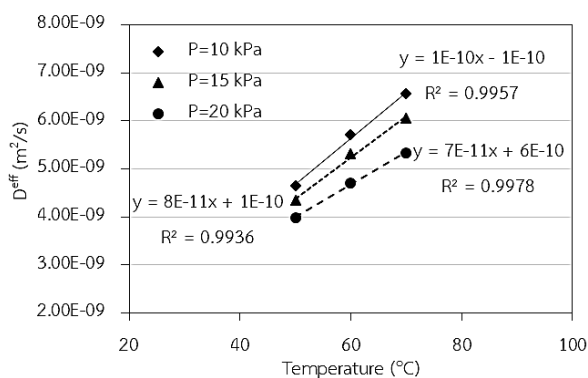
(ค) ความดันสมบูรณ์ 10 kPa

รูปที่ 5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายของแบบจำลอง Midilli

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli กับผลการทดลอง

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

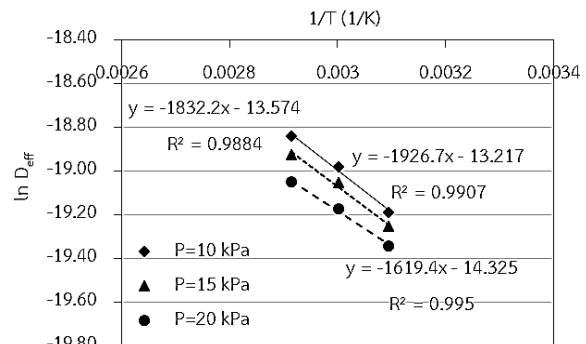
เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิธึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง และพิจารณาความชันของกราฟดังสมการที่ (9) จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลในแต่ละการทดลองได้ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจะพบว่าความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิในห้องอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น [6] หรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง [22] โดยที่ความดันสัมบูรณ์ 10 15 และ 20 kPa สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 4.684×10^{-9} ถึง 6.630×10^{-9} , 4.391×10^{-9} ถึง 6.110×10^{-9} และ 4.003×10^{-9} ถึง $5.361 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่สูงขึ้นจะทำให้เพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาในการอบแห้งได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ (2) และรูปที่ (3)



รูปที่ 7 อิทธิพลของความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิอบแห้งต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการวิเคราะห์กราฟในรูปที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งและอุณหภูมิอบแห้ง [21], [22] ดังนั้น การหาค่าพลังงานกระตุ้นตามสมการที่ 12 จะพิจารณาวิเคราะห์แยกทีละความดัน โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า

ลอการิธึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอุณหภูมิอบแห้ง ($1/T$) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้ง

ตารางที่ 3 พลังงานกระตุ้นที่ความดันสัมบูรณ์ต่างๆ

P (kPa)	$D_o \text{ (m}^2/\text{s)}$	$E_a \text{ (kJ/kmol)}$
10	1.819×10^{-6}	16,018.25
15	1.273×10^{-6}	15,232.76
20	6.008×10^{-7}	13,463.41

เมื่อพิจารณาความลาดชันของเส้นกราฟที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า เมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น พลังงานกระตุ้นมีค่าลดลงสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ลดลงเช่นกัน เนื่องจาก ที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำน้ำจะระเหยได้มาก ซึ่งต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุมากขึ้นตามไปด้วย โดยความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa มีค่าพลังงานกระตุ้น 16,018.25 15,232.76 และ 13,463.41 kJ/kmol ตามลำดับ

4. สรุป

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยทดลองอบแห้งเห็ดหอมพันธุ์ดอนโกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 cm อบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และความดันสัมบูรณ์ในห้อง

อบแห้ง 10 15 และ 20 kPa จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,015-1,076% d.b. จนได้ปริมาณความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13% d.b.

จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงจะทำให้ อัตราการอบแห้งเห็ดหอมสูงขึ้น ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 4.684×10^{-9} ถึง 6.630×10^{-9} , 4.391×10^{-9} ถึง 6.110×10^{-9} และ 4.003×10^{-9} ถึง 5.361×10^{-9} m²/s และพลังงานกระตุ้นมีค่า 16,018.25 15,232.76 และ 13,463.41 kJ/kmol ที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจากสมการของ Midilli สามารถทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด คือ $R^2=0.99689$ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ $RMSE=0.18370$ และค่าการลดลงไคกำลังสองต่ำที่สุด คือ $\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Artnaseaw, S. Theerakulpisut and C. Benjapiyaporn, "Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 88, no.2-3, pp. 105-114, June-Sep. 2010.
- [2] U. Teeboonma and S. Jongiam, "Ginger drying using infrared-vacuum technique," *Burapha Sci. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 76-86, 2010.
- [3] M. Younis, D. Abdelkarim and A.Z. El-Abdein, "Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 25, no. 2, pp. 332-338, Feb. 2018.
- [4] S. Rungsawang, S. Jaekhum, N. Uengkimbuan and K. Witinantakit, "Shiitake Mushroom Drying Using Vacuum and Infrared Radiation Technique," in *12th Conference On Energy Network of Thailand*, Phitsanulok, 2016, pp. 1591-1596.
- [5] K. Sathapornprasath and P. Praneetpolkrang, "Modeling pepper drying by jet spouted bed technique using ANFIS system," *SWU Engineering Journal*, vol.13, no. 1, pp. 176-186. Jan.-Apr. 2018.
- [6] A.O. Omolola, P.F. Kapila and H.M. Silungwe, "Mathematical modeling of drying characteristics of Jew's mallow (*Corchorus olitorius*) leaves," *Information Processing in Agriculture*, vol. 6, no. 1, pp.109-115, Mar. 2019.
- [7] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17thed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [8] N. IZLI, G. IZLI and O. Taskin, "Influence of different drying techniques on drying parameters of mango," *Food Science and Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 604-612, Oct.-Dec. 2017.

- [9] Q. Lui and F.W. Bakker-Arkema, "Stochastic modeling of grain drying, part 2; model development," *Journal of Agricultural Research*, vol. 66, pp. 275-280, Apr. 1997.
- [10] G.P. Sharma and S. Prasad, "Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination," *Journal of Food Engineering*, vol. 50, vol. 99-105, Nov. 2001.
- [11] H. Togrul, "Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, pp. 311-323, Dec. 2005.
- [12] A. Ruiz-Celma, S. Rojas and F. Lopez-Rodriguez, "Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 47, pp. 1810-1818, Sep. 2008.
- [13] M. Ozdemir and Y. Onur-Devres, "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting," *Journal of Food Engineering*, vol. 42, pp. 225-233, Dec. 1999.
- [14] A. Midilli, H. Kucuk and Z. Yapar, "A new model for single-layer drying," *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1503-1513, Jul. 2002.
- [15] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten, "Drying effects of drying air parameters on rice drying models," *Trans. ASAE*, vol. 85, pp. 296-301, Jan. 1985.
- [16] I. Alibas, "Microwave, Air and Combined Microwave-Air Drying of Grape Leaves (*Vitis vinifera* L.) and the Determination of Some Quality Parameters," *International Journal of Food Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 69-88, Jan. 2014.
- [17] S.J. Babalis, E. Papanicolaou, N. Kyriakis and V.G. Belessiotis, "Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*)," *Journal of Food Engineering*, vol. 75, pp. 205-214, Jul. 2006.
- [18] V. Demir, T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu, "Mathematical modelling of convection drying of green table olives," *Biosystems Engineering*, vol. 98, no. 1, pp. 47-53, Sep. 2007.
- [19] J. Crank, "The mathematics of diffusion," Clarendon press, Oxford, UK, 1972, pp. 47-53.
- [20] S. Devahastin, "Drying of Foods and Biomaterials," Top Publishing, 2012, pp. 253-260.
- [21] T. Swasdisevi, S. Devahastin, P. Sa-Adchom and S. Soponronnarit, "Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice," *Journal of Food Engineering*, vol. 92, no. 1, pp. 100-106, May. 2009.
- [22] I. Alibas and N. Koksai, "Convective, vacuum and microwave drying kinetics of mallow leaves and comparison of color and ascorbic acid values of three drying methods," *Food Science and Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 358-364, Apr.-June 2014.