

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งไพลที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ
Drying Kinetics of *Zingiber cassumunar* Roxb. by Far-Infrared Radiation
under Vacuum Condition

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์^{1*} ชวกร มุกสถาน¹ และชโลธร ศักดิ์มาศ²

Setthawat Thanimkarn^{1*}, Chavakorn Muksan¹ and Chalotorn Sakmas²

¹หลักสูตรสาขาวิชาเกษตรอัจฉริยะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นครศรีธรรมราช 80110

²แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยการอาชีพคลองท่อม กระบี่ 81120

¹Curriculum of Smart Agriculture, Faculty of Agriculture, Rajamangla University of Technology Srivijaya
Nakhon Si Thammarat, Thailand 80110

²Department of Automotive, Klontom Industrial and Community Education College, Krabi, Thailand 81120

*Corresponding author: satthawat.t@rmutsv.ac.th

Abstract

Received: October 05, 2023

Revised: June 29, 2024

Accepted: July 18, 2024

This research aimed to investigate the drying kinetics of *Zingiber Cassumunar* Roxb. (ZC), the optimal drying models, and quality assessment of 5 mm thick ZC samples by using far-infrared (FIR) radiation at different intensities of 4,929, 6,550, 8,541 and 10,955 W/m² under a vacuum condition of 5 kPa (an absolute pressure). The initial moisture content of ZC was 3.58±0.04 g water/g dry matter, and was expected to reach a final moisture content of 0.10±0.02 g water/g dry matter after drying process. The drying times obtained were 145, 85, 55, and 35 min for the respective radiation intensities. The drying process exhibited a decreasing drying rate under all conditions. The model accuracy was assessed using experimental data from five drying models, employing the coefficient of determination (R²) and the root mean squared error (RMSE). The drying model proposed by Midilli *et al.* (2002) yielded the most accurate drying predictions, with the highest R² value and the lowest RMSE value. The effective moisture diffusion coefficient ranged from 0.59×10⁻⁷–2.75×10⁻⁷ m²/s, and the activation energy of ZC was 17.97 kJ/mol. Regarding the quality of the dried ZC, it was observed that the yellowness (b*) decreased with increasing drying intensity. The bulk density values ranged from 0.19 to 0.31 g/cm³, and shrinkage values ranged from 77.57-93.47 percentages. An increase in radiation intensity led to an increase in both bulk density and %shrinkage values. However, no significant difference was observed between the drying conditions using radiation intensities of 4,929 and 6,550 W/m².

Keywords: *Zingiber cassumunar* Roxb., far-infrared radiation, drying kinetics

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม และคุณภาพสำหรับการอบแห้งเหง้าไพลที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ด้วยรังสีอินฟราเรดไกลความเข้มรังสี 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ภายใต้สภาวะสูญญากาศที่ระดับ 5 กิโลปาสกาล ที่ความชื้นเริ่มต้น 3.58 ± 0.04 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง จนความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.10 ± 0.02 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 145, 85, 55 และ 35 นาที กระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงที่ทุก ๆ สภาวะการอบแห้ง จากข้อมูลผลการทดลองใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 5 แบบจำลอง โดยความถูกต้องของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) พบว่าแบบจำลองการอบแห้ง Midilli *et al.* (2002) ให้ผลการทำนายการอบแห้งดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 สูงที่สุดในขณะที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุด ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 0.59×10^{-7} – 2.75×10^{-7} ตารางเมตร/วินาที และค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเคลื่อนที่ของสสาร มีค่าเท่ากับ 17.97 กิโลจูล/โมล คุณภาพของเหง้าไพลแห้งพบว่า ค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มรังสีในการอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับความหนาแน่นมวลรวมและการหดตัว มีค่าอยู่ระหว่าง 0.19-0.31 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 77.57-93.47 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าเมื่อความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นมวลรวม และการหดตัวเพิ่มขึ้น แต่ในการอบแห้งด้วยความเข้มรังสี 4,929 และ 6,550 วัตต์/ตารางเมตร ไม่มีความแตกต่างกัน

คำสำคัญ: ไพล รังสีอินฟราเรดไกล จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

คำนำ

ไพล (*Zingiber cassumunar* Roxb.) เป็นพืชล้มลุกจำพวกเหง้าใต้ดิน แห้งเหี่ยวในหน้าแล้งและงอกงามในหน้าฝน ใบเดี่ยวรูปหอกเรียวยาว กาบใบหุ้มลำต้นสูง 2-4 ฟุต สีเขียวเข้ม โคนกาบสีแดง เนื้อในเหง้าสีเหลืองอ่อน กลิ่นหอมฉุน กาบหุ้มสีน้ำตาลเข้มแดงขอบเขียว ผลเป็นผลแห้งรูปทรงกลม (Subcharoen, 2006) เป็นพืชที่มีสรรพคุณทางยาในการรักษาโรคได้หลายชนิด เช่น รักษาอาการปวดเมื่อย เคล็ดขัดยอก ฟกช้ำ และยังนำมาทำแห้งและบดเป็นผงเพื่อทำเป็นลูกประคบสมุนไพรในธุรกิจนวดแผนไทยและสปา ซึ่งเป็นวิธีการรักษาของแพทย์แผนไทย (Lakchai, 2009)

การอบแห้งถือเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรรูปยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน หรือเทคนิคการอบแห้งอื่น ๆ มีการพิสูจน์ว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยให้ปริมาณสารสำคัญที่พบในยาสมุนไพร เช่น สารประกอบฟีนอล สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ มีปริมาณมากขึ้น (Niamnuy *et al.*, 2011) นอกจากนี้มีการค้นพบว่าเทคนิคการอบแห้งแบบนี้สามารถให้ความร้อนแก่วัสดุได้สม่ำเสมอว่าเทคนิคการอบแห้งแบบอื่น จึงส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งดีกว่าด้วย (Nowak and Lewicki, 2004) สำหรับพืชสมุนไพรในกลุ่มที่มีน้ำมันหอมระเหยพบว่า ความเข้มรังสีอินฟราเรดไกลไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย ในขณะที่สามารถรักษปริมาณสารสำคัญที่มีในผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งได้ (Thanimkarn *et al.*, 2019; Thuwapanichayanan and Prachayawarakorn, 2011)

จากผลการค้นพบนี้ การอบแห้งแบบอินฟราเรดจึงเป็นเทคนิคการอบแห้งที่อาจให้ผลดีต่อการลดความชื้นสมุนไพรในด้านของการเพิ่มปริมาณสารสำคัญและการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเพื่อหาผลกระทบของระดับความเข้มรังสีอินฟราเรดไกลที่ใช้

ในการอบแห้งไพลภายใต้สภาวะสุญญากาศต่อ จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง แบบจำลองการอบแห้ง ที่เหมาะสม และคุณภาพของเหง้าไพลแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างไพล

เหง้าไพลอายุ 12 เดือน จากแหล่งปลูกบ้าน วังไทร ตำบลลำใหญ่ อำเภอยะรัง จังหวัดนครศรีธรรมราช นำมาทำการล้างให้สะอาด ปอกเปลือก และหั่นตามแนว ยาวความหนา 5 มิลลิเมตร บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ขนาดถุงละ 0.5 กิโลกรัม นำไปเก็บรักษาในตู้เย็น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำ ไพลมาทำการทดลองอบแห้ง จะนำไพลออกมาจากตู้เย็น และวางไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ไพล เกิดการถ่ายเทความชื้นเข้าสู่สภาวะสมดุล

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้น

นำเหง้าไพลจำนวน 5 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม ขนาด 2.5 ออนซ์ นำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 2000) จากนั้นนำมาวางไว้ใน โถดูดความชื้น แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง ระบบดิจิตอล 3 ตำแหน่ง นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนัก ก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาความชื้นโดยมี สมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงใน สมการที่ (1)

$$MC = \frac{W_I - W_F}{W_F} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นของไพล (กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง) และ W_I , W_F คือ น้ำหนักเริ่มต้นของไพล (กรัม) และน้ำหนักสุดท้ายของไพล (กรัม) ตามลำดับ

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองอบแห้ง

สำหรับการทดลองนี้เป็นการทดลองการอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดไกล โดยมีปั๊ม สุญญากาศในการทำหน้าที่สร้างสภาวะสุญญากาศภายใน ห้องอบแห้ง ห้องอบแห้ง (Drying chamber) และภาต อบแห้งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด $0.20 \times 0.30 \times 0.05$ ลูกบาศก์เมตร และแบ่งเป็นช่อง สี่เหลี่ยมจัตุรัส 6 ช่อง ขนาด 0.10×0.10 ตารางเมตร สามารถวางวัสดุที่ใช้ทดลองอบแห้งแบบชั้นบางได้ครั้งละ ประมาณ 300 กรัม โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทั้งหมด ทำมาจาก Stainless steel

การทดลองอบแห้ง

นำเหง้าไพล 270 กรัม วางบนภาตอบแห้งความ หนาของวัสดุ 5 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งที่ความเข้มของ รังสีอินฟราเรดไกล 4 ระดับ คือ 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ระดับ 5 กิโลปาสกาล จนความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.10 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง ระหว่างทำการอบแห้งจะทำการ ชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดไว้

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

การศึกษาพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของน้ำภายใน วัสดุจะถูกอธิบายในรูปของลักษณะการอบแห้ง โดย วิเคราะห์จากค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำ ในวัสดุ (Ratmanee *et al.*, 2021) และอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เปรียบเทียบกับเวลาอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

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

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ M_t , M_i , M_e และ $M_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสมดุล และความชื้นที่เวลา $t+\Delta t$ ตามลำดับ (กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง) โดยที่ t คือ เวลาการอบแห้ง (นาท)

แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองมวลสารในระหว่างการอบแห้ง โดยจะใช้ข้อมูลการทดลองอบแห้ง

มเข็มของรังสีอินฟราเรดไกล 4 ระดับ คือ 4,929, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร มาทำการหาค่าความเข้ากันได้ (Goodness of fit) ของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้แบบจำลองการอบแห้ง 5 แบบจำลอง ดังแสดงใน Table 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เพื่อบอกถึงความสามารถ และความกลมกลืนในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (4) และ (5)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n MR_{exp,i} \times MR_{pre,i}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n MR_{exp,i}^2)(\sum_{i=1}^n MR_{pre,i}^2)}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (5)$$

เมื่อค่า $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ คือค่าอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นจาก

การทำนายของแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ค่า N คือจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

Table 1 Thin layer drying models for drying of ZC

No.	Model Name	Model	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(Bruce, 1985)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
3	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	(Henderson and Pabis, 1961)
4	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang and Singh, 1978)
5	Midilli <i>et al.</i>	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli <i>et al.</i> , 2002)

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้น ประสิทธิผล (Effective diffusivity coefficient, D_{eff})

การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นหรือเกรเดียนต์ของความชื้นเป็นไปตามสมการการแพร่ของฟิคส์ (Ratmanee *et al.*, 2021) ซึ่งเมื่อน้ำเคลื่อนที่มายังผิวของวัสดุแล้วจึงจะระเหยกลายเป็นไอ อัตราการระเหยของน้ำนี้จะถูกจำกัดโดยการแพร่ของความชื้น ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของการถ่ายเทมวลแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (6)$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้นประสิทธิผล ซึ่งหมายถึงเทอมของกลไกการส่งผ่านความชื้นทั้งหมดในวัสดุตัวอย่างที่อบแห้ง มีหน่วยเป็นตารางเมตร/วินาที

สำหรับโพลที่ใช้ในการทดลองนั้นมีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวอนันต์ซึ่งมีผลเฉลยเป็นดังสมการที่ (7)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

เมื่อ D_{eff} , L และ t คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที) ความหนาของตัวอย่าง (เมตร) และเวลาในการอบแห้ง (วินาที)

ในการทดลองการอบแห้งนั้นมักจะมีปัจจัยของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะอัตราการอบแห้งจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอบแห้ง และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้นประสิทธิผล และอุณหภูมิอบแห้งได้ในรูปของสมการของ

อาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ (8) โดยที่การทดลองอบแห้งโพลด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศนี้ กำหนดให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดไกล 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ตามลำดับ

$$D_{eff} = D_0 \exp \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

เมื่อ D_0 , E_a , R และ T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ของสมการอาร์เรเนียส (ตารางเมตร/วินาที) ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ (Activation energy) กิโลแคลอรี/กิโลกรัม โมล ค่าคงตัวสากลของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 กิโลจูล/กิโลกรัม โมล เคลวิน และค่าอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (เคลวิน) ตามลำดับ

การวิเคราะห์คุณภาพของโพลอบแห้ง

การวิเคราะห์สี (Color) ในงานวิจัยนี้ทำการวัดสีโพลอบแห้งด้วยเครื่องวัดสีอาหาร Hunter Associates Laboratory รุ่น 45/0-L ใช้การวัดค่าสีในระบบ CIE ($L^*a^*b^*$) ซึ่งเป็นระบบบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงสีแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) (Ratmanee *et al.*, 2021)

การวิเคราะห์ความหนาแน่นมวลรวม (Bulk density, ρ_b) โพลที่ผ่านการอบแห้งสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นมวลรวมได้โดยนำโพลแห้งบรรจุใส่ภาชนะทรงกระบอกที่มีปริมาตร 25 มิลลิเมตร จนเต็มภาชนะ ทำการเคาะภาชนะ 3 ครั้ง เพื่อให้โพลแห้งเรียงตัว แล้วทำการบรรจุโพลแห้งจนเต็ม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก รูปแบบของค่าความหนาแน่นมวลรวม คือ มวลของโพลแห้งต่อปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ (Thanimkarn *et al.*, 2020)

การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การหดตัว

(%Shrinkage) โพลที่ผ่านการอบแห้งสามารถหาค่าการหดตัวได้โดยอาศัยหลักการแทนที่ในของเหลวที่บรรจุอยู่ภายใน Pycnometer โดยการทดลองนี้จะใช้ *n*-Heptane ซึ่งมีความหนาแน่น 0.684 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร การหดตัวของโพลอบแห้งจะแสดงในเทอมของเปอร์เซ็นต์ (%) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพลหลังการอบแห้งเปรียบเทียบกับโพลสด (Thanimkarn *et al.*, 2020) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (11)

$$\%Shrinkage = \left(\frac{V_i - V}{V_i} \right) \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ V_i , V คือ ปริมาตรของโพลสด (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และปริมาตรของโพลหลังอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

แผนการทดลองและการคำนวณทางสถิติ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของโพลที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ มีเงื่อนไขในการอบแห้ง คือ ความเข้มของรังสีอินฟราเรดไกลที่ 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง 5 กิโลปาสกาล ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแผนการทดลองเป็นแบบ Completely Randomized Design โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์คุณภาพของโพลอบแห้งโดยใช้วิธี One-way ANOVA และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงพหุคูณด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัยและวิจารณ์

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

เหง้าโพลมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 3.58 ± 0.04 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง ทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.10 ± 0.02 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง จาก Figure 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 145, 85, 55 และ 35 นาที ที่ความเข้มรังสี 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มรังสี 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ซึ่งเป็นระดับที่สูงที่สุดในการทดลองจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเนื่องจากระดับความเข้มรังสีสูงจะสามารถเพิ่มความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างวัสดุกับอากาศส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่มายังสภาวะแวดล้อมได้เพิ่มขึ้น (Abe and Afzal, 1997; Ponkham *et al.*, 2012)

Figure 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดไกลต่างกัน โดยอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มรังสี กล่าวคือที่ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร มีอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด เท่ากับ 0.14 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง·นาที่ ขณะที่ความเข้มรังสี 8,541, 6,550, 4,929 วัตต์/ตารางเมตร มีอัตราการอบแห้งที่สูงสุดเท่ากับ 0.12, 0.09 และ 0.06 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง·นาที่ ตามลำดับ กระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ยกเว้นช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่โพลยังคงมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นสู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาอบแห้งมากขึ้น

ความชื้นของไหลลดต่ำลง อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำจากภายในไปยังห้องอบแห้งจะลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งวัสดุชีวภาพที่ผ่านมา (Tirawanichakul and Tirawanichakul, 2008; Das *et al.*, 2009)

แบบจำลองการอบแห้ง

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นตัวบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้งในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด แต่ในขณะที่ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด Table 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้ง ซึ่งทำให้เห็นว่าแบบจำลองของ Midilli *et al.* (2002) สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งไหลได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9939-0.9998 นอกจากนี้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าระหว่าง 0.0051-0.0233 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งไหลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการของ Midilli *et al.* (2002) มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำ หรือเส้นตรงที่ความชัน 45° ดังแสดงใน Figure 3

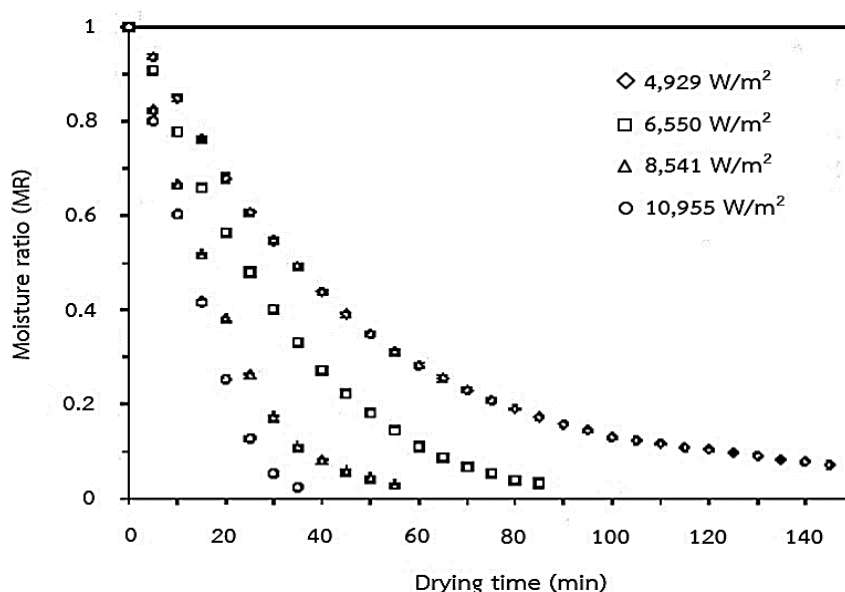


Figure 1 Relationship between moisture ratio and the drying time of ZC drying at different Infrared intensities

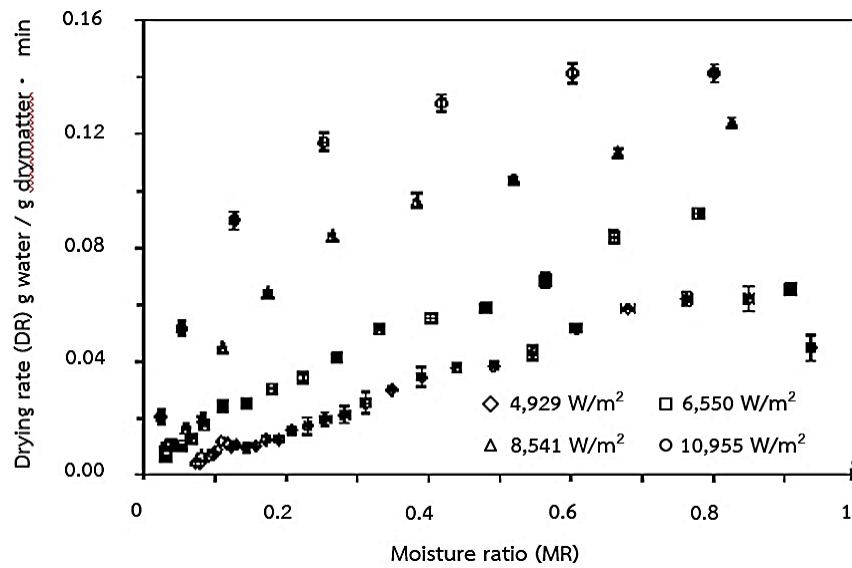


Figure 2 Relationship between drying rate and moisture ratio of ZC drying at different Infrared intensities

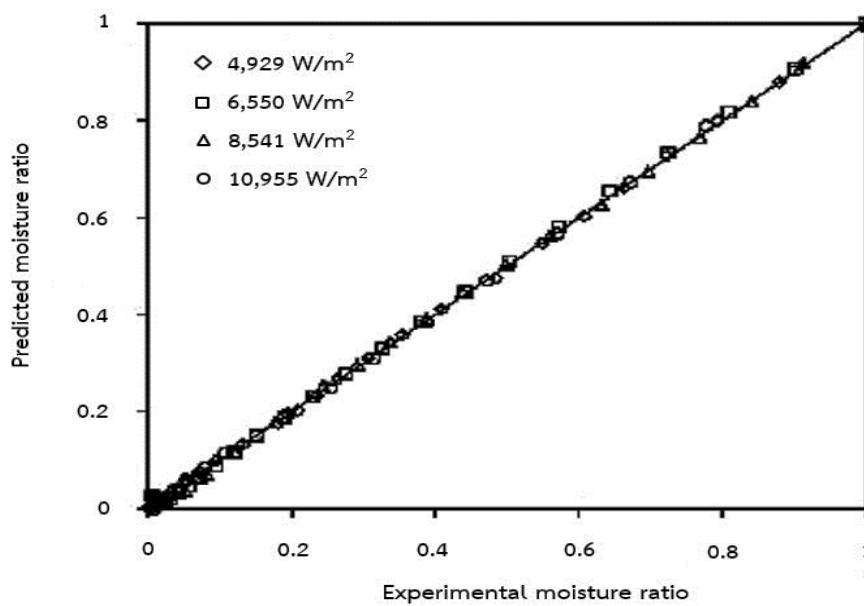


Figure 3 Comparative plot of experimental and predicted moisture ratios by Midilli *et al.* (2002)

Table 2 Mathematical models applied to ZC drying curves and their statistical results

No.	Intensity (W/m ²)	Constants and coefficients				R ²	RMSE
1	4,929	$k = 0.0049$				0.9992	0.0085
	6,550	$k = 0.0131$				0.9857	0.0328
	8,541	$k = 0.0220$				0.9916	0.0419
	10,955	$k = 0.0339$				0.9712	0.0074
2	4,929	$k = 0.0063$	$n = 0.9543$			0.9996	0.0056
	6,550	$k = 0.0039$	$n = 1.2650$			0.9982	0.0127
	8,541	$k = 0.0077$	$n = 1.2710$			0.9992	0.0137
	10,955	$k = 0.0105$	$n = 1.3290$			0.9989	0.0105
3	4,929	$k = 0.0048$	$a = 0.978$			0.9996	0.0057
	6,550	$k = 0.0139$	$a = 1.063$			0.9903	0.0286
	8,541	$k = 0.0234$	$a = 1.059$			0.9940	0.0360
	10,955	$k = 0.0363$	$a = 1.076$			0.9828	0.0396
4	4,929	$a = -0.0020$	$b = 0.0000008$			0.8075	0.1719
	6,550	$a = -0.0101$	$b = 0.0000261$			0.9968	0.0173
	8,541	$a = -0.0166$	$b = 0.0000705$			0.9998	0.0067
	10,955	$a = -0.0247$	$b = 0.0001555$			0.9993	0.0083
5	4,929	$k = 0.0056$	$n = 0.9709$	$a = 0.9878$	$b = -0.00039$	0.9997	0.0051
	6,550	$k = -0.0014$	$n = 1.2070$	$a = 0.9539$	$b = -0.0112$	0.9939	0.0233
	8,541	$k = 0.0080$	$n = 1.2440$	$a = 0.9836$	$b = -0.0002$	0.9998	0.0075
	10,955	$k = 0.0121$	$n = 1.2740$	$a = 0.9949$	$b = -0.0003$	0.9997	0.0052

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity coefficient, D_{eff})

จาก Table 3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไพล ในระหว่างการอบแห้งที่ระดับความเข้มรังสีอินฟราเรดไกล 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.59×10^{-7} – 2.75×10^{-7} ตารางเมตร/วินาที โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่า

เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดไกลที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งไพลด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่าสูงกว่าการอบแห้งวัสดุชีวภาพด้วยวิธีพาความร้อน ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของวัสดุชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-11} – 10^{-9} ตารางเมตร/วินาที (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011)

Table 3 Effective diffusivity coefficient of ZC drying at different infrared intensities

Infrared intensity (W/m ²)	Effective diffusivity coefficient (m ² /s)	R ²
4,929	0.59×10 ⁻⁷	0.98
6,550	1.14×10 ⁻⁷	0.97
8,541	1.86×10 ⁻⁷	0.98
10,955	2.75×10 ⁻⁷	0.91

ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเคลื่อนที่ของ
สสารสามารถหาได้จากการสร้างกราฟจากข้อมูลที่ได้จาก
การทดลองในรูปของลอการิทึมของค่าการแพร่กระจาย
ความชื้นประสิทธิพล ($\ln(D_{\text{eff}})$) เปรียบเทียบกับส่วนกลับ
ของอุณหภูมิ ($1/T$) ดังแสดงใน Figure 4 จะได้ความชัน

ของเส้นกราฟ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชันของ
เส้นกราฟกับค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเคลื่อนที่
ของสสาร โดยที่ ค่า E_a สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการ
ที่ (9) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.97 กิโลจูล/โมล

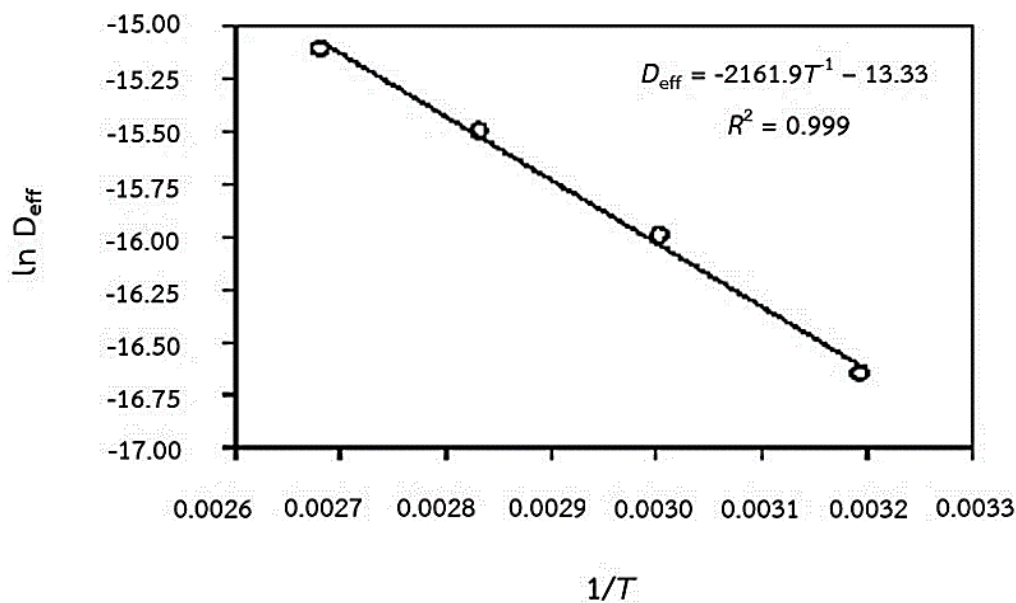


Figure 4 Plot of natural logarithm of effective moisture diffusivity vs. reciprocal of absolute temperature of drying of ZC

คุณภาพของไหลอบแห้ง

จาก Table 4 ไพลอบแห้งที่อบแห้งด้วยความเข้มข้นอินฟราเรดไกลต่างกัน มีค่าสีความเป็นสีเหลือง (b^*) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้นค่า b^* มีแนวโน้มลดลง โดยที่ระดับความเข้มข้นสี 4,929 และ 6,550 วัตต์/ตารางเมตร มีค่าไม่แตกต่างกัน คือ 54.49 และ 54.32 ตามลำดับ สำหรับในระดับความเข้มข้นสี 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันคือ 52.18 และ 51.65 เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นจะเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของคาโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการทำแห้ง ในขณะที่ความเข้มข้นอินฟราเรดไกลในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นมวลรวมของวัสดุและเปอร์เซ็นต์การหดตัว

เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากลักษณะที่ผิววัสดุเป็นเปลือกแข็งแล้วหุ้มส่วนด้านในที่ยังไม่แห้งไว้ ซึ่งเกิดจากในช่วงแรกของการอบแห้ง น้ำที่ผิวของวัสดุระเหยเร็วเกินไปทำให้น้ำจากด้านในเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทัน โดยการอบแห้งที่ความเข้มข้นอินฟราเรดไกล 4,929 และ 6,550 วัตต์/ตารางเมตร มีค่าความหนาแน่นมวลรวมไม่แตกต่างกันคือ 0.19 ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การหดตัวมีค่าเท่ากับ 77.57 และ 77.42 ตามลำดับ แต่การอบแห้งที่ความเข้มข้นอินฟราเรดไกล 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร มีค่าความหนาแน่นมวลรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) คือ 0.25 และ 0.31 ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การหดตัวมีค่าเท่ากับ 85.61 และ 93.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Table 4 Evaluation of dried ZC quality

Infrared intensity (W/m ²)	b^*	Bulk density (g/cm ³)	%Shrinkage
4,929	54.49±0.03 ^a	0.19±0.02 ^c	77.57±0.51 ^c
6,550	54.32±0.06 ^a	0.19± 0.01 ^c	77.42±0.94 ^c
8,541	52.03±0.04 ^b	0.25±0.02 ^b	85.61±0.55 ^b
10,955	51.65±0.02 ^b	0.31±0.01 ^a	93.47±0.32 ^a

The same letter in the same column is not significantly different at $p<0.05$.

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของไหลด้วยอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ ใช้เวลาในการอบแห้ง 145, 85, 55 และ 35 นาที อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.06, 0.09, 0.12 และ 0.14 กรัม น้ำ/กรัม วัสดุแห้ง·นาที ที่ความเข้มข้นอินฟราเรดไกล 4,929, 6,550, 8,541 และ 10,955 วัตต์/ตารางเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการอบแห้ง Midilli *et al.* (2002) สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก

มีค่า R^2 มากที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 17.97 กิโลจูล/โมล คุณภาพของไหลอบแห้งพบว่าค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นอินฟราเรดไกลในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของไหลแห้งก็เป็นอีกวิธีที่จะสามารถยืนยันข้อมูลด้านคุณภาพได้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Thuwapanichayanan

and Prachyawarakorn. (2011) พบว่าความชื้นของรังสีอินฟราเรดไกลในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ทุนสนับสนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2562 และคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ครุภัณฑ์ ในการดำเนินการทดลองวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Abe, T. and T.M. Afzal. 1997. Thin layer infrared radiation drying of rough rice. **Journal of Agricultural Engineering Research** 67(1): 289-297.
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis**. 17th Edition. Gaithersburg, Maryland: AOAC International. 771 p.
- Bruce, D.M. 1985. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. **Journal of Agricultural Engineering Research** 32(1): 337-347.
- Das, I., S.K. Das and S. Bal. 2009. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. **Journal of Food Engineering** 95(1): 166-171.
- Henderson, S.M. and S. Pabis. 1961. Grain drying theory II. temperature effects on drying coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research** 6(1): 169-174.
- Lakchai, A. 2009. **Performance Analysis of Drying Process of Phai (*Zingiber cassumunar* Roxb.) Using Heat Pump Dryer**. Master Thesis. Chiangmai University. 149 p. [in Thai]
- Midilli, A., H. Kucuk and Z.A. Yapar. 2002. New model for single-layer drying. **Drying Technology** 20(7): 1503-1513.
- Niamnuy, C., M. Nachaisin, J. Laohavanich and S. Devahastin. 2011. Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions. **Food Chemistry** 129(1): 899-906.
- Nowak, D. and P.P. Lewicki. 2004. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science and Emerging Technology** 5(1): 353-360.
- Page, G.E. 1949. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. Master thesis. Purdue University. 44 p.
- Ponkham, K., N. Meeso, S. Soponronnarit and S. Siriamornpun. 2012. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. **Food and Bioproducts Processing** 90(1): 155-164.
- Ratmanee, P., S. Phitakwinai, W. Nilnont and W. Buakaew. 2021. Thin layer drying kinetics of turmeric using hot air dryer. **Journal of Industrial Technology** 17(2): 32-45. DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.06.001. [in Thai]

- Sripinyowanich, J. and A. Noomhorm. 2011. A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer. **Drying Technology** 29(7): 735-748.
- Subcharoen, P. 2006. **Herbal Garden in Royal Flora Expo**. Bangkok: Samchareon Phanich. 464 p. [in Thai]
- Thanimkarn, S., E. Cheevitsopon and J. Sripinyowanich. 2019. Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of *Cissus quadrangularis* Linn. **Heliyon** 5(6): 1-7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01999.
- _____. 2020. Drying kinetics and quality of *Cissus quadrangularis* Linn. dried by convective hot air. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal** 22(3): 230-240.
- Thuwapanichayanan, R. and S. Prachyawarakorn. 2011. Effects of drying techniques and conditions on drying kinetics and quality of chopped garlic. **The Agricultural Science Journal** 42(3)(Suppl.): 605-608.
- Tirawanichakul, Y. and S. Tirawanichakul. 2008. Mathematical model of fixed-bed drying and strategies for crumb rubber producing STR20. **Drying Technology** 26(11): 1388-1395.
- Wang, C.Y. and R.P. Singh. 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers** 11(1): 668-672.