



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การศึกษาอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและสีในระหว่างการอบแห้ง ขมิ้นชันด้วยลมร้อน

Study of temperature to moisture ratio change and color during drying Turmeric with hot air

มารีนา มะหนิ^{1*} สุวิทย์ คงภักดี¹ ประชิต คงรัตน์² จักรี บุญละคร¹

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์พื้นฐาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

² สาขาการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

Marina Mani^{1*} Suwit Khongpakdee¹ Prachit Khongrattana² Jakkree Boonlakhorn¹

¹ Department of Basic Science and Mathematics, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla Campus, Songkhla 90000

² Department of Teaching Science and Mathematics, Faculty of Education, Thaksin University, Songkhla Campus, Songkhla 90000

* Corresponding author.

E-mail: sumsiyha@gmail.com; Telephone: 08 6298 7700

วันที่รับบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 กรกฎาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 18 กันยายน 2566

วันที่ตอบรับบทความ 14 ตุลาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขมิ้นชันที่ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อน 1.5 เมตรต่อวินาที ทำการอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น $1,060.61 \pm 1.45$ เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้น 136.40 ± 2.35 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากนั้นนำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Lewis, Henderson and Pabis, Page, Modified Page I, Logistic, Logarithmic, Two term และ Midilli et al. พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic สามารถทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขมิ้นชันได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) มากที่สุด และค่าโคสแควร์ (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) น้อยที่สุด ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของการอบแห้งขมิ้นชันมีค่าอยู่ระหว่าง 5.58×10^{-8} - 2.39×10^{-7} ตารางเมตรต่อวินาที จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีในระบบ CIE ($L^*a^*b^*$) ของขมิ้นชัน พบว่าพารามิเตอร์สี L^* (ความสว่าง) a^* (ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว) และ b^* (ค่าสีเหลือง/สีน้ำเงิน) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการอบแห้ง โดยค่า L^* , a^* และ b^* ของ ขมิ้นชันอบแห้งมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) มีค่าเท่ากับ 20.032, 18.231 และ 15.476 ที่ระดับอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

คำสำคัญ

การอบแห้งด้วยลมร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพ ขมิ้นชัน

Abstract

The purpose of this research was to study the effect of temperature on the change in moisture ratio of Turmeric under drying conditions at 50, 60 and 70 °C. and a hot air speed of 1.5 m/s. Drying was performed from the initial moisture

content of $1,060.61 \pm 1.45$ percent dry basis until the remaining moisture was 136.40 ± 2.35 percent dry basis. Then, the change in moisture ratio during drying was studied with a mathematical model of Lewis, Henderson and Pabis, Page, Modified Page I, Logistic, Logarithmic, Two term and Midilli et al. found that the Logarithmic model best predicted the moisture ratio change characteristics of Turmeric. It has the highest coefficient of determination (R^2) and chi-square (χ^2), root mean square error (RMSE) and the lowest mean biased error (MBE). The effective moisture diffusivity coefficient of Turmeric drying was between 5.58×10^{-8} - 2.39×10^{-7} square meters per second. From the CIE (L^* - a^* - b^*) color quality change analysis of Turmeric, it was found that the color parameters L^* (brightness), a^* (red/green value) and b^* (yellow, blue value) were used to estimate the color change during drying. The L^* , a^* and b^* values of dehydrated Turmeric were decreased when the drying temperature is higher while the total color difference (TCD) was 20.032, 18.231 and 15.476 at the temperature of 50, 60 and 70 °C.

Keywords

hot-air drying; mathematical modeling; effective moisture diffusivity coefficient; Turmeric

1. คำนำ

ขมิ้น (Turmeric) หรือขมิ้นชัน มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Curcuma longa* L. (*Curcuma domestica* Valetton) วงศ์ Zingiberaceae เป็นพืชวงศ์ขิง ที่ใช้เพื่อเป็นทั้งเครื่องเทศ และพืชสมุนไพร มีลำต้นเหนือดินเป็นลำต้นที่เกิดจากการอัดตัวกันของกาบใบ มีความสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร ลำต้นจริงอยู่ใต้ดิน เรียกว่า เหง้าขมิ้น ประกอบด้วย เหง้าหลักใต้ดิน ที่เรียกว่า หัวขมิ้น ซึ่งมีรูปไข่และแตกแขนงทรงกระบอกออกด้านข้างทั้ง 2 ด้าน เรียกว่า แง่ง เนื้อในเหง้ามีสีเหลือง มีกลิ่นเฉพาะ ส่วนที่ใช้บริโภค คือ ลำต้นใต้ดินที่ใช้สะสมอาหาร ขมิ้นชันมีเนื้อสีเหลืองเข้มจนถึงสีแดงเข้ม มีกลิ่นเฉพาะตัว ซึ่งมาจากน้ำมันหอมระเหยที่มีอยู่ภายใน เอกลักษณ์ที่เด่นชัด คือ รสชาติที่จัดจ้าน สีสันมีความสวยงาม โดยถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นสมุนไพรที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุมากมาย เช่น วิตามินเอ วิตามินบีรวม วิตามินซี วิตามินอี แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก เกลือแร่ เส้นใยอาหาร และโปรตีน นอกจากนี้จะมีคุณค่าทางอาหารแล้ว ก็ยังถือเป็นพืชที่มีคุณค่าทางยาอีกด้วย [1-2] ขมิ้นชันสามารถนำมาใช้ในการบริโภคได้ทั้งสดและการแปรรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่นการทำให้แห้งและการสกัดสาร ซึ่งในการทำแห้งนั้นเป็นกระบวนการที่ทำให้การลดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การอบแห้งเชิงกล การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ [2-4] และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด [4-10] ดังนั้นวิธีการอบแห้งอาหารมักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อทำ

ให้แห้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและควบคุมการทำงานได้ง่าย แต่อาจใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน [8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะมีผลต่อการลดลงของความชื้นในผลิตภัณฑ์มากกว่าความเร็วลมที่คงที่ประมาณ 1.5 เมตรต่อวินาที [2,3] โดยการถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดที่ผิวหน้าอย่างเดียว ดังนั้นความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องมีค่าที่สูง [2,3] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างรอบแห้งกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ หรือแบบจำลองแบบเอพริเคิล [11-12] โดยที่อัตราส่วนความชื้นมีความสำคัญในแบบจำลองการแพร่ของของเหลว ซึ่งเป็นไปตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขมิ้นชันในช่วงอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส [2] และศึกษาหาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสีของขมิ้นชันที่ผ่านการอบแห้งเนื่องจากในปัจจุบันนิยมใช้ระบบสีในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลผลิตทางด้านการเกษตรด้วยมาตรฐานสี Commission International de l'Eclairage (CIE) ซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง [6] ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาวิธีการแปรรูปขมิ้นชันในกระบวนการอบแห้งให้มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ดียิ่งขึ้น [6-8]

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ค่าความชื้น

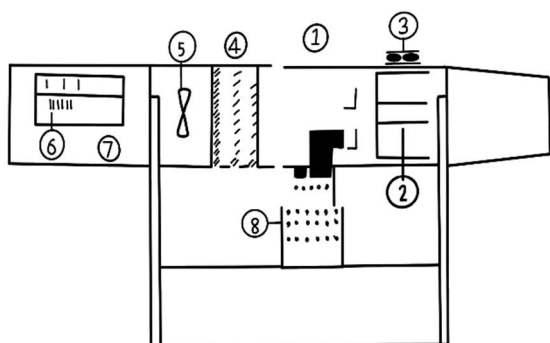
ตัวอย่างขมิ้นชันสดที่นำมาศึกษา นำมาล้างทำความสะอาด ทำการปอกเปลือก หั่นเนื้อขมิ้นชันให้มีขนาดเล็กที่สุดจำนวน 3 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นออก นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น UFE 700) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AOAC, 2010) [13] จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล เพื่อหาน้ำหนักแห้งของขมิ้นชัน นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักมาคำนวณหาความชื้นของขมิ้นชันแสดงในสมการที่ (1)

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

โดยที่ MC คือ ค่าความชื้นของขมิ้นชัน (มาตรฐานแห้ง) w คือ น้ำหนักของขมิ้นชัน (กรัม) และ d คือ น้ำหนักแห้งของขมิ้นชัน (กรัม)

2.2 เครื่องอบแห้งลมร้อน

เครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นขดลวดความร้อนขนาด 6 กิโลวัตต์ พัฒนชนิดไหลตามแกนขนาด 500 วัตต์ ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำหนักซึ่งโดยใช้โหลดเซลล์ เพื่อบันทึกค่าน้ำหนักตลอดการทดลอง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในการทดลอง

หมายเหตุ : ชุดอบแห้งลมร้อนประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้ง 2) ถาดวางผลิตภัณฑ์ 3) โหลดเซลล์ 4) ขดลวดความร้อน 5) พัดลม 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 7) ชุดปรับความเร็วลม 8) ชุดบันทึกข้อมูล

2.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำข้อมูลการอบแห้งที่ได้จากการทดลองนำมาใช้เป็นฐานข้อมูล แล้วเปรียบเทียบกับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งด้วยแบบจำลองเอมพีริคัล (empirical model) [14] โดยมีขมิ้นชันสดที่ปอกเปลือกออกแล้วหั่นเนื้อขมิ้นชันออกเป็นทรงกลมขนาดเท่าๆ กันใช้ในการทดลองประมาณ 100 กรัม อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้ง คือ อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลมที่ประมาณ 1.5 เมตรต่อวินาที เนื่องจากขมิ้นชันเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีความชื้นไม่สูงมากนัก จะทำให้กระบวนการอบแห้งมีการลดลงของความชื้นในลักษณะของการอบแห้งแบบลดลงเท่านั้น ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นค่าความเร็วลมของอากาศร้อนที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องมีค่าสูง และความเร็วลมร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีและอัตราการคืนรูปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% [2,15] ทำการบันทึกน้ำหนักของขมิ้นชันที่ลดลงทุก ๆ 10 นาที โดยใช้ชุดบันทึกข้อมูล จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำไปหาปริมาณความชื้นสุดท้าย และปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ ที่ผ่านการอบแห้ง และทำการหาอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio : MR) จากสมการที่ (2) [9] เซลเซียส ซึ่งในการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง และนำมาหาค่าความแตกต่างของอัตราส่วนของความชื้นที่ลดลง

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

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของขมิ้นชัน (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชัน (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของขมิ้นชัน (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

ในการศึกษาครั้งนี้ไม่คิดความชื้นสมดุล เนื่องจากความชื้นสมดุลมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใด ๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3) [9]

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

2.4 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

สมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลมีหลายรูปแบบ ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวิธีการอบแห้งหรือคุณสมบัติของวัสดุทางการเกษตร ในการศึกษาครั้งนี้ใช้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล [16-18] แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง

ลำดับ	แบบจำลอง	รูปแบบสมการ
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
3	Page	$MR = a \exp(-kt^n)$
4	Modified Page I	$MR = a \exp(-kt)^n$
5	Logistic	$MR = a / (1 + \exp(kt))$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Two term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
8	Midilli <i>et.al</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

* t คือ เวลาในการอบแห้ง และ k, k_1, k_2, n, a , และ c คือค่าคงที่ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในการวิเคราะห์รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับการทำนายกระบวนการอบแห้ง ซึ่งใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแควร์ (chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (mean bias error, MBE) [19-21] ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง โดยค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองการอบแห้ง

โดยยังมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 ค่า RMSE และค่า MBE เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองการอบแห้ง ดังนั้นแบบจำลองการอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 มากแต่มีค่า RMSE และค่า MBE น้อย โดยสมการการหาพารามิเตอร์ทั้ง 9 ค่า แสดงในสมการที่ (4)–(7) ตามลำดับ [19-21]

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

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{\exp,i} \times MR_{pre,i})^2} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{\exp,i} \times MR_{pre,i})^2 \quad (7)$$

โดยที่ $MR_{\exp,i}$ คืออัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง $MR_{pre,i}$ คืออัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง N คือจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ n_p คือจำนวนตัวแปรในแบบจำลองการอบแห้ง

2.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (effective moisture diffusivity coefficient) เป็นสมบัติทางกายภาพที่บ่งบอกความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ พิจารณาในรูปแบบสมการกึ่งทฤษฎี (semi theoretical equation) [22] ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปของ สมการการแพร่ตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law) สมการนี้ได้หาผลเฉลยโดย J.Crank [9] สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการที่ (8) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมยาวมาก ๆ (infinite spherical) [9]

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{r^2} D_{eff} t\right) \quad (8)$$

โดยที่ D_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประ สติธิ ผล (ตารางเมตรต่อวินาที) r คือค่ารัศมีของทรงกลม (เมตร) และ t คือระยะเวลาในการอบแห้ง (วินาที) และสำหรับค่า พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (activation energy for diffusion) โดยใช้สมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [8-10] ดังแสดงในสมการที่ (9) [22-23]

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

โดยที่ D_o คือ ค่าคงที่ของระบบการแพร่ (ตารางเมตรต่อวินาที) E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล) T คือ อุณหภูมิของลมร้อน (เคลวิน) และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล เคลวิน)

2.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์สี

วัดสีขมิ้นชันอบแห้งที่อุณหภูมิของลมร้อนระดับต่างๆ ด้วย เครื่อง Spectrophotometer รุ่น CM-5 โดยวัดค่าสีในระบบ CIE-Lab SCALE ในรูปแบบของค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างโดยรวม (TCD) ของขมิ้นชันอบแห้ง ที่อุณหภูมิระดับต่างๆ [10,24] โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่ แสดงในสมการ (10)

$$TCD = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2} \quad (10)$$

โดยที่ L_1^* a_1^* และ b_1^* คือค่าพารามิเตอร์สีของขมิ้นชันใน ระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เวลาใดๆ และ L_0^* a_0^* และ b_0^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของขมิ้นชันสด

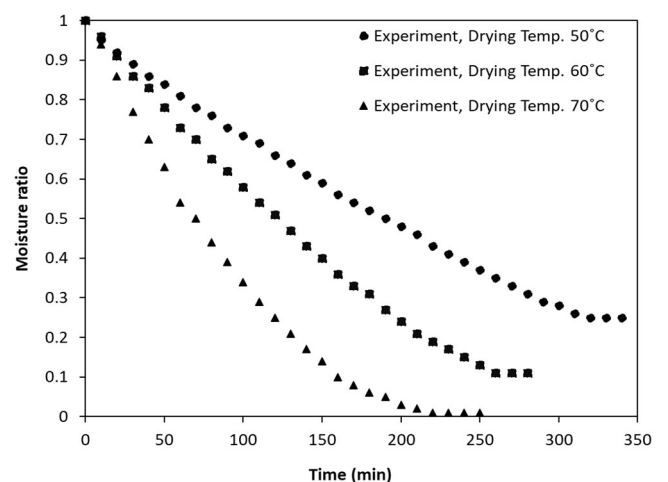
3. ผลการศึกษา

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความชื้นของขมิ้นชันในระหว่างการอบแห้งจาก ความชื้นเริ่มต้น $1,060.61 \pm 1.45$ เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้น 136.40 ± 2.35 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ที่ อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสนั้น แต่ละอุณหภูมิจะ

ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้มีค่าความ แตกต่างกันน้อยมาก เนื่องจากค่าความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันที่ ใช้ในการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นและเวลา ในการอบแห้งของขมิ้นชัน ซึ่งพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นของขมิ้นชันจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำที่ผิว เซลล์ของขมิ้นชันจะถูกระเหยออก ทำให้น้ำหรือไอน้ำใน โครงสร้างของขมิ้นชันเกิดการเคลื่อนที่มาสู่ผิวหน้าและระเหย ไปกับกระแสลมที่ร้อนทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำในโครงสร้างเซลล์ชั้นในกับบริเวณผิวหน้าของขมิ้นชัน เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า ซึ่งเรียกว่า สภาวะ อัตราการทำแห้งคงที่ (constant drying rate period) [2] จะ เห็นได้ว่าความชื้นของขมิ้นชันซึ่งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จนเหลือความชื้นประมาณระดับหนึ่ง เมื่อการทำแห้ง ดำเนินการต่อไปจนกระทั่งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายใน ขมิ้นชันที่แพร่ออกมาแทนที่ผิวหน้าจะช้ากว่าอัตราการระเหย ของน้ำที่ผิวหน้าของขมิ้นชัน (falling drying rate period)

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการลดความชื้นของขมิ้นชันจาก ความชื้นเริ่มต้น $1,060.61 \pm 1.45$ เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้น 136.40 ± 2.35 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยที่พิจารณาจากที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ค่า ของน้ำหนักของขมิ้นชันจะไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ซึ่งส่งผลต่อค่า อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นและ เวลาในการอบแห้ง

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

จากตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับการอบแห้งขมิ้นชัน ค่า R^2 ค่า χ^2 , ค่า RMSE และค่า MBE จากการวิเคราะห์สมการแบบจำลองทั้ง 8 สมการ พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งขมิ้นชันได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.9965 – 0.9986 ซึ่งมีความมากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่น ๆ และค่า χ^2 มีค่าระหว่าง $0.000196 - 5.26 \times 10^{-15}$ RMSE มีค่าระหว่าง $0.0134 - 7.04 \times 10^{-8}$ และ MBE มีค่าระหว่าง $0.000182 - 4.96 \times 10^{-15}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่น ๆ และเมื่อนำสมการของ Logarithmic มาประมวลผลเพื่อทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อนตามเงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ พบว่า ผลการทำนายและผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 และสามารถนำแบบจำลองนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานไปใช้ในการออกแบบการอบแห้งลักษณะต่าง ๆ ได้

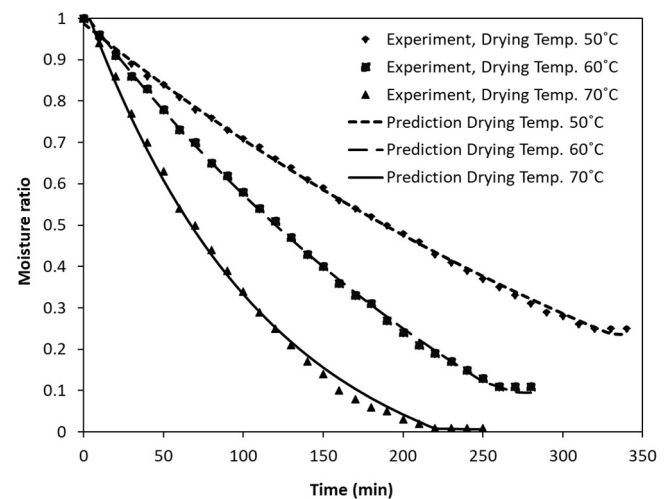
3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบขมิ้นชัน ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 5.58×10^{-8} , 7.97×10^{-8} และ 2.39×10^{-7} ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น [22-23] แสดงดังรูปที่ 4 เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า และมีค่าเท่ากับ

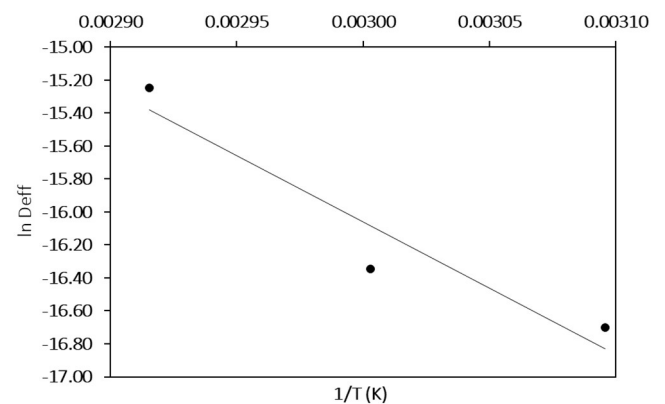
อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างที่เคลื่อนที่มาที่บริเวณผิวหน้า ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) และอุณหภูมิของการอบแห้งนี้จะไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำที่มีผลทำให้โมเลกุลเป็นอิสระต่อกันเพิ่มขึ้นและแพร่ออกมาที่อากาศอบแห้งได้มากตามระดับอุณหภูมิของการอบแห้ง นอกจากนั้นจากข้อมูลในรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิอบแห้งตามรูปแบบสมการที่ (9) ได้ดังนี้

$$D_{eff} = 2963.442 \exp\left(-\frac{666.647}{RT}\right) \quad (11)$$

สมการที่ (11) เป็นสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยลมร้อน โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) เท่ากับ 666.647 กิโลจูล/โมล และค่าคงที่ของระบบการแพร่เท่ากับ 2963.442 ตารางเมตรต่อวินาที และสามารถนำสมการนี้ไปแทนค่าในสมการที่ (8) ได้ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเปลี่ยนแปลงไป สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขมิ้นชันได้



รูปที่ 3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นและเวลาในการอบแห้ง จากผลการทดลองและสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Logarithmic



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและอุณหภูมิอบแห้งของขมิ้นชันตามสมการของอาร์เรเนียส

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการอบแห้งขมิ้นชัน

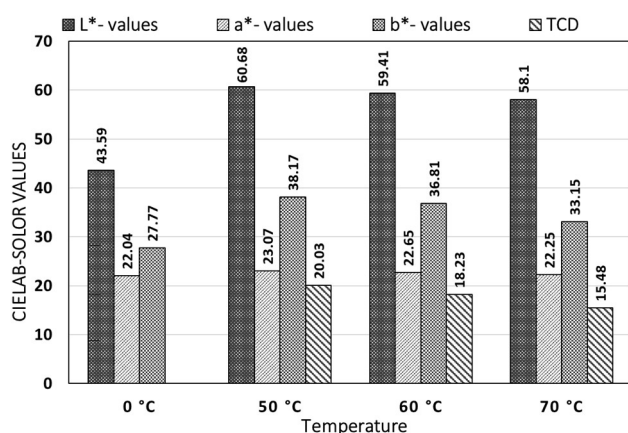
แบบจำลอง	อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง	R ²	χ^2	RMSE	MBE
Lewis	50	k = 0.0038	0.9982	1.25×10^{-4}	1.10×10^{-2}	1.18×10^{-4}
	60	k = 0.0064	0.9914	7.96×10^{-4}	2.70×10^{-3}	7.41×10^{-6}
	70	k = 0.0116	0.9899	6.73×10^{-4}	2.49×10^{-2}	6.21×10^{-4}
Henderson and Pabis	50	k = 0.0039 a = 1.0232	0.9905	2.09×10^{-7}	4.00×10^{-4}	1.97×10^{-7}
	60	k = 0.0070 a = 1.0925	0.9822	3.00×10^{-3}	5.37×10^{-2}	2.88×10^{-3}
	70	k = 0.0125 a = 1.9089	0.9848	4.00×10^{-3}	6.10×10^{-2}	3.72×10^{-3}
Page	50	k = 0.0050 n = 1.0027	0.9877	2.69×10^{-1}	5.03×10^{-1}	2.53×10^{-1}
	60	k = 0.0024 n = 1.2196	0.9941	4.15×10^{-2}	1.96×10^{-1}	3.87×10^{-2}
	70	k = 0.0026 n = 1.3663	0.9905	4.62×10^{-2}	2.06×10^{-1}	426×10^{-2}
Modified Page I	50	k = 0.0037 n = 1.0027	0.9877	9.00×10^{-3}	2.95×10^{-2}	8.00×10^{-4}
	60	k = 0.0017 n = 1.2196	0.9941	3.00×10^{-3}	1.80×10^{-3}	3.00×10^{-4}
	70	k = 0.0008 n = 1.3663	0.9905	5.88×10^{-1}	7.35×10^{-1}	5.20×10^{-1}
Logistic	50	k = 0.0058 a = 1.9727	0.9980	4.56×10^{-6}	2.00×10^{-3}	4.29×10^{-6}
	60	k = 0.0098 a = 2.0588	0.9948	5.00×10^{-4}	7.24×10^{-3}	5.23×10^{-4}
	70	k = 0.0171 a = 2.0643	0.9961	1.4×10^{-3}	3.60×10^{-2}	1.29×10^{-3}
Logarithmic	50	k= 0.0019 n = 1.5735 c= -0.5866	0.9983	5.26×10^{-15}	7.04×10^{-8}	4.96×10^{-15}
	60	k = 0.0031 n = 1.6519 c = -0.6369	0.9986	1.96×10^{-5}	1.34×10^{-2}	1.82×10^{-4}
	70	k = 0.0089 n = 1.2002 c = -0.1613	0.9965	1.87×10^{-5}	4.10×10^{-2}	1.73×10^{-5}
Two term	50	k ₁ = 0.0039 a = 0.5116 b = 0.5116 k ₂ = 0.0039	0.9905	9.95×10^{-5}	9.60×10^{-3}	9.36×10^{-5}
	60	k ₁ = 0.0070 a = 0.5462 b = 0.5462 k ₂ = 0.0070	0.9822	3.10×10^{-3}	5.37×10^{-2}	2.88×10^{-3}
	70	k ₁ = 0.0125 a = 0.6037 b = 0.4823 k ₂ = 0.1257	0.9848	3.50×10^{-3}	5.68×10^{-2}	3.23×10^{-3}
Midilli <i>et.al</i>	50	k = 0.0751 a = 0.0751 b = 6.3634 n = 3.0894	0.8844	3.10×10^{-2}	1.70×10^{-1}	2.91×10^{-2}
	60	k = 0.0766 a = 0.0766 b = 5.5552 n = 2.9858	0.9066	3.74×10^{-2}	1.86×10^{-1}	3.49×10^{-2}
	70	k = 0.0632 a = 0.0632 b = 7.9808 n = 4.1627	0.9675	4.10×10^{-2}	1.94×10^{-1}	3.78×10^{-2}

3.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสีของขมิ้นชันอบแห้ง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งขมิ้นชันที่มีอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะส่งผลต่อค่า L*-value โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้ขมิ้นชันอบแห้งมีค่า L*-value ลดลง โดยมีค่า

60.68, 59.41 และ 58.10 ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่า a*-values ซึ่งมีค่า 23.07, 22.65 และ 22.25 ตามลำดับ และค่า b*-values มีค่า 38.17, 36.81 และ 33.15 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของขมิ้นชัน โดยเปรียบเทียบกับค่าสีของขมิ้นชันสด (เมื่อขมิ้นชันสดมีค่า $L_0^* = 43.59$ $a_0^* = 22.04$ และ $b_0^* = 27.27$) มีค่า 20.03, 18.23 และ 15.47 ที่

ระดับอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มจะมีค่าลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yomsungnoen Y. [25] จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้รังควัตถุหรือสารให้สีถูกทำลายและสลายตัวได้ [4,25] โดยที่ไขมันชั้นที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสจะมีเม็ดสีเป็นสีเหลืองส้มซึ่งมีเม็ดสีไม่ต่างจากไขมันชั้นสดมากนัก ดังนั้นถ้าใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส จะมีความเหมาะสมและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสีในไขมันชั้นที่ผ่านการอบแห้ง

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของไขมันชั้นภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อน 1.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะมีความเหมาะสมในการอบแห้งมากที่สุด เนื่องจากสีที่เปลี่ยนแปลงไปจากไขมันชั้นสดมีค่าน้อยและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพื่อให้ได้ค่าความชื้นที่ต้องการมีค่าน้อยกว่าที่ใช้อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส [2,15] ผลจากการวิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้ง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Logarithmic มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งไขมันชั้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) มากที่สุด และค่าโคสแควร์ (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (MBE)

น้อยที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพของไขมันชั้นจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น โดยมีค่าพลังงานการกระตุ้นเท่ากับ 666.647 กิโลจูลต่อโมล และจากการวัดสีพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้ข้อมูลจากการศึกษาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการพัฒนาออกแบบระบบการอบแห้งให้มีความเหมาะสมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์พื้นฐาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิถีพีเดียสารานุกรมเสรี ไขมัน: เข้าถึงได้จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/> [เข้าถึงเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2566].
- [2] ปาริชาติ ราชมณี, สุธิดา พิทักษ์วินัย, วุฒิไกร บัวแก้ว. จลนพลศาสตร์การอบแห้งไขมันชั้นแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 2021; 17(2): 32-45.
- [3] Chindaraksa S, Bongkaew H, Wardkein P, Chantrawongphaisal B. Effect of hot air temperature on moisture reduction and drying time of turmeric in a closed-system herb dryer: kinetics and models. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023; 13:16272-16272.
- [4] พัทธกรณ อินริราย, ธวัชรัตน์ สัมฤทธิ์, วรลักษณ์ สุริวงษ์ สุรินทร์พร ชังไชย. การศึกษาการอบแห้งไขมันชั้นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารเกษตรพระวรุณ*. 2021;18(2): 87-96.
- [5] Teevgrathinam G, Pandiselvam R, Pandiarajan T, Preetha P, Krishnakumar T, Balahrishnan M, Ganapathy S, Amirtham D. Design development, and drying kinetics of infrared-assisted hot air dryer for turmeric slices. *Journal of Food Process Engineering*. 2021; 45(6): e13876.
- [6] Sharma S, Dhalsamant K, Tripathy PP, Manepally RK. Quality analysis and drying characteristics of

- turmeric (*Curcuma longa* L.) dried by hot air and direct solar dryers. *LWT Food Science and Technology*. 2021; 138: 110687.
- [7] Karthikeyan AK, Murugavelh S. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*. 2018; 128 (A): 305-312.
- [8] เนาวนิตย์ โพธิ์ศรี, พิมลพรรณ คงบุตร, เกียรติศักดิ์ อุดตมะตัง, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. อิทธิพลของอุณหภูมิ ต่อ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและสีของใบ สะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล สุวรรณภูมิ (มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์)*. 2556; 1(2): 103-114.
- [9] Crank. J. *The mathematics of diffusion*. London: Oxford University Press. 1975.
- [10] Saha G, Sharangi AB, Upadhyay TY, Al-Keridis LA. Dynamics of drying turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) with respect to its moisture, color, texture and quality. *Agronomy*. 2022; 12: 1420.
- [11] Venkateshwari T, Ganapathy S, Arulmari R, Vijayakumary P. Effect of drying temperature on the curcumin content turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.). *Pharma Innovation Journal*. 2021; 10: 1349-2351.
- [12] Alara OR, Abdurahman NH, Olalere OA. Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernonia amygdalina* leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2019; 18(3): 309-315.
- [13] AOAC. *Official Methods of Analysis (18th ed.)*, Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC. USA; 2010.
- [14] Phitakwinai S, Thepa S, Nilnont W. Thin layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science and Nutrition*. 2019; 7(9): 2921-2931.
- [15] กราตร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรม เครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552*. 2552 9.p.
- [16] Shekarau BS, Zakka T, Tswenma T, Yuguda TK, Udom PU. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of cashew apple pomace in hot air oven dryer. *Acta Period. Technology*. 2020; 51: 119-136.
- [17] Junior WF, Osvaldo R, Pinheiro GI, Lígia S, Souza DG, Sousa DK. Modelling and thermodynamic properties of the drying of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seeds. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2021; 25: 37-41.
- [18] Beye NF, Kane C, Ayessou N, Kebe CMF, Talla C, Diop CM, Sène A. Modelling the dehydration kinetics of four onion varieties in an oven and a solar greenhouse. *Heliyon*. 2019; 5(9): e02430.
- [19] Singh G, Arora S, Kumar S. Effect of mechanical drying air conditions on quality of turmeric powder. *Journal of Food Science and Technology*. 2021; 47: 347-350.
- [20] Nilnont W, Phitakwinai S. Drying kinetics of mango using solar tunnel dryer. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*. 2020; 30(1): 36-47.
- [21] Komonsing N, Khuwijitjaru P, Nagle M, Muller J, Mahayothee B. Effect of drying temperature together with light on drying characteristics and bioactive compounds in turmeric slice. *Journal of Food Engineering*. 2022; 317: 110695.
- [22] Taskin O, Nazmi I. Effect of microwave, infrared and freeze drying methods on drying kinetics, effective moisture diffusivity and color properties of turmeric. *Journal of Agricultural Science*. 2019; 25: 334-345.

- [23] Luka BS, Vihikwagh QM, Ngabea SA, Mactony MJ, Zakka R, Yuguda TK, et al. Convective and microwave drying kinetics of white cabbage (*Brassica oleracea* var capitata L.): mathematical modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023; 12:100605.
- [24] Khater ES. Effect of drying systems on the parameters and quality of dried basil. *Annal of Agriculture Science Moshtohor Journal*. 2020; 58: 261-271.
- [25] Yomsungnoen Y, Waiprib Y, Tongta A. Effects of temperature and velocity of superheated steam on moisture content and color of dried turmeric. *Agricultural Science Journal*. 2014; 45(2): 697-700.