



จลนพลศาสตร์การอบแห้งไขมันชั้นแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

ปาริชาติ ราชมณี¹ สุธิดา พิทักษ์วิชัย² วาณิช นิลนนท์³ และ วุฒิกไร บัวแก้ว^{4*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร, คณะเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: wutthikrai.b@rmutr.ac.th

วันที่รับบทความ: 20 มกราคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 15 พฤษภาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 17 พฤษภาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 16 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งไขมันชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 40 50 60 และ 70 °C ความเร็วลมประมาณ 1 m/s จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นของไขมันชั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 3.28×10^{-11} ถึง 1.67×10^{-10} m²/s พารามิเตอร์สี่ L* (ความสว่าง) a* (ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว) และ b* (ค่าสีเหลือง/สีน้ำเงิน) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการอบแห้ง ค่า L*, a* และ b* ของไขมันชั้นอบแห้งมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ปริมาณสารเคอร์คิวมินของไขมันสดและไขมันแห้งซึ่งถูกทำให้แห้งในอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลต่อการลดปริมาณเคอร์คิวมิน ในการทดลองนี้ปริมาณเคอร์คิวมินของไขมันชั้นแห้งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของยาสมุนไพร

คำสำคัญ: ไขมันชั้น; จลนพลศาสตร์การอบแห้ง; ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น; เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

Thin Layer Drying Kinetics of Turmeric using Hot Air Dryer

Parichat Ratmanee¹, Sutida Phitakwinai², Wanich Nilnont³ and Wutthikrai Buakaew^{4*}

¹ Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology,
Rajabhat Mahasarakham University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of
Technology Suvarnabhumi

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

⁴ Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Rattanakosin

* Corresponding author, E-mail: wutthikrai.b@rmutr.ac.th

Received: 20 January 2021; Revised 15 May 2021; Accepted: 17 May 2021

Online Published: 16 June 2021

Abstract: This research aims to study the drying kinetics of turmeric using a hot air dryer to investigate the effective moisture diffusivity. The drying temperatures of turmeric are 40, 50, 60 and 70 °C. The air velocity is approximately 1 m/s. The results showed that the effective moisture diffusivity of turmeric was between 3.28×10^{-11} to 1.67×10^{-10} m²/s. Color parameters L* (lightness), a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness) were used to estimate color changes during drying. L*, a* and b* values of dried turmeric decreased as the drying temperature increased. In addition, the curcumin content of fresh turmeric and dried turmeric, which were dried at various temperatures, were analyzed. It was found that affected the reduction of the curcumin content. In this experiment, the curcumin content of dried turmeric is still within the standard of herbal medicine.

Keywords: Turmeric; Drying kinetics; Effective moisture diffusivity; Hot air dryer



1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยได้มีความร่วมมือระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนในการจัดทำแผนแม่บทแห่งชาติ ว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย ฉบับที่ 1 พ.ศ.2560–2564 [1] เพื่อสร้างความมั่นคงทางสุขภาพและความยั่งยืนของเศรษฐกิจที่สามารถแก้ปัญหาพัฒนา และส่งเสริมสมุนไพรไทยให้ไปไกลระดับโลกได้อย่างมีมาตรฐาน ซึ่งขมิ้นชัน (Turmeric) เป็นหนึ่งในพืชสมุนไพรที่เป็น Product Champions ของประเทศที่รัฐบาลให้การสนับสนุน [2] ขมิ้นชันมีสารประกอบทางเคมีที่แสดงฤทธิ์ทางเภสัชวิทยามีอยู่ 2 ชนิด คือ น้ำมันหอมระเหย (Essential Oil) และสารเคอร์คิวมินอยด์ (Curcuminoids) ภายในสารเคอร์คิวมินอยด์นั้นประกอบด้วยสารหลักอยู่ 3 ชนิด คือ เคอร์คูมิน (Curcumin, CUR) ดีเมท็อกซีเคอร์คูมิน (Demethoxycurcumin, DMC) และบิสดีเมท็อกซีเคอร์คูมิน (Bisdemethoxycurcumin, BDMC) โดยมีสมบัติเป็นสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง และอื่น ๆ [3] จึงนำขมิ้นชันมาใช้ประโยชน์ทั้งด้านอาหาร ยา รักษาโรค เครื่องสำอาง [4-7] ขมิ้นชันสามารถนำมาใช้บริโภคได้ทั้งแบบสดและแบบที่ผ่านการแปรรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การทำแห้ง การสกัดสาร และการกลั่นน้ำมันหอมระเหย ซึ่งการทำแห้งเป็นกระบวนการที่ลดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเชิงกล [8-11] การอบแห้งด้วยพลังงานร่วม [12-13] การตากแดดธรรมชาติ [11, 14-15] และการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ [16-19] ที่มีอุปกรณ์ในการเปลี่ยนรูป

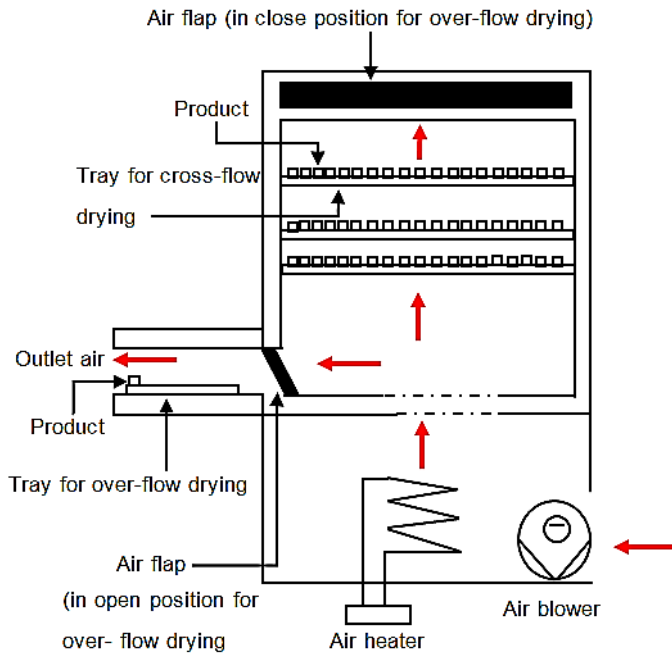
พลังงานรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่เรียกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) [20-21]

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งของผลิตภัณฑ์มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา ซึ่งจะทำให้ระบุเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ นอกจากนั้นแล้วยังเป็นข้อมูลสำคัญในการสร้างแบบจำลองเอมพิริคัลซึ่งมักอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้ง โดยที่อัตราส่วนความชื้นมีความสำคัญในแบบจำลองการแพร่ของเหลวซึ่งเป็นการเลียนแบบกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's Second Law of Diffusion) [22] ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาในรูปแบบจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบเครื่องอบแห้งและทำการหาสารเคอร์คูมินที่ออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยมีอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งอยู่ระหว่าง 40 – 70 °C

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

ในการทดลองอบแห้ง ขมิ้นชันจะถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งประกอบด้วยชุดลดความร้อนแบบ Air Heater พัดลม (Air Blower) และส่วนของอุปกรณ์ที่ทำการอบแห้ง (Drying Section) การทำงานของเครื่องอบแห้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยเริ่มจากพัดลมทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอก



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

ผ่านขดลวดความร้อนแบบ Air Heater เพื่อปรับอุณหภูมิให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นอากาศร้อนจะไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่บนถาด เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนนี้สามารถอบแห้งได้ 2 แบบ คือ การอบแห้งแบบชั้นบางแบบ Parallel Flow ซึ่งเป็นแบบที่ใช้สำหรับการทดลองนี้และการอบแห้งแบบ Cross Flow ถ้าต้องการอบแห้งแบบชั้นบางแบบ Parallel Flow จะปิดฝาเครื่องด้านบน (Air Flap) เพื่อไม่ให้อากาศออกทางด้านบนให้ออกทางด้านข้างเพียงด้านเดียว ซึ่งห้องอบแห้งชั้นบางจะอยู่ทางด้านซ้ายของเครื่องอบแห้ง แต่ถ้าต้องการการอบแห้งแบบ Cross Flow จะปิดฝาเครื่องด้านข้าง (Air Flap) เพื่อไม่ให้อากาศออกทางด้านข้างให้ออกทางด้านบนเพียงด้านเดียว

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง ด้วยอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 40 50 60 และ 70 °C และใช้ความเร็วลมที่ประมาณ 1 m/s เนื่องจากขมิ้นชันเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีความชื้นไม่สูงมากนัก จึงมีผลทำให้กระบวนการอบแห้งมีการลดลงของความชื้นเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ซึ่งอัตราการระเหยน้ำจะขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำภายในผลิตภัณฑ์ โดยการถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นที่ผิวอย่างเดียว ดังนั้นความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องมีค่าที่สูง



ในส่วนอุณหภูมิของการอบแห้งนั้น อุณหภูมิของผลิตผลจะมีค่าเพิ่มเติมตามอุณหภูมิของอากาศร้อนซึ่งในกรณีการอบแห้งผลิตผลที่เป็นอาหารและวัสดุชีวภาพส่วนใหญ่มักอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จึงใช้อุณหภูมิอากาศร้อนที่อบแห้งที่ค่อนข้างต่ำเพื่อให้สอดคล้องกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลของน้ำ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในด้านคุณภาพของผลิตผลที่ได้จากการอบแห้ง [23]

ในการเตรียมตัวอย่างทดลองให้นำไขมันชั้นมาล้างเอาชีส์ฝุ่นและสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำไขมันชั้นมาลอกเปลือกและหั่นให้มีความหนาประมาณ 3 mm แล้วนำไขมันชั้นวางเรียงกระจายบนถาดไม่วางซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 และทำการชั่งมวล โดยแต่ละถาดมีมวลไขมันชั้นประมาณ 300 g การทดลองนี้จะอบแห้งจนกระทั่งมวลของไขมันชั้นคงที่ซึ่งได้ทำการชั่งมวลทุก ๆ 15 นาที หลังจากนั้นนำมวลไขมันชั้นนั้นไปอบแห้งในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC [24] เพื่อหามวลแห้งของไขมันชั้นและนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นระหว่างการอบแห้งต่อไป

ภายในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งไขมันชั้นได้ติดตั้งเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ประกอบด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ชนิด K มีค่าความแม่นยำ 0.1°C ในการชั่งมวลของไขมันชั้นระหว่างการอบแห้งใช้เครื่องชั่งแบบ Electronic Balance มีขนาดความสามารถ 3000 g ค่าความแม่นยำ 0.01 กรัม การวัดความเร็วอากาศใช้เครื่องมือวัดแบบ Anemometer ชนิด Hot Wire ของ Emtech รุ่น 45158 ค่าความแม่นยำ $\pm 3\%$



รูปที่ 2 ไขมันชั้นที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเทียบกับเวลา อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใด ๆ [22-25] เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (1)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%d.b.), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใด ๆ (%d.b.) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b.) ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เกิดภาวะสมดุลระหว่างไอน้ำในวัสดุและไอน้ำในอากาศ หรือกล่าวได้ว่าเป็นภาวะที่ไอน้ำไม่ระเหยออกจากวัสดุเนื่องจากมีภาวะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่รอบ ๆ วัสดุนั้น กรณีสภาพอากาศที่ใช้อบแห้งต่างกันจะมีความชื้นสมดุลที่ต่างกัน การอบแห้งที่ใช้เวลายาวนานพบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุจะมีค่ามากกว่าความชื้นสมดุลมาก ๆ ทำให้สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการ (2) [22, 26] และ



ความชื้นของวัสดุตามมาตรฐานแห้งหาได้จากสมการ (3)

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

$$M = \frac{m_i - m_d}{m_d} \quad (3)$$

เมื่อ M คือความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (%), m_i คือมวลเริ่มต้น (kg) และ m_d คือมวลแห้งของวัสดุ (kg)

2.4 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (Effective Moisture Diffusivity, D_{eff}) ของขม้นชั้นในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำการวิเคราะห์โดยมีสมมติฐานการถ่ายเทความชื้นที่เป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's Diffusion) ซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความชื้นจากภายในวัสดุมายังผิวด้วยสมบัตการแพร่ยังผลของความชื้นเพียงอย่างเดียว โดยมีการแปรค่าของความชื้นที่จุดต่าง ๆ ในวัสดุที่เป็นไปตามสมการแพร่ของฟิคส์ [22] ดังนี้

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

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นในวัสดุ (m^2/s) และ t คือเวลาในการอบแห้ง (s)

ในการหาการแปรค่าของความชื้นตามตำแหน่งในช่วงเวลาการอบแห้งสามารถหาผลเฉลยได้ด้วยวิธีแบบวิเคราะห์ (Analytical Solution) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นมีค่าคงที่ตลอดในช่วงเวลาการอบแห้ง ความชื้นมีการเคลื่อนที่ออก

จากวัสดุเป็นแบบหนึ่งมิติ ไม่คิดการหดตัวของวัสดุ ในกรณีวัสดุเป็นแผ่นเรียบสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ [22, 27]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

โดยที่เมื่อแทนค่า n ในสมการ (5) จะพบว่า $n = 1, 2, 3$ ขึ้นไปจะได้พจน์ที่มีค่าน้อยลงตามลำดับ ดังนั้นจึงแทนค่า $n = 0$ ลงในสมการ (5) ทำให้ได้สมการ MR ที่มีความสัมพันธ์กับสมบัตการแพร่ยังผลของความชื้นดังนี้ [28]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

เมื่อ L คือครึ่งส่วนของความหนาชั้นขม้นชั้น (m) สมการ (6) ทำการจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงรูปมาตรฐาน ($y = mx \pm c$) ที่อยู่ในรูปของ Logarithmic ดังนี้

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

จากสมการ (7) จะเห็นได้ว่า $-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$ คือความชันของกราฟที่มีค่าลดลงเมื่อเวลา t เพิ่มขึ้น และ $\ln \frac{8}{\pi^2}$ คือจุดตัดบนแกน $+y$ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln MR$ ที่มีความสัมพันธ์กับ t สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นได้จากสมการดังนี้

$$D_{eff} = (\text{slope}) \frac{4L^2}{\pi^2} \quad (8)$$



2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้านสี

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้านสี ด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) ของ Hunter Lab รุ่น ColorFlex EZ ทำการทดสอบวัดค่าสีขึ้นตัวอย่างไขมันชั้นซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C จำนวน 5 ซ้ำ ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเขียว-สีแดง (a^*) ค่าสีน้ำเงิน-สีเหลือง (b^*) ซึ่งค่า L^* ที่เข้าใกล้ 100 หมายถึงตัวอย่างมีความสว่างมากจนเป็นสีขาวหรือ สีจาง แต่ถ้าค่า L^* เข้าใกล้ 0 หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างน้อยลงจนเป็นสีดำ ส่วนค่า a^* ที่เป็นบวก แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีแดง แต่ค่า a^* ที่เป็นลบ แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีเขียว และในค่า b^* ที่เป็นบวกแสดงว่าตัวอย่างเป็นสีเหลือง แต่ถ้าค่า b^* เป็นลบแสดงว่าตัวอย่างเป็นสีน้ำเงิน [29]

2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณสารเคอร์คูมิน

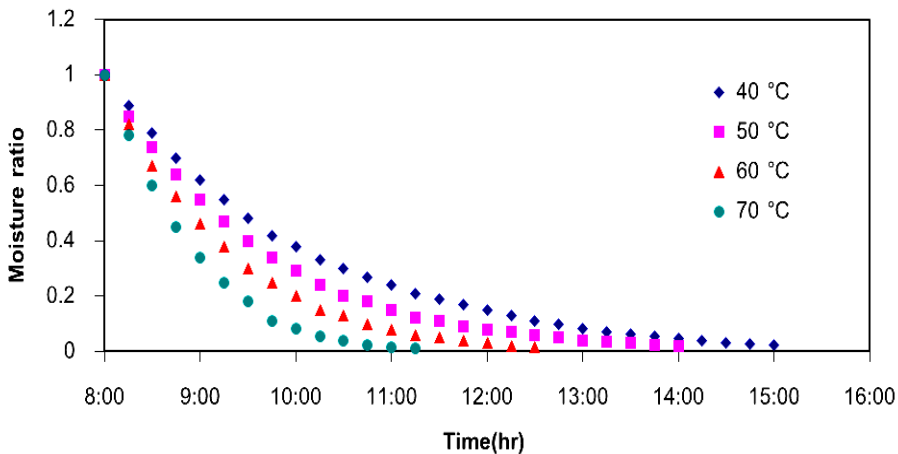
ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารเคอร์คูมิน ด้วยการสกัดสารเคอร์คูมินในไขมันชั้น โดยนำไขมันชั้นปริมาณ 0.3 g ละลายใน 95% เอทานอลปริมาตร 10 ml เก็บไว้ที่ขวดสีชาปิดฝาให้สนิท วางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 หลังจากนั้นบีบเอาตัวอย่างจากขวดสีชามา 0.2 ml ใส่ในปิเปตเจอร์ขนาด 15 ml แล้วเติมตัวทำละลาย 95% เอทานอลปริมาตร 5 ml หลังจากนั้นบีบเอา 0.2 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 10 ml แล้วปรับปริมาตรตัวทำละลาย 95% เอทานอลปริมาตร 10 ml นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเคอร์คูมินที่สกัดได้โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น

425 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของสารสกัดเคอร์คูมินที่วัดได้จากนั้นนำไปทำกราฟมาตรฐาน [30]

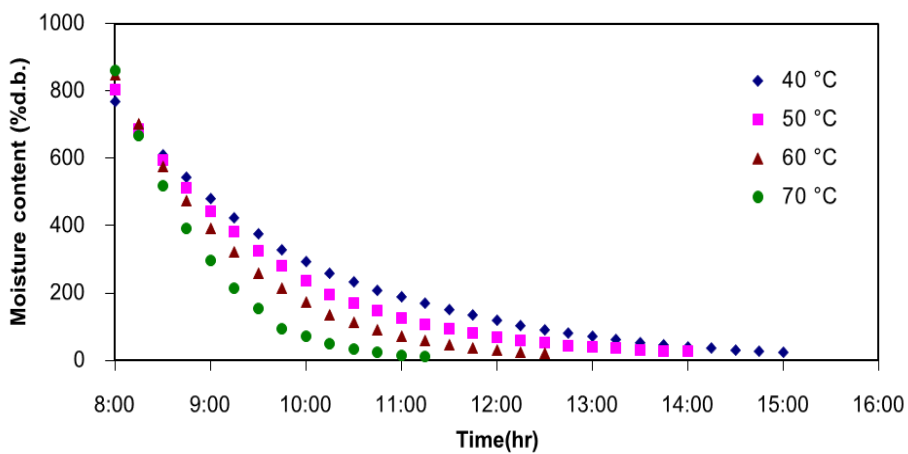
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทำการอบแห้งไขมันชั้น ซึ่งทำการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของอากาศอบแห้ง โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C และความเร็วของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 m/s โดยใช้ตัวอย่างของไขมันชั้นที่มีมวลเริ่มต้นในการอบแห้งจำนวน 300 g ทำการชั่งทุก ๆ 15 นาทีจนกระทั่งมวลของไขมันชั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่าตลอดระยะเวลาในการอบแห้งไขมันชั้นนั้นจะมีอัตราการลดลงของความชื้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราเปลี่ยนแปลงความชื้นในไขมันชั้นในช่วงระยะเริ่มต้นจะมีค่าสูงหรือปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการลดลงของปริมาณความชื้นฐานแห้งเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และรูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในรูปอัตราส่วนความชื้นที่เป็นการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้งเทียบกับความชื้นเริ่มต้น โดยที่อัตราส่วนความชื้นจะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (D_{eff}) น้ำที่อยู่ในไขมันชั้นจะมีอยู่มาก เมื่ออากาศร้อนที่มีค่าความชื้นจำเพาะคงที่แต่ค่าความจุความชื้นสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิมาสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งขมิ้นชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4 การอบแห้งขมิ้นชันแบบชั้นบางที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จะเกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากอากาศมายังผลิตภัณฑ์ โดยความร้อนนี้จะทำให้พลังงานที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำที่ผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์สู่ผิวด้วยการแพร่และระเหยออกสู่อากาศอบแห้ง ทำให้ความชื้นจำเพาะและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอบแห้งมีปริมาณสูงขึ้น ในขณะที่

อุณหภูมิของอากาศที่ภาวะนี้มีค่าลดต่ำลงก่อนออกจากเครื่องอบแห้ง ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมอบแห้งที่สูงจะใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุด ซึ่งอุณหภูมิมอบแห้ง 70 °C จะใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง 15 นาที โดยผลการทดลองดังกล่าวมีผลที่สอดคล้องกับการอบแห้งกาแฟ [31] และการอบแห้งมะม่วงสุก [27]



3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (Effective Moisture Diffusivity, D_{eff}) ของขมิ้นชันในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่หาจากสมการแพร่ของฟิคส์ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 3.28×10^{-11} m²/s และ 1.67×10^{-10} m²/s ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นที่ได้นี้เป็นค่าที่อยู่ในช่วงของสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของอาหารประเภทผักและผลไม้ที่มีการอบแห้งโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-8} m²/s ถึง 10^{-12} m²/s [32] จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นนี้มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนที่มีค่าสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิของการอบแห้งนี้จะไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำที่มีผลทำให้โมเลกุลเป็นอิสระต่อกันเพิ่มขึ้นและแพร่ออกมาที่อากาศอบแห้งได้มากตามระดับอุณหภูมิอบแห้ง

3.3 คุณภาพสีของขมิ้นชัน

การทดสอบคุณภาพสีของขมิ้นชันทั้งก่อนและหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดสีอาหารยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น ColorFlex EZ โดยวัดวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นชันอบแห้งในเทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* ทำการวัดสีตัวอย่าง 5 ซ้ำ ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าขมิ้นสดเทียบกับขมิ้นอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในการอบแห้งจะส่งผลต่อ คุณภาพสีของขมิ้นชัน คือ ค่าความสว่างหรือมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดงหรือเขียว (a^*) และค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

| Temperature (°C) | Diffusivity (m ² /s) |
|------------------|---------------------------------|
| 40 | 3.28×10^{-11} |
| 50 | 4.38×10^{-11} |
| 60 | 9.02×10^{-11} |
| 70 | 1.67×10^{-10} |

เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น จะส่งผลต่อคุณภาพสีของขมิ้นชัน ซึ่งค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มที่จะลดลงที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yomsungnoen [33] จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลทำให้รงควัตถุหรือสารให้สีถูกทำลายและสลายตัวได้ ความร้อนการอบแห้งจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำและความชื้น รวมทั้งมีการสลายตัวและการรวมตัวของกรดอะมิโนกับสารประกอบรีดิวซ์ซึ่งในระหว่างการอบแห้งจะมีการเคลื่อนที่ของไอน้ำและความชื้นผ่านชั้นผิวของวัตถุดิบเกิดเป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวกับเอนไซม์ (Non-enzymatic Browning Reaction) เป็นการเกิด ปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) กับกรดอะมิโนโปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์อบแห้งมีสีเข้มขึ้น และโดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์และเวลาในการอบแห้ง ซึ่งการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [34]



ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นสดเทียบกับขมิ้นที่อบแห้งจากสภาวะต่างกัน

| ตัวอย่าง | ค่าสี | | |
|----------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | L* | a* | b* |
| ขมิ้นสด | 43.55 ± 2.39 ^{bc} | 29.89 ± 1.57 ^a | 48.95 ± 2.46 ^{bc} |
| อุณหภูมิ 40 °C | 48.85 ± 0.70 ^a | 30.09 ± 1.34 ^a | 53.23 ± 0.81 ^a |
| อุณหภูมิ 50 °C | 47.43 ± 2.56 ^a | 26.34 ± 1.54 ^b | 49.73 ± 2.92 ^b |
| อุณหภูมิ 60 °C | 40.67 ± 2.34 ^c | 24.48 ± 0.81 ^c | 45.88 ± 2.33 ^c |
| อุณหภูมิ 70 °C | 39.13 ± 3.48 ^d | 23.21 ± 0.84 ^c | 41.91 ± 3.81 ^d |

หมายเหตุ : a, b, c, d = ตัวอักษรกำกับของตัวเลขที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.4 ปริมาณสารเคอร์คูมินในขมิ้นชั้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารเคอร์คูมินขมิ้นสดและขมิ้นที่อบแห้งในสภาวะต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อปริมาณสารเคอร์คูมิน อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อปริมาณสารเคอร์คูมินลดลงที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่ความร้อนในการอบแห้ง มีผลต่อการทำลายผนังเซลล์พืช ทำให้เมื่อนำขมิ้นชั้นที่ผ่านการอบแห้งมาสกัดเพื่อหาสารเคอร์คูมิน จึงสามารถสกัดสารออกมาได้มาก ซึ่งการอบแห้งขมิ้นชั้นที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C มีผลต่อปริมาณสารเคอร์คูมินที่สกัดได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิที่อบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณสารเคอร์คูมินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่อุณหภูมิที่อบแห้งที่ 40 °C มีปริมาณสารเคอร์คูมินมากที่สุด อยู่ที่ 4.526 ± 0.19 ซึ่งการอบแห้งเป็นการให้ความร้อนที่สัมผัสโดยตรงจะส่งผลต่อการสลายของสารเคอร์คูมิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Suresh et al. [35] และอุณหภูมิที่แตกต่างในการอบแห้ง เมื่อเทียบปริมาณ

สารเคอร์คูมินที่พบในขมิ้นชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนกับมาตรฐานยาสมุนไพรไทย ซึ่งกำหนดให้วัตถุขมิ้นชั้นที่เป็นผงแห้งต้องมีปริมาณเคอร์คูมิน

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ปริมาณสารเคอร์คูมินที่สกัดจากขมิ้นสดและขมิ้นที่อบแห้งจากสภาวะต่างกัน

| ตัวอย่าง | ปริมาณสารเคอร์คูมิน (mg/L) |
|----------------|----------------------------|
| ขมิ้นสด | 0.724 ± 0.19 ^e |
| อุณหภูมิ 40 °C | 4.526 ± 0.19 ^a |
| อุณหภูมิ 50 °C | 3.369 ± 0.19 ^b |
| อุณหภูมิ 60 °C | 2.597 ± 0.07 ^c |
| อุณหภูมิ 70 °C | 2.493 ± 0.18 ^d |

หมายเหตุ : a, b, c, d = ตัวอักษรกำกับของตัวเลขที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



4. บทสรุป

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนที่มีอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 60 และ 70 °C พบว่าอัตราการลดลงของความชื้นจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยสุด และมีอัตราการอบแห้งแบบลดลงเพียงอย่างเดียว สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (D_{eff}) ของขมิ้นชันที่หาได้จากแบบจำลองของ Fick's diffusion พบว่ามีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 70 °C โดยมีค่า $1.67 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ 40 °C โดยมีค่า $3.28 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ในส่วนของค่าสี ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น และปริมาณสารเคอร์คูมินพบว่ามีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานยาสมุนไพรในการใช้อุณหภูมิการอบแห้งทั้ง 4 ระดับอุณหภูมิ ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้ข้อมูลที่ได้ออกมาทดลองนี้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการพัฒนาออกแบบระบบอบแห้งให้มีความเหมาะสมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย ตลอดจนสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับดำเนินการทดลอง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] https://www.dtam.moph.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=1672%3Adl0021&catid=42&Itemid=334&lang=th&fbclid=IwAR33GYWmnyKi75lr5o1v5t7uLyF0MMaZ7olwIXSrvxNFEa78Mh3HGifrh2l (Accessed on 14 June 2021), (In Thai)
- [2] https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/607229/607229.pdf&title=607229&cate=1143&d=0 (Accessed on 14 June 2021), (In Thai)
- [3] C. Changtam, Usefulness and various biological activities of *Curcuma longa* L., Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal, 2015, 1(2), 94-109. (In Thai)
- [4] H.P. Ammon and M.A. Wahl, Pharmacology of curcuma longa, *Planta Medica*, 1991, 57(1), 1-7.
- [5] P.R. Waghmare, P.G. Kakade, P.L. Takdhat, A.M. Nagrale, S.M. Thakare, and M.M. Parate, Turmeric as medicinal plant for the treatment of acne vulgaris, *PharmaTutor*, 2017, 5(4), 19-27.
- [6] C. Swaddichai and S. Im-iam, Turmeric, *The Journal of Prapokkiao Hospital Clinical Medical Education Center*, 2016, 33(3), 265-270. (In Thai)



- [7] S. Onsurathum, S. Pinlaor and T. Boonmars Effect of curcumin on opisthorchiasis and cholangiocarcinoma in animal models, Srinagarind Medical Journal, 2012, 27(supplement), 389-396. (In Thai)
- [8] C. Niamnuy, J. Siwawut and R. Kadeedang (2012) Kinetics of Drying and Phenolic Compound Changes of *Centella asiatica* (Linn.) Urban During Hot Air Drying, Agricultural Science Journal, 43(3), 208-211. (In Thai)
- [9] P. Toomthong and U. Teeboonma (2010) Drying Kinetic and Diffusion Coefficient of *Tilapia Nilotica*, UBU Engineering Journal, 3(2), 9-16. (In Thai)
- [10] N. Phosee, P. Khongbutr, K. Uttamating and R. Assawarachan, Effect of temperature on moisture ratio and color changes of mint leaves during hot air drying process, RMUTSB Academic Journal, 2013, 1(2), 103-114. (In Thai)
- [11] S. Sharma, K. Dhalsamant, P.P. Tripathy and R.K. Manepally, 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.
- [12] N. Seanmeema, N. Poomsa-ad, and L. Wiset, Curcumin drying by heat pump dryer, Journal of Science and Technology Mahasarakham University, 2013, 32(5), 631-635. (In Thai)
- [13] N. Krachang and N. Uengkimbuan, Kinetics and modeling of turmeric using hot air and infrared drying, Burapha Science Journal, 2016, 21(3), 239-248. (In Thai)
- [14] J. Prasad and V.K. Vijay, Open sun drying of *tinospora cordifolia*, *Curcuma longa* L. and *zingiber officinale*. Thermal analysis, Food Science and Technology International, 2005, 11(6), 409-416.
- [15] H. Essalhi, M. Benchrifa, R. Tadili, and M.N. Bargach, Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun, Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 49, 58-64.
- [16] A.K. Karthikeyan and S. Murugavelh, Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer, Renewable Energy, 2018, 128(Part A), 305-312.



- [17] D.K. Rabha, P. Muthukumar and C. Somayaji, Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger, *Renewable Energy*, 2017, 105, 764-773.
- [18] S. Janjai, N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, J. Müller, B. K. Bala and M. Nagle, Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, *Solar Energy*, 2009, 83(9), 1550–1565.
- [19] W. Nilnont and S. Phitakwinai, Energy and exergy potential assessment of solar tunnel dryer, *Engineering Journal of Research and Development*, 2019, 30(3), 91-107. (In Thai)
- [20] S. Puban and V. Chantawong, Drying of katoy squid using solar thermal energy, *The Journal of Industrial Technology*, 2015, 11(1), 78 – 87. (in Thai)
- [21] W. Nilnont and S. Phitakwinai, Performance assessment of flat plate solar collector, *The Journal of Industrial Technology*, 2018, 14(3), 116-137. (In Thai)
- [22] J. Crank, *The mathematics of diffusion*. 2nd ed., Oxford University Press, London, 1975.
- [23] S. Devahastin, *Drying of foods and biomaterials*, Top publishing Co., Ltd., Bangkok, 2012.
- [24] AOAC. *Official methods of analysis*, 18th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC. 2006.
- [25] I. Doymaz, Drying behaviour of green beans, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(2), 161-165.
- [26] B.K. Bala, *Drying and storage of cereal grains*. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 1997.
- [27] W. Nilnont and S. Phitakwinai, Drying kinetics of mango using solar tunnel dryer, *The Journal of KMUTNB*, 2020, 30(1), 36-47. (In Thai)
- [28] D. Evin, Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L., *Food and Bioproducts Processing*, 2012, 90(2), 323–332.
- [29] A. Hamathulin, S. Simla, S. Boontang and S. Inchuen, Relationship between color value and anthocyanin content in purple waxy corn germplasm, *Khon Kaen Agriculture Journal*, 2012, 40(supplement), 59-64. (In Thai)
- [30] J. Kamfu and K. Jamjang, Determination of Curcumin from *Alpinia galangal*, *Boesenbergia rotunda*, The 5th Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference, Proceeding, 2018, 642-647. (In Thai)



- [31] S. Phitakwinai, S. Thepa and W. Nilnont, Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity, 2019, Food Science and Nutrition, 7(9), 2921-2931.
- [32] I. Doymaz, Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (Diospyros kaki L.), Energy Conversion and Management, 2012, 56, 199-205.
- [33] Y. Yomsungnoen, Y. Waiprib, and A. Tongta, Effects of temperature and velocity of superheated steam on moisture content and color of dried turmeric, Agricultural Science Journal, 2014, 45(2, supplement), 697-700. (In Thai)
- [34] N. Ratanapanon, Non-enzymatic browning, Food Chemistry Book, Odeonstore, Bangkok, 2002, pp. 321.
- [35] D. Suresh, H. Manjunatha, and K. Srinivasan, Effect of heat processing of spices on the concentrations of their bioactive principles: Turmeric (*Curcuma longa*), red pepper (*Capsicum annuum*) and black pepper (*Piper nigrum*), Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 20(3-4), 346–351.