

การอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ Arrowroot Flour Drying Using Solar Drying Dome

ศรีมา แจ้คำ^{1*} กิตติศักดิ์ วีนันทกิตต์¹ รินจง เสริมศรี²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²วิสาหกิจชุมชนบ้านมาบหม้อ 26/3 ม.7 ต.บ้านปึก อ.เมือง จ.ชลบุรี 20130

Srima Jaekhom^{1*} Kittisak Witanantakit¹ Rinjong Sermsri²

¹Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Choburi 20110

²Ban Map Mo Community Enterprise Group

26/3 Moo 7 Ban Puek Subdistrict, Muang District, Choburi 20130

*Corresponding author Email: srima_j@hotmail.com

(Received: April 15, 2021; Accepted: July 7, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานราก ทำการทดลองอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพด้านสี ปริมาณน้ำอิสระ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ทำการอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมจากความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 80 มาตรฐานแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งโดยใช้โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการตากแดดแบบธรรมชาติ สามารถอบแห้งได้เร็วกว่าประมาณ 2-4 ชั่วโมง คุณภาพด้านสีอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ยอมรับได้ สำหรับปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0.478-0.493 ส่วนการตากแดดอยู่ในช่วง 0.495-0.548 ซึ่งให้ค่าไม่เกิน 0.6 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้งที่สามารถเก็บรักษาได้ทั้ง 2 วิธีการ นอกจากนี้สามารถอบแห้งเอมพิริคัลของเวอร์มาและคณะสามารถให้ผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด

คำสำคัญ: แป้งเท้ายายม่อม โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ABSTRACT

This article was a research and innovation project to transfer technology to the founding community. This research was to drying arrowroot flour with solar drying dome compared with traditional sun exposure drying method. The objective of this research was to study of drying kinetic, color quality, water activity and to develop empirical mathematical modeling for predicting drying

kinetic. The research was conducted by initial moisture of arrowroot flour at about 80% d.b. (dry basis) and was dried until final moisture at about 15% d.b. The results found that drying rate of arrowroot flour by solar drying dome is higher than by traditional sun exposure method. Arrowroot flour dried by solar drying dome is achieved faster than traditional sun exposure about 2-4 hours. Color quality is good and acceptable. The water activity of dried arrowroot by solar drying dome was approximately 0.478-0.493 while the sun exposure was about 0.495-0.548 with water activity within 0.6, which is the standard of dry food storage, in both methods. In addition, the Verma et al.'s empirical equation of mathematical modeling is the best equation for predicting of drying kinetic of arrowroot flour which the highest coefficient of determination, the lowest root mean square error and sum of squared error.

Keyword: Arrowroot flour, solar drying dome, mathematical modeling.

1. บทนำ

เท้ายายม่อม (Arrowroot) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Tacca leontopetaloides* เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุหลายปี จัดเป็นพืชในวงศ์ Taccaceae ซึ่งเป็นวงศ์เดียวกันกับต้นกลอย มีเขตกระจายพันธุ์อยู่ในแถบแอฟริกา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หมู่เกาะแปซิฟิก และออสเตรเลีย มักเจริญเติบโตอยู่ได้ร่มไม้ในป่าดิบแล้ง ป่าผลัดใบ หรือตามป่าชายหาด ในประเทศไทยสามารถพบได้มากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ [1] แป้งที่ได้จากหัวเท้ายายม่อมสามารถนำไปใช้ประกอบในอาหารคาวหวานและทำขนมได้หลายชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้อาหารมีความเหนียวและใสเป็นมันวาวดีกว่าแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง จึงมักนิยมผสมแป้งเท้ายายม่อมลงไปแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด แป้งถั่วเขียว แป้งเผือก แป้งสาลี และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น [2]

ในส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย วิสาหกิจชุมชนบ้านมาบหม้อ ตำบลบ้านปึก จังหวัดชลบุรี เกษตรกรนิยมปลูกต้นเท้ายายม่อมค่อนข้างมากเพื่อการจำหน่ายและการประกอบอาหารบางส่วน วิธีการทำแป้งเท้ายายม่อมแบบพื้นบ้านนั้น จะต้องอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิต ซึ่งทางชุมชนใช้วิธีการตากแดด โดยต้องใช้เวลาอบแห้งนานประมาณ 4-5 วัน ขึ้นอยู่กับความชื้นของรังสีแสงอาทิตย์ และผลิตภัณฑ์ต้องสัมผัสกับฝุ่นละอองต่างๆ ในอากาศ เชื้อ

แบคทีเรียที่ตาเปล่ามองไม่เห็น เวลาฝนตกหรือไม่มีแสงแดดการเก็บรักษาก็ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากจะเกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นทางชุมชนจึงมีความต้องการที่จะลดระยะเวลาในการอบแห้งลง โดยที่ไม่เพิ่มค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำแห้งดังกล่าวมากนัก กระบวนการทำแห้งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปเช่น การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ [3] และการอบแห้งแบบป้อนความร้อน [4] เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อน แต่มีการสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างสูง การอบแห้งระบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เหมาะกับผลิตภัณฑ์จำพวกเนื้อสัตว์หรืออาหารทะเล เนื่องจากสามารถใช้ความร้อนสูงในการอบแห้งได้ [5] แต่ก็มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงเช่นกัน สำหรับการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบอบแห้งนั้นมีต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำ และเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกับเกษตรกรทั่วไปเนื่องจากระบบการทำงานไม่ซับซ้อน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ได้มีการศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกพบว่าสามารถลดความชื้นปลานิลจาก 80.0% w.b. (wet basis; มาตรฐานเปียก) จนเหลือ 25.8% w.b. สามารถลดความชื้นได้มากกว่าการตากแดดธรรมชาติถึง 6.2% w.b. นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของการเตรียมปลานิลส่งผลต่อค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี แต่ไม่ส่งผล

ต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [6] การศึกษาประสิทธิภาพโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมจากอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่แข็ง พบว่าระบบความร้อนเสริมมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าโดยเฉลี่ย 29.74% ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า คือ 2 วัน ในขณะที่การอบแห้งด้วยระบบโรงเรือนและการตากแดดใช้เวลา 3 และ 6 วัน ตามลำดับ [7] การใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเครื่องอบลมร้อนแบบชั้นวาง โดยใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการทำแห้งถือว่าเป็นพลังงานสะอาดและประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้ LPG เพียงอย่างเดียว การใช้ระบบผสมผสานนี้สามารถแก้ปัญหาระยะเวลาในการอบแห้งได้กรณีที่ไม่แดดไม่เพียงพอ [8] นอกจากนี้ยังมีการสร้างเครื่องอบแห้งโรงเรือนแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ใช้โพลีคาร์บอเนต โดยทำการอบพริก กล้วย และกาแฟ ทดลองอบกล้วย 1,000 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 70% w.b. ใช้เวลา 5 วัน เทียบกับการใช้แสงอาทิตย์จะใช้ระยะเวลา 7 วัน ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกัน ทดลองอบพริก 300 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 75% w.b. ใช้เวลา 3 วัน เปรียบเทียบกับธรรมชาติจะใช้ระยะเวลา 5 วัน อบเมล็ดกาแฟ 200 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 55% w.b. ใช้เวลา 2 วัน โดยธรรมชาติจะใช้ระยะเวลา 4 วัน นอกจากนี้การอบแห้งโดยใช้โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถป้องกันแมลง สัตว์ต่างๆ รวมถึงฝนได้ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างดี ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 2.5 ปี [9]

งานวิจัยนี้ทางชุมชนเป็นผู้กำหนดโจทย์ เพื่อช่วยแก้ปัญหาและยกระดับคุณภาพชีวิตของชุมชน เพื่อให้ตรงตามความต้องการ และสอดคล้องกับกรอบยุทธศาสตร์ชาติระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560-2579) ตลอดจนนโยบายประเทศไทย 4.0 และยุทธศาสตร์จังหวัด เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนประเทศไปสู่เป้าหมายเดียวกันได้ ดังนั้นใน

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีระบบโซลาร์เซลล์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้กับพัดลมดูดความชื้น ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบโจทย์ของกลุ่มเกษตรกรข้างต้นได้ดี เนื่องจากใช้งานง่าย สะดวกต่อการบำรุงรักษาและไม่เพิ่มต้นทุนทางด้านการผลิตให้กับเกษตรกร โดยทำการศึกษาอัตราการอบแห้ง สี ปริมาณน้ำอิสระ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง โดยทำการเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบตากแดดโดยธรรมชาติและหวังว่าเทคโนโลยีนี้จะเป็นทางเลือกใหม่ในการอบแห้งของชุมชนและสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นได้ต่อไป

2. อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องอบแห้งโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์

โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 1 มีขนาด 1.04x1.25 เมตร ครอบด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส แผ่นพื้นปูด้วยไม้อัดแข็งขนาด 1.5 เซนติเมตรและปิดทับด้วยแผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 20 W เพื่อใช้กับพัดลม DC ขนาด 3 นิ้ว ที่ติดตั้งไว้ด้านหลังโรงเรือนจำนวน 2 ตัว สำหรับใช้ดึงความชื้นออกจากระบบ ซึ่งปัจจัยการทำงานของพัดลมจะขึ้นอยู่กับความชื้นของรังสีอาทิตย์เป็นหลัก ถ้าความชื้นมากจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงซึ่งก็จะสอดคล้องกับพัดลมที่หมุนเร็วขึ้นเพื่อดึงความชื้นออกไป ด้านหน้ามีช่องให้อากาศเข้าขนาด 8x20 เซนติเมตร จำนวน 2 ช่อง มีตะแกรงลวดปิดเพื่อป้องกันแมลง ความจุในการอบแห้งได้ครั้งละ 20 กิโลกรัม และลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของโรงเรือนนี้คือ ติดล้อแบบล็อกได้ขนาด 2 นิ้ว ที่ฐานของโรงเรือนจำนวน 4 ตัว ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายหรือเคลื่อนที่โรงเรือนได้สะดวก เหมาะกับการใช้งานในชุมชน เพราะบางช่วงอาจมีการบังเงาในแต่ละเวลา มีการเก็บค่าปริมาณความชื้นรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง Pyranometer ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP11 ช่วงการใช้งาน -40°C ถึง 80°C ความคลาดเคลื่อน <1% วัดค่าอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล type K ร่วมกับ Data Logger ยี่ห้อ

GRAPHTEC รุ่น midi Logger GL800 ความเร็วการบันทึกผลอยู่ที่ 100 ms ถึง 1 hr ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วย Testo 610 ความแม่นยำ $\pm 2.5\% \text{RH}$ และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัลยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S ความละเอียด 0.001 กรัม ทำการทดลอง ณ บ้านมาบหม้อ ตำบลบ้านปึก อำเภอเมืองชลบุรี พิกัดละติจูด $13^{\circ}18'38.6''\text{N}$ และลองจิจูด $100^{\circ}55'25.5''\text{E}$



รูปที่ 1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ ดังนี้ 1) ปลอกเปลือกหัวเท้ายายม่อมออก และแช่ทิ้งไว้ในน้ำสะอาด 2) นำมาใส่เครื่องบดให้ละเอียดเพื่อกรองเอาน้ำแป้ง 3) แช่น้ำทิ้งไว้และเททิ้งหลายๆ รอบจนได้เนื้อแป้งตกผลึกเป็นสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 4) นำใส่ถาดทึบเพื่อเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง โดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดโดยธรรมชาติ



รูปที่ 2 ลักษณะหัวเท้ายายม่อมและน้ำแป้ง

การทดลองการอบแห้งนี้ได้ใช้ตัวอย่างครั้งละ 20 กิโลกรัม โดยนำเข้าโรงเรือนอบแห้งและตากแดดอย่างละ 10 กิโลกรัม ทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง โดยนำตัวอย่างบางส่วนเอาไปชั่งน้ำหนักและนำไปอบแห้งในตู้อบแห้งแบบลมร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการความค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน AOAC [10] จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไปทำการอบแห้งโดยใช้โรงเรือนอบแห้งแสงอาทิตย์และนำไปตากแดดเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ทำการทดลองตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. ทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทุกๆ 30 นาที อบแห้งแป้งเท้ายายม่อมจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพในลำดับต่อไป

2.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

การหาความชื้นของแป้งเท้ายายม่อม สามารถทำได้โดยนำแป้งเท้ายายม่อมไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [10] เพื่อหาน้ำหนักแห้งของแป้งเท้ายายม่อม แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture content) ได้จากสมการที่ (1) [3]

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

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

w คือ น้ำหนักเปียกของแป้งเท้ายายม่อม (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของแป้งเท้ายายม่อม (g)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) คือ สัดส่วนของปริมาณน้ำที่ยังเหลืออยู่ภายในวัสดุที่กำลังอบแห้งกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ในวัสดุก่อนอบแห้ง [11] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [3]

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

หรือ $MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$

- เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
- M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)
- M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
- M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ (3) [3]

2.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพด้านสีของแป้งเท้ายายม่อม ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d ใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ค่าความละเอียด 0.01 เป็นการทดสอบสีแบบ L a b และจะนำค่าสีของผลิตภัณฑ์หลังจากอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับสีของผลิตภัณฑ์จากการตากแดดตามธรรมชาติ โดยให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตากแดดเป็นสีมาตรฐานที่ชุมชนยอมรับอยู่แล้ว [12] เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งโดยใช้โรงเรือนมีค่า ΔE แตกต่างกับการตากแดดมากน้อยเพียงใด ตามสมการที่ (4)

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \tag{4}$$

โดยที่ ΔE คือ ความแตกต่างของสีโดยรวม ΔL คือ ความแตกต่างของความสว่าง Δa คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียว และ Δb คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน

2.5 การทดสอบค่าปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระหรือแอกทิวิตี้ของน้ำ (water activity, a_w) เป็นค่าที่แสดงระดับความชื้นที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษาและความปลอดภัยของอาหาร [13] มีค่าตั้งแต่ 0-1 สำหรับแป้งเท้ายายม่อมที่ผ่านการอบแห้งจัดอยู่ในประเภทอาหารแห้งซึ่งต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 โดยจะทำการทดสอบทั้งผลิตภัณฑ์ที่ตากแดดตามธรรมชาติและที่ผ่านการอบแห้งจากโรงเรือนพลังงาน

แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ Aqua lab รุ่น Series 3 TE ค่าความละเอียด 0.001

2.6 แบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองอบแห้งชิ้นบางหรือแบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบการวิเคราะห์ที่ง่าย นิยมใช้วิเคราะห์การถ่ายเทมวลเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางการเกษตรในช่วงเวลาที่อบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองเอมพิริคัลที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมจำนวน 5 สมการ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัล [3, 11, 14, 15]

No.	Model name	Model equation
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$
5	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$

* a c g k และ n คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

การวิเคราะห์หาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลในตารางที่ 1 จะใช้ข้อมูลความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมจากการทดลอง นำไปวิเคราะห์สมการโดยใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมได้ดีที่สุดจะพิจารณาจากค่าทางสถิติ 3 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สูงที่สุด ผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Sum of squared error, SSE) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ต่ำที่สุด [3, 11, 14] ดังสมการที่ (5)-(7)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \bar{MR}_{exp})^2} \tag{5}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (7)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)

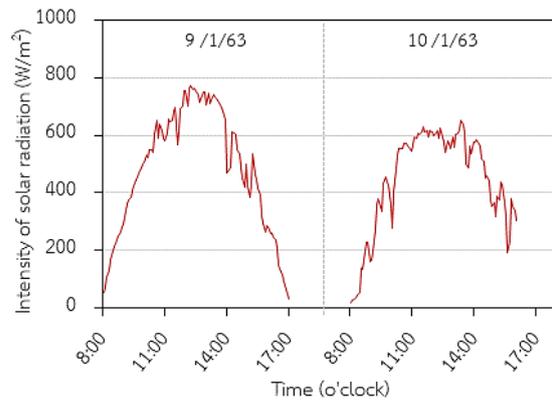
\overline{MR}_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของการทดลอง (decimal)

N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

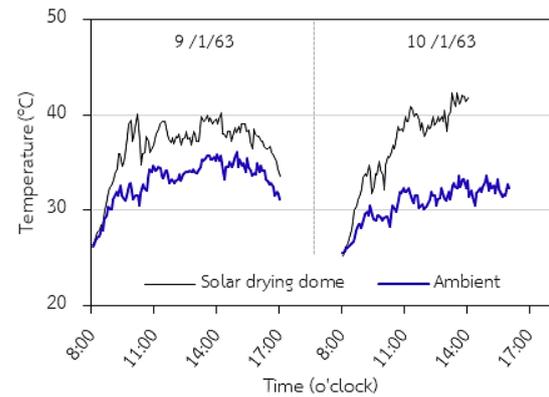
3. ผลการทดลอง

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งแป้งทำยาย่อม

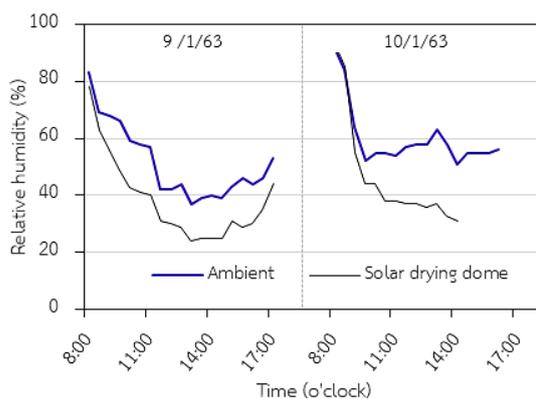
การทดลองนี้จะอบแห้งแป้งทำยาย่อมจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. โดยทดลองครั้งที่ 1 ในวันที่ 9-10 มกราคม 2563 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 10.00-14.00 น. ดังรูปที่ 3 (ก) โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 447.21 W/m^2 และให้ผลที่สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งและการตากแดดที่มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาดังกล่าว โดยเฉลี่ย คือ 37°C และ 31°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 (ข) ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าการตากแดด ดังรูปที่ 3 (ค)



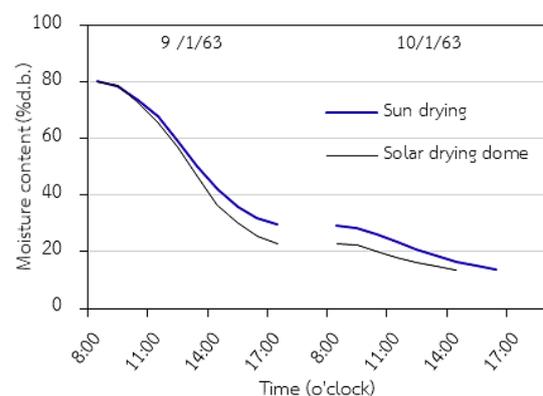
(ก) ความเข้มรังสีอาทิตย์



(ข) อุณหภูมิภายในโรงเรือนกับสิ่งแวดล้อม



(ค) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนและสิ่งแวดล้อม



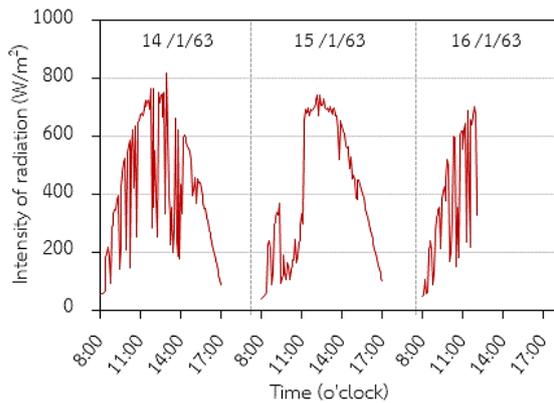
(ง) การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งทำยาย่อม

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลง ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นของแป้งทำยาย่อมที่อบแห้งโดยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ในวันที่ 9-10 มกราคม 2563

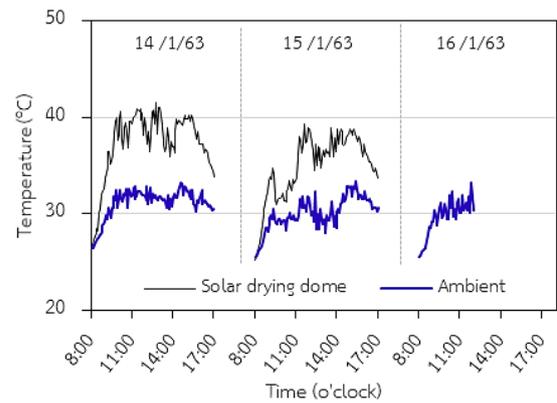
เนื่องจากมีอุณหภูมิอบแห้งที่สูงกว่าและมีพัลลคมจากโซลาร์เซลล์ช่วยดึงความชื้นออกสู่ภายนอก ซึ่งจะส่งผลให้มีการลดความชื้นได้ดีกว่าการตากแดด ส่วนอัตราการลดความชื้นนั้นพบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งตามรูปที่ 3 (ง) โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบคงที่ เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟการอบแห้งแป้งเท้ายวมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลา 14 ชั่วโมง การอบแห้งแบบดั้งเดิมคือการตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลา 16 ชั่วโมง เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งสูงกว่าบรรยากาศภายนอกและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ระยะเวลา

การอบแห้งเร็วกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติ และการอบแห้งทั้ง 2 วิธี ใช้เวลาไม่เกิน 2 วัน

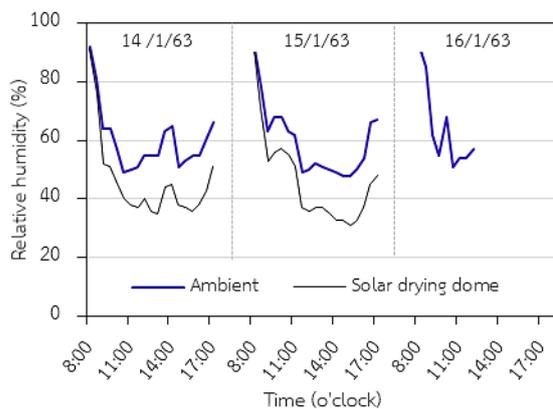
การทดลองครั้งที่สองในวันที่ 14-16 มกราคม 2563 ความเข้มของรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดเฉลี่ยในช่วงเวลา 11.00-14.00 น. โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 409.32 W/m² แต่ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ค่อนข้างจะแกว่งมาก ดังรูปที่ 4 (ก) เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวท้องฟ้าปิดเป็นบางช่วง อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงสูงกว่าการตากแดดโดยเฉลี่ยที่ 36.2°C และ 30.6°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำกว่าการตากแดดดังรูปที่ 4 (ค) แสดงว่ายังมีความสามารถในการลดความชื้นได้ดีกว่าการตากแดด



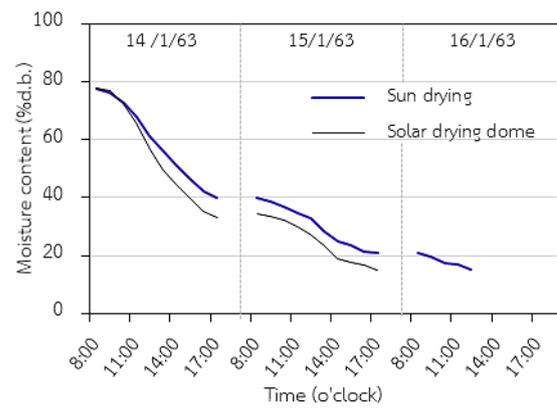
(ก) ความเข้มรังสีอาทิตย์



(ข) อุณหภูมิภายในโรงเรือนกับสิ่งแวดล้อม



(ค) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนและสิ่งแวดล้อม



(ง) การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งเท้ายวม

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นของแป้งเท้ายวมที่อบแห้งโดยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ในวันที่ 14-16 มกราคม 2563

สำหรับอัตราการลดความชื้น พบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งตามรูปที่ 4 (ง) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองครั้งแรกจะเห็นว่าใช้ระยะเวลาที่ยาวนานกว่า เนื่องจากการทดลองครั้งแรกนั้นค่าความเข้มข้นสีอาทิตย์ค่อนข้างจะน้อยกว่าและมีความเข้มข้นที่สูงกว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งแห้งเพื่อยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบตากแดด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองครั้งแรกเช่นกัน โดยใช้เวลา 18 ชั่วโมง และ 22 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าครั้งนี้นักอบแห้งโดยใช้โรงเรือนแสงอาทิตย์ใช้เวลา 2 วัน แต่การตากแดดจำเป็นต้องตากแห้งเพิ่มอีกในวันที่ 3 เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ประมาณ 15% d.b.

3.2 คุณภาพด้านสีของแป้งเท้ายายม่อม

ค่าสีของแป้งเท้ายายม่อมหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า มีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 77.21-78.61 ค่าสีแดงอยู่ในช่วง 0.63-1.47 และค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 2.26-3.58 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สีของแป้งเท้ายายม่อมหลังอบแห้ง

Method	L	a	b	ΔE
9/1/63 - 10/1/63				
Sun drying	77.32±2.08	1.64±0.06 ^a	4.12±0.12 ^a	N/A
Solar drying dome	78.61±1.37	1.47±0.13 ^b	3.58±0.27 ^b	1.76±0.01
14/1/63 - 16/1/63				
Sun drying	78.03±2.31	0.73±0.18 ^c	2.51±0.24 ^c	N/A
Solar drying dome	77.21±0.58	0.63±0.10 ^c	2.26±0.23 ^c	1.89±1.09

a-c means in the same column with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) and ns mean that the data not statistically significant ($p > 0.05$).

ในการทดลองครั้งที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าสีแดง a และค่าสีเหลือง b จะมีความแตกต่างกับสีของแป้งเท้ายายม่อมที่ได้จากการตากแดด แต่การทดลองครั้งที่ 2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) ค่อนข้างน้อย คือ 1.76 และ 1.89 ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแป้งเท้ายายม่อมจะมีความสว่าง (L)

ค่อนข้างมากเป็นหลักซึ่งอยู่ในโทนสีขาว ซึ่งการทดลองทั้งสองครั้งในการอบแห้งทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จึงสรุปได้ว่าการใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ส่งผลกระทบต่อทางด้านคุณภาพสีโดยเฉพาะความสว่างของผลิตภัณฑ์ และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับการตากแดดแบบวิธีดั้งเดิม ดังรูปที่ 5



(ก) ตากแดด (ข) โรงเรือนแสงอาทิตย์

รูปที่ 5 แป้งเท้ายายม่อมหลังการอบแห้งด้วยการตากแดดและโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์

3.3 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w)

แป้งเท้ายายม่อมที่อบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.478-0.493 สำหรับการตากแดดแบบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.495-0.548 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำอิสระของแป้งเท้ายายม่อม

Date	Method	a_w
9/1/63-10/1/63	Sun drying	0.548±0.002 ^a
	Solar drying dome	0.478±0.001 ^c
14/1/63-16/1/63	Sun drying	0.495±0.005 ^b
	Solar drying dome	0.493±0.002 ^b

a-c means in the same column with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

ในการทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณน้ำอิสระจะมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ แต่การทดลองครั้งที่ 2 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่โดยรวมแล้วไม่มีตัวอย่างใดที่มีค่าปริมาณน้ำอิสระเกินค่าที่กำหนด

คือ 0.6 ดังนั้น แป้งทำขนมที่ผ่านการอบแห้งทั้งสองวิธี สามารถเก็บรักษาได้ตามมาตรฐาน แต่การเก็บรักษาควรมีการป้องกันความชื้นจากภายนอกด้วย เนื่องจากอาหารประเภทแป้งจะสามารถดูดซับความชื้นจากบรรยากาศได้ค่อนข้างรวดเร็ว

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลในตารางที่ 1 และค่าทางสถิติของสมการที่ 5-7 ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้ง

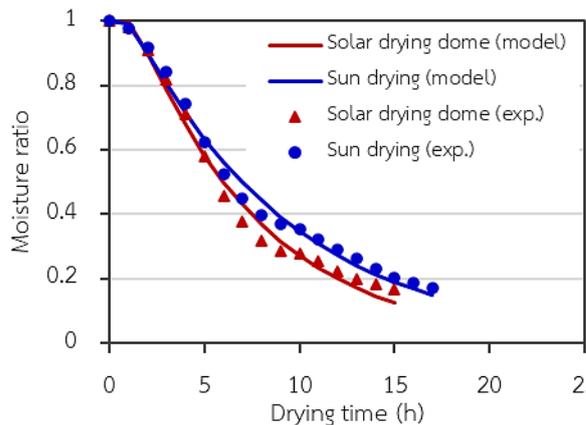
ทำขนมที่อบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดดตามธรรมชาติได้ผลดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า แบบจำลองของ Newton ทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งทำขนมได้ห่างจากผลการทดลองมากที่สุดหรือมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ต่ำที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองเอมพิริคัลในการอบแห้งแป้งทำขนมด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์

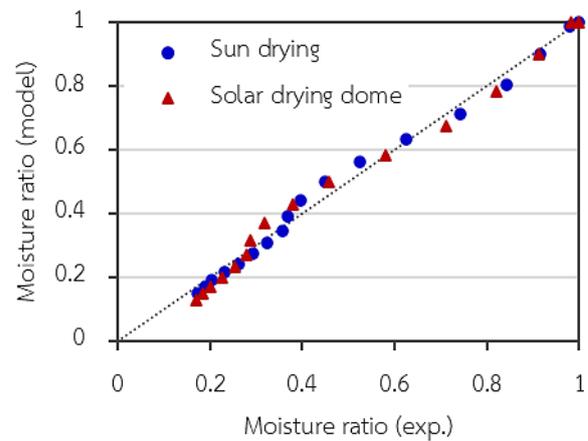
Date	Model	Constant	R^2	RMSE	SSE
9-10 Jan 2020	Newton	k = 0.11924	0.95609	0.06155	0.06062
	Page	k = 0.06553 n = 1.29193	0.97739	0.04417	0.03121
	Henderson and Pabis	a = 1.10073 k = 0.13331	0.97305	0.04822	0.03720
	Logarithmic	a = 1.13676 k = 0.12250 c = -0.04462	0.97358	0.04775	0.03648
	Verma et al.	a = -0.25018 k = 1.22637 g = 0.15252	0.98859	0.03137	0.01575
14-16 Jan 2020	Newton	k = 0.08667	0.97774	0.03858	0.02828
	Page	k = 0.06804 n = 1.10681	0.98159	0.03509	0.02339
	Henderson and Pabis	a = 1.05262 k = 0.09284	0.98396	0.03274	0.02037
	Logarithmic	a = 1.03016 k = 0.09773 c = 0.02698	0.98400	0.03271	0.02032
	Verma et al.	a = -0.08376 k = 24.76830 g = 0.09646	0.98743	0.02899	0.01597

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองเอมพิริคัลในการอบแห้งแป้งทำขนมด้วยการตากแดด

Date	Model	Constant	R^2	RMSE	SSE
9-10 Jan 2020	Newton	k = 0.10127	0.97213	0.04639	0.03873
	Page	k = 0.06547 n = 1.19829	0.98376	0.03542	0.02258
	Henderson and Pabis	a = 1.07864 k = 0.11096	0.98364	0.03555	0.02274
	Logarithmic	a = 1.09267 k = 0.10733 c = -0.01726	0.98371	0.03547	0.02265
	Verma et al.	a = -0.15662 k = 1.50214 g = 0.12017	0.99180	0.02516	0.01139
14-16 Jan 2020	Newton	k = 0.07031	0.98831	0.02749	0.01738
	Page	k = 0.04968 n = 1.14892	0.99275	0.02166	0.01079
	Henderson and Pabis	a = 1.04923 k = 0.07565	0.99402	0.01966	0.00889
	Logarithmic	a = 1.11378 k = 0.06757 c = -0.07159	0.99364	0.02028	0.00946
	Verma et al.	a = -0.07898 k = 2.09203 g = 0.07880	0.99640	0.01527	0.00536

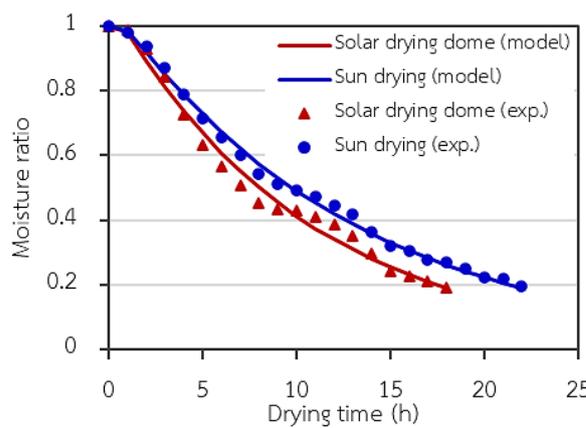


(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น

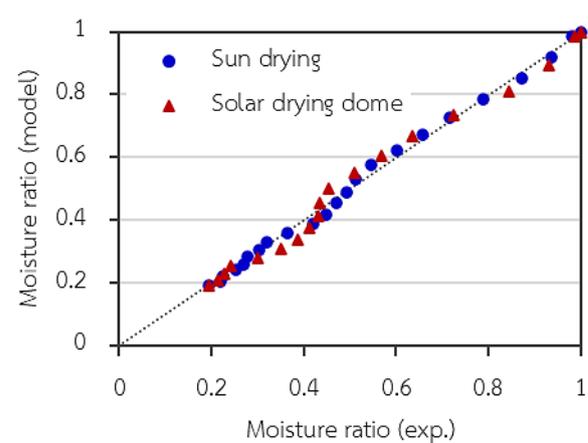


(ข) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น

รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นและความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นแป้งเท้ายายม่อม ระหว่างแบบจำลองของ Verma et al. กับการทดลอง ในวันที่ 9-10 มกราคม 2563



(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น



(ข) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น

รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นและความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นแป้งเท้ายายม่อม ระหว่างแบบจำลองของ Verma et al. กับการทดลอง ในวันที่ 14-16 มกราคม 2563

ส่วนแบบจำลองของ Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมได้ดีพอสมควร โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนดีกว่าแบบจำลองของ Newton ขณะที่แบบจำลองของ Verma et al. สามารถทำนายการ

เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมที่อบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98743-0.98859 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.02899-0.03137 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.01575-0.01597 และแบบจำลองของ Verma et al.

สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมที่อบแห้งด้วยการตากแดดตามธรรมชาติ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุดเช่นกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.99180-0.99640 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.01527-0.02516 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.00536-0.01139 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 6 (ก) และรูปที่ 7 (ก) ที่แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการของ Verma et al. ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลอง นอกจากนี้เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลองของ Verma et al. ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) และรูปที่ 7 (ข) พบว่า ส่วนใหญ่ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นเกาะกลุ่มกันอยู่ในแนวเส้นตรงความลาดชัน 45 องศา ดังนั้นแบบจำลองของ Verma et al. สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมจากการอบแห้งทั้งสองวิธีการได้ดีที่สุด

4. สรุป

การอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิมนั้นพบว่า ในปริมาณความชื้นของแสงอาทิตย์ที่เท่ากัน ณ เวลาต่างๆนั้น การใช้โรงเรือนแสงอาทิตย์ให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่า เนื่องจากอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะสูงกว่าการตากแดดโดยเฉลี่ยที่ 6°C โดยการทดสอบครั้งแรกใช้เวลา 14 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ 2 ชั่วโมงสำหรับการอบแห้งครั้งที่ 2 ใช้เวลา 18 ชั่วโมงและ 22 ชั่วโมงตามลำดับ สามารถลดระยะเวลาได้ 4 ชั่วโมง คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและยอมรับได้ ปริมาณน้ำอิสระก็อยู่ในเกณฑ์เป็นไปตามมาตรฐานของอาหารแห้งคือ ไม่เกิน 0.6 นั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้โรงเรือนอบแห้งให้ผลทางเวลาและคุณภาพในเกณฑ์ที่ดี อีกทั้งยังสามารถป้องกันฝุ่นละออง แมลงต่างๆ และยัง

ยับยั้งความเสียหายให้กับแป้งเท้ายายม่อมในกรณีฝนตกได้ นอกจากนี้ยังพบว่า สมการเอมพิริคัลของ Verma et al. สามารถทำนายผลการอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98743-0.99640 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในช่วง 0.01527-0.03137 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) อยู่ในช่วง 0.00536-0.01597

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ในโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานราก วิชาศึกษชุมชนบ้านปึกชลบุรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mahidol University Foundation, "Arrowroot," Herbal Encyclopedia Isaan Medicine, vol. 4, Bangkok: Amarin Printing & Publishing Public, pp. 212, 2000.
- [2] Puechkaset. (2019, Nov. 10). Properties and planting arrowroots [Online]. Available: <https://Puechkaset.com/arrowroot/>
- [3] K. Witinantakit, N. Uengkimbuan and S. Rungsawang, "Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-13, Sep.-Dec. 2019.
- [4] C. Borompichaichartkul, K. Luengsoode, N. Chinprahast and S. Devahastin, "Improving quality of macadamia nut (*Macadamia*

- integrifolia) through the use of hybrid drying process,” *Journal of Food Engineering*, vol. 93, no. 3, pp. 348-353, Aug. 2009.
- [5] S. Jaekhom and K. Witinantakit, “Drying kinetics of chicken using superheated steam technique,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 201-217, Sep.-Dec. 2019.
- [6] P. Pontecha and S. Cansee, “Tilapia Nilotica drying with solar greenhouse dryer,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 58-64, Jul.-Dec. 2020.
- [7] T. Ongprasert and K. Jitjack, “A study of solar greenhouse drying in association with infrared heater for dehydration cherry tomatoes,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 62-83, Sep.-Dec. 2020.
- [8] W. Arekornchee, S. Pathaveerat, V. Thepent, A. Chaochote, U. Thanee and A. Senanarong, “Study on using solar greenhouse combined with tray dryer for vegetable and fruit drying,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 39-45, Jan.-Jun. 2016.
- [9] S. Janjai , P. Intawee , J. Kaewkiewa, C. Sritus and V. Khamvongsa, “A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1053-1062, Mar. 2011.
- [10] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 17th ed. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [11] W. Jeentada, J. Jareanjit and P. Tippracha, “Drying experiment of rubber sheet using solar dryer with solar collector installed on top wall of the dryer,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 23-33, Jan.-Mar. 2019.
- [12] S. Janjai, *Solar Drying Technology*, Nakhon Pathom: Phetkasem Printing Group, 2017.
- [13] P.P. Lewicki, “Water as the determinant of food engineering properties. A review,” *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 4, pp. 483-495, Mar. 2004.
- [14] K. Witinantakit and S. Jaekhom, “Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 29-44, Sep.-Dec. 2019.
- [15] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten, “Effects of drying air parameters on rice drying models,” *Trans. ASAE*, vol. 28, no. 1, pp. 296-301, Jan. 1985.