



จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม

วาณิช นิลนนท์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี
สุธิดา พิทักษ์วินัย*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 0084 9014 อีเมล: n_joice@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.12.005

รับเมื่อ 24 กรกฎาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 28 สิงหาคม 2562 ตอรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 17 ธันวาคม 2562

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางของมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม การอบแห้งดำเนินการในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00–18.00 น. ตัวอย่างในการทดลองเป็นมะม่วงพันธุ์มหาชนกสุกหั่นเป็นแผ่นบางมีความหนาประมาณ 5 มม. มีความชื้นเริ่มต้น 81.5% w.b. ทำการอบแห้งจนกระทั่งมวลของมะม่วงไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งมะม่วงเป็นแบบลดลงเพียงอย่างเดียว การอบแห้งมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยกว่าการตากแดดธรรมชาติ นอกจากนี้ยังได้มีการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งมะม่วงสุกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง 8 แบบจำลอง โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear Regression) พบว่าแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางของ Two-term สามารถทำนายผลการอบแห้งชั้นบางของมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมได้ดีที่สุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นของมะม่วงสุกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมมีค่าสูงกว่าการตากแดดธรรมชาติซึ่งคำนวณได้จากสมการการแพร่ของฟิค (Fick's Diffusion) ด้วยวิธี Minimizing the Sum of Squares

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม มะม่วง แบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น



Drying Kinetics of Mango Using Solar Tunnel Dryer

Wanich Nilnont

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Nonthaburi, Thailand

Sutida Phitakwinai*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Nonthaburi, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 0084 9014, E-mail: n_joice@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.12.005

Received 24 July 2019; Revised 28 August 2019; Accepted 30 August 2019; Published online: 17 December 2019

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research presents the thin-layer drying kinetics of mango using a solar tunnel dryer. The drying experiment was carried out at 08.00–18.00 p.m. The samples in the experiment were ripe mango slices with a thickness about of 5 mm. The moisture content of the mango from an initial value of 81.5% w.b. until the moisture content did not change with time. According to the drying experiment results, it was found that the drying was in the type of falling rate period. Mango drying in the solar tunnel dryer takes less drying time than open sun drying. Besides, the experimental data were fitted to eight thin layer mathematical models and their constants evaluated by nonlinear regression analysis. The agreement between the predicted and experimental data for mango in the Two-term model was excellent for considering the drying behavior of mango, and this model was used to optimize the dryer. The effective moisture diffusivity of mango drying with a solar tunnel dryer more than open sun drying, which was determined from Fick's diffusion by minimizing the sum of squares.

Keywords: Solar Tunnel Dryer, Mango, Modelling, Effective Moisture Diffusivity

1. บทนำ

มะม่วง (*Mangifera L.*) มีชื่อสามัญ Mango อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae เป็นผลไม้ที่รับประทานได้ทั้งผลดิบและผลสุกและยังเป็นผลไม้ให้พลังงานสูงที่สุดไปด้วยวิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี สารต้านอนุมูลอิสระต่างๆ เช่น แครโรทีนอยด์ (Carotenoid) แอนโธไซยานิน (Anthocyanins) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) เป็นต้น [1], [2] ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้จะช่วยป้องกันเลือดออกตามไรฟันและโรคสมองเสื่อม [3] ดังนั้นมะม่วงจึงเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ โดยที่ปริมาณมะม่วงในตลาดโลกจำนวนสามในสี่ส่วนนั้นมาจากทวีปเอเชีย [4] มะม่วงเป็นผลไม้เมืองร้อนที่สำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทยและปัจจุบันประเทศไทยมีตลาดมะม่วงส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ มะม่วงสด มะม่วงบรรจุภาชนะอัดลม มะม่วงอบแห้ง และมะม่วงแช่แข็ง ซึ่งสถิติการส่งออกมะม่วงสดหรือแช่เย็นจนแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น [5] โดยเกษตรกรจะทำการตัดแยกและคัดขนาดมะม่วงให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการส่งออก ส่วนมะม่วงสดที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการส่งออกก็จะนำไปแปรรูปด้วยกระบวนการต่างๆ เป็นมะม่วงอบแห้งเพื่อจำหน่ายต่อไป และเนื่องจากในปัจจุบันราคาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการต่างๆ เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานให้สูงขึ้นควบคู่กับการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

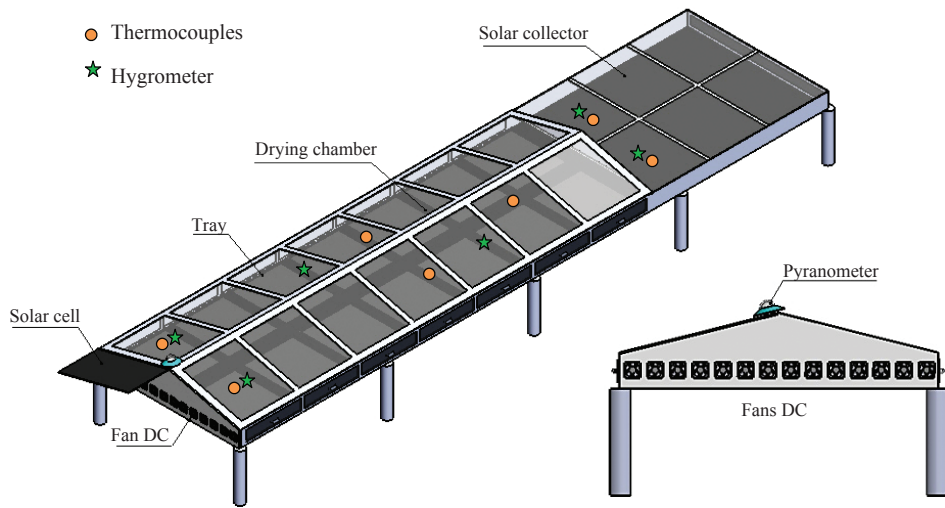
ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนจึงได้รับพลังงานรังสีอาทิตย์รวมรายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศค่อนข้างสูง โดยมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ หรือ $5.05 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$ [6] ซึ่งจัดได้ว่ามีศักยภาพเพียงพอในการเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการอบแห้ง วิธีการลดความชื้นผลิตผลทางการเกษตรที่เกษตรกรนิยมวิธีหนึ่งคือการตากแดดธรรมชาติ แต่การลดความชื้นของมะม่วงสดด้วยการตากแดดธรรมชาติในปริมาณมากอาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีและอาจเกิดปัญหาความเสียหายของผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากการปนเปื้อนและการรบกวนจากสัตว์ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่สะอาดถูกสุขลักษณะ ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสี

อาทิตย์ซึ่งเป็นวิธีการลดความชื้นผลิตผลทางการเกษตรที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนการตากแดดธรรมชาติ โดยมีแหล่งพลังงานซึ่งสามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดและเป็นพลังงานสะอาดจึงจัดได้ว่าเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานฟอสซิลสำหรับการอบแห้ง ทำให้ผลผลิตที่ได้มีความสะอาดสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานและยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรอีกทางหนึ่ง

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ได้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นหลายรูปแบบเพื่อใช้เป็นทางเลือกสำหรับการอบแห้งที่มีทั้งชนิดรังสีอาทิตย์โดยตรง รังสีอาทิตย์แบบอ้อม และรังสีอาทิตย์แบบผสม [7] โดยที่เครื่องอบแห้งชนิดรังสีอาทิตย์แบบผสมจะมีตัวเก็บรังสีทำหน้าที่รับรังสีกระจายเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และส่วนห้องอบแห้งที่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงทำให้สามารถได้ความร้อนใช้ประโยชน์มากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น [8]

การอบแห้งชั้นบางได้รับความนิยมในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ซึ่งมีทั้งระดับเล็กกระทงในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลาง [9] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ร่วมกับการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรแบบชั้นบางที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อช่วยอธิบายพฤติกรรมและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบที่เรียกว่าจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง [10]–[14]

สำหรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่มีขนาดตั้งแต่ 100 กก. ขึ้นไป ที่เป็นการอบแห้งชนิดรังสีอาทิตย์แบบผสม จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังขาดข้อมูลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงแบบชั้นบางในเครื่องอบแห้งชนิดอ้อมค์ลมด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ซึ่งจัดอยู่ในประเภทเครื่องอบแห้งชนิดรังสีอาทิตย์แบบผสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงสายพันธุ์มหาชนกในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงอย่างเดียวยด้วยแบบจำลองการลดลงความชื้นเอมพิริคัล โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงตัวต่างๆหาด้วยการใช้แบบจำลองวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดลอง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) และความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometer)

อบแห้งชั้นบาง จากนั้นทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่รังผลของความชื้นจากกฎการแพร่ของฟิคส์ ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสม

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม (Solar Tunnel Dryer) ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการอบแห้งมะม่วง เครื่องอบแห้งประเภทนี้จัดเป็นเครื่องอบแห้งประเภทรับรังสีอาทิตย์แบบผสมโดยมีส่วนประกอบหลักคือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate Solar Collector) มีขนาดกว้าง 2.4 ม. ยาว 3 ม. สูง 0.1 ม. ด้านบนปิดด้วยกระจกใสหนา 8 มม. ห้องอบแห้งมีขนาดกว้าง 2.4 ม. ยาว 7 ม. ด้านบนมีโครงสร้างแบบหน้าจั่วมีมุมที่ฐานเอียง 14 องศา ความสูงของห้องอบแห้งถึงฐานหน้าจั่วคือ 20 ซม. แผ่นปิดด้านบนเป็นวัสดุชนิดเดียวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พื้นของเครื่องอบแห้งทาด้วยสีดาด้านชนิดไม้มีผลกระทบบ้างเคียงต่อการอบแห้งอาหาร วัสดุหลักในการสร้างคือแผ่นอะลูมิเนียมคอมโพสิต การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านผลผลิตใช้พัดลมชนิดไฟกระแสตรง 12 โวลต์ จากเซลล์รังสีอาทิตย์ (Solar Cell) รุ่น SLP 120S-12

ขนาด 120 วัตต์ โดยมีพื้นที่หน้าตัดของพัดลมระบายอากาศรวม 1.34 ตารางเมตร และความเร็วลมเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1 และภายในเครื่องอบแห้งมีการหุ้มฉนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน

2.2 เครื่องมือวัดสำหรับการใช้ในการทดลอง

ภายในเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม ที่ทำการอบแห้งมะม่วงได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดดังรูปที่ 1 ที่มีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้ เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) ของ Kipp & Zonen รุ่น CMP6 เครื่องมือวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ชนิด K เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometer) อากาศสิ่งแวดล้อมและอากาศภายในเครื่องอบแห้งของ Graphtec รุ่น B-530-UM-152 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ของ Graphtec รุ่น GL-820 ในการชั่งมวลของมะม่วงระหว่างการอบแห้งใช้เครื่องชั่งแบบ Electronic Balance มีขนาดความสามารถ 3000 กรัม ค่าความแม่นยำ 0.01 กรัม การวัดความเร็วอากาศใช้เครื่องมือวัดความเร็วแบบ Anemometer ชนิด Hot Wire ของ Emtech รุ่น 45158

2.3 วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ถูกสร้างและติดตั้งที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี โดยเครื่องอบแห้ง จะหันหน้าไปทางทิศใต้และมีความสามารถในการอบแห้ง มะม่วงสดสุกได้ครั้งละ 100 กก. ในการทดลองอบแห้งนี้ได้ ทำการอบแห้งมะม่วงสุกพันธุ์มหาชนกเต็มความจุ โดยนำ มะม่วงมาปอกเปลือกและหันตามยาวของลูก แต่ละชิ้นมีความหนาประมาณ 5 มม. หลังจากนั้นนำมะม่วงทั้งหมดเก็บไว้ในตู้แช่เย็น ก่อนทำการทดลองได้นำมะม่วงออกจากตู้แช่เย็น และนำมะม่วงวางเรียงกระจายบนถาดไม่วางซ้อนทับกันและ รอให้อุณหภูมิของมะม่วงมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จึงเริ่มต้นทำการทดลอง ในการทดลองได้ทำการแบ่งมะม่วง เพื่อเป็นตัวอย่างวิเคราะห์ผลการทดลองจำนวน 3 ถาด แต่ละถาดมีมวล 400 กรัม ทำการวางถาดภายในเครื่องอบแห้ง 2 ถาด และส่วนมะม่วงอีกถาดนำไปตากแดดธรรมชาติ เริ่มทำการทดลองในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 18.00 น. การทดลองอบแห้งนี้จะอบแห้งจนกระทั่งมวลของมะม่วงภายใน หีงอบแห้งคงที่ซึ่งได้ทำการชั่งมวลทุกชั่วโมง หลังจากนั้นนำ มวลมะม่วงตัวอย่างไปอบแห้งในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC [15] เพื่อหามวลแห้งของมะม่วงและนำไปใช้ในการคำนวณ หาค่าความชื้นระหว่างการอบแห้งต่อไป

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

การเปลี่ยนแปลงของน้ำที่อยู่ในวัสดุขณะเวลาใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาเริ่มต้นของการอบแห้งคำนวณได้ในรูปของอัตราส่วนความชื้น (MR) ดังสมการที่ (1) [16], [17]

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าบอกถึงปริมาณน้ำ ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่เกิดภาวะสมดุล ระหว่างไอน้ำในวัสดุและไอน้ำในอากาศ หรือกล่าวได้ว่าเป็น

ภาวะที่ไอน้ำไม่ระเหยออกจากวัสดุเนื่องจากมีภาวะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่รอบๆ วัสดุนั้น กรณีสภาพอากาศที่ใช้ออบแห้งต่างกันจะมีความชื้นสมดุลที่ต่างกัน การอบแห้งที่ใช้เวลายาวนานพบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุจะมีความมากกว่าความชื้นสมดุลมากๆ ทำให้สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการที่ (2) [18]

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

เมื่อ M_o คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (% d.b.) และ M_t คือ ความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้งที่เวลา t (% d.b.) ความชื้นของวัสดุตามมาตรฐานแห้งหาได้จากสมการที่ (3)

$$M = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100 \quad (3)$$

นอกจากความชื้นของวัสดุตามมาตรฐานแห้งที่กล่าวมายังมีความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.) หาได้จากสมการที่ (4)

$$M = \frac{m_i - m_d}{m_i} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ m_i คือ มวลเริ่มต้น (กก.) และ m_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กก.)

การวิเคราะห์ค่า MR ในช่วงเวลาการอบแห้งใดๆ ของวัสดุทางการเกษตรสามารถแบ่งออกเป็นการใช้สมการการอบแห้งทางทฤษฎี สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี สมการการอบแห้งเอมพิริคัล [19] ซึ่งงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการอบแห้งเอมพิริคัลแบบชั้นบางดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อใช้ช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของจลนพลศาสตร์การอบแห้งกับระยะเวลาในการอบแห้ง โดยมีกรวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear Regression) ความสามารถของสมการจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; $RMSE$) จากสมการที่ (5) และ (6)

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

ลำดับที่	สมการแบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton [20]
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page [21]
3	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis [22]
4	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis [23]
5	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic [24]
6	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Two-term [25]
7	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two-term exponential [26]
8	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion [27]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{ex,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{ex,i} - \overline{MR_{pre,i}})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{ex,i})^2}{n} \right]^{0.5} \quad (6)$$

เมื่อ $MR_{ex,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนายที่ได้จากสมการ ส่วน $\overline{MR_{pre,i}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนายที่ได้จากสมการ และ n คือ จำนวนข้อมูลจากการทดลอง

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (Effective Moisture Diffusivity; D_{eff}) ของมะม่วงในกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ทำการวิเคราะห์โดยมีสมมติฐานการถ่ายเทความชื้นที่เป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิคส์ซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความชื้นจากภายในวัสดุมายังผิวด้วยสมบัติการแพร่ยังผลของความชื้นเพียงอย่างเดียว โดยมีการแปรค่าของความชื้นที่จุดต่างๆ ในวัสดุที่เป็นไปตามสมการแพร่ของฟิคส์ [28] ดังสมการที่ (7)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} (\nabla M)) \quad (7)$$

เมื่อ M คือความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (%), D_{eff} คือ ค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นในวัสดุ (ตารางเมตรต่อวินาที) และ t คือเวลาในการอบแห้ง (วินาที)

ในการหาตัวแปรค่าของความชื้นตามตำแหน่งในช่วงเวลาการอบแห้งสามารถหาค่าผลเฉลยได้ด้วยวิธีแบบวิเคราะห์ (Analytical Solution) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นมีค่าคงที่ตลอดในช่วงเวลาการอบแห้ง ความชื้นมีการเคลื่อนที่ออกจากวัสดุเป็นแบบหนึ่งมิติ ไม่เกิดการหดตัวของวัสดุ ในกรณีวัสดุเป็นแผ่นเรียบสามารถเขียนในรูปสมการที่ (8) ได้ดังนี้ [4], [29]

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

โดยที่เมื่อแทนค่า n ในสมการที่ (8) จะพบว่า $n = 1, 2, 3$ ขึ้นไปจะได้พจน์ที่มีค่าน้อยลงตามลำดับ ดังนั้นจึงแทนค่า $n = 0$ ลงในสมการที่ (8) ทำให้ได้สมการ MR ที่มีความสัมพันธ์กับสมบัติการแพร่ยังผลของความชื้น ดังสมการที่ (9) [30]

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

เมื่อ L คือ ครึ่งส่วนของความหนาขึ้นมะม่วง (เมตร)

สมการที่ (9) ทำการจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงรูปมาตรฐาน ($y = mx \pm c$) ที่อยู่ในรูปของ Logarithmic ดังสมการที่ (10)

$$\ln MR = \left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) + \ln \frac{8}{\pi^2} \quad (10)$$

จากสมการ (10) จะเห็นได้ว่า $-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$ คือ ความชันของกราฟที่มีค่าลดลงเมื่อเวลา t เพิ่มขึ้น และ $\ln \frac{8}{\pi^2}$ คือ จุดตัดบนแกน $+y$ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln MR$ ที่มีความสัมพันธ์กับ t สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นได้จากสมการที่ (11) ดังนี้

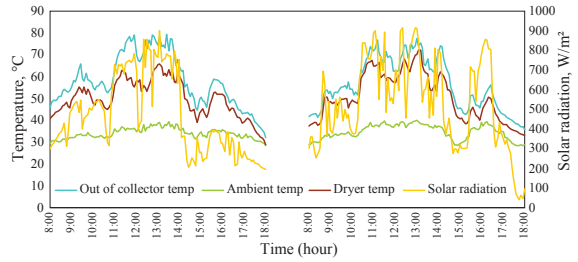
$$D_{eff} = (slope) \frac{4L^2}{\pi^2} \quad (11)$$

4. ผลการทดลอง

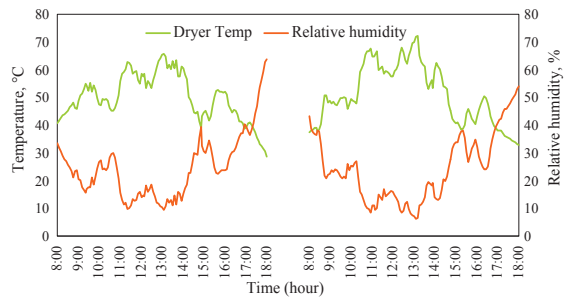
4.1 ผลการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การทดลองได้ทำการวัดรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ในราย 5 นาที ระหว่างการทดลองในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 18.00 น. ของวันที่ 18-19 มิถุนายน พ.ศ. 2561 ซึ่งเวลาดังกล่าวท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนและในระหว่างการทดลองอยู่ในช่วงฤดูฝน จึงมีผลทำให้ค่าความชื้นของรังสีอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอและมีฝนตกในเวลาประมาณ 14.00 น. ถึง 15.00 น. ของวันที่ทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าระหว่าง 28.4 องศาเซลเซียสถึง 39.2 องศาเซลเซียส ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดประมาณ 908.3 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิในห้องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 72.2 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2 ในส่วนความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงตรงข้ามกับอุณหภูมิห้องอบแห้งและจะมีค่าสูงในช่วงเวลาฝนตกดังแสดงในรูปที่ 3

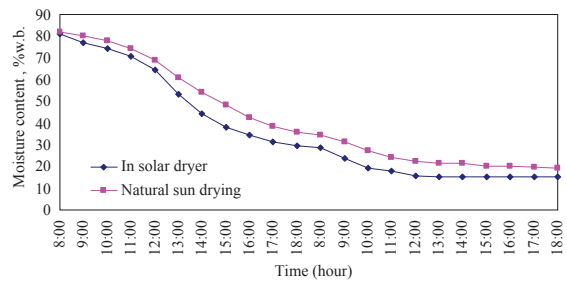
การลดลงของความชื้นในมะม่วงที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 81.5% w.b. ระหว่างการอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและตากแดดธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4 พบว่ามะม่วงที่อยู่ในเครื่องอบแห้งมีความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 14 ชั่วโมง โดยพบว่ามีค่า 15.13% w.b. ในขณะที่ช่วงเวลาเดียวกันความชื้นของมะม่วงที่ตากแดดตามธรรมชาติภายนอกเครื่องอบแห้งมีค่าลดลงมาอยู่ที่ 24.38% w.b. เมื่อได้ทำการทดลอง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทางออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งและความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น.-18.00 น.



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบความชื้นกับเวลาที่อบแห้งมะม่วงโดยเครื่องอบแห้งและการตากแดดธรรมชาติ

ต่อไปอีก 6 ชั่วโมง พบว่าค่าความชื้นมะม่วงที่ตากแดดตามธรรมชาติมีความชื้นลดลงเหลือ 20.03% w.b. และสามารถลดลงได้ถ้าการอบแห้งดำเนินต่อไป แสดงว่าการอบแห้งในเครื่องอบแห้งจะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าแบบตากแดด ถึงแม้ว่าจะอยู่ในช่วงฤดูฝน ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นไปตามการศึกษาของ Kamil และคณะ [31] ที่พบว่าศักยภาพของ

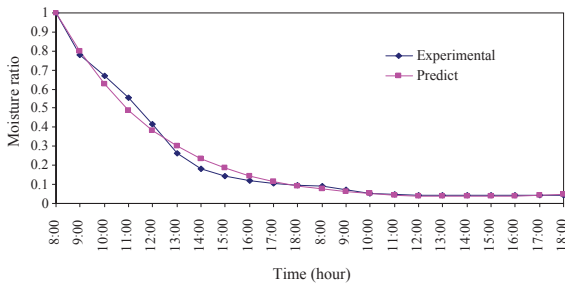
เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมจะมีการใช้เวลาในการอบแห้งลดลงจากการตากแดดธรรมชาติมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20% ขึ้นไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับฤดูกาลที่ทำการอบแห้งด้วย โดยที่การลดลงของความชื้นที่อยู่ในมะม่วงอย่างต่อเนื่องภายในเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมนั้นเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าลดลงเมื่ออากาศได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นไปตามขบวนการเพิ่มอุณหภูมิที่ความชื้นจำเพาะของอากาศคงที่ เมื่ออากาศที่มีสมบัติเช่นนี้เคลื่อนที่ผ่านวัสดุขึ้น ความร้อนที่สะสมในอากาศก็จะถูกถ่ายเทให้กับวัสดุขึ้นทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุขึ้นเป็นผลให้อากาศนั้นมีความชื้นจำเพาะและความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศมีค่าลดลงและใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดธรรมชาติ ผลการทดลองที่ได้พบว่า การลดลงของความชื้นเมื่อเทียบกับเวลาเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียวไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีการลดลงจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของมะม่วงเข้าสู่ภาวะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งซึ่งผลการทดลองนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองอบแห้งมะม่วง [4] มะเขือเทศ [32] และกล้วย [33] ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง

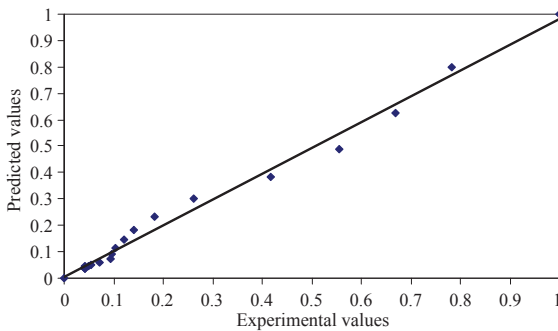
ผลจากการนำข้อมูลการอบแห้งแบบชั้นบางในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 8 แบบจำลอง นั้น มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ($RMSE$) โดยมีค่าอยู่ที่ 0.9866 ถึง 0.9904 และ 10.7620% ถึง 14.1155% ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองของ Two-term มีความเหมาะสมที่สามารถใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นของมะม่วงระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9904 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ แต่มีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย $RMSE$ เท่ากับ 10.7620% มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dissa และคณะ [34] ที่ทำการอบแห้งมะม่วงเป็นแบบชั้นบางในเครื่องอบแห้งชนิดรับรังสีอาทิตย์โดยตรง

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของการอบแห้งมะม่วง

Models	k	k_0	k_1	n	a	b	g	c	h	r^2	$RMSE$ (%)
Newton	0.2364									0.9933	14.1155
Page	0.2159			1.0568						0.9936	13.7918
Henderson and Pabis	0.2403				1.0167					0.9935	13.8750
Modified Henderson and Pabis	-0.1716				0.0012	0.5188	0.2476	0.5047	0.2476	0.9946	11.7870
Logarithmic	0.2593				1.0052			0.2288		0.9947	12.3865
Two-term		-0.1714	0.2476		0.5241	0.5274	0.1406		0.14056	0.9952	10.7620
Two-term Exponential	0.2604				0.7189					0.9934	14.0790
Approximation of Diffusion				0.2409	0.9993	-0.8155				0.9942	12.7500



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองของ Two-term



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Two-term สำหรับการอบแห้งในเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลม

ผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Two-term เทียบกับผลการทดลองในการอบแห้งมะม่วงในเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าผลของการใช้แบบจำลองมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับผลการทดลองสำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แบบจำลองนี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมได้ และในรูปที่ 6 พบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นจากการวัดมีความแตกต่างจากค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองไม่มากนักจึงมีความสอดคล้องกันของข้อมูลค่อนข้างดีซึ่งดูได้จากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองและการวัดเกือบเป็นเส้นตรง

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (D_{eff}) ของมะม่วงระหว่างการอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและตากแดดธรรมชาติที่หาจากแบบจำลองของ Fick's Diffusion พบว่ามีค่า 1.0132×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที และ 6.3325×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นมะม่วงที่ลดความชื้นในเครื่องอบแห้งจะมีค่าสูงกว่าการตากแดดธรรมชาติ (Open Sun Drying) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นที่ได้นี้เป็นค่าที่อยู่ในช่วงประสิทธิภาพการแพร่ยังผลของอาหารประเภทผักและผลไม้ที่มีการอบแห้งซึ่งโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง $10^{-8} - 10^{-12}$ ตารางเมตรต่อวินาที [34] และจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิอบแห้งที่สูงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นมีค่าที่สูงขึ้นด้วยเนื่องจากพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นในเครื่องอบแห้งได้ทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมีผลทำให้โมเลกุลเป็นอิสระต่อกันเพิ่มขึ้นและสามารถเคลื่อนตัวออกมาที่ผิวด้วยกระบวนการแพร่ได้มากกว่าการตากแดดธรรมชาติส่งผลให้แอกติวิตีของน้ำ (Water Activity) ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว

5. สรุป

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถใช้ลดความชื้นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี ซึ่งในการนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งมะม่วงพันธุ์มหาชนกสุกภายใต้สภาวะอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงตามวันที่ทำการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งเป็นแบบลดลงเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณความชื้นลดลงจาก 81.5% w.b. -15.13% w.b. โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 14 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการทดลองในฤดูฝน ในขณะที่การตากแดดธรรมชาติใช้เวลา 20 ชั่วโมง ความชื้นลดลงเหลือ 20.03% w.b. ในส่วนของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางพบว่าแบบจำลอง Two-term มีความเหมาะสมที่สามารถใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งมะม่วงสุกแบบชั้นบางได้ดีสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (D_{eff}) ของมะม่วงที่หาได้จากแบบจำลองของ Fick's Diffusion พบว่า

มีค่า 1.0132×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และ 6.3325×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที สำหรับการตากแดดธรรมชาติ ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลที่จะช่วยพัฒนาระบบอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานฟอสซิลและเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Agricultural. (2019, March 20). *Plant germplasm database mango*. [Online]. Available: http://www.doa.go.th/pvp/images/stories/top03_doc_vichakarn/mango1.pdf (in Thai).
- [2] C. M. Ajila, K. A. Naidu, S. G. Bhat, and U. J. S. Prasada Rao, "Bioactive compounds and antioxidant potential of mango peel extract," *Food Chemistry*, vol. 105, pp. 982–988, 2007.
- [3] J. Wattanathom, S. Muchimapura, S. Wittayaarekul, K. Ingkaninan, and N. Leelayuwat, "Screening the potential of *Mangifera indica* to protect and to increase the efficiency of brain functions," Faculty of Medicine, Khon Kaen University, Khon Kaen, Rep. RDG5220005, 2009 (in Thai).
- [4] W. Wang, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, and L. Yang, "Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango," *Applied Thermal Engineering*, vol. 134, pp. 310–321, 2018.
- [5] Center for Agricultural Information. (2019 May). *Thailand Foreign Agricultural Trade Statistics 2017*, Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand [Online]. Available: <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2561/thailandtradestat2560.pdf> (in Thai).
- [6] S. Janjai, I. Masiri, S. Pattarapanitchai, and J. Laksanaboonsong, "Mapping Global solar radiation from long-term satellite data in the tropics using an improved model," *International Journal of Photoenergy*, vol. 9, pp. 1–11, 2013.
- [7] J. Jareanjit, "A solar dryer technology and its development," *KKU Research Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 110–124, 2012 (in Thai).
- [8] M. A. Eltawil, M. M. Azam, and A. O. Alghannam, "Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips," *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 594–605, 2018.
- [9] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2019 March). *Alternative Energy Development Plan: AEDP2015*, Ministry of Energy, Bangkok, Thailand [Online]. Available: http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf (in Thai).
- [10] E. K. Akpınar and Y. Bicer, "Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 6, pp. 1367–1375, 2008.
- [11] 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*, vol. 105, pp. 764–773, 2017.
- [12] 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 & Emerging Technologies*, vol. 49, pp. 58–64, 2018.
- [13] 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*, vol. 128, pp. 305–312, 2018.
- [14] E. A. Mewa, M. W. Okoth, C. N. Kunyanga, and M. N. Rugiri, “Experimental evaluation of beef drying kinetics in a solar tunnel dryer,” *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 235–241, 2019.
- [15] L. M. Vargas-Rodríguez, J. E. Morales-Barrera, J. G. Herrera-Haro, J. Antonio-Bautista, R. López-Pozos, and D. Hernández-Sánchez, *Official methods of analysis of association of official analytical chemists*, 15th ed. Washington DC, 1990.
- [16] S. Soponronnarit, “*Drying of seeds and certain foods*, 7th ed., Bangkok: King Mongkut’s Institute of Technology Thonburi, 1997 (in Thai).
- [17] L. Blanco-Cano, A. Soria-Verdugo, L. M. Garcia-Gutierrez, and U. Ruiz-Rivas, “Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 1086–1094, 2016.
- [18] O. R. Alara, N. H. Abdurahman, and O. A. Olalere, “Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernonia amygdalina* leaves,” *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 18, no. 3, pp. 309–315, 2019.
- [19] B. K. Bala, *Drying and Storage of Cereal Grains*. New Delhi: Oxford and IBH Publishing Co., 1997.
- [20] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*, Marcel Dekker, New York, 1987.
- [21] L. M. Diamante and P. A. Munro, “Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices,” *Solar Energy*, vol. 51, no. 4, pp. 271–276, 1993.
- [22] Q. Zhang and J. B. Litchfield, “An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer,” *Drying Technology*, vol. 9, pp. 383–395, 1991.
- [23] V. T. Karathanos, “Determination of water content of dried fruits by drying kinetics,” *Journal of Food Engineering*, vol. 39, pp. 337–344, 1999.
- [24] A. Yagcioglu, A. Degirmencioglu, and F. Cagatay, “Drying characteristic of laurel leaves under different conditions,” in *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy*, Turkey, Adana, 1999, pp. 565–569.
- [25] S. M. Henderson, “Progress in developing the thin layer drying equation,” *Transactions of the ASAE*, vol. 17, pp. 1167–1172, 1978.
- [26] I. Doymaz, “Effect of dipping treatment on air drying of plums,” *Journal of Food Engineering*, vol. 64, pp. 465–470, 2004.
- [27] E. K. Akpınar, A. Midilli, and Y. Bicer, “Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling,” *Energy Conversion Management*, vol. 44, pp. 1689–1705, 2003.
- [28] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed., London: Oxford University Press, 1975.
- [29] K. B. Koua, W. F. Fassinou, P. G., and S. Toure, “Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava,” *Energy*, vol. 34, pp. 1594–1602, 2009.
- [30] D. Evin, “Thin layer drying kinetics of *Gundelia toumefortii* L.,” *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, no. 2, pp. 323–332, 2012.
- [31] K. Sacilik, R. Keskin, and A. K. Elicin, “Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato,” *Journal of Food Engineering*,



- vol. 73, no. 3, pp. 231–238, 2006.
- [32] S. Janjai, N. Lamler, 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*, vol. 83, no. 29, pp. 1550–1565, 2009.
- [33] A. O. Dissa, D. J. Bathiebo, H. Desmorieux, O. Coulibaly, and J. Koulidiati, “Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes,” *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 2517–2527, 2011.
- [34] I. Doymaz, “Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.),” *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 199–205, 2012.