

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ PERFORMANCE ENHANCEMENT OF SOLAR DRYER

ศิริชัย ศิริชนะ¹, อภินันต์ นามเขต¹, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹,
ประพันธ์พงษ์ สมศิลา², ทรงสุภา พุ่มชุมพล^{1*}

Sirichai Sirichana¹, Apinunt Namkhat¹, Umphisak Teeboonma¹,
Prapphanpong Somsila², Songsupa Pumchumpol^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย 34190

²คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
อ.เมือง จ.สุรินทร์ ประเทศไทย 32000

¹Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

²Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus,
Muang, Surin, Thailand, 32000

*Corresponding author e-mail: pumchumpol.s@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 19 กันยายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 28 กันยายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 4 ตุลาคม 2565

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและสร้างมูลค่าเพิ่ม ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการอบแห้งมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง ดังนั้นการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานทดแทนเป็นแหล่งผลิตความร้อนจึงมีความจำเป็น ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมพัดลมระบายอากาศ ซึ่งมีเกณฑ์ที่ใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิดพัดลมระบายอากาศคือผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีเทคนิคการอบแห้งแตกต่างกัน 4 รูปแบบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ (PSD) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดควบคุมความแตกต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 5% (SD-RH5), 10% (SD-RH10) และ 15% (SD-RH15) ตามลำดับ และได้เลือกเนื้อหมูที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $265 \pm 2\% \text{d.b.}$ เป็นตัวอย่างในการทดลอง ซึ่งมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ อัตราการอบแห้ง ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การควบคุมพัดลมระบายอากาศสามารถเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2) สมรรถนะ SD-RH10 สูงกว่า SD-RH5, SD-RH15 และ PSD 3) อัตราการอบแห้ง SD-RH10 สูงกว่า SD-RH5, SD-RH15 และ PSD โดยเฉลี่ยประมาณ 1.93%, 3.38% และ 3.38% ตามลำดับ 4) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ SD-RH10 ต่ำกว่า SD-RH5, SD-RH15 และ PSD เฉลี่ยประมาณ 7.54%,

2.16% และ 1.86% ตามลำดับ และสุดท้ายประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ PSD, SD-RH5, SD-RH10 และ SD-RH15 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 8.47%, 8.11%, 8.68% และ 8.46% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, ประสิทธิภาพ

Abstract

Drying is a process of reducing moisture content of a product to extend shelf life and increase product value. It is generally known that energy consumption of drying is rather high; therefore, a development of dryer using renewable energy as a heating source is necessary. For this reason, the performance enhancement of solar dryer using ventilation fan control was studied in this research. The criterion used for turning on-off the ventilation fan was the difference between relative humidity of the air at the inlet and outlet of the drying chamber. The four models of solar dryers were constructed by using four different drying techniques to assess the performance of the passive solar dryer (PSD) and solar dryers equipped with relative humidity difference control of 5% (SD-RH5), 10% (SD-RH10) and 15% (SD-RH15), respectively. Pork with the initial moisture content of $265 \pm 2\%$ dry basis was selected as the sampling material. The criteria used to evaluate the solar dryer performance are drying rate, solar dryer efficiency and specific energy consumption. The experimental results showed that the performance of solar dryer could be improved by using ventilation fan control technique. Also, the SD-RH10 performance was higher than that of SD-RH5, SD-RH15 and PSD. In addition, the drying rate of SD-RH10 was higher than that for SD-RH5, SD-RH15 and PSD by approximately 1.93%, 3.38% and 3.38%, respectively. Moreover, the specific energy consumption of SD-RH10 was lower than that for SD-RH5, SD-RH15 and PSD by around 7.54%, 2.16% and 1.86%, respectively. Finally, solar dryer efficiencies of PSD, SD-RH5, SD-RH10 and SD-RH15 were about 8.47%, 8.11%, 8.68% and 8.46%, respectively.

Keywords: Relative humidity control, Solar dryer, Efficiency

1. บทนำ

ประชาชนส่วนใหญ่ในประเทศไทยโดยเฉพาะเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือประกอบอาชีพเกษตรกรรม เช่น ทำนา ทำไร่ ทำสวนผลไม้ และเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีผลผลิตออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมากในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว ส่งผลให้ราคาผลผลิตต่ำกว่าที่ควรจะเป็นและยังมีส่วนเกิดความเสียหายจากการเก็บเกี่ยวไม่ทันหรือเน่าเสียเนื่องจากความชื้นผลผลิตสูง จากผลการศึกษาที่ผ่านมา (El-sebaili & Shalaby, 2012; Ahmed, 2013) พบว่าประเทศที่กำลังพัฒนาจะมีผลผลิตเสียหายจากการเก็บเกี่ยวมากกว่า 40% ของผลผลิตทั้งหมด และเกิดการเน่าเสียเนื่องจากการเก็บรักษาที่ไม่ดีเท่าที่ควรมากกว่า 80% ของผลผลิตทั้งหมด (Ahmed, 2010) ซึ่งสาเหตุหลักของผลผลิตเน่าเสียเกิดจากน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สูงเกินไป ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ใช้น้ำดังกล่าวในการเจริญเติบโตจึงเกิดการเน่าเสีย ดังนั้นหากต้องการเก็บรักษาผลผลิตให้นานขึ้นโดยไม่เกิดการเน่าเสียจะต้องลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Nwajinka & Onuegbu, 2014; Okoroigwe *et al.*, 2013; Janjai & Bala, 2012; Gutti *et al.*, 2012) วิธีการลดความชื้นที่เกษตรกรปฏิบัติกันมาอย่างต่อเนื่องคือการนำผลิตภัณฑ์ตากแดดโดยตรง ซึ่งความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์จะเป็นสิ่งกำหนดระยะเวลาในการทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง และจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Janjai & Bala, 2012; Gutti *et al.*, 2012; Hajar *et al.*, 2018) พบว่าการนำผลิตภัณฑ์ตากแดดโดยตรงจะมีปัญหาหลายด้าน เช่น ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกปนเปื้อน แมลงรบกวน สัตว์แทะเล็ม ใช้พื้นที่ในการตากมาก หรือแม้แต่ปัญหาเรื่องกลิ่น เป็นต้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาและผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งสำหรับใช้ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้พบว่าผลิตภัณฑ์มีความสะอาดและมีคุณภาพดีขึ้น (Muruganantham *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามการใช้งานเครื่องอบแห้งต้องพึ่งพาความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ โดยแหล่งพลังงานที่ใช้ในการสร้างความร้อนมีหลายรูปแบบ เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ไฟฟ้า เป็นต้น (Ankur *et al.*, 2022) พลังงานความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีแหล่งต้นกำเนิดมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีความผันผวนทางด้านราคาเป็นอย่างมากเนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลง ทำให้เกษตรกรมีภาระจากต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตและส่งผลให้กำไรลดลง ดังนั้นหลายภาคส่วนจึงส่งเสริมและสนับสนุนให้เกษตรกรใช้พลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพ หรือเชื้อเพลิงชีวมวล อย่างไรก็ตามก็ยังประสบปัญหาของกลิ่นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือแม้กระทั่งฝุ่นควัน จากผลกระทบทางด้านมลภาวะและต้นทุนที่กล่าวมา เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้รับความสนใจจากเกษตรกรเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไม่มีต้นทุนด้านพลังงาน ไร้ซึ่งมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งประเทศไทยอยู่ใกล้แนวเส้นศูนย์สูตรจึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เต็มที่ตลอดทั้งปี ซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงอย่างมาก (Chaianong & Pharino, 2015; Chimres & Wongwiset, 2016) จากงานวิจัยที่ผ่านมา (El-sebaili & Shalaby, 2012; Shrivastava *et al.*, 2014; Kapadiya & Desai, 2014; Kumar *et al.*, 2014; Narendra & Piyush, 2017; Ortiz-

Rodríguez *et al.*, 2022) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกตามการประยุกต์ใช้ได้ 3 รูปแบบ คือ 1) การตากแดดโดยตรง ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้นจะถูกนำมาตากแดดโดยตรง 2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ (Passive solar dryer, PSD) ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไล่ความชื้นจะถูกนำเข้าไปในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งจะสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม เป็นผลให้ความหนาแน่นของอากาศที่อยู่ภายในห้องอบแห้งลดลง จึงเกิดการลอยตัวของอากาศและขณะเดียวกันอากาศที่มีความหนาแน่นมากกว่าก็จะเลื่อนตัวเข้ามาแทนที่เป็นผลให้เกิดการไหลเวียนอากาศตามธรรมชาติ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวิธีการนี้จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการตากแดดโดยตรง (Gutti *et al.*, 2012; Hajar *et al.*, 2018; Muruganantham *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบจากการใช้งานเครื่องอบแห้งรูปแบบนี้คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งค่อนข้างสูง เนื่องจากการไหลเวียนอากาศเป็นไปตามธรรมชาติ ทำให้อากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพื่อพาความชื้นออกจากห้องอบแห้งในบางช่วงเวลาไม่เพียงพอจึงเกิดความชื้นสะสมที่ผิวผลิตภัณฑ์นานเกินไปจนเป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์จากความชื้นในการเจริญเติบโตจนเกิดการเน่าเสียได้ (Ahmed, 2010) และ 3) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งจะคล้ายคลึงกับเครื่องอบแห้งรูปแบบที่ 2 แต่จะมีพัดลมระบายอากาศเพื่อใช้ในการสร้างการไหลเวียนอากาศสำหรับพาความชื้นออกจากห้องอบแห้ง ข้อดีของรูปแบบนี้คือความชื้นสะสมในห้องอบแห้งจะต่ำกว่าการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ แต่ข้อด้อยคืออุณหภูมิในห้องอบแห้งจะต่ำกว่าการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ เนื่องจากพัดลมระบายอากาศจะพาทั้งความชื้นและความร้อนออกไปพร้อมกันส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งลดลง จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Aymen *et al.*, 2015; Avesahemad *et al.*, 2018; Baher *et al.*, 2018; Semwanga *et al.*, 2020; Aprajeeta & Tripathy, 2021) พบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการตากแดดโดยตรง และการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ และหากต้องการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับให้มีอัตราการอบแห้งที่ดีขึ้นต้องควบคุมอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสม

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมการระบายอากาศโดยใช้เทคนิคการควบคุมผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศทางเข้าและทางออกห้องอบแห้ง เรียกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (Solar dryer equipped with relative humidity control, SD-RH) โดยได้สร้างชุดควบคุมการทำงานพัดลมระบายอากาศของห้องอบแห้ง ซึ่งพัดลมระบายอากาศจะทำงานก็ต่อเมื่อผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศระหว่างทางออกและทางเข้าห้องอบแห้งมากกว่าค่าที่ตั้งไว้

นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ โดยเลือกใช้เนื้อหมูเป็นตัวอย่างในการทดลอง เนื่องจากเนื้อหมูแดดเดียวได้รับความนิยมในการบริโภค และราคาที่เหมาะสมก็แปรผันตามคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นหากสามารถนำเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเนื้อหมูแดดเดียวก็จะเป็นทางเลือกในการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

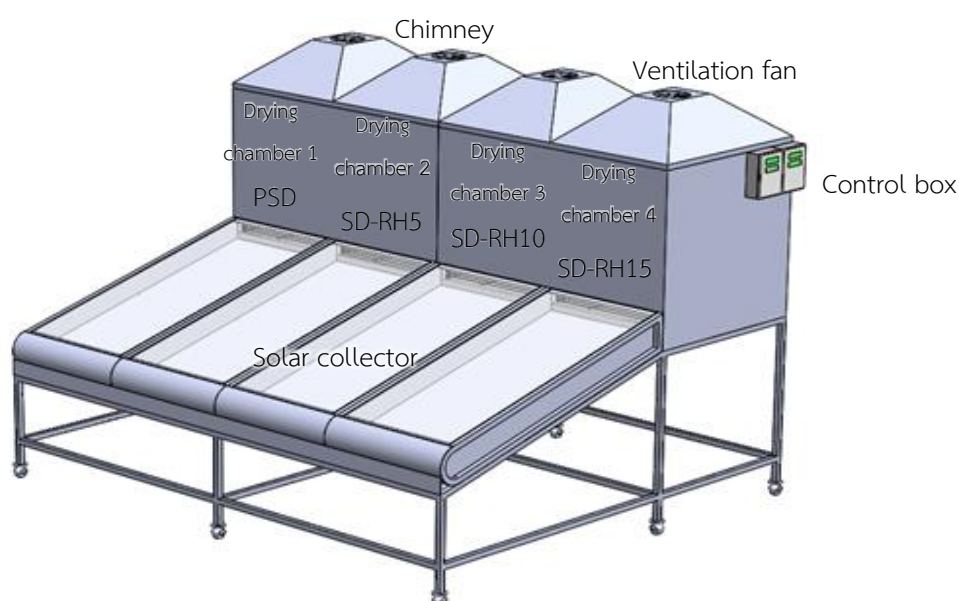
2.1 เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมการระบายอากาศโดยใช้เทคนิคการควบคุมผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกห้องอบแห้ง

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมการระบายอากาศและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การศึกษาในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 1 เครื่อง จำนวน 4 ห้องอบแห้ง ซึ่งแต่ละห้องอบแห้งมีแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์และขนาดห้องอบแห้งเท่ากัน โดยห้องอบแห้งเรียงชิดติดกันดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักที่สำคัญคือ 1) ชุดแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ โครงสร้างทำจากเหล็กกล่องผนังด้านข้างและด้านล่างปิดด้วยแผ่นสังกะสีภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนชนิดโฟลียูรีเทนความหนา 10 mm ด้านบนปิดทับด้วยกระจกใสหนา 5 mm ใช้สำหรับสร้างสภาวะเรือนกระจกและป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ โดยกระจกมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ 0.68 m^2 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งให้เอียงรับแสงอาทิตย์โดยทำมุมเท่ากับ 15 องศา และหันหน้าแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ 2) ห้องอบแห้งซึ่งเป็นส่วนที่รับพลังงานความร้อนจากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์เพื่ออบแห้งลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ผนังทุกด้านห่อหุ้มด้วยสังกะสีภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนหนา 10 mm เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมและป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องอบแห้งทั้ง 4 ห้อง ด้านบนห้องอบแห้งสร้างเป็นปล่องระบายอากาศ และทำการติดตั้งพัดลมไว้ที่ด้านบนของห้องอบแห้งที่ 2-4 (SD-RH5, SD-RH10 และ SD-RH15) 3) ชุดควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศสำหรับพาความชื้นออกจากห้องอบแห้ง ชุดควบคุมจะทำหน้าที่ตรวจวัดค่าความชื้น ซึ่งเมื่อถึงเกณฑ์ที่กำหนดชุดควบคุมจะสั่งให้พัดลมทำงานเพื่อระบายอากาศออกจากห้องอบแห้ง ในการทดลองได้กำหนดให้พัดลมระบายอากาศห้องอบแห้งที่ 2, 3 และ 4 ทำงานเมื่อผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งมากกว่า 5% (SD-RH5), 10% (SD-RH10) และ 15% (SD-RH15) ตามลำดับ ยกตัวอย่างการทำงาน เช่น กรณี SD-RH5 พัดลมระบายอากาศจะทำงานเมื่อผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งมากกว่าเกิน 5% ($RH_{do} - RH_{di} = \Delta RH > 5\%$) โดยพัดลมระบายอากาศจะทำงานต่อเนื่องไปจนกระทั่งผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ($\Delta RH \leq 5\%$) ก็จะหยุดทำงาน และจะเริ่มทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อเงื่อนไขสอดคล้องตามค่าที่ตั้งไว้ สำหรับพัดลมระบายอากาศที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm ให้อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 40 W เหมือนกันทั้ง 3 ห้องอบแห้ง (ห้องอบแห้งที่ 2-4) โดยก่อนดำเนินการติดตั้งพัดลมระบายอากาศได้ทดสอบเครื่องอบแห้งทั้ง 4 ห้องในเงื่อนไขการระบายอากาศแบบธรรมชาติและสภาพภูมิอากาศจริง เพื่อให้เชื่อมั่นว่าเครื่องอบแห้งสามารถเพิ่มอุณหภูมิและมีประสิทธิภาพเท่ากัน ซึ่งในการทดสอบพบว่าห้องอบแห้งทุกห้องสามารถสร้างอุณหภูมิและมีประสิทธิภาพเท่ากัน หลังจากนั้นจึงติดตั้งพัดลมระบายอากาศเพิ่มเข้าไปในห้องอบแห้งที่ 2-4

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ผลลัพธ์ที่ใช้ในการทดลอง

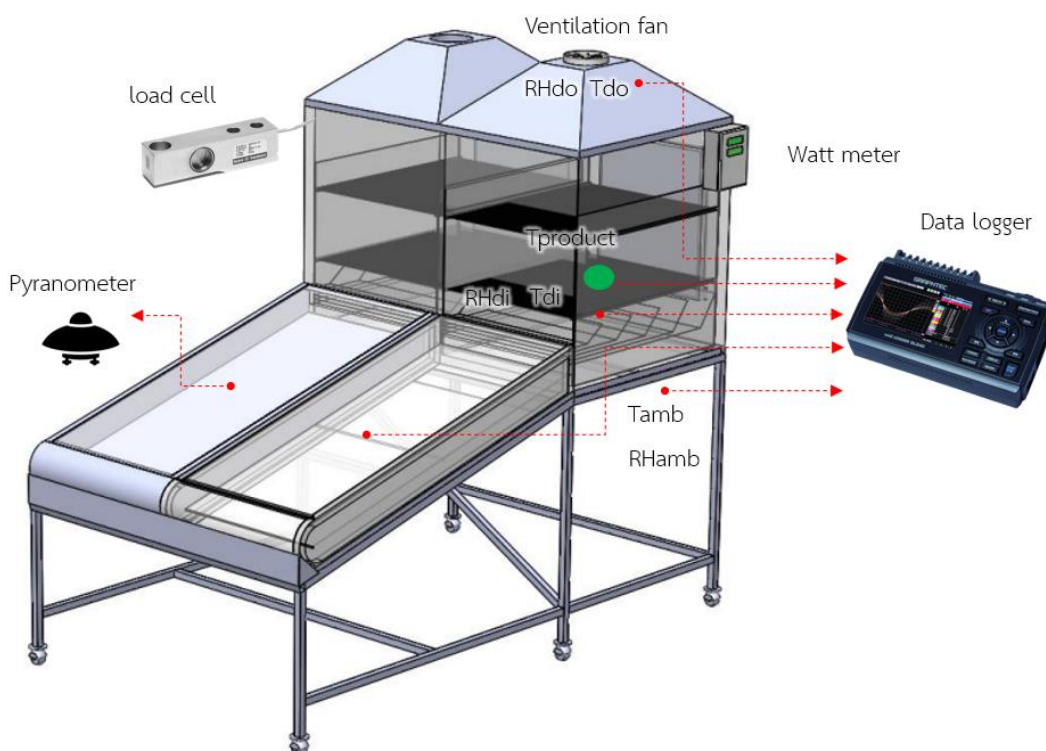
ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เนื้อหมูส่วนสันนอกสำหรับทดลอง ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $265 \pm 2\% \text{ d.b.}$ โดยหั่นเนื้อหมูตัดขวางแนวเส้นใยกล้ามเนื้อให้ได้ขนาดความยาวและความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 10 cm และ 1.5 cm ตามลำดับ ซึ่งเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดเนื้อหมูแดดเดียวที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองภายใต้พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบตามสภาพแวดล้อมจริง เพื่อทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมการระบายอากาศด้วยผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศทางเข้า (RHdi) และทางออกห้องอบแห้ง (RHdo) 3 ระดับ คือ 5% (SD-RH5), 10% (SD-RH10) และ 15% (SR-RH15) ตามลำดับ

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมเนื้อหมูและชุดทดลองพร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทดังแสดงในภาพที่ 2 ได้แก่ อุปกรณ์วัดและบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ น้ำหนักผลิตภัณฑ์ และพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ ทำการวัดและบันทึกค่าทุก 5 นาที โดยเริ่มดำเนินการทดลองในช่วงเวลา 09.00-16.00 น. รวม 7 ชั่วโมง และทำการวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมระบายอากาศของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละห้องอบแห้ง



ภาพที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยค่าสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้ง สัดส่วนการทำงานพัสดมระบายอากาศ ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง และความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture ratio, MR) คือ ดัชนีบ่งชี้ปริมาณความชื้นที่แต่ละช่วงเวลาต่อความชื้นเริ่มต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1)

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

เมื่อ	MR	คือ	สัดส่วนความชื้น, ไรหน่วย
	M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.
	M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล, %d.b.
	M_t	คือ	ความชื้นที่แต่ละช่วงเวลา, %d.b.

สำหรับการคำนวณสัดส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ ซึ่งมีสมมุติฐาน คือ ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ดังนั้นสมการที่ (1) (Vijayan *et al.*, 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018; Khuthadzo & Tilahun, 2021) สามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (2)

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

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ ปัจจัยสำคัญที่แสดงถึงค่าสมรรถนะการอบแห้งหรือความสามารถในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อช่วงเวลาอบแห้ง โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3) (Vijayan *et al.*, 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018)

$$DR = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง, kg/h
	Δm	คือ	มวลผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง, kg



Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง, h

สัดส่วนการทำงานพัดลมระบายอากาศ (Working ratio of ventilation fan, WR) คือ พารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้ชั่วโมงทำงานของพัดลมระบายอากาศ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ได้ ดังสมการที่ (4)

$$WR = \frac{E_F}{P_F \times DT} \quad (4)$$

เมื่อ	WR	คือ	สัดส่วนการทำงานพัดลมระบายอากาศ, ไร้นิหน่วย
	E_F	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้พัดลมระบายอากาศ, Wh
	P_F	คือ	กำลังไฟฟ้าพัดลมระบายอากาศ, W
	DT	คือ	ระยะเวลาอบแห้ง, h

ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar dryer efficiency, η) คือ พารามิเตอร์บ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ของเครื่องอบแห้งต่อพลังงานทั้งหมดที่เครื่องอบแห้งใช้ ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (5) (Wei *et al.*, 2018; Aprajeeta & Tripathy, 2021; Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2022)

$$\eta = \frac{m_w h_{fg}}{AI + 0.0036E_F} \times 100\% \quad (5)$$

เมื่อ	η	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, %
	m_w	คือ	ปริมาณน้ำระเหย, kg
	h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิอบแห้ง, MJ/kg
	A	คือ	พื้นที่แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์, m^2
	I	คือ	พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดการทดลอง, MJ/m^2

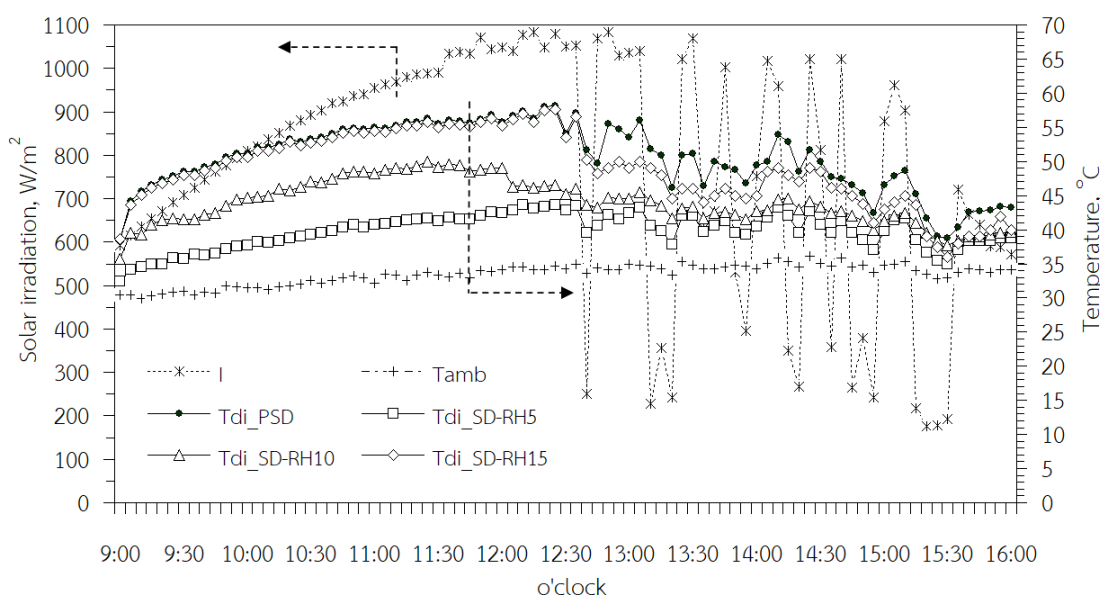
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง โดยมีความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ดังสมการที่ (6) (Wei *et al.*, 2018; Aprajeeta & Tripathy, 2021; Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2022)

$$SEC = \frac{0.0036E_F + AI}{m_w} \quad (6)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg evap-water

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยผลการทดลองที่นำเสนอประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้ง อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดกรณีตัวอย่างการทดลองครั้งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 3-5 โดยปัจจัยที่เลือกนำเสนอข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 เนื่องจากมีช่วงการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบให้เห็นชัดเจนในช่วงบ่าย ซึ่งจะทำให้สังเกตเห็นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ชัดเจน โดยข้อมูลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีรายละเอียดสรุปในตารางที่ 1



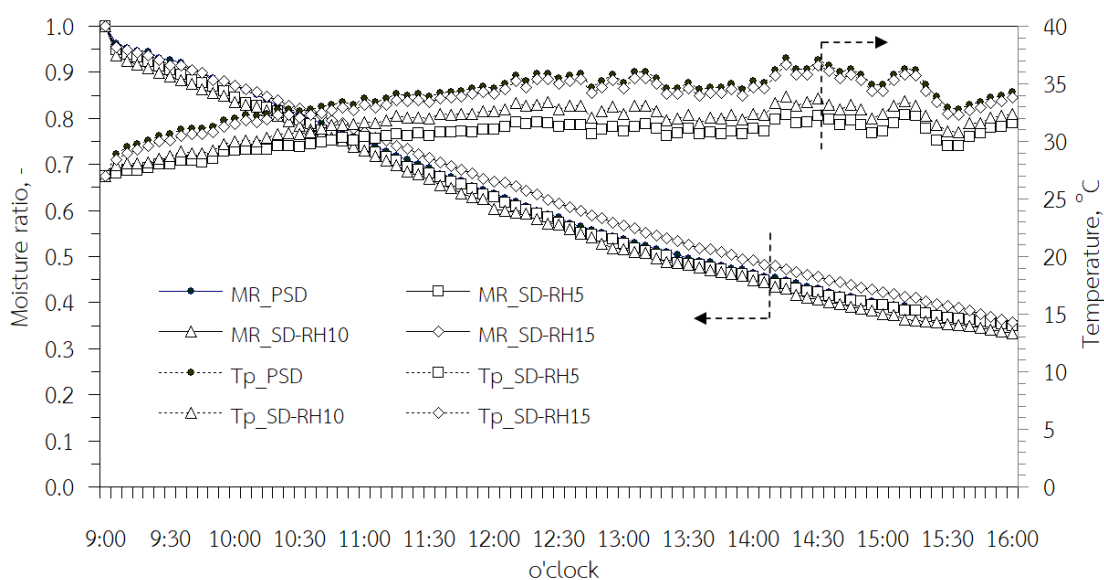
ภาพที่ 3 พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบและอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งในแต่ละช่วงเวลาในการทดลองครั้งที่ 1

ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ (I) อุณหภูมิแวดล้อม (Tamb) และอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้ง (Tdi) ที่แต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลพบว่าพลังงานตกกระทบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเช้า ซึ่งในช่วงเวลา 9:00-12:00 น. เป็นช่วงที่ท้องฟ้าแจ่มใสทำให้สามารถสังเกต

ผลต่างอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งของแต่ละห้องอบแห้งได้อย่างชัดเจน สำหรับในช่วงบ่ายเป็นช่วงที่สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงเป็นระยะ คือ มีเมฆบดบังรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งในการทดลองครั้งที่ 1 พบว่ามีค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวของห้องอบแห้งเท่ากับ 774.93 W/m^2 ในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อมก็เปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศเช่นกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อมตลอดช่วงการทดลองเท่ากับ 33.45°C สำหรับอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าห้องอบแห้งก็เปลี่ยนแปลงตามพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวของห้องอบแห้งเช่นกัน นั่นคือเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวของห้องอบแห้งมากขึ้นก็จะส่งผลให้อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นตาม โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ (PSD) มีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 50.40°C ในขณะที่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมการระบายอากาศโดยตั้งค่าผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งเท่ากับ 5% (SD-RH5), 10% (SD-RH10) และ 15% (SD-RH15) มีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 39.70°C , 44.00°C และ 48.50°C ตามลำดับ โดย SD-RH15 จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้าห้องอบแห้งใกล้เคียง PSD มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการทำงาน SD-RH15 มีการระบายอากาศค่อนข้างน้อยซึ่งสังเกตได้จากค่าสัดส่วนการทำงานพัลลมระบายอากาศ (WR เท่ากับ 0.046) ที่นำเสนอไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลจะพบว่า PSD มีอุณหภูมิมอบแห้งสูงกว่า SD-RH5, SD-RH10 และ SD-RH15 เท่ากับ 21.23%, 12.69% และ 3.77% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามสมการพลังงาน คือ $Q = \rho V C_p (T_{di} - T_{amb})$ หรือเขียนสมการใหม่ได้ว่า $T_{di} = T_{amb} + [Q / (\rho V C_p)]$ ก็จะพบว่าตัวแปรที่ห้องอบแห้งทั้ง 4 ห้องมีค่าเท่ากันประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิว (Q) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{amb}) ค่าความจุความร้อนอากาศ (C_p) และความหนาแน่นอากาศ (ρ) โดยมีตัวแปรที่ไม่เท่ากัน คือ อัตราการระบายอากาศ (V) ของแต่ละห้องอบแห้ง ด้วยเหตุผลนี้จึงส่งผลให้ SD-RH5 มีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งต่ำที่สุด เนื่องจากพัลลมระบายอากาศทำงานค่อนข้างบ่อย ซึ่งจากการทดลองพบว่ามีสัดส่วนการทำงานพัลลมระบายอากาศ (WR) เท่ากับ 0.954 ถัดมาคือ SD-RH10 (WR = 0.236) และสุดท้ายคือ SD-RH15 (WR = 0.041) ซึ่งพัลลมระบายอากาศทำงานน้อยมาก ดังข้อมูลที่น่าสนใจในตารางที่ 1 ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ PSD มีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือ SD-RH15, SD-RH10 และ SD-RH5 ตามลำดับ

ภาพที่ 4 นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลพบว่า สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงตามเวลา และเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะพบว่า SD-RH10 จะให้ค่าสัดส่วนความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 0.33 โดยมีค่าความชื้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายเท่ากับ 87.59% d.b. ซึ่งต่ำกว่าความชื้นสุดท้ายของ PSD, SD-RH15 และ SD-RH5 เท่ากับ 6.67%, 6.67% และ 4.17% ตามลำดับ จากข้อมูลในกรณีที่ SD-RH10 มีความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดหรือกล่าวในอีกความหมาย คือ สามารถระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขพลังงาน

แสงอาทิตย์ตกกระทบและระยะเวลาอบแห้งเท่ากัน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากข้อมูลผลการทดลองจะพบว่า อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของ SD-RH10 จะมีลักษณะคงที่คล้ายคลื่นขึ้นบันได โดยมีช่วงอุณหภูมิคงที่และเพิ่มขึ้นเป็นระยะซึ่งเกิดจากการระบายอากาศที่ไม่ต่อเนื่อง โดยสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ทำให้มีช่วงเวลาเพียงพอสำหรับการถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์และการแพร่ของน้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ออกมายังบริเวณผิวนอก หลังจากนั้น เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลที่บริเวณผิวนอกผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งสูงเป็นช่วงๆ เช่นกัน ดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 5



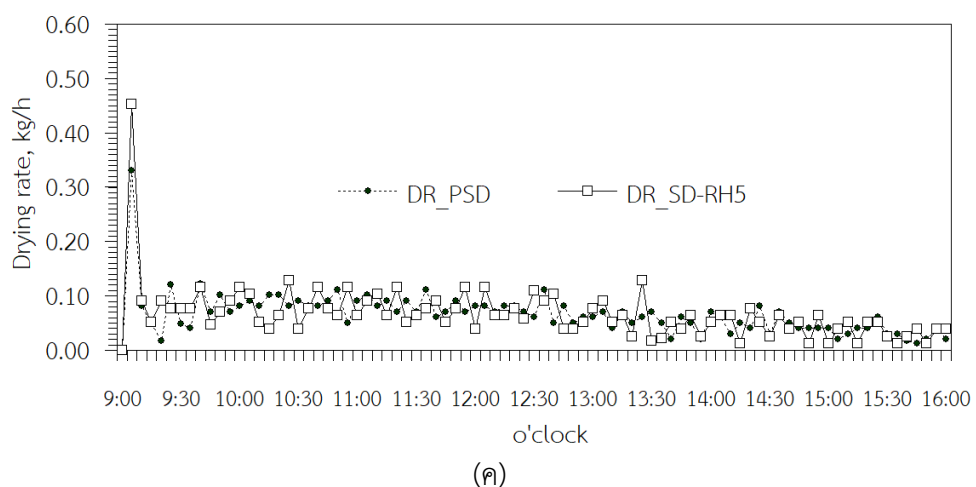
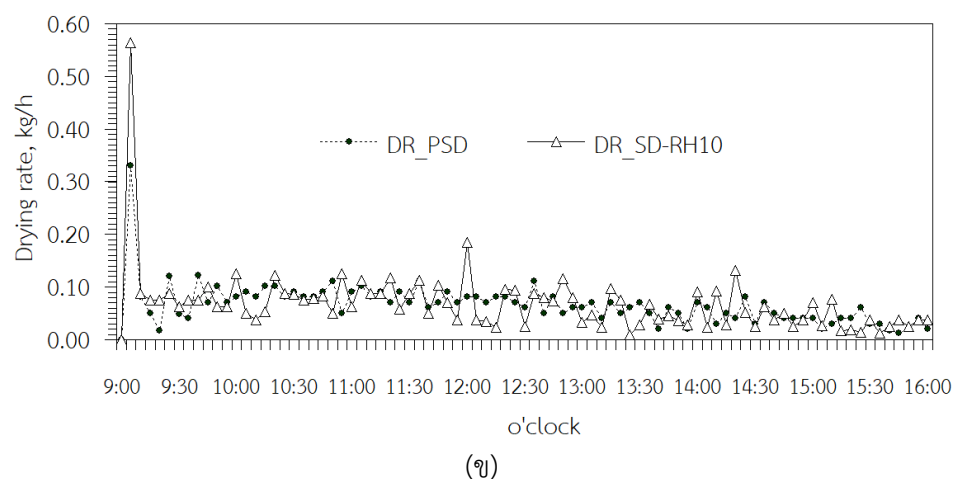
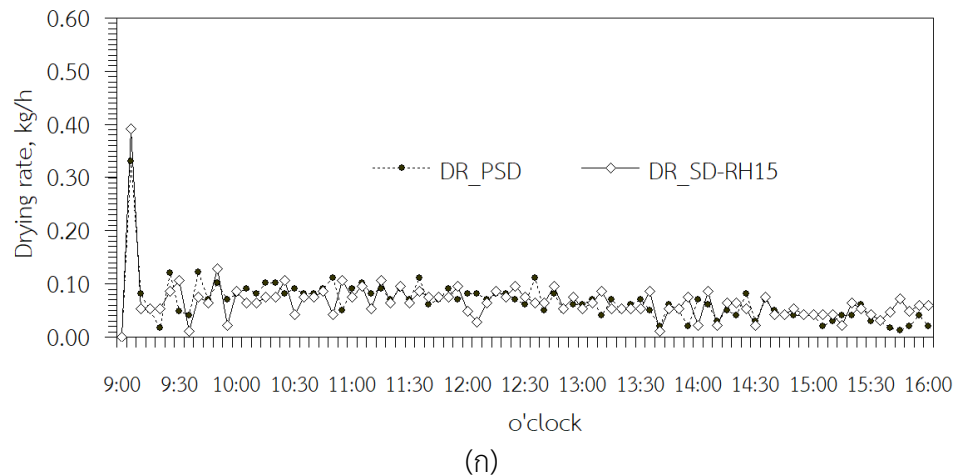
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา
ในการทดลองครั้งที่ 1

จากข้อมูลที่นำเสนอในภาพที่ 5(ก-ค) จะสังเกตได้ชัดเจนว่า ทุกเงื่อนไขการทดลองจะมีอัตราการอบแห้งสูงในช่วงแรกของการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงจึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ได้ค่อนข้างดี และเมื่อพิจารณาข้อมูลอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่นำเสนอในภาพที่ 4 ควบคู่ไปด้วยจะพบว่า ช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (Heat up) ของผลิตภัณฑ์ นั่นคือในช่วงเริ่มต้นอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิลมร้อนดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์เป็นหลัก หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลหรือระเหยน้ำที่บริเวณผิวนอกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะสูง หลังจากนั้นก็จะลดลงเมื่อน้ำที่บริเวณผิวนอกของผลิตภัณฑ์แห้งหรือเข้าสู่ช่วงที่เรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) (Sun et

al., 2019) ซึ่งจากข้อมูลที่น่าเสนอในภาพที่ 4 และ 5 จะพบว่าช่วงอัตราการรอบแหว่งคงที่ (Constant rate period) ไม่ปรากฏให้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการรอบแหว่งเปรียบเทียบกันระหว่าง PSD และ SD-RH15 ดังภาพที่ 5 (ก) จะพบว่าอัตราการรอบแหว่งของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยอัตราการรอบแหว่งในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของระบบ SD-RH15 จะสูงกว่า PSD เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากพัฒนาการของ SD-RH15 ทำงานในช่วงนี้หลังจากนั้นอัตราการรอบแหว่งของทั้งสองกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากพัฒนาการของ SD-RH15 ไม่ทำงาน ซึ่งเกิดจากผลต่างค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (ΔRH) ไม่สอดคล้องตามเงื่อนไขการทำงานของพัฒนาการอากาศ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง PSD และ SD-RH10 (ภาพที่ 5 (ข)) จะพบว่าอัตราการรอบแหว่งของ SD-RH10 ในช่วงเวลา 30 นาทีแรกจะสูงกว่า PSD หลังจากนั้นอัตราการรอบแหว่งของ SD-RH10 จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วงๆ ในขณะที่อัตราการรอบแหว่งของ PSD มีแนวโน้มลดลงช้าๆ อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ลักษณะพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลมาจาก SD-RH10 มีพัฒนาการช่วยระบายอากาศ โดยมีสัดส่วนการทำงานพัฒนาการอากาศเท่ากับ 0.236 ในขณะที่ PSD ไม่มีพัฒนาการช่วยในการระบายอากาศ และเมื่อพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับกรณีที่ระบบมีพัฒนาการช่วยระบายอากาศเกือบตลอดเวลา คือ SD-RH5 ซึ่งมี WR เท่ากับ 0.954 จะพบว่ามีลักษณะพฤติกรรมอัตราการรอบแหว่งคล้ายคลึงกับกรณี SD-RH10 อย่างไรก็ตาม SD-RH5 จะมีความถี่การเพิ่มขึ้นและลดลงของอัตราการรอบแหว่งถี่กว่า SD-RH10 ดังรายละเอียดปรากฏในภาพที่ 5 (ค)

ตารางที่ 1 นำเสนอข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 1-3 และค่าเฉลี่ยทั้ง 3 การทดลอง จากข้อมูลในตารางจะพบว่าเมื่อดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะเดียวกัน SD-RH10 จะมีอัตราการรอบแหว่งสูงที่สุดถัดมาจะเป็น SD-RH5 ในขณะที่ PSD และ SD-RH15 จะอยู่ในลำดับสุดท้ายและมีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากัน ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ PSD และ SD-RH15 มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจาก SD-RH15 มีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกับ PSD คือ ระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัดส่วนการทำงานพัฒนาการอากาศ (WR) เฉลี่ยเท่ากับ 0.041 หรือใน 7 ชั่วโมงของการรอบแหว่งพัฒนาการอากาศทำงานประมาณ 17 นาที ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราการรอบแหว่งมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจะพบว่า SD-RH10 มีอัตราการรอบแหว่งสูงกว่า SD-RH5, SD-RH15 และ PSD เฉลี่ยเท่ากับ 1.93%, 3.38% และ 3.38% ตามลำดับ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาในด้านประสิทธิภาพเครื่องรอบแหว่งจะพบว่า SD-RH10 มีประสิทธิภาพสูงกว่า SD-RH5, SD-RH15 และ PSD เฉลี่ยเท่ากับ 6.60%, 2.61% และ 2.45% ตามลำดับ และสุดท้ายยังพบว่า SD-RH10 มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่า SD-RH5, SD-RH15 และ PSD เฉลี่ยเท่ากับ 7.54%, 2.16% และ 1.86% ตามลำดับ จากข้อมูลการทดลองจะพบว่าถึงแม้อัตราการรอบแหว่ง SD-RH5 จะสูงกว่า SD-RH15 และ PSD แต่เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแล้วจะพบว่า SD-RH15 และ PSD มีสมรรถนะสูงกว่า SD-RH5 ทั้งนี้เกิดจาก SD-RH5 ใช้พลังงานในส่วนของการพัฒนา

ระบายอากาศมากกว่า SD-RH15 ในขณะที่ PSD ไม่มีการใช้พลังงานในส่วนนี้ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5) และ (6) จึงทำให้ SD-RH10 มีสมรรถนะสูงที่สุดและเหมาะสมในการเลือกไปประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 5 อัตราการอบแห้งที่แต่ละช่วงเวลาในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1-3

รายการ	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2				การทดลองครั้งที่ 3				เฉลี่ย			
	PSD	SD-RH5	SD-RH10	SD-RH15	PSD	SD-RH5	SD-RH10	SD-RH15	PSD	SD-RH5	SD-RH10	SD-RH15	PSD	SD-RH5	SD-RH10	SD-RH15
พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย, W/m^2	774.93	774.93	774.93	774.93	785.50	785.50	785.50	785.50	740.25	740.25	740.25	740.25	766.89	766.89	766.89	766.89
อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย, $^{\circ}C$	33.45	33.45	33.45	33.45	34.55	34.55	34.55	34.55	32.27	32.27	32.27	32.27	33.42	33.42	33.42	33.42
อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย, $^{\circ}C$	50.40	39.70	44.00	48.50	51.07	40.80	45.30	50.65	49.20	38.15	42.90	47.65	50.22	39.55	44.07	48.93
มวลหมูเริ่มต้น, kg^*	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
มวลหมูสุดท้าย, kg	0.530	0.524	0.514	0.530	0.525	0.518	0.510	0.524	0.543	0.540	0.524	0.544	0.533	0.527	0.516	0.533
ปริมาณน้ำที่ระเหย, kg	0.470	0.476	0.486	0.470	0.475	0.482	0.490	0.476	0.457	0.460	0.476	0.456	0.467	0.473	0.484	0.467
ความชื้นหมูเริ่มต้น, %d.b.	264.96	264.96	264.96	264.96	266.30	266.30	266.30	266.30	266.97	266.97	266.97	266.97	266.08	266.08	266.08	266.08
ความชื้นหมูสุดท้าย, %d.b.	93.43	91.24	87.59	93.43	92.31	89.74	86.81	91.94	99.27	98.17	92.29	99.63	95.00	93.05	88.90	95.00
สัดส่วนความชื้นสุดท้าย, -	0.35	0.34	0.33	0.35	0.35	0.34	0.33	0.35	0.37	0.37	0.35	0.37	0.36	0.35	0.34	0.36
เวลาในการอบแห้ง, h^*	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
กำลังไฟฟ้าพัฒนาระบายอากาศ, W^*	0.00	37.00	37.00	37.00	0.00	37.00	37.00	37.00	0.00	37.00	37.00	37.00	0.00	37.00	37.00	37.00
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ให้พัดลม, Wh	0.00	247.00	60.00	12.00	0.00	248.00	61.00	10.00	0.00	246.00	62.00	10.00	0.00	247.00	61.00	10.67
สัดส่วนการทำงานพัฒนาระบายอากาศ, -	0.000	0.954	0.232	0.046	0.000	0.958	0.236	0.039	0.000	0.950	0.239	0.039	0.000	0.954	0.236	0.041
พลังงานแสงอาทิตย์รวม, MJ	13.279	13.279	13.279	13.279	13.460	13.460	13.460	13.460	12.685	12.685	12.685	12.685	13.141	13.141	13.141	13.141
อัตราการอบแห้ง, kg/h	0.067	0.068	0.069	0.067	0.068	0.069	0.070	0.068	0.065	0.066	0.068	0.065	0.067	0.068	0.069	0.067
ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง, %	8.427	8.086	8.630	8.416	8.397	8.073	8.573	8.396	8.588	8.171	8.847	8.559	8.471	8.110	8.683	8.457
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg	28.253	29.765	27.767	28.345	28.337	29.778	27.918	28.353	27.757	29.501	27.118	27.897	28.116	29.681	27.601	28.198

* มีค่าเท่ากับทุกการทดลอง

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมการระบายอากาศโดยใช้เทคนิคการควบคุมผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้ง ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เนื้อหมูส่วนสันนอกเป็นตัวอย่างในการทดลอง นอกจากนั้นในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ และแบบที่ติดตั้งชุดควบคุมการระบายอากาศโดยใช้ผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศเป็นตัวกำหนด ผลจากการศึกษาพบว่า การควบคุมการทำงานพัดลมระบายอากาศสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ และยังพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมพัดลมระบายอากาศโดยใช้ผลต่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศระหว่างทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งเท่ากับ 10% (SD-RH10) จะมีอัตราการอบแห้ง และประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีอื่น นอกจากนั้นยังพบว่า SD-RH10 มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่ากรณีอื่นเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, A.G. (2010). Design, construction and performance evaluation of solar maize dryer. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, 23, 39-46.
- Ahmed, A.G. (2013). Drying characteristic of apple slices undertaken the effects of passive shelf solar dryer and open sun drying. **Pakistan Journal of Nutrition**, 12(3), 250-254.
- Ankur, G.B., Das, A.B., & Jayanta, D.M. (2022). Sustainability and 4E analysis of novel solar photovoltaic-thermal solar dryer under forced and natural convection drying. **Renewable Energy**, 188, 1008-1021.
- Aprajeeta, J., & Tripathy, P.P. (2021). Recent advancements in design, application, and simulation studies of hybrid solar drying technology. **Food Engineering Reviews**, 13, 375-410.

- Avesahemad, S.N., Husainy, S.P., & Gouri, W. (2018). Experimental investigation of mixed mode forced convection solar dryer for turmeric (*Curcuma Longa*). **Asian Review of Mechanical Engineering**, 7(1), 1-6.
- Aymen, E., Sami, K., Ilhem, H., & Abdelhamid, F. (2015). Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. **Renewable Energy**, 77, 1-8.
- Baher, M.A.A, Klaus, G., & Hossain, M.A. (2018). Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. **Renewable Energy**, 121, 539-547.
- Chaianong, A., & Pharino, C. (2015). Outlook and challenges for promoting solar photovoltaic rooftops in Thailand. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 48, 356-372.
- Chimres, N., & Wongwises, S. (2016). Critical review of the current status of solar energy in Thailand. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 58, 198-207.
- El-sebaili, A.A., & Shalaby, S.M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16, 37-43.
- Gutti, B., Kiman, S., & Mustafa, B.G. (2012). Design and construction of forced/natural convection solar vegetable dryer with heat storage. **ARP Journal of Engineering and Applied Sciences**, 7(10), 1213-217.
- Hajar, E., Mohammed, B., Rachid, T., & Bargach, M.N. (2018). Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 49, 58-64.
- Janjai, S., & Bala, B.K. (2012). Solar drying technology. **Food Engineering Review**, 4, 16-54.
- Kapadiya, S., & Desai, M.A. (2014). Solar drying of natural and food products: A review. **International Journal of Agriculture and Food Science Technology**, 5(6), 565-576.
- Karthikeyan, A.K., & Murugavelh, S. (2018). Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy**, 128, 305-312.

- Khuthadzo, M., & Tilahun S.W. (2021). The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. **Heliyon**, 7, 1-15.
- Kumar, A., Singh, R., & Prakash, O. (2014). Review on global solar drying status. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, 16(4), 161-177.
- Muruganantham, P.K., Kamalakannan, R.S., & Mohana, S. (2021). Performance analysis of a tubular solar dryer for drying mexican mint (*Plectranthus amboinicus*) - An experimental approach. **Energy Reports**, 7, 7-12.
- Narendra, K.M., & Piyush, N. (2017). Review on solar energy dryer for drying the agricultural products. **International Journal for Scientific Research & Development**, 5(8), 198-203.
- Nwajinka, C.O., & Onuegbu, C.U. (2014). Development of a solar cabinet dryer for root crops chips in Nigeria. **Journal of Agricultural Engineering and Technology**, 22(2), 47-58.
- Okoroigwe, E.C., Eke, M.N., & Ugwu, H. U. (2013). Design and evaluation of combined solar and biomass dryer for small and medium enterprises for developing countries. **International Journal of Physical Sciences**, 8(25), 1341-1349.
- Ortiz-Rodríguez, N.M, Condorí, M., Duran, G., & García-Valladares, O. (2022). Solar drying Technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale. **Applied Thermal Engineering**, 215, 1-31.
- Semwanga, M., Nakiguli, F., & Nasejje, S. (2020). Drying performance and economic analysis of novel hybrid passive-mode and active-mode solar dryers for drying fruits in East. **Journal of Stored Products Research**, 88, 1-11.
- Shrivastava, V., Kumar, A., & Baredar, P. (2014). Developments in indirect solar dryer: A review. **International Journal of wind and Renewable Energy**, 3(4), 67-74.
- Sun, Y., Zhang, M., & Mujumdar, A. (2019), Berry drying: Mechanism, pretreatment, drying technology, nutrient preservation, and mathematical models. **Food Engineering Reviews**, 11, 61-77.



- Vijayan, S., Arjunan, T.V., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 36, 59–67.
- Wei, W., Ming, L., Reda, H.E., Yunfeng, W., & Luwei. Y. (2018). Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. **Applied Thermal Engineering**, 134, 310–321.