

Performance investigation of a transparent roof forced convection solar drying system for drying *Andrographis paniculata*

Kotchanipha Yuyen¹, Sarawut Nabnean^{2*}

¹Division of Science Education, Faculty of Science and Technology,
Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand

²Division of Science, Major in Physics, Faculty of Science and Technology,
Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand

*Corresponding author's e-mail: sarawut.n@lawasri.tru.ac.th

Received: 14 January 2026, Revised: 13 April 2026, Accepted: 15 April 2026

Abstract

This research investigated the performance of a transparent roof forced convection solar drying *Andrographis paniculata* (commonly known as “Fah Talai Jone”). The system was designed as a large-scale greenhouse with an area of 3×12 m². The roof structure consisted of alternating transparent and opaque corrugated metal sheets, each measuring 50×120 cm², while the walls were constructed from concrete blocks enclosing all four sides. The ventilation system comprised 6 fans powered by two 80 watt photovoltaic panels. In the experiment, a total of 200 kg of *Andrographis paniculata* was dried using the system between 8:00 a.m. and 6:00 p.m. The average solar radiation intensity during the experimental period was 366 W/m². Drying system temperature ranged from 36 - 41 °C, which is suitable for herbal processing as it prevents thermal degradation. The initial moisture content of 82% (wb) was successfully reduced to 10% (wb) within only three days. In comparison, natural sun drying achieved a final moisture content of 22% (wb). The solar dryer compared to natural sun drying a 40% reduction in drying time. The dried *Andrographis paniculata* obtained from the solar dryer demonstrated superior quality in terms of bioactive compound retention, color attributes, and a water activity of 0.41, which allows for extended storage stability by reducing the risk of fungal growth. Furthermore, the system effectively prevented insect infestation, rainfall interference, and dust contamination, ensuring a more hygienic and reliable drying process.

Keywords: Solar drying system, *Andrographis paniculata*, Wet basis moisture content, Water activity

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสเพื่อใช้อบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมีลักษณะเป็นโรงเรือนขนาดใหญ่ มีพื้นที่ 3×12 ตารางเมตร สำหรับหลังคาใช้หลังคาอลูมิเนียมทึบสลับกับหลังคาอลูมิเนียมใสสลับกันแต่ละแถว ซึ่งหลังคาแต่ละแผ่นมีขนาด 50×120 ตารางเซนติเมตร ส่วนผนังเป็นอิฐบล็อกก่อขึ้นเป็นกำแพงทั้ง 4 ด้าน ระบบระบายอากาศประกอบด้วยพัดลม 6 ตัว ต่อเข้ากับแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 80 วัตต์ จำนวน 2 แผง ในการทดลองในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสในการอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรจำนวน 200 กิโลกรัม ขณะที่ทำการทดลองอบแห้งในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 18.00 น. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 366 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งแปรค่าอยู่ในช่วง 36 ถึง 41 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมสำหรับการแปรรูปสมุนไพรที่ไม่สูงมากเกินไปและสามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรที่มีความชื้นเริ่มต้น 82 (%wb) จนเหลือความชื้นเพียง 10 (%wb) ภายในระยะเวลาเพียง 3 วัน เมื่อเทียบกับการตากแห้งฟ้าทะลายโจรตามธรรมชาติ ซึ่งเหลือความชื้นสุดท้าย 22 (%wb) เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติแล้วสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้ 40% สำหรับสมุนไพรฟ้าทะลายโจรแห้งที่ได้จากระบบอบแห้งนั้น มีคุณภาพที่ดี ทั้งทางด้านปริมาณสารสำคัญ ผลของสี และปริมาณน้ำอิสระที่มีค่า 0.41 เป็นผลให้สามารถเก็บรักษาฟ้าทะลายโจรแห้งได้นานเนื่องจากไม่เกิดเชื้อราได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันแมลง ฝน และฝุ่นละอองได้ดี

คำสำคัญ: ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, ฟ้าทะลายโจร, ความชื้นมาตรฐานเปียก, ปริมาณน้ำอิสระ

1. บทนำ (Introduction)

ในช่วงปลายปี 2562 ที่ผ่านมามีการระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 (COVID-19) อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อไวรัสโควิด-19 จำนวนมาก และเสียชีวิตจากเชื้อโควิด-19 กว่า 34,000 คน [1] ในขณะเดียวกันทางองค์การอนามัยโลกจึงประกาศให้โรคติดเชื้อโควิด-19 เป็นโรคระบาดและหาแนวทางในการป้องกันและรักษาผู้ที่ติดเชื้อโควิด-19 ทั้งวัคซีนป้องกันและยาปฏิชีวนะเพื่อลดอาการของโรคในผู้ป่วยที่ติดเชื้อ ปัจจุบันผู้ติดเชื้อโควิด-19 ได้ลดลงอย่างมาก หรือเทียบกับการเป็นไข้หวัด แต่ก็ต้องเตรียมความพร้อมและระมัดระวังอย่างมากเมื่อเกิดการระบาดขึ้นอีกครั้ง สำหรับประเทศไทยมีการปลูกพืชสมุนไพรในหลายพื้นที่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในเขตภาคกลางของประเทศมีสมุนไพรพื้นถิ่นหลายชนิดเช่น โพล ขมิ้นชัน ขิง ตะไคร้ ใบมะกรูด ฟักทะลายโจร เป็นต้น สมุนไพรฟักทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่มีฤทธิ์เย็นและเป็นสมุนไพรที่อยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ มีสรรพคุณหลักคือ ลดไข้ แก้ไอ แก้เจ็บคอ บรรเทาอาการหวัด และช่วยลดการอักเสบของระบบทางเดินหายใจ มีสารสำคัญ คือ แอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide) ช่วยต้านเชื้อไวรัส และเสริมภูมิคุ้มกัน ซึ่งเหมาะสำหรับต้านโรคโควิด-19 ซึ่งในจังหวัดลพบุรีอยู่ในเขตภาคกลางของประเทศ มีการปลูกพืชสมุนไพรเป็นจำนวนมากเช่นกัน สำหรับสมุนไพรทางเลือกที่มีฤทธิ์ต้านโรคโควิด-19 คือ ฟักทะลายโจรที่มีการปลูกและแปรรูปในพื้นที่จังหวัดลพบุรีในหลายพื้นที่ เป็นพืชสมุนไพรที่สามารถนำรักษาผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 อีกทั้งการเข้าถึงสมุนไพรฟักทะลายโจรของคนทั่วไปในประเทศไทยยังเข้าถึงได้ง่ายและราคาไม่สูง [2] ฟักทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่บรรจุอยู่ในบัญชียาสมุนไพรของกรมแพทย์แผนไทยมีสารสำคัญ คือ แอนโดรกราโฟไลด์ที่มีฤทธิ์ลดอาการปวด ต้านการอักเสบ ลดไข้ [3] ซึ่งปกติสารสำคัญนี้มีอยู่ทุกส่วนของต้นฟักทะลายโจร แต่จะมีมากสุดอยู่ที่บริเวณใบพบสารในกลุ่มแลคโตน (Lactone) มีองค์ประกอบ 4 ชนิด ประกอบด้วย แอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide) นีโอแอนโดรกราโฟไลด์ (Neoandrographolide) 14-ดีออกซี-11,12-ไดไฮโดรแอนโดรกราโฟไลด์ (14-Deoxy-11,12-Didehydroandrographolide) และ 14-ดีออกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (14-Deoxyandrographolide) [4] จากข้อมูลตำรามาตรฐานยาสมุนไพร (Thai Herbal Pharmacopoeia) กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ได้ระบุถึงปริมาณสารสำคัญกลุ่มแลคโตนรวมไม่น้อยกว่าร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะต้องมีปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก [5] จึงจะเป็นสมุนไพรฟักทะลายโจรที่มีประสิทธิภาพในการรักษาโรค โดยปกติจะมีการแปรรูปเป็นฟักทะลายโจรแห้งก่อนจะนำมาทำเป็นยา โดยการทำให้แห้งถ้ามีความชื้นสูงจะทำให้เกิดเชื้อราได้ง่าย และส่งผลให้ยาที่ฟักทะลายโจรที่มีความชื้นสูงไม่มีคุณภาพ

วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ไร่นาธารสาประชาเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่อยู่ในเขตตำบลนิคมสร้างตนเอง อำเภอเมืองจังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่เน้นด้านการปลูกและแปรรูปพืชสมุนไพร เป็นอีกกลุ่มที่มีความสำคัญในเรื่องแนวทางผลิตสมุนไพรที่มีความสำคัญยิ่งโดยเฉพาะการผลิตฟักทะลายโจรแห้งส่งให้กับโรงพยาบาลในการจัดทำยาฟักทะลายโจรให้กับผู้ป่วยเป็นจำนวนมากและฟักทะลายโจรที่ผลิตในช่วงแรกเป็นฟักทะลายโจรที่ได้จากการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งมีการปนเปื้อนฝุ่นละอองในบรรยากาศ การเปียกฝน และความชื้นของอากาศแวดล้อมที่สูง ทำให้เกิดเชื้อราได้ง่ายและไม่มีความปลอดภัยส่งผลให้ไม่สามารถส่งขายให้กับโรงพยาบาลได้ ดังนั้นทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจึงได้ทำการแปรรูปด้วยเครื่องอบแห้งแบบไฟฟ้าซึ่งทำให้ฟักทะลายโจรที่ได้มีคุณภาพ แต่ปัญหาเรื่องของพลังงานไฟฟ้าที่ควบคุมต้นทุนได้ยาก รวมถึงปริมาณการอบแห้งแต่ละครั้งไม่เพียงพอกับความต้องการของโรงพยาบาล จึงได้ทำการปรึกษากับทางนักวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ซึ่งได้เสนอแนวทางในการใช้พลังงานทดแทนทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์

มาใช้เป็นพลังงานความร้อนในการอบแห้ง ซึ่งปัจจุบันระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีจำนวนมาก โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรง [6-8] ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม [9-10] ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม กล่าวคือระบบที่รับรังสีอาทิตย์โดยตรงร่วมกับระบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม [11-13] สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการอบแห้งสมุนไพรฟักทะลายโจรมีการศึกษาการอบแห้งฟักทะลายโจรด้วยเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกสำหรับอบแห้งสมุนไพรฟักทะลายโจร [14] เครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรงแบบเรือนกระจกอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งค่อนข้างสูงและในช่วงที่ฝนตกอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งลดลง จึงจำเป็นต้องใช้การเปิดระบบแก๊ส LPG หรือแก๊สเบียร์นอร์มาช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งและเปิดพัดลมไฟฟ้ากระแสสลับที่ติดตั้งไว้ทางด้านหลังของเครื่องอบแห้งเพื่อช่วยระบายความชื้น การใช้พลังงานความร้อนเสริมในการอบแห้งดังกล่าวทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาจึงมีการวิจัยน้อยมากสำหรับการอบแห้งฟักทะลายโจรด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม ทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ไร่นาธารสาประชาได้ทำการวิจัยร่วมกับนักวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีในการร่วมกันพัฒนาระบบอบแห้ง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหลักในการทำแห้ง โดยได้ทำการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส โดยได้ทำการศึกษาศรรณะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟักทะลายโจร ซึ่งเป็นระบบอบแห้งแบบพาความร้อนแบบบังคับ และปิดคลุมด้วยหลังคาใสเป็นการอบแห้งสมุนไพรฟักทะลายโจรด้วยพลังงานสะอาด เพื่อลดต้นทุนในการผลิตฟักทะลายโจรอบแห้งที่ได้คุณภาพ และทำการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำอิสระ สี และปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ของฟักทะลายโจรที่ได้จากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 ปริมาณความชื้นของวัสดุ

การอบแห้ง หมายถึง กระบวนการลดความชื้นของวัสดุ (Moisture material) โดยอาศัยความร้อนเพื่อทำให้น้ำเกิดการระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งโดยปกติผักผลไม้ หรือสมุนไพรสด จะมีปริมาณความชื้นสูง ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ค่อนข้างง่าย การอบแห้งจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งเพื่อช่วยลดความชื้นของวัสดุ ทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Micro-organism) ได้ ปกติจะสามารถบอกปริมาณความชื้นของวัสดุได้ 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, wb) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, db) ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียก หมายถึง อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำภายในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุชื้น และความชื้นมาตรฐานแห้ง หมายถึง อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [15]

$$M_w = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

$$M_d = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)

m_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (กิโลกรัม)

m_f คือ น้ำหนักวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

2.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่นำมาใช้ในการอบแห้งหรือการระเหยความชื้นออกจากวัสดุต่อค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคา ซึ่งในการทดลองนี้เป็น การระเหยน้ำของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร โดยการคำนวณนี้ถือได้ว่าเป็น การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งที่ได้รับพลังงานจาก การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เข้ามาภายในระบบอบแห้ง สำหรับประสิทธิภาพ เชิงความร้อนนี้หาได้จากสมการที่ 3 หรือสมการที่ 4 [16]

$$\eta_s = \frac{Q}{A_s G} = \frac{mC(T_o - T_i)}{A_s G} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_s = \frac{WL}{A_s G} \times 100\% \quad (4)$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (ตารางเมตร)

C คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (จุลต่อกิโลกรัม- องศาเซลเซียส)

G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (วัตต์ต่อ ตารางเมตร)

L คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (จุลต่อกิโลกรัม)

m คือ อัตราการไหลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

Q คือ พลังงานที่นำมาใช้ในการอบแห้งหรือการระเหยความชื้น ออกจากวัสดุ (จุล)

T_o คือ อุณหภูมิอากาศจากระบบอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

T_i คือ อุณหภูมิอากาศเข้าระบบอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

W คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (กิโลกรัม)

η_s คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง (%)

สำหรับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุหรือฟ้าทะลายโจรอาจหาได้จาก ผลต่างของมวลรวมก่อนเข้าระบบอบแห้งกับมวลแห้งที่ได้ หรือสามารถหาได้ จากการคำนวณด้วยปริมาณความชื้นของฟ้าทะลายโจรที่เปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ 5 [16]

$$W = \frac{m_i(M_i - M_f)}{100 - M_f} \quad (5)$$

โดยที่ M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของฟ้าทะลายโจร (%wb)

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของฟ้าทะลายโจร (%wb)

นอกจากนี้สมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการทดลองนี้ สามารถวัดได้จากการประหยัดเวลาในการอบแห้ง (Saving in drying time, S) [16] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 ดังนี้

$$S = \frac{(t_{os} - t_{sd})}{t_{os}} \times 100\% \quad (6)$$

โดยที่ S คือ การประหยัดเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (%)

t_{os} คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งฟ้าทะลายโจรตามธรรมชาติ (ชั่วโมง)

t_{sd} คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งฟ้าทะลายโจรด้วยระบบ อบแห้ง (ชั่วโมง)

พลังงานที่ใช้ในการดึงความชื้นออกจากวัสดุขึ้น เป็นในการระเหยน้ำออกจาก วัสดุขึ้น 1 กิโลกรัมต่อปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งหรือเรียกว่าอัตรา การดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 ดังนี้ [16]

$$SMER = \frac{W}{A_s G} \quad (7)$$

โดยที่ SMER คือ อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์- ชั่วโมง)

W คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (กิโลกรัม)

A_s คือ พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (ตารางเมตร)

G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (วัตต์ต่อ ตารางเมตร)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นการหาพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ อบแห้งปริมาณ 1 กิโลกรัม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 ดังนี้ [16]

$$SEC = \frac{A_s G}{W} \quad (8)$$

โดยที่ SEC คือ อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อ กิโลกรัม)

W คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (กิโลกรัม)

A_s คือ พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (ตารางเมตร)

G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (วัตต์ต่อตารางเมตร)

2.3 การวิเคราะห์สี

การตรวจสอบคุณภาพทางด้านสีของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรอบแห้ง โดยอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อน แบบบังคับชนิดหลังคาใส ทำการตรวจสอบสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab โดยค่าสีที่วัดได้อ้างอิงตามระบบ Commission International de l'Eclairage (CIE) แสดงผลการวัดสีในรูปค่าพารามิเตอร์ของสี (L^*, a^*, b^*) ซึ่งค่า L^* เป็นการบอกถึง ความสว่าง (Lightness) โดยค่า $L^*=100$ แสดงถึงสีขาว จนถึงค่า $L^*=0$ แสดงถึงสีดำ สำหรับค่า a^* บอกถึงความเป็นสีแดง-เขียว (Redness-Greeness) โดยค่าของ $+a^*$ แสดงถึงสีแดง และค่า $-a^*$ แสดงถึงสีเขียว ส่วนค่า b^* บ่งบอก ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (Yellowness-Blueness) โดยค่า $+b^*$ บ่งบอกถึง ความเป็นสีเหลือง และค่า $-b^*$ บ่งบอกถึงความเป็นสีน้ำเงิน ในปัจจุบันนิยมใช้ผลสี ดังกล่าวในการบอกลักษณะของสีของวัตถุที่ทำการศึกษา สำหรับข้อมูลใน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้งโดยแสดงการคำนวณ ค่าความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนไปจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการอบแห้ง หรือฟ้าทะลายโจรสด เป็นไปตามสมการที่ 9 สำหรับการคำนวณค่าความเข้ม ของสี (Hue angle, h) ของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรโดยใช้ค่า a^* และ b^* สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 10 สำหรับค่าความอิ่มตัวของสีหรือความสด ของสี (Chroma, C^*) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 11

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \quad (9)$$

$$h = \begin{cases} \tan^{-1}(b^*/a^*) & (\text{when } a^* > 0) \\ 180^\circ + \tan^{-1}(b^*/a^*) & (\text{when } a^* < 0) \end{cases} \quad (10)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (11)$$

โดยที่ ΔE คือ ค่าความแตกต่างรวมของสีของฟ้าทะเลโย (-)

L^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกความสว่างของสีของฟ้าทะเลโยรอบแท่ง (-)

L_{ref}^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกความสว่างของสีของฟ้าทะเลโยสด (-)

a^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีแดงหรือเขียวของฟ้าทะเลโยรอบแท่ง (-)

a_{ref}^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีแดงหรือเขียวของฟ้าทะเลโยสด (-)

b^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินของฟ้าทะเลโยรอบแท่ง (-)

b_{ref}^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีเหลืองหรือเขียวของฟ้าทะเลโยสด (-)

h คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าเฉดสีของฟ้าทะเลโยรอบแท่ง (-)

C^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความอิ่มตัวของสีหรือความสดของสีของฟ้าทะเลโยรอบแท่ง (-)

2.4 อุปกรณ์การทดลอง

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่และเหมาะสมสำหรับเป็นระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ โดยมีลักษณะโครงสร้างมุงด้วยหลังคาปิดคลุมแบบกระเบื้องลอนคู่ขนาด 50x120 ตารางเซนติเมตร เคลือบสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ซึ่งมีส่วนให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบอบแห้งนั้นมีสีสดและสารสำคัญไม่ถูกทำลาย พื้นที่หลังคาทั้งหมดที่ใช้มีขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 12 เมตร ซึ่งเรียงสลับเป็นหลังคาใสครึ่งหนึ่งของหลังคากระเบื้องแบบทึบแสง ผนังห้องอบแห้งเป็นผนังอิฐบล็อก มีประตูเข้า-ออกหนึ่งทาง ภายในระบบอบแห้ง

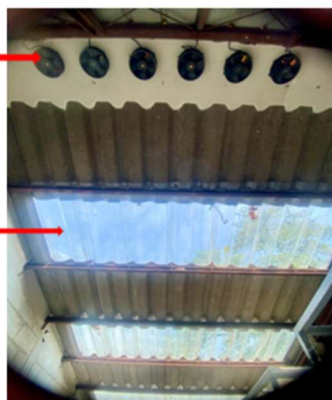
สามารถใส่ชั้นวางผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 8 ชั้น อันละ 10 ชั้น แต่ละชั้นประกอบด้วยตะแกรงสำหรับวางผลิตภัณฑ์ โดยตะแกรงขนาดความกว้าง 0.9 เมตร ยาว 0.9 เมตร ทำด้วยมุ้งลวดซึ่งทำให้อากาศไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งได้เป็นอย่างดี บริเวณด้านหน้าของระบบอบแห้งผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งพัดลม DC 12 โวลต์ 25 วัตต์ ขนาด 6.8 นิ้ว จำนวน 6 ตัว สูงจากพื้น 3.50 เมตรโดยต่อเข้ากับแผงโซลาร์เซลล์แบบผลึกเดี่ยวขนาด 80W รุ่น CNSDPV80M จำนวน 2 แผ่น โดยต่อพัดลมจำนวน 3 ตัวต่อแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง สำหรับพัดลมที่ใช้ในระบบอบแห้งนี้ทำหน้าที่ระบายอากาศขึ้นออกจากระบบอบแห้ง โดยการทดลองแต่ละครั้งสามารถรองรับการอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะเลโยได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 1

2.5 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งฟ้าทะเลโย โดยมีวิธีการเตรียมฟ้าทะเลโยจากไร่ทหารสวนประชา อายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 3.5 - 4.5 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการสะสมสารแอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide) สูงสุด ปราศจากรอยโรคและการปนเปื้อนของเชื้อรา นำมาล้างน้ำให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนเศษดิน แล้วนำมาตัดเป็นท่อนความยาวประมาณ 3 - 4 เซนติเมตร จำนวน 200 กิโลกรัม เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทความร้อนก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง โดยเริ่มทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 08.00 - 18.00 น. ในระหว่างวันที่ทำการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยหัววัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP22 ช่วงการใช้งาน -40 องศาเซลเซียส ถึง 80 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อน 1% ทำการติดตั้งบนหลังคาของระบบอบแห้ง ดังรูปที่ 2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (Thermocouples type K) ค่าความแม่นยำอยู่ที่ $\pm 2\%$ สำหรับวัดอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม ดังรูปที่ 3 การวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยหัววัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity Sensor) ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 ช่วงการใช้งาน -40 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส มีค่าความแม่นยำ 1.3% สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งเทียบกับอากาศแวดล้อม ดังรูปที่ 4 ซึ่งเก็บข้อมูลเฉลี่ยทุก ๆ 10 นาทีด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8432-20 ดังรูปที่ 5 โดยที่รูปที่ 2 - 5 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากสถานที่ดำเนินการวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการวัดอัตราการไหลของอากาศและช่วงมวลตัวอย่างของฟ้าทะเลโยรอบแท่งเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่ามวลที่ซึ่งจะคงที่ซึ่งจะหยุดการทดลอง

พัดลมระบาย
ความชื้น/อากาศ

หลังคาใส



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) หลังคาใสปิดคลุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และพัดลมระบายความชื้น/อากาศ
(ข) ชั้นวางฟ้าทะเลโยภายในระบบอบแห้ง



รูปที่ 2 หัววัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer)
ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP22 ติดตั้งบนหลังคาระบบอบแห้ง



รูปที่ 3 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouples type K)
สำหรับวัดอุณหภูมิ ติดตั้งภายในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 4 หัววัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity Sensor)
ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 ติดตั้งภายในเครื่องอบแห้งและภายนอก



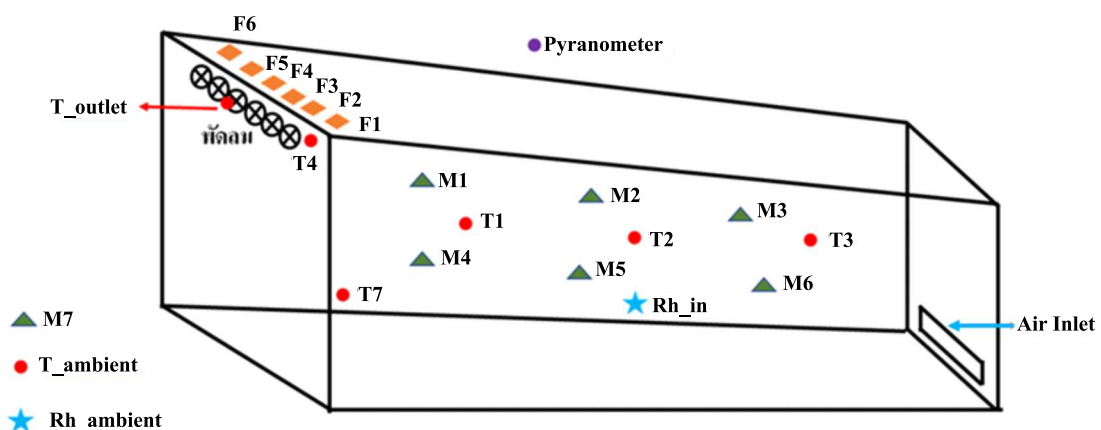
รูปที่ 5 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)
ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8432-20

สำหรับตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งมวลตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6 หลังจากนั้นเมื่อได้ฟ้ายะลายนอร์แห่งจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ขั้นตอนถัดไปจะนำมวลฟ้ายะลายนอร์ที่ได้ใส่ตู้อบและตั้งอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ตามมาตรฐาน AOAC, [17]) หรือจนกว่ามวลจะไม่ลดลง

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งฟ้ายะลายนอร์ โดยทำการทดลองอบแห้งฟ้ายะลายนอร์แบบเต็มพื้นที่ตากสามารถอบแห้งฟ้ายะลายนอร์ได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม โดยการทดลองอบแห้งฟ้ายะลายนอร์ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ท้องฟ้า

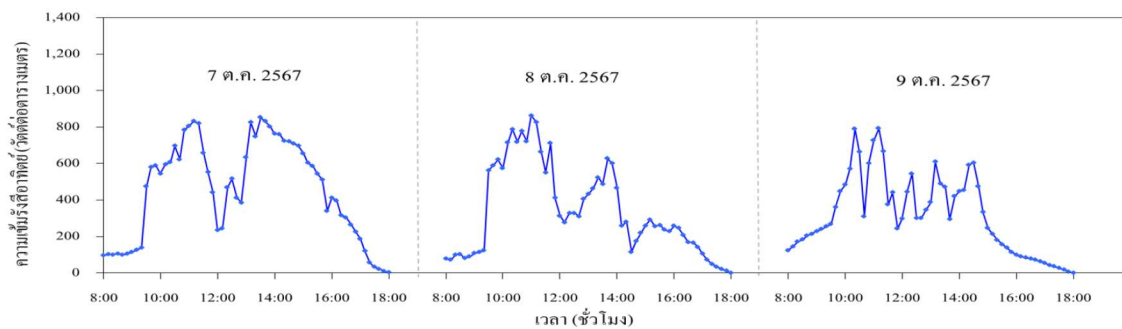
เริ่มปลอดโปร่งมากขึ้น ฝนลดลง มีแดดเกือบตลอดทั้งวัน ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 08.00 - 18.00 น. ในขณะที่ทำการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการชั่งมวลเพื่อศึกษาอัตราการลดลงของมวลฟ้ายะลายนอร์ที่อบแห้งภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการวางมวลตัวอย่างไว้ภายในและภายนอกของระบบอบแห้งดังรูปที่ 6 และบันทึกอัตราการไหลของอากาศทุก ๆ 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังได้ทำการบันทึกข้อมูลของความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ภายนอกด้านบนหลังคาของระบบอบแห้ง สำหรับอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดทั้งภายในระบบอบแห้งเทียบกับแวดล้อม เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างและการแปรค่าของผลที่ได้จากการวัดทั้งภายในระบบอบแห้งและสภาวะแวดล้อมในเวลาเดียวกัน



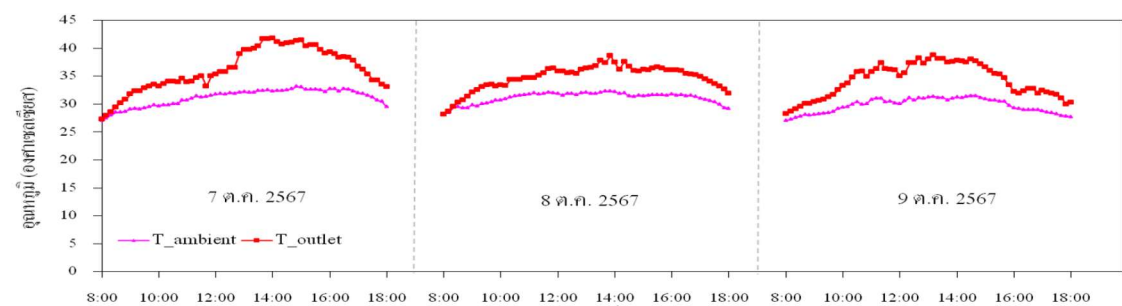
รูปที่ 6 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ (T) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Rh) ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) และมวลตัวอย่าง (M)

สำหรับการทดลองอบแห้งฟ้ายะลวยโจรด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในช่วงวันที่ 7 - 9 ตุลาคม พ.ศ. 2567 โดยทำการทดลองอบแห้งฟ้ายะลวยโจรแบบเต็มพื้นที่ภายในระบบอบแห้งซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวมีลักษณะของท้องฟ้าแจ่มใสและมีเมฆบางส่วนตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดในวันที่สองของการทดลองประมาณ 864 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยระหว่างการทดลองอยู่ที่ 366 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นดังรูปที่ 7 สำหรับรูปที่ 8 เป็นการแปรค่าอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งบริเวณด้านหน้า กลาง และด้านหลัง เทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับค่าอุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในแต่ละวันจะอยู่ในช่วงเวลา 10.00 - 14.00 น. แปรค่าอยู่ในช่วง 36 - 41 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งที่ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 32% (ดังรูปที่ 10) ทำให้มวลฟ้ายะลวยโจรภายในระบบอบแห้งสามารถคายความชื้นได้ดี และระบบระบายอากาศด้วยพัดลมดูดอากาศช่วยในการระบายความชื้น โดยมี

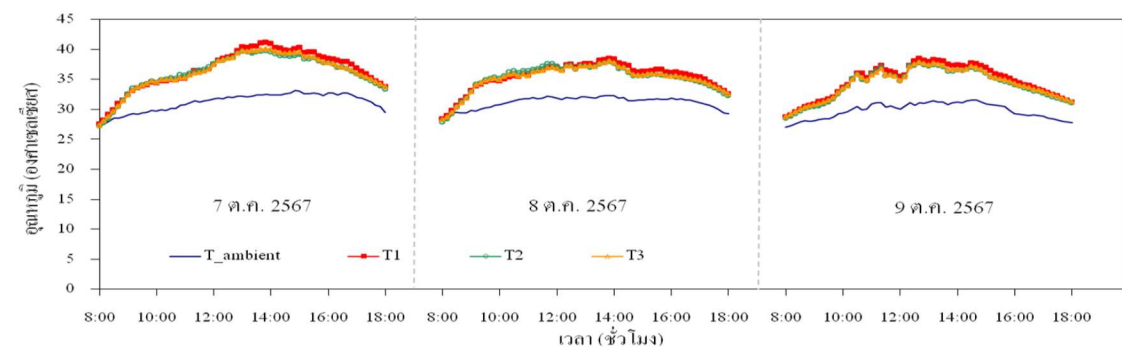
อัตราการไหลของอากาศอยู่แปรค่าดังรูปที่ 11 ซึ่งสามารถลดความชื้นของฟ้ายะลวยโจรเริ่มต้น 82 (%wb) จนเหลือ 10 (%wb) ภายในระยะเวลา 3 วัน ในขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติใช้ระยะเวลา 3 วัน เท่ากัน ซึ่งเหลือความชื้นสุดท้าย 22 (%wb) (ดังรูปที่ 12) ในกรณีดำเนินการตากแห้งต่อจนเหลือความชื้นใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งจะต้องใช้ระยะเวลา 5 วัน สำหรับการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งนี้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Saving in drying time) ได้ถึง 40% เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในการลดระยะเวลาของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจะอยู่ในช่วง 30% - 60% [18-19] สำหรับอัตราการดิ่งน้ำจำเพาะของระบบอบแห้งสำหรับอบแห้งฟ้ายะลวยโจร มีค่าเท่ากับ 24.29 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง และค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีค่าเท่ากับ 0.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 63.41%



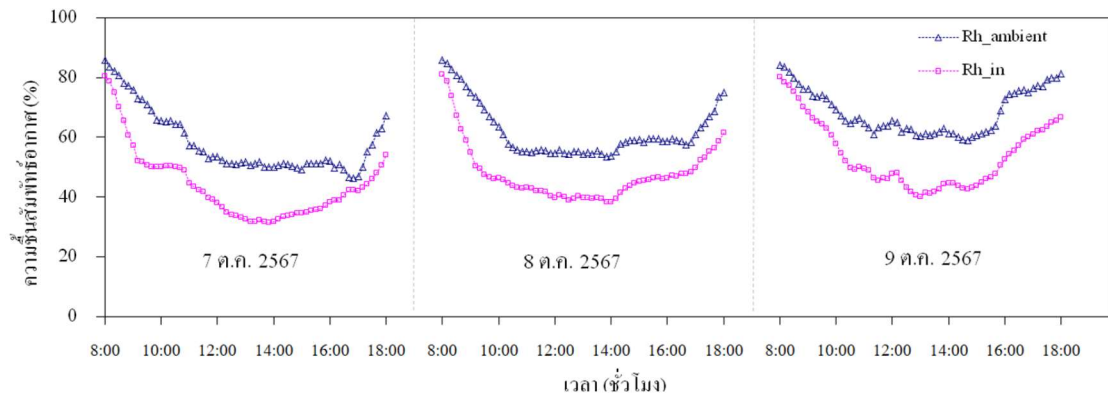
รูปที่ 7 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



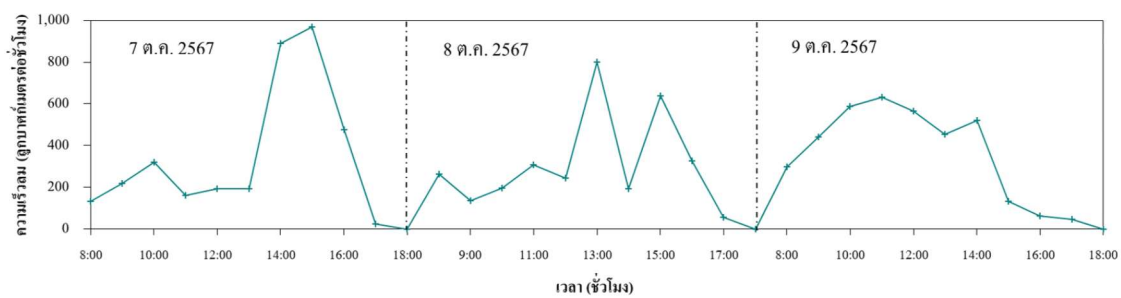
รูปที่ 8 การแปรค่าของอุณหภูมิภายนอก เทียบกับช่องระบายอากาศของระบบอบแห้งในช่วงเวลาที่ทำทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



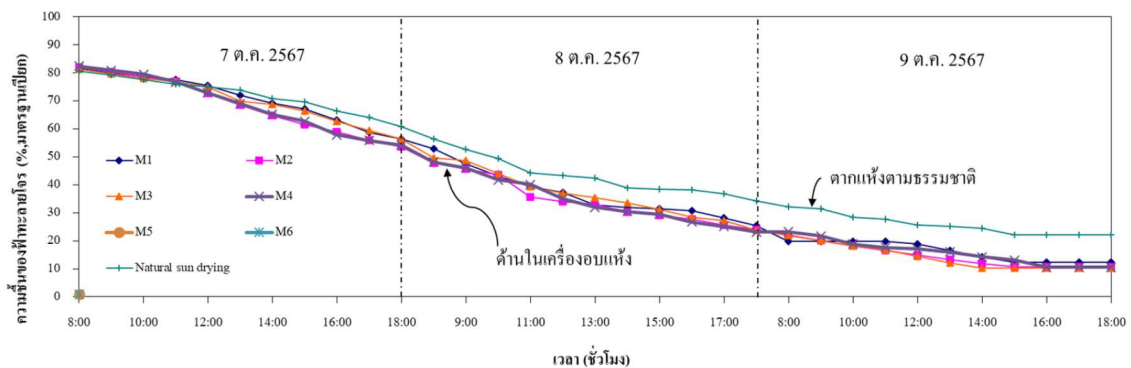
รูปที่ 9 การแปรค่าของอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งบริเวณด้านหน้า กลาง และหลังระบบอบแห้งในช่วงเวลาที่ทำทดลองการอบแห้ง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



รูปที่ 10 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งเทียบกับภายนอกระบบอบแห้ง ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



รูปที่ 11 การแปรค่าของอัตราการไหลของอากาศภายในระบบอบแห้งในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



รูปที่ 12 การแปรค่าของความชื้นของตัวอย่างฟ้าทะลายโจรที่เก็บ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในโรงอบแห้งและการตากแห้งด้วยแสงแดดธรรมชาติ ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)

หลังจากการอบแห้งฟ้าทะลายโจร ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างของฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส ที่ผ่านการอบแห้งที่มีความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ฟ้าทะลายโจรที่ทำการตากแห้งตามธรรมชาติ ฟ้าทะลายโจรสดและได้นำมาวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity, aw) ด้วยเครื่องหาแอคทิวิตีของน้ำ ของสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี ซึ่งผลการวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของฟ้าทะลายโจรแห้งที่อบด้วยโรงอบแห้งแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่า aw น้อยกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าเชื้อราจะไม่สามารถเติบโตได้ จึงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน สำหรับค่าปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์จากตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรสดมีค่าเท่ากับ 5.27 (%w/w) และเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์

อยู่ที่ 3.08 (%w/w) ซึ่งผลที่ได้ของปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรแห้งน้อยกว่าฟ้าทะลายโจรสดอันเป็นผลมาจากความร้อนของระบบอบแห้งที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ [19] แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าของตำรามาตรฐานยาสมุนไพร (Thai Herbal Pharmacopoeia) ที่ระบุไว้ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จึงจะเป็นสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่มีประสิทธิภาพในการรักษาโรค เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ ปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์เท่ากับ 0.57 (%w/w) จากการทดลอง พบว่าการตากแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถรักษาปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ไว้ได้ดีกว่าการใช้วิธีการตากแห้งตามธรรมชาติ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการวัดค่าสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab ซึ่งจะแสดงผลของการวัดสีจากเครื่องวัดสี Hunter lab แสดงดังตารางที่ 2 ผลการวัดสีของฟ้าทะลายโจร

ตารางที่ 1 ค่าแอกติวิตีของฟ้าทะลายโจร

ผลิตภัณฑ์	ค่า water activity, a_w	ปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ (%w/w)
ฟ้าทะลายโจรสด	0.96	5.27
ฟ้าทะลายโจรอบแห้งภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส	0.41	3.08
ฟ้าทะลายโจรตากแห้งตามธรรมชาติ	0.54	0.57

ตารางที่ 2 ผลการวัดสีของฟ้าทะลายโจร

ผลิตภัณฑ์	Color value					
	L*	a*	b*	C*	h	ΔE
ฟ้าทะลายโจรตากใน ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส	29.64	-5.71	12.81	14.02	114.10	4.60
ฟ้าทะลายโจรตากแห้งตามธรรมชาติ	35.22	0.64	18.62	18.63	88.00	10.28
ฟ้าทะลายโจรสด	31.79	-8.59	15.68	17.88	118.10	0.00

จากการวัดสีของฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจร รวมถึงฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติและฟ้าทะลายโจรสด จากการทดลองสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2 สีของฟ้าทะลายโจรสดจะเปลี่ยนจากสีเขียวสดเป็นสีเขียวเข้มหลังจากการอบแห้งโดยมีระดับความเข้มของสีที่แตกต่างกัน ค่าดัชนีสีบ่งชี้ว่าสีของฟ้าทะลายโจรที่อบแห้งในระบบอบแห้งเป็นสีเขียวเข้ม ($a^* = -5.71$) สำหรับสีของฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติจะมีสีเขียวออกเป็นสีน้ำตาล ($a^* = 0.64$) เมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของฟ้าทะลายโจรที่ตากในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสและที่ตากแห้งตามธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกับสีของฟ้าทะลายโจรสด พบว่า สีของฟ้าทะลายโจรที่ได้จากระบบอบแห้งไม่ได้เปลี่ยนสีของฟ้าทะลายโจรและยังคงสีเขียวเข้มโดยมีค่าเท่ากับ 4.60 สำหรับฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 10.28 ซึ่งเปลี่ยนแปลงมากกว่าและออกไปทางสีน้ำตาล ผลของสีที่ได้จากระบบอบแห้งยังตรงกับความต้องการของผู้บริโภคและเป็นที่ยอมรับ

4. สรุป (Conclusions)

จากการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสในครั้งนี้สามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมทำให้สามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรโดยใช้ระยะเวลาเพียง 3 วัน จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 82 (%wb) จนเหลือความชื้นสุดท้าย 10 (%wb) เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ

ในระยะเวลาที่เท่ากันจะได้อัตราความชื้นสุดท้ายประมาณ 22 (%wb) ปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.60 โดยสามารถลดปริมาณน้ำอิสระของฟ้าทะลายโจรสดด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จาก 0.96 ให้เหลือ 0.41 ซึ่งทำให้สามารถเก็บรักษาฟ้าทะลายโจรแห้งได้ระยะเวลาที่นานขึ้นเมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ สำหรับฟ้าทะลายโจรแห้งที่ได้จากระบบอบแห้งมีปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์อยู่ที่ 3.08 (%w/w) เทียบกับปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0.57 (%w/w) ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่ได้จากระบบอบแห้งมีคุณภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลังคาใสมีประสิทธิภาพ 63.41% นอกจากนี้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้ยังสามารถนำไปอบแห้งสมุนไพรกลุ่มอื่นที่มีลักษณะใบที่คล้ายกันได้โดยไม่ต้องการอุณหภูมิที่ไม่สูงมากและยังสามารถใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.สรวิชัย แนนเนียร อาจารย์ที่ปรึกษา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ไร่นาสวนประสาธน์ ตำบลนิคมสร้างตนเองอำเภอมือง จังหวัดลพบุรี ที่ให้ใช้สถานที่และฟ้าทะลายโจรใช้ในการทดลองในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] องค์การอนามัยโลก. รายงานสถานการณ์โดยองค์การอนามัยโลก ประจำประเทศไทยฉบับที่ 265 [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 7 กันยายน 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/searo/thailand/2023_06_13_tha-sitre-265-covid-19_th.pdf?sfvrsn=e213bba3_1
- [2] นกสร ผ่องใส, ขวสิน อินทร์ทอง, ดวงทิพย์ สนธิเมือง, ภัทรศศิริ เหล่าจินวงศ์, บดินทร์ ชาตะเวทย์. ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อพฤติกรรมการใช้ฟ้าทะลายโจรในการดูแลสุขภาพช่วงภาวะติดเชื้อโควิด-19 ของประชาชนในอำเภอดอนตาล จังหวัดสกลนคร. วารสารไทยเภสัชชนิพนธ์. 2565;17(1):57-69. <https://doi.org/10.69598/tbps.17.1.57-69>
- [3] มหาวิทยาลัยมหิดล, คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี. สรรพคุณ ฟ้าทะลายโจร [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 12 ตุลาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://www.rama.mahidol.ac.th/altern_med/th/km/19jun2020-1729
- [4] Hossain MS, Urbi Z, Sule A, Hafizur Rahman KM. Andrographis paniculate (Burm. f.) Wall. ex Nees: A review of ethnobotany, phytochemistry, and pharmacology. The Scientific World Journal. 2014;1:274905. <https://doi.org/10.1155/2014/274905>
- [5] Thailand, Ministry of Public Health, Department of Medical Sciences. Thai herbal pharmacopoeia Vol. II. Bangkok: Office of National Buddhism Press; 2007.
- [6] Elwakeel AE, Oraith AAT, Ghanem THM, Elbeltagi A, Salem A, Dewidar AZ, et al. Mathematical modeling, drying kinetics, and economic analysis of a hybrid photovoltaic thermal solar dryer for henna leaves. Scientific Reports. 2025;15:21392. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03460-3>

- [7] Kidane H, Farkas I, Buzás J. Characterizing agricultural product drying in solar systems using thin-layer drying models: comprehensive review. *Discover Food*. 2025;5:84. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00362-1>
- [8] Nnamchi O, Tom C, Akpan G, Umunna M, Ubong D, Ibeh M, et al. Solar dryers: A review of mechanism, methods and critical analysis of transport models applicable in solar drying of product. *Green Energy and Resources*. 2025;3(2):100118. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2025.100118>
- [9] Sharma BB, Vaidya P, Kumar N, Tiwari A, Bansal S, Faruque MRI, et al. Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer. *Scientific Reports*. 2025;15:28608. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13499-x>
- [10] Monicka AA, Shree P, Blessie RF, Tazeen H, Navaneetham B, Andria SS, et al. A comprehensive review of indirect solar drying techniques integrated with thermal storage materials and exergy-environmental analysis. *Environment, Development and Sustainability*. 2025;27:25769-25813. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04755-7>
- [11] Fernandes L, Tavares PB. A review on solar drying devices: Heat transfer, air movement and type of chambers. *Solar*. 2024;4(1):15-42. <https://doi.org/10.3390/solar4010002>
- [12] Rahman MA, Hasnain SMM, Paramasivam P, Zairov R, Ayanie AG. Solar drying for domestic and industrial applications: A comprehensive review of innovations and efficiency enhancements. *Global Challenges*. 2025;9(2):2400301. <https://doi.org/10.1002/gch2.202400301>
- [13] Rajagukguk RA, Lee H. Application of explainable machine learning for estimating direct and diffuse components of solar irradiance. *Scientific Reports*. 2025;15:7402. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91158-x>
- [14] จักรพรรณ์ ผิวสอาด, ชยพัทธ์ ภูสำเภา. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก สำหรับอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจร. *Life Sciences and Environment Journal*. 2565;23(2):324-333. <https://doi.org/10.14456/lsej.2022.25>
- [15] เสริม จันทร์ฉาย. เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. *นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์*; 2560.
- [16] Fudholi A, Sopian K, Othman MY, Ruslan MH. Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. *Energy Buildings*. 2014;68:121-129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.072>
- [17] Association of Official Analytical Chemists International (AOAC). *Official methods of analysis of AOAC International*. 22nd ed. Oxford: Oxford University Press; 2023. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- [18] Kumar A, Tiwari GN. Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of Jaggery. *Journal of Food Engineering*. 2006;73(2):121-134. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.011>
- [19] Jaidee W, Rujanapun N, Malee K, Chaisawad S, Puttarak P, Hiransai P, et al. Degradation kinetics of andrographolide in aqueous solution, product identification and biological activity evaluation. *Scientific Reports*. 2025;15:28856. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13652-6>