

การศึกษาประสิทธิภาพโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ  
ความร้อนเสริมจากอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่แข็ง  
**A STUDY OF SOLAR GREENHOUSE DRYING IN ASSOCIATION WITH  
INFRARED HEATER FOR DEHYDRATION CHERRY TOMATOES**

รัชชชัย อ่องประเสริฐ<sup>1</sup> และ กมลวรรณ จิตจักร<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษา, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,  
thawatchai15578@gmail.com

<sup>2</sup>อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,  
kamonwan\_ji@rmutto.ac.th

Thawatchai Ongprasert<sup>1</sup> and Kamonwan Jitjack<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Student, Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,  
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,  
Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, thawatchai15578@gmail.com

<sup>2</sup>Lecturer, Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,  
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,  
Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, kamonwan\_ji@rmutto.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่แข็งด้วยโรงเรือน 2 ระบบ คือ โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เสริมความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรด เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ โดยกำหนดอุณหภูมิอบแห้งในโรงเรือนอบแห้ง 45-60 °C ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 95% มาตรฐานแห้ง (%d.b.) อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 22% มาตรฐานแห้ง (%d.b.) จากการศึกษาพบว่า โรงเรือนที่มีระบบความร้อนเสริมมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency) สูงกว่าโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าโดยเฉลี่ย 29.74% ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า คือใช้เวลา 2 วัน ในขณะที่การอบแห้งด้วยระบบโรงเรือนและการตากแดดใช้เวลาในการอบแห้ง 3 และ 6 วัน ตามลำดับ สำหรับคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งพบว่า ค่าสี

ของการอบแห้งด้วยระบบเสริมจะมีสีที่คล้ำมากที่สุดแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยผลการวัดค่าความสว่างของมะเขือเทศราชินีแช่ห่อมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  แต่ค่าสีแดง (a) และค่าสีเหลือง (b) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P > 0.05$  ค่าความหวานหลังการอบแห้ง พบว่าโรงเรือนแบบมีระบบเสริมความร้อนมีค่าความหวานน้อยที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P > 0.05$  และการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่ห่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบได้ดีที่สุด

**คำสำคัญ:** โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์, ระบบความร้อนเสริม, มะเขือเทศราชินีแช่ห่อม

### ABSTRACT

This research was aimed to compare the traditional drying of dehydration cherry tomatoes with two different drying systems including a solar greenhouse and a solar greenhouse in association with quartz infrared heater (QIH). The inside drying temperatures of the greenhouse were fixed at 45–60 °C. The products with the averaged initial moisture content at 95% d.b. were dried in the two systems of the greenhouse until the average final moisture content reached 22% d.b. The results revealed that thermal efficiency of the solar greenhouse in association with quartz infrared heater was higher than the opponent. The average specific energy consumption was also lower at 29.74% and it took shorter time, only 2 days. However, the solar greenhouse and the natural drying took 3 and 6 days respectively. The quality of the products after the drying showed that the colors of those dried in the solar greenhouse in association with QIH were the darkest, but they were not really different. The brightness of the products was lower but not statistically significant ( $P \leq 0.05$ ). The redness (a) and yellowness (b) were not different with statistically significant ( $P \leq 0.05$ ). The sweetness of the products dried in the solar greenhouse in association with QIH was the least but not statistically significant ( $P \leq 0.05$ ). Midilli mathematical model was the best model for predicting the moisture ratio of drying dehydration cherry tomatoes.

**KEYWORDS:** Solar Greenhouse, Quartz infrared heater, Dehydration cherry tomato

### 1. บทนำ

มะเขือเทศเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เพราะนิยมปลูกและรับประทานกันอย่างแพร่หลาย ชนิดมะเขือเทศที่ปลูกในประเทศไทยแบ่งตามการใช้ประโยชน์ได้ 2 ประเภท คือ มะเขือเทศส่งโรงงาน

อุตสาหกรรมมีพื้นที่ปลูก 12,177 ไร่ มีผลผลิตรวม 20,206 ตัน หรือมีผลผลิตเฉลี่ย 2.7 ตันต่อไร่ และมะเขือเทศบริโภคสดมีพื้นที่ปลูก 9,638 ไร่ มีผลผลิตรวม 14,767 ตัน หรือมีผลผลิตเฉลี่ย 1.2 ตันต่อไร่ [1-2] มะเขือเทศราชินี (Cherry tomato) เป็นหนึ่งในพันธุ์มะเขือเทศที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสรรพคุณทางยา เช่น ลดอาการความดันเลือดสูง ลดอัตราการเสี่ยงในการเกิดมะเร็งต่อมลูกหมาก บำรุงสายตาและผิวพรรณ เป็นต้น [3]

มะเขือเทศราชินีเป็นหนึ่งในพืชผลทางการเกษตรที่ประสบปัญหาหลังตลาดในแต่ละฤดูกาล เป็นผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้นานไม่ค่อยได้อายุการเก็บรักษาสั้นและขนาดของมะเขือเทศไม่ได้มาตรฐาน ทำให้ไม่สามารถนำขายออกได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกรอย่างมาก การแปรรูปโดยการทำให้เป็นผลไม้แช่อิ่มแล้วอบแห้งนั้นเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาได้นานและเพิ่มมูลค่าให้กับมะเขือเทศ รวมถึงเป็นการสร้างรายได้เสริมให้เกษตรกร แต่การอบแห้งในประเทศยังประสบปัญหาหลายประการ เช่น เกษตรกรและผู้ประกอบการส่วนใหญ่อบแห้งโดยการตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือ ฟันละอองที่เจือปนในผลิตภัณฑ์และการรบกวนของแมลงต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ระยะเวลาในการตากแดดต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน และยังมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากไม่สามารถตากแห้งได้ในช่วงฤดูฝน โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งมะเขือเทศเป็นการออกแบบและทดสอบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการพาความร้อนตามธรรมชาติรูปทรงพาราโบลาที่ปกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ด้านหลังมีช่องระบายอากาศ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมถึง  $15^{\circ}\text{C}$  [4] การกระจายอุณหภูมิภายในโรงเรือนมีความสม่ำเสมอเนื่องจากหลังคาที่มีลักษณะโค้ง [5] ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์สั้นกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ ถึงแม้ว่าโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการพาความร้อนตามธรรมชาติรูปทรงพาราโบลา สามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ได้และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลากลางคืนหรือในช่วงฤดูฝน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาแหล่งให้ความร้อนเสริมกับโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงที่ปริมาณพลังงานจากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นมีจุดเด่นที่น่าสนใจ คือ พลังงานจากรังสีอินฟราเรดสามารถผ่านเข้าไปยังวัสดุทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการเหี่ยวยุบ [6] ช่วยให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงลดระยะเวลาการอบแห้งได้ 1-10 เท่า และพลังงานที่ใช้น้อยกว่า 30-50% [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงพาราโบลาในรูปแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติซึ่งใช้ความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรด ในการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม โดยศึกษาอัตราการลดลงของความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านสี ความหวาน และหาแบบจำลอง

เอมพิริคัลในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มที่เหมาะสมกับระบบการอบแห้ง โดยทำการเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดดธรรมชาติ ทั้งนี้ผลการวิจัยจะก่อประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม กลุ่มเกษตรกรหรือประชาชน ที่สามารถให้เป็นทางเลือกเพื่อประยุกต์ใช้ในการอบแห้งมะเขือเทศเพื่อการค้าต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โรงเรือนอบแห้งรูปทรงพาราโบลาเพิ่มพื้นที่รับแสงอาทิตย์ด้านข้างขนาด 3x3.5x1.55 เมตร ปกคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต พื้นเตด้วยปูนซีเมนต์เพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างของโรงเรือนและผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถดูดซับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นปูนและแผ่ความร้อนภายในโรงเรือน ด้านหน้ามีประตูสำหรับนำผลิตภัณฑ์เข้าออกและช่องระบายอากาศเข้า จำนวน 2 ช่อง ส่วนด้านหลังมีช่องระบายอากาศชั้นจากภายในโรงเรือนออกสู่อากาศแวดล้อมภายนอก ลักษณะโรงเรือนอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โรงเรือนอบแห้งรูปทรงพาราโบลาเพิ่มพื้นที่รับแสงอาทิตย์ด้านข้าง

### 2.2 การออกแบบและติดตั้งระบบเสริมความร้อนอินฟราเรด

ฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดหลอดแก้ว (Quartz Infrared Heater) นิยมใช้ในระบบให้ความร้อนทั่วไป ซึ่งติดตั้งง่ายและความปลอดภัยสูงเนื่องจากไม่มีเปลวไฟ ความสูญเสียต่ำ ประสิทธิภาพสูง ประหยัดไฟฟ้าได้ 30-50% ในการเลือกขนาดของฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ในการอบแห้ง โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการอบแห้งอยู่ในช่วง 45-60 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมและไม่สูงเกินไปในการอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่ม ทำให้คุณภาพด้านสีหลังการอบแห้งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด [8] ทำการคำนวณดังสมการที่ (1) [7]

$$Q = mC_p\Delta T \quad (1)$$

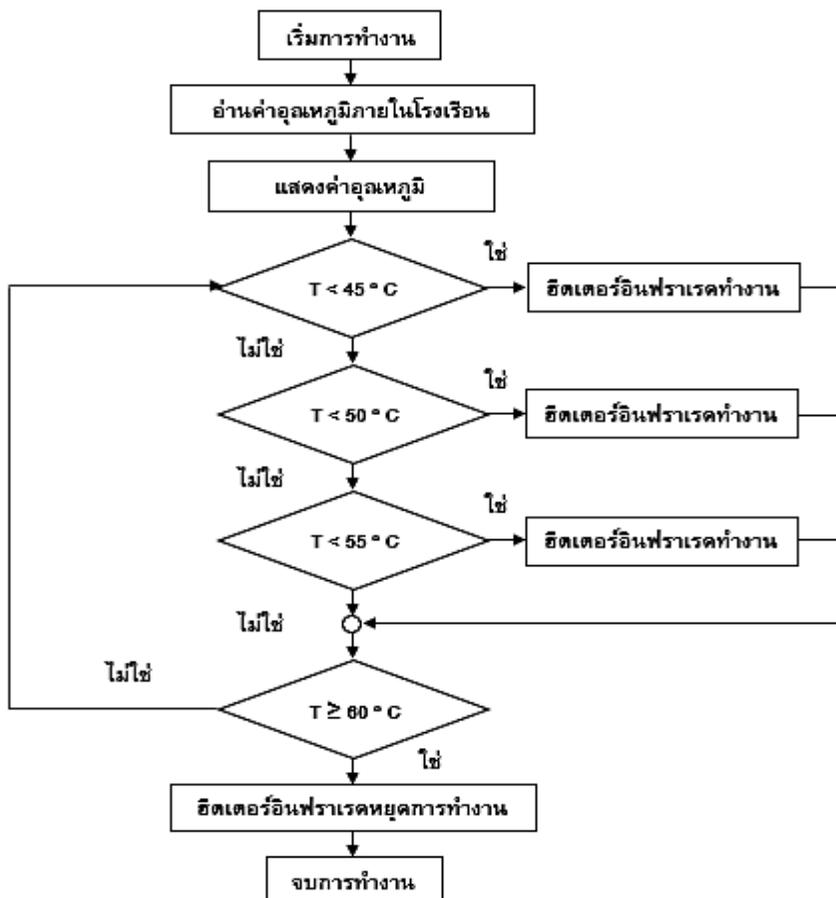
เมื่อ  $Q$  คือ ปริมาณความร้อน (kJ)

$M$  คือ มวลของอากาศภายในโรงเรือน (kg)

$C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศ (kJ/kg K)

$\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิสุดท้ายและเริ่มต้น (K)

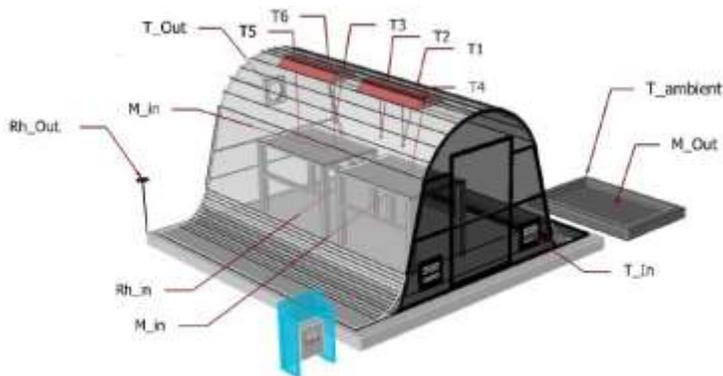
จากการคำนวณออกแบบแล้ว เลือกใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดหลอดแก้ว (Quartz Infrared Heater) ขนาด 1,000 วัตต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.017 เมตร จำนวน 4 หลอด ติดตั้งบริเวณโครงตรงกลางโรงเรือนซึ่งครอบคลุมภายใต้ผลผลิตกัญชง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องจึงออกแบบระบบควบคุมการอบแห้งอัตโนมัติ ซึ่งหลักการทำงานของระบบคือเมื่อปริมาณความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการอบแห้งระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดจะทำงานโดยให้ความร้อนกับระบบอบแห้งเพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งอยู่ในช่วงที่กำหนด ตามผังระบบควบคุมดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังระบบควบคุมการอบแห้งโดยอัตโนมัติ

### 2.3 วิธีการทดลอง

เตรียมมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม โดยทำการเด็ดขั้วแล้วล้างน้ำให้สะอาดผึ่งให้สะเด็ดน้ำกรีดตามความยาวผล 4-6 แฉก แล้วนำไปแช่ในน้ำปูนใส 30 นาที หลังจากนั้นผึ่งให้สะเด็ดน้ำปูนใสเติมน้ำตาล เกลือป่น และมะนาวลงไป ทำการเชื่อมด้วยความร้อนปานกลางจนเหนียวและงวดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง [9] ทำการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มในโรงเรือนอบแห้งรูปทรงพาราโบลาเพิ่มพื้นที่รับแสงด้านข้างใน 2 ระบบ คือในระบบอบแห้งโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวและในระบบการทำงานอัตโนมัติที่ใช้ความร้อนเสริมจากหลอดความร้อนอินฟราเรดร่วมกับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทั้งสองระบบทำการเปรียบเทียบกับการตากภายนอกโรงเรือนหรือการตากแดดปกติ ในการทดลองจะนำตัวอย่างจำนวนจากภายในโรงเรือนและนอกโรงเรือนครั้งละ 0.5 กิโลกรัม มาชั่งน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาทุก ๆ 30 นาที โดยเริ่มต้นทำการทดลองตั้งแต่เวลา 08:00-20:00 น. พร้อมเก็บค่าอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิตำแหน่งทางเข้าและทางออกของโรงเรือน ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม ข้อมูลความชื้นรังสีอาทิตย์ ตำแหน่งการวัดค่าต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 3 และทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองเมื่อใช้ระบบเสริมความร้อนอินฟราเรดในช่วงเวลา 8:00-20:00 น. ทำการเก็บมะเขือเทศใส่กล่องเข้าตู้เย็น และเริ่มทำการอบแห้งต่อในช่วงเช้าของวันถัดไป ทำการอบแห้งจนกว่าความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่มมีค่าประมาณ 10-20% มาตรฐานเปียกซึ่งตรงตามที่ต้องการ [10] หรือเทียบเท่ากับความชื้นที่ใช้วิเคราะห์ในกระบวนการอบแห้งประมาณ 11-25% มาตรฐานแห้ง วิธีการหาความชื้นก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้งหาโดยการนำตัวอย่างมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มไปอบแห้ง ในตู้อบลมร้อนและตั้งอุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [11] แล้วนำน้ำหนักแห้งไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture content) ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และมวลตัวอย่างภายในโรงเรือนอบแห้งเทียบกับสิ่งแวดล้อม

## 2.4 การหาปริมาณความชื้น

จากการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อบที่มีการบันทึกน้ำหนักทุกๆ 30 นาที นำน้ำหนักไปคำนวณหาปริมาณความชื้นดังสมการที่ (2) [12]

$$MC = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

w คือ น้ำหนักของมะเขือเทศราชินีแช่อบที่เวลาใดๆ (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของมะเขือเทศราชินีแช่อบ (g)

โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเทียบกับความชื้นที่เวลาใด ๆ ( $M_{eq} \ll M_t$ ) และความชื้นเริ่มต้น ( $M_{eq} \ll M_0$ ) ดังนั้นอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (3) [13]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

$M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (%d.b.)

$M_0$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)

## 2.5 การวัดคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพสีของมะเขือเทศราชินีแช่อบด้วยเครื่อง Portable Colorimeter 3NH รุ่น NH310 มาตรฐานชนิดแหล่งกำเนิดแสง D65 แสดงดังรูปที่ 4 เป็นการทดสอบสีแบบ L a b เมื่อ L แสดงถึงค่าความสว่างมีค่า 0-100 โดยค่า 0 คือ สีดำ และค่า 100 คือ สีขาว a แสดงสีแดง (+a) ถึงสีเขียว (-a) และค่า b แสดงสีเหลือง (+b) ถึงสีน้ำเงิน (-b) โดยจะทำการวัดสีของมะเขือเทศราชินีแช่อบก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และโรงเรือนเสริมระบบอินฟราเรดร่วม เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ แล้วนำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ



รูปที่ 4 เครื่องวัดสี Portable colorimeter

## 2.6 การวัดค่าความหวาน

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solid, TSS) ทั้งหมดจะใช้เป็นดัชนีวัดปริมาณน้ำตาล หรือความหวาน (Brix) แสดงค่าในรูปของ %Brix ด้วยเครื่อง Refractometer ยี่ห้อ OEM รุ่น RHB-90ATC ความแม่นยำ  $\pm 0.05$  โดยทดสอบค่าความหวานของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์และระบบเสริมอินฟราเรดร่วม เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ วิธีการคือนำมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มมาบดให้ละเอียด และผสมน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วนผสม 1 ต่อ 1 หยดลงบนปริซึมของเครื่อง Refractometer และอ่านค่าบนแถบแสดงค่าความหวาน แล้วนำค่าความหวานที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ [14]

## 2.7 ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Drying System) เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำต่อพลังงานที่ให้กับระบบอบแห้ง โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้มีการใช้ระบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และระบบความร้อนเสริมอินฟราเรดร่วมกับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในการคำนวณจะแยกออกเป็นสองกรณี คือประสิทธิภาพของโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ คำนวณได้จากสมการที่ (4) และกรณีมีระบบความร้อนเสริมอินฟราเรดร่วม ต้องรวมค่าพลังงานของฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ให้ความร้อนกับโรงเรือนอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5) [15]

$$\eta_{th} = \frac{(m_i - m_f) \times h_{fg}}{(A_c \times I \times t)} \times 100 \quad (4)$$

$$\eta_{th} = \frac{(m_i - m_f) \times h_{fg}}{(A_c \times l \times t) + (E_{infrared})} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ  $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบโรงเรือนอบแห้ง (%)

$m_i$  คือ มวลของมะเขือเทศราชินีแช่หิมก่อนการอบแห้ง (kg)

$m_f$  คือ มวลของมะเขือเทศราชินีแช่หิมหลังการอบแห้ง (kg)

$h_{fg}$  คือ พลังงานความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (kWh/kg)

$A_c$  คือ พื้นที่โรงเรือนที่รับรังสีอาทิตย์ ( $m^2$ )

$l$  คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโรงเรือน ( $W/m^2$ )

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

$E_{infrared}$  คือ พลังงานที่ใช้กับฮีตเตอร์อินฟราเรด (kWh)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนการใช้พลังงานของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อความชื้นที่ระเหยออกจากมะเขือเทศราชินีแช่หิมในระหว่างที่ทำการทดลอง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คำนวณได้จากสมการที่ (6) และกรณีระบบความร้อนเสริมอินฟราเรดร่วม ซึ่งต้องรวมพลังงานของฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ให้กับโรงเรือนอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการที่ (7) [15]

$$SEC = \frac{(A_c \times l) t}{m_i - m_f} \quad (6)$$

$$SEC = \frac{(A_c \times l \times t) + (E_{infrared})}{m_i - m_f} \quad (7)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

## 2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ซึ่งงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการอบแห้งเอมพิริคัลแบบชั้นบาง 6 แบบจำลอง ดังตารางที่ 1 โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) เพื่อเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุด ดัชนีที่ใช้บ่งชี้ความสามารถ

ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ดังสมการที่ (8) และ (9) [16] โดยแบบจำลองที่ทำนายได้เหมาะสมต้องมีค่า  $R^2$  สูงที่สุด และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง [17-20]

ลำดับที่	สมการแบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page
3	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
4	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic
5	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two-term exponential
6	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{exe,ave}})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N} \right]^{0.5} \quad (9)$$

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

$MR_{\text{exp,ave}}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลองเฉลี่ย (decimal)

$MR_{\text{pre},i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจากการคำนวณ (decimal)

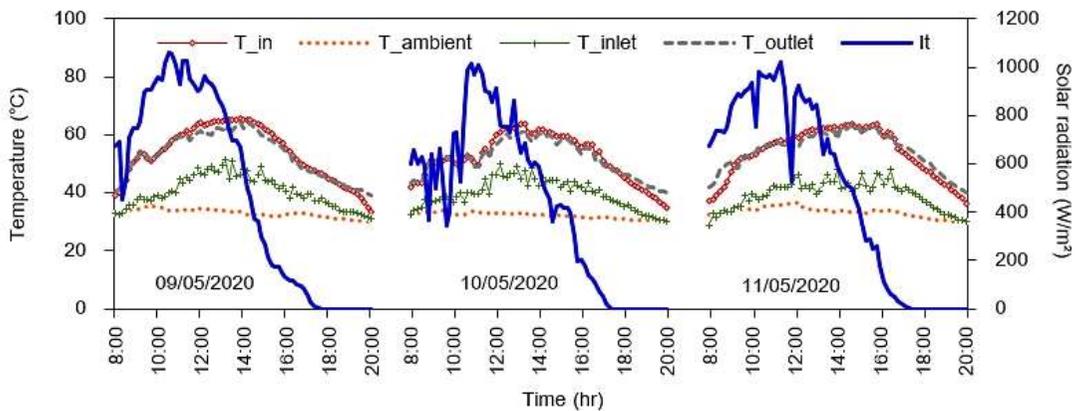
N คือ จำนวนข้อมูลจากการทดลอง

### 3. ผลการวิจัย

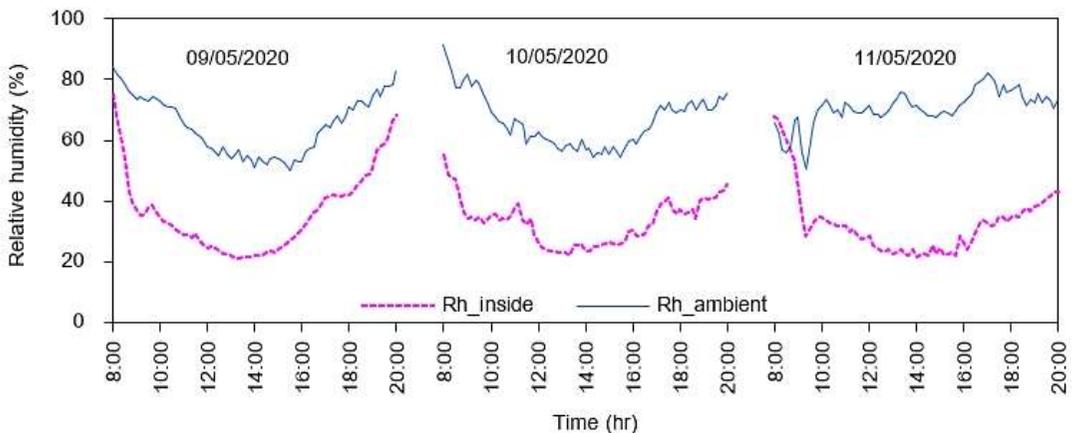
#### 3.1 ผลการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม

ระบบแรกอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เปรียบเทียบการตากแดดปกติ จากผลการทดลองในช่วงวันที่ 9-11 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวมีลักษณะ

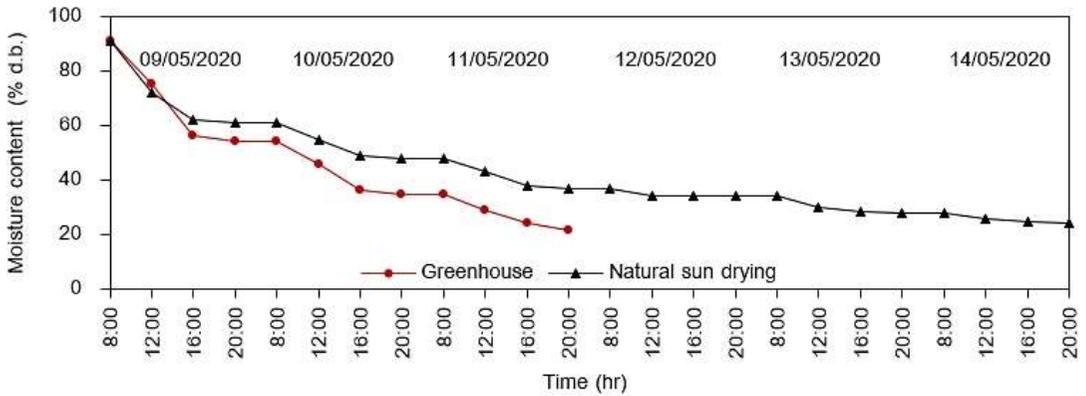
ของห้องฟ้าแจ่มใส และมีเมฆเล็กน้อยตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย  $465.40 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิภายในเฉลี่ย  $53 \text{ }^\circ\text{C}$  สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในต่ำที่สุดอยู่ที่ 22% แสดงดังรูปที่ 5-6 สามารถลดความชื้นเริ่มต้นจาก 94% มาตรฐานแห้งจนเหลือความชื้น 22% มาตรฐานแห้ง พบว่าเมฆเอื้อต่อการอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลาเพียง 3 วัน เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติใช้เวลาถึง 6 วัน ซึ่งเหลือความชื้นสุดท้าย 22% มาตรฐานแห้ง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้ง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิขาเข้าขาออก และความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำกรทดลอง

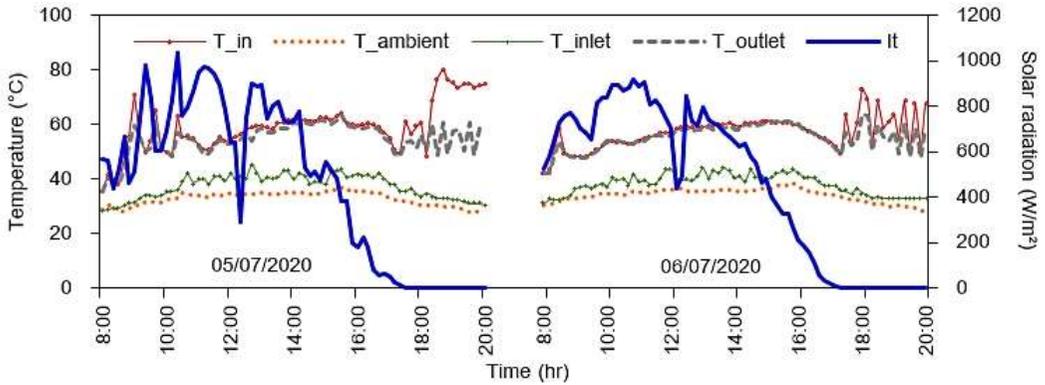


รูปที่ 6 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้ง เปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมในช่วงเวลาที่ทำกรทดลอง

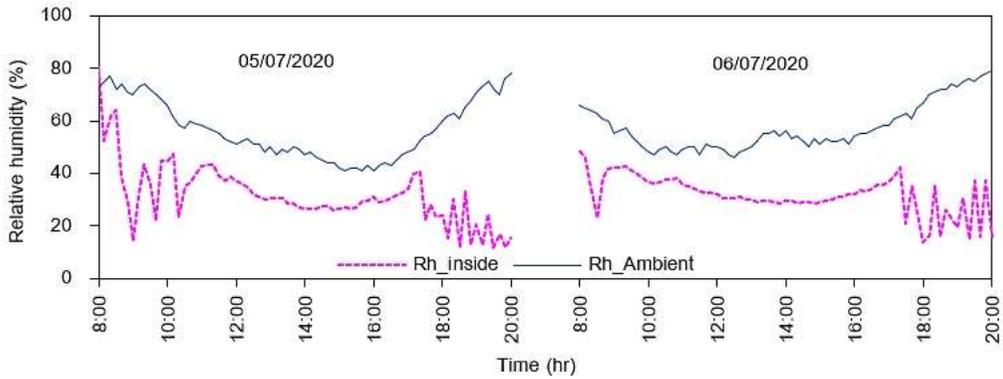


รูปที่ 7 ความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง

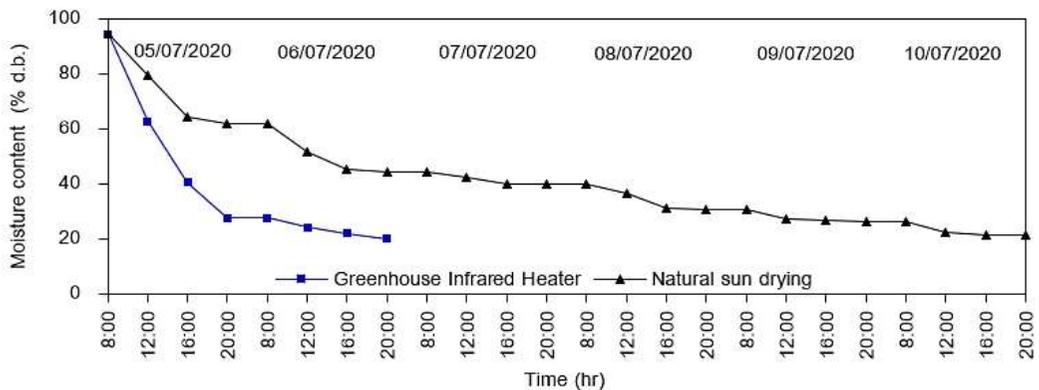
ระบบที่สองอบแห้งด้วยระบบโรงเรือนเสริมอินฟราเรดร่วม ผลการทดลองในช่วงวันที่ 5-6 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 ซึ่งในวันแรกของการทดลองช่วงเช้ามีเมฆเป็นส่วนมากตั้งแต่เวลา 08:00-10:00 น. หลังจากนั้นท้องฟ้าแจ่มใส ส่วนวันที่สองมีเมฆสลับกับแสงแดดตลอดทั้งวัน โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย  $460.20 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิภายในเฉลี่ย  $58 \text{ }^\circ\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในต่ำที่สุดอยู่ที่ 13% แสดงดังรูปที่ 8-9 สามารถลดความชื้นเริ่มต้นจาก 95% มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นเพียง 21% มาตรฐานแห้ง ได้ภายในระยะเวลา 2 วัน เมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติในช่วงเวลาการทดลองเดียวกันใช้เวลาการอบแห้ง 6 วัน ซึ่งเหลือความชื้นสุดท้าย 22% มาตรฐานแห้ง ดังรูปที่ 10 ในการทดลองครั้งนี้มีการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 14.7 kWh จากฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ให้ความร้อนด้วยระบบอัตโนมัติในช่วงที่อุณหภูมิภายในโรงเรือนต่ำกว่าที่กำหนด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้ง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิขาเข้าขาออก และความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง

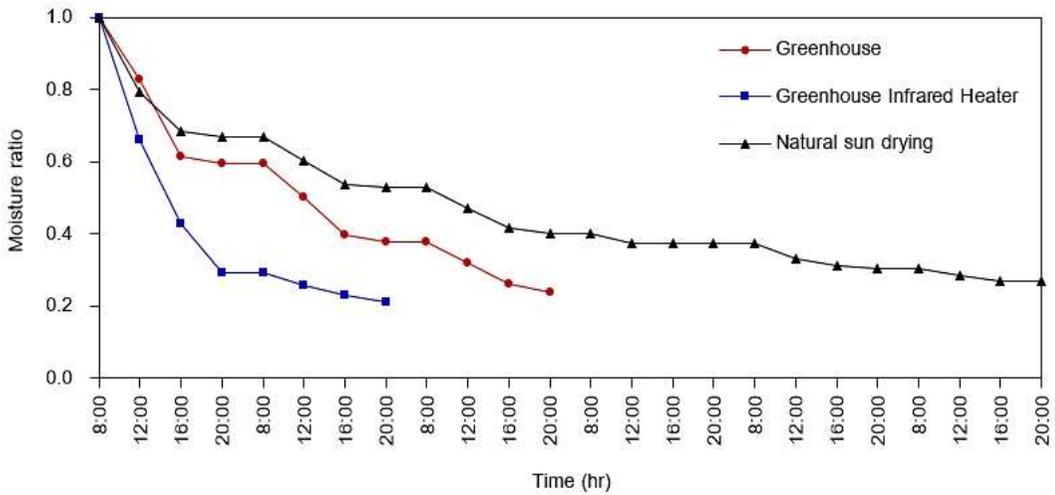


รูปที่ 9 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้ง เปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง



รูปที่ 10 ความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อบภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองอบแห้งทั้ง 2 ระบบ ที่ค่าความชื้นเริ่มต้นของมะเขือเทศราชินีแช่แข็งใกล้เคียงกัน พบว่าระบบโรงเรือนเสริมอินฟราเรดร่วม สามารถทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องในช่วงที่แสงแดดไม่เพียงพอหรืออุณหภูมิไม่เหมาะสมต่อการทำอบแห้ง และพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอบแห้งมีค่าสูงกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมีค่าต่ำกว่า ซึ่งทำให้วัสดุสามารถคายความชื้นได้ดี ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่าโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งของทั้ง 3 ระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่แข็งภายในโรงเรือนอบแห้ง 2 ระบบ และการตากแห้งตามธรรมชาติ

### 3.2 คุณภาพด้านสี

ผลการวัดค่าสีของมะเขือเทศแช่แข็งก่อนและหลังจากการอบแห้ง ภายในโรงเรือนทั้ง 2 ระบบกับการตากแดดตามธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยระบบโรงเรือนเสริมอินฟราเรดร่วม มีค่าความสว่าง (L) น้อยกว่ามะเขือเทศแช่แข็งอบแห้งด้วยโรงเรือนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดดตามธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  เนื่องจากการอบแห้งด้วยระบบโรงเรือนเสริมอินฟราเรดร่วม มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าระบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดธรรมชาติ ส่งผลให้มีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) หรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) มากกว่า [12] อย่างไรก็ตาม ค่าสีแดง (a) และค่าสีเหลือง (b) ของมะเขือเทศแช่แข็งอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ และการตากแห้ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P > 0.05$  ดังแสดงผลในตารางที่ 2

## ตารางที่ 2 คุณภาพด้านสีของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อนและหลังการอบแห้ง

วิธีการ (Method)	ค่าสี		
	L	a	b
มะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อนอบแห้ง	31.48±1.35 <sup>b</sup>	18.05±2.74 <sup>a</sup>	10.42±1.02 <sup>b</sup>
การตากแดดตามธรรมชาติ	29.74±1.33 <sup>b</sup>	18.67±2.42 <sup>a</sup>	8.30±1.03 <sup>ab</sup>
โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์	30.48±0.61 <sup>b</sup>	19.14±1.02 <sup>a</sup>	7.35±0.63 <sup>a</sup>
โรงเรือนอบแห้งเสริมความร้อน อินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์	26.60±1.65 <sup>a</sup>	16.13±1.58 <sup>a</sup>	8.29±1.57 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ : ค่า L a และ b ตัวอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

### 3.3 ความหวาน

ผลการทดสอบค่าความหวาน (Brix) ของมะเขือเทศแช่อิ่มอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า มะเขือเทศแช่อิ่มอบแห้งด้วยการตากแดดธรรมชาติ มีค่าความหวานมากกว่าการอบแห้งภายในโรงเรือนทั้ง 2 ระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  สำหรับค่าความหวานของมะเขือเทศหลังอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ มีค่าความหวานไม่แตกต่างกัน โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P > 0.05$  แสดงได้ดังตารางที่ 3

## ตารางที่ 3 ความหวานของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มหลังการอบแห้ง

วิธีการ (Method)	ความหวาน (%Brix)
อบแห้งโดยการตากแห้งตามธรรมชาติ	30.67±1.37 <sup>b</sup>
อบแห้งโดยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	28.00±0.00 <sup>a</sup>
อบแห้งโดยโรงเรือนอบแห้งเสริมความร้อนอินฟราเรด ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์	27.33±0.58 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

### 3.4 ประสิทธิภาพทางความร้อนและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการเก็บข้อมูลของการอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่มด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ ได้ปริมาณค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้นรังสีอาทิตย์ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในระบบ นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มด้วยโรงเรือนระบบเสริมอินฟราเรดร่วม ซึ่งระบบจะ

ทำงานอัตโนมัติ ในช่วงที่อุณหภูมิโรงเรือนต่ำกว่าที่กำหนดหรือช่วงที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการอบแห้ง เพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้กับระบบ ทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าอุณหภูมิภายในเฉลี่ยสูงกว่า ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่าสูงกว่าเฉลี่ย 26.86% ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำกว่าเฉลี่ย 29.74% เมื่อเปรียบเทียบกับโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4 โดยมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อน 7.69% และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 8.53 kWh/kg เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยทดสอบประสิทธิภาพโรงเรือนอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งข้าวฮางอก พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยมีค่า 4.64% [21] ซึ่งมีค่าน้อยกว่าโรงเรือนระบบเสริมอินฟราเรดร่วม อีกทั้งงานวิจัยการอบแห้งมะเขือเทศด้วยระบบสายพานลำเลียงที่ใช้ไฟฟ้าในการทำความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบแห้ง 60 °C จากผลการทดลองพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 109.22 kWh/kg [8] ซึ่งมีค่าสูงกว่าโรงเรือนระบบเสริมอินฟราเรดร่วม นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งปลาช่อนด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และไฟฟ้า ที่มีการติดตั้งแผงรับรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 ด้านของเครื่องอบแห้ง ภายในติดตั้งขดลวดความร้อน โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบแห้ง 60 °C จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยมีค่า 5.54% และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 42.57 MJ/kg [22] หรือมีค่าเทียบเท่า 11.82 kWh/kg ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่า การประยุกต์ใช้ระบบเสริมความร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนให้สูงขึ้นและส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในระบบอบแห้งมีค่าต่ำลง

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพทางความร้อนของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ตัวแปร	โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์			โรงเรือนอบแห้งอินฟราเรดเสริมร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์	
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 1	วันที่ 2
Average $T_{in}$ (°C)	53.74	52.22	53.90	59.12	57.05
Average I (W/m <sup>2</sup> )	482	430	483	462	458
Drying time (h)	36			24	
$E_{infrared}$ (kWh)	-			14.735	
$\eta_{th}$ (%)	5.43			7.69	
SEC (kWh/kg)	12.14			8.53	

### 3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่ส้ม

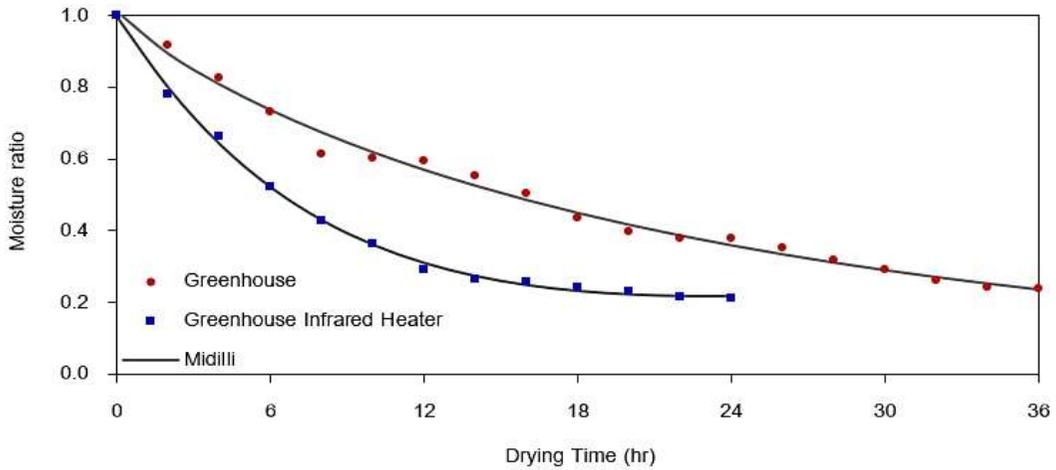
จากผลการทดลองอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งทั้ง 2 ระบบ นำมาหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา วิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้ทั่วไปในงานทางด้าน การอบแห้ง 6 แบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม Statistica ตามรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  และค่า RMSE ที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่ส้มแล้วพบว่าแบบจำลองของ Midilli มีความเหมาะสมที่สามารถใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่ส้มระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ โดยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และโรงเรือนอบแห้งเสริมความร้อนอินฟราเรดรวม ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) 0.99167 และ 0.99816 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่า 0.02040 และ 0.01024 ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ซึ่งหมายความว่า ค่าที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการทดลองมากที่สุดจึงเหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่ส้มระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยแสดงกราฟการเปรียบเทียบ อัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่ส้มระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลองของ Midilli ดังรูปที่ 12

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลอง	พารามิเตอร์	โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์	โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบความร้อนเสริม
Newton	k	0.04349	0.09079
	$R^2$	0.98235	0.95055
	RMSE	0.02969	0.05374
Page	k	0.06465	0.16912
	n	0.86760	0.74415
	$R^2$	0.99118	0.98531
	RMSE	0.02098	0.02925

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพิริคัล (ต่อ)

แบบจำลอง	พารามิเตอร์	โรงเรียนพลังงาน แสงอาทิตย์	โรงเรียนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ มีระบบความร้อนเสริม
Henderson and Pabis	a	0.96546	0.93450
	k	0.04143	0.08348
	R <sup>2</sup>	0.98593	0.96036
	RMSE	0.02651	0.04812
Logarithmic	a	0.85919	0.82330
	k	0.05647	0.14991
	c	0.13394	0.18179
	R <sup>2</sup>	0.99038	0.99722
	RMSE	0.01505	0.01262
Two-term exponential	a	0.24790	0.24811
	k	0.12854	0.27707
	R <sup>2</sup>	0.99136	0.98057
	RMSE	0.02076	0.03365
Midilli	a	1.01095	0.99664
	k	0.06805	0.11763
	n	0.85978	1.02060
	b	0.00022	0.00707
	R <sup>2</sup>	<b>0.99167</b>	<b>0.99816</b>
	RMSE	<b>0.02040</b>	<b>0.01024</b>



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่ห่อระหว่างผลการทำนายและผลการทดลอง

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาประสิทธิภาพโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงพาราโบลาแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยใช้หลอดอินฟราเรดเสริมความร้อนให้กับระบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้ทำงานอัตโนมัติเมื่อค่าอุณหภูมิภายในต่ำกว่าหรือสูงกว่าในช่วง 45-60 °C เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดปกติ สรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงเรือนระบบเสริมอินฟราเรดรวมมีค่าดีที่สุด ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำที่สุด คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีความเข้มมากที่สุด และความหวานน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับระบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และตากแดดธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิภายในโรงเรือนระบบเสริมอินฟราเรดรวมมีค่าสูงที่สุด จึงส่งผลให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำขึ้น และความหวานของผลผลิตที่ได้น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า สมการของ Midilli มีความเหมาะสมในการทำนายผลการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่ห่อด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองระบบ ได้ดีที่สุด

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

## References

- [1] Department of Agriculture Extension. Tomato plant year 2018 [Internet]. 2019 [cited 2020 Aug 14]. Available from: <http://www.agriinfo.doe.go.th/year62/plant/rotor/veget/64>. (In Thai)
- [2] Department of Agriculture Extension. Fresh tomatoes for cultivation year 2018 [Internet]. 2019 [cited 2020 Aug 14]. Available from: <http://www.agriinfo.doe.go.th/year62/plant/rotor/veget/63>. (In Thai)
- [3] Folk Doctor Foundation. Cherry tomatoes [Internet]. Available from: <http://www.doctor.or.th/article/detail/5888>. (In Thai)
- [4] Jeentada W, Phetsongkram P. Geometrical effects of solar greenhouse dryer on rubber sheet drying. The journal of kmutnb 2017;1:89-99. (In Thai)
- [5] Somsila P, Teeboonma U, Tumtong P, Oudduang S, Wichangarm M. Type of solar greenhouse dryer affecting air circulation and temperature distribution inside solar greenhouse dryer. Agricultural Sci. J. 2012;43:3(suppl.):212-5. (In Thai)
- [6] Glouannec P, Lecharpentier D, Noel H. Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. Applied Thermal Engineering. 2002;22: (15):1689-703.
- [7] Patcharaprakiti N. A Paraboiled gaba rice (khaohang) and drying process with solar energy and infrared electromagnetic wave. RMUTL ENG.J. 2016;1:43-50. (In Thai)
- [8] Kansaard N, Khruakaew A, Saesong P, Sa-adchom P. Effect of air temperature on cherry tomato drying using combined conveyor system and hot air. In: Tangwannawit P, Uthaida T, Chaitawittanun N, editors. Proceedings of 4<sup>th</sup> Phetchabun Rajabhat University National Research and Academic Conference; 2017 Mar 10; Phetchabun Rajabhat University, Thailand. Research and Development Phetchabun Rajabhat University; 2017. p. 903-11. (In Thai)
- [9] Nabnean S. Design, construction and performance investigation of a solar dryer for drying tomatoes [dissertation]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2015. (In Thai)
- [10] Nabnean S. An investigation of the performance of large – scale greenhouse solar drying system with auxiliary heaters [thesis]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2009. (In Thai)
- [11] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official's Analytical Chemists. Virginia; 2000.

- [12] Jaekhom S, Witinantakit K. Drying kinetics of chicken using superheated steam technique. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2019;9:201-17. (In Thai)
- [13] Saniso E, Prado M, Yayee F. Optimal condition of mushroom drying using solar energy combined with infrared radiation. *Journal of Yala Rajabhat University* 2013;8:107-17. (In Thai)
- [14] Bharathkumar A, Jagadeesh SL, Bhuvaneshwari G, Patil SN, Rudresh DL, Viresh M Hiremath, Prabhakar I. Influence of pre-treatment on total soluble solids, titratable acidity and sugars of raisin. *International Journal of Chemical Studies* 2018;6(5):230-2.
- [15] Jeentada W, Niyomvas B, Thaikul A. Experimental study on drying conditions of solar fish dryer with temperature controlled by open-closed ventilating system. *The Journal of KMUTNB* 2018;28(3):525-36. (In Thai)
- [16] Nilnont W. Drying kinetics of mango using solar tunnel dryer. *The Journal of KMUTNB* 2020;30(1):36-47. (In Thai)
- [17] Younis M, Abdelkarim D, El-Abdein AZ. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2018;25:332-8.
- [18] Teeboonma U, Jongjam S. Ginger drying using infrared-vacuum technique. *Burapha Sci. J.* 2010;15:76-86. (In Thai)
- [19] Babalis SJ, Papanicolaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering* 2006;75:205-14.
- [20] Demir V, Gunhan T, Yagcioglu AK. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering* 2007;98:47-53.
- [21] Sriprapakhan P. The study of using small solar drying room for communities case study: Nongpraktob Sub-district, Sisomdet District, Roi ed Province. The 8<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference; 2015 Nov 4-6; Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. (In Thai)
- [22] Yaibok T, Phethuayluk S, Weawsak J, Mani M, Buaphet P. Development the fish drying process with a solar-electrical combined energy dryer under the southern of Thailand climate. *Thaksin.J.* 2009;12(3):109-18. (In Thai)

### ประวัติผู้เขียนบทความ



ธวัชชัย อ่องประเสริฐ ตำแหน่ง นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

โทรศัพท์ 098-387-0737 Email: thawatchai15578@gmail.com



กมลวรรณ จิตจักร ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

โทรศัพท์ 092-332-5566 Email: kamonwan\_ji@rmutto.ac.th

---

#### Article History:

Received: October 13, 2020

Revised: December 8, 2020

Accepted: December 15, 2020