

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ สำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง¹ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค^{1*} กระวี ตรีอำนรรค² และ เกียรติศักดิ์ ใจโต³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

^{1, 2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 14 มิถุนายน 2565 แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2565 ตอบรับบทความ 30 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์โดยการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ เครื่องอบแห้งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบราบร่องรูปตัววีขนาดพื้นที่ 2x1 ตารางเมตร จำนวน 3 ชุด ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบน้ำมัน 1500 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ห้องอบแห้งขนาด 0.6x0.6x0.6 ลูกบาศก์เมตร ทำการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยร้อยละ 84.44 (มาตรฐานเปียก) ครั้งละ 4 กิโลกรัม ที่สภาวะการอบแห้งคืออุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง 0.034 กิโลกรัมต่อวินาที จนเหลือความชื้นสุดท้ายของมะม่วงอบแห้งต่ำกว่าร้อยละ 18 (มาตรฐานเปียก) ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) อัตราการอบแห้ง และประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งจากค่าความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ ค่าความต่างของสี และเนื้อสัมผัสซึ่งประกอบด้วยความแข็ง การยืดเกาะ ความยืดหยุ่น และค่าความเคี้ยวได้ ผลของการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่าคุณภาพของมะม่วงอบแห้งที่ดีที่สุดโดยมีค่าความแตกต่างสี น้อยที่สุด ค่าเนื้อสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด โดยที่ความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง โดยมีค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 46.36 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่ำที่สุดคือ 12.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 27.15

คำสำคัญ : มะม่วงอบแห้ง; เครื่องอบแห้ง; พลังงานร่วมไฟฟ้าแสงอาทิตย์; ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4694 2933, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tawarat@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Performance Evaluation of Electrical-solar Combined Energy Dryer for Nam Dok Mai Mango Drying

Jantana Seelanamtiang¹ Tawarat Treeamnuk^{1*} Krawee Treeamnuk² and Kaittisak Jaito³

¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

³Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000

³ 2 Nanglinchee Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120

Received 14 June 2022; Revised 26 August 2022; Accepted 30 August 2022

Abstract

The objective of this research was to evaluate performance of a solar-electrical combined energy dryer by drying Nam Dok Mai mango. The dryer consists of 3 sets of 2x1 m² solar collector, 2 sets of 1500 watts of the finned heater, and a drying chamber size of 0.6x0.6x0.6 m³. Nam Dok Mai mango weight of 4 kg with initial moisture content of 84.44% (wet basis) was dried with drying air temperature of 60, 70, and 80°C and drying air flow rate of 0.034 kg/s until the final moisture content was less than 18% (wet basis). The performance of drying was evaluated by efficiency of solar collector, Specific electrical energy consumption (SEEC) and drying rate. The quality was evaluated by moisture content, color difference, and texture profile consists of hardness, cohesiveness, springiness, and chewiness. The result shown that, drying with temperature of 60°C has the best qualities of dried product with the lowest color difference, optimum texture, with moisture and water activity are up to the industry standard of dried fruit. The solar collector set has highest efficiency of 46.36%, the lowest of the specific electrical energy consumption of 12.57 MJ/kg, which can be save electrical energy of 27.15%

Keywords: Dried Mango; Dryer; Electrical-solar Combined Energy; Solar Collector

** Corresponding Author. Tel.: +668 4694 2933, E-mail Address: tawarat@sut.ac.th*

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่สูงขึ้น ความกังวลด้านสิ่งแวดล้อม และคาดว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมีจำนวนลดลงอย่างรวดเร็ว การส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนทดแทนพลังงานฟอสซิลมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อลดปัญหาด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิต [1] พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่ง จากรายงานของ R.H.B.Exell [2] ประเทศไทยมีความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.2 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งปัจจุบันการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการทำน้ำร้อนหรือการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นการขจัดความชื้นออกจากวัสดุช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารและผลิตผลทางการเกษตรเพื่อลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและลดต้นทุนการขนส่ง [3] การอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่ทำได้ง่ายคือการตากแห้ง ซึ่งวิธีการตากแห้งแบบดั้งเดิมใช้เวลาค่อนข้างนาน มีข้อเสียหลายประการ เช่น การเน่าเสียของผลิตภัณฑ์เนื่องจากสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยมีฝน ลม ความชื้นและฝุ่นละอองจำนวนมาก การสูญเสียจากนก แมลงและสัตว์ฟันแทะมารบกวน และการเจริญเติบโตของเชื้อรา อีกทั้งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ [4] เพื่อเอาชนะข้อจำกัดนี้จึงได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งทางกลทำให้ลดการสูญเสียพืชผลและสามารถลดความชื้นถึงระดับที่เก็บรักษาได้อย่างปลอดภัยโดยใช้เชื้อเพลิงทั่วไป เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล ไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับให้ความร้อนกับอากาศ เครื่องอบแห้งนำเข้ามักจะมีราคาสูง [5], [6] และเนื่องจากความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงฟอสซิล ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการลดลงของเชื้อเพลิง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกการใช้พลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล [7] ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงมีข้อจำกัดไม่สามารถอบแห้งเนื้อได้เมื่อมีฝนตกหรือในตอน

กลางคืน จึงได้มีการพัฒนาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตปั๊ม [8] ในระบบนี้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่ผลิตความร้อนเป็นแหล่งความร้อนเสริมให้กับอากาศก่อนไปปรับความร้อนจากคอนเดนเซอร์ในระบบฮีตปั๊มอีกครั้ง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นได้ โดย C. Tiris et al. [9] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมหลายชั้นวาง ซึ่งเครื่องอบแห้งประกอบไปด้วยตัวเก็บรังสี ห้องอบแห้ง ชั้นวาง พัดลม และเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งองุ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าเมื่อเทียบกับการตากแห้ง

T. Yaibok et al. [10] ได้ศึกษาการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักและพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริม ประกอบด้วยตู้อบชนิดโปร่งแสง ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาด 4.08 ตารางเมตร ขดลวดไฟฟ้าสำหรับทำความร้อนขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ชุด จากการทดลองอบแห้งปลา 2 ชนิด คือ ปลาช่อนและปลาดุก โดยให้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งปลาช่อนแบบใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 42.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 5.54 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งปลาดุกด้วยพลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 80.02 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 2.98% และใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง

นอกจากนี้ปัญหามลพิษมีแนวโน้มล้นตลาดในช่วงฤดูการผลิตมีปริมาณเกินความต้องการของผู้บริโภค ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและผลิตผลจำนวน

มาก การแปรรูปมะม่วงเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น มะม่วงกระป๋อง น้ำมะม่วง และมะม่วงอบแห้ง เป็นต้น มะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติที่ไม่มีการเติมน้ำตาลและเติมวัตถุเจือปนอาหารเป็นที่สนใจสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดการใช้พลังงานในการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเสริมในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้และประเมินความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

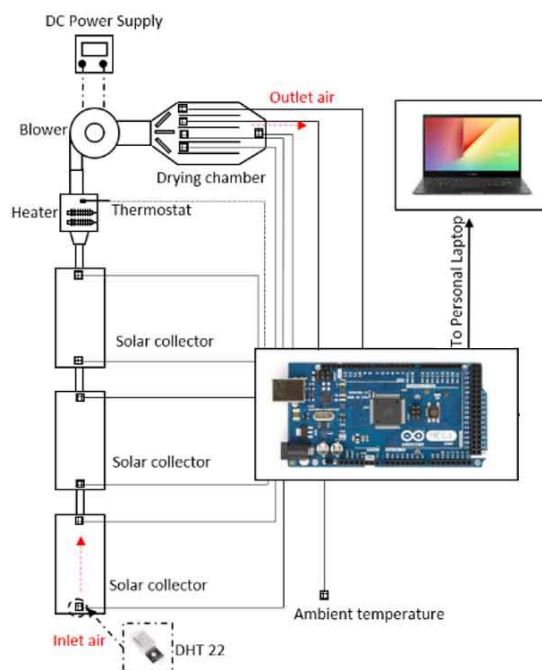
2.1 มะม่วงน้ำดอกไม้

มะม่วงน้ำดอกไม้ในการทดลองมาจากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยของมะม่วงอยู่ที่ 84.44% (มาตรฐานเปียก) และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids content, TSS) 20 องศาบริกซ์ ซึ่งเป็นมะม่วงระยะงอมหรือสุกเกินไป [11]

2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีชนิด 60 องศา ทำมุมเอียง 14 องศากับแนวระดับ ขนาด 2x1 ตารางเมตร จำนวน 3 ชุด จัดวางแบบอนุกรม โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร ทาสีดำและแผ่นปิดด้านหลังเป็นอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ภายในติดตั้งฉนวนกันความร้อนหนา 20 มิลลิเมตร มีท่อลมเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องผลิตลมร้อนที่ติดตั้งฮีตเตอร์พร้อมครีบน้ำมัน 1500 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ทางเข้าห้องอบแห้งติดตั้งโบลเวอร์เพื่อระบายความชื้นออกจากห้องอบแห้งและควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ห้องอบแห้งขนาด 0.6x0.6x0.6 ลูกบาศก์เมตร

ทำจากเหล็กแผ่นอบสังกะสี และทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนไว้ภายใน มีทั้งหมด 4 ถาด ติดตั้งเซ็นเซอร์ DHT22 ที่ทางเข้าตัวเก็บรังสี 1 จุด ทางออกตัวเก็บรังสี 1 จุด ในห้องอบแห้งบนชั้นถาดละ 1 จุด ทางออกของห้องอบแห้ง 1 จุด และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 1 จุด และทางออกห้องฮีตเตอร์ 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยอากาศจะไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อรังสีอาทิตย์กระทบกับแผงรับแสงจะทำให้อากาศอุ่นขึ้น อากาศถูกดูดมายังห้องผลิตลมร้อน ซึ่งฮีตเตอร์จะทำงานถ้าหากอากาศมีอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่กำหนด และโบลเวอร์จะดูดอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง



รูปที่ 1 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

2.3 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าและทางออกของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านตัวเก็บรังสีมีค่า 0.03 และ 0.09 กิโลกรัมต่อวินาที

ในช่วงเวลา 10.00 – 16.00 น. ซึ่งค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หาได้จากอัตราส่วนของความร้อนที่อากาศได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับไว้ ซึ่งค่าความร้อนที่อากาศได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$Q_u = \dot{m} C_a (T_{co} - T_{ci}) \quad (1)$$

โดยที่

Q_u คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (กิโลวัตต์)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส)

T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศขาออกจากตัวเก็บรังสี (องศาเซลเซียส)

T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าตัวเก็บรังสี (องศาเซลเซียส)

ดังนั้นประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \times I} \quad (2)$$

โดยที่

η_c คือ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

A_c คือ พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ตารางเมตร)

I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

2.4 การทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

การทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 70 และ 80°C อัตราการไหลของอากาศอบแห้งเท่ากับ 0.034 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ การทดสอบเริ่มจากนำมะม่วง

น้ำดอกไม้ผลสดไปหาความชื้นเริ่มต้นตามวิธีของ AOAC [12] ค่าความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$M = \frac{w - d}{w} \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่

M คือ ความชื้นของมะม่วง (เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก)

w คือ น้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้ (กรัม)

d คือ น้ำหนักแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ (กรัม)

การทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ดำเนินการโดยหั่นมะม่วงเป็นชิ้นซึ่งกำหนดให้ขนาดของมะม่วงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 3x7x0.5 เซนติเมตร³ นำไปปรับสภาพก่อนการอบแห้งด้วยวิธีการลวกด้วยน้ำร้อน 1 นาที [13] จัดเรียงชิ้นมะม่วงแบบชั้นบางลงในถาดได้ประมาณ 85 ชิ้นต่อถาด คิดเป็นน้ำหนักโดยประมาณ ถาดละ 1 กิโลกรัม ทั้งหมด 4 ถาด นำเข้าห้องอบแห้งระหว่างการทดสอบทำการบันทึก พลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทุกๆ 1 ชั่วโมง และบันทึกน้ำหนักมะม่วงและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งทุกๆ 2 ชั่วโมง จนมะม่วงมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18 เปอร์เซ็นต์และมีค่า Water Activity ไม่เกิน 0.65 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง (มอก. 919-2563) [14]

2.5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption, SEEC) เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์และระบบควบคุม สามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดไฟฟ้า (Kilowatt-hour Meter) ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมะม่วงน้ำดอกไม้ 1 กิโลกรัม [15] โดยไม่คิดค่าพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่ได้ฟรีซึ่งค่า SEEC สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$SEEC = \frac{3.6 \times E}{w_i - w_f} \quad (4)$$

โดยที่

SEEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

w_i คือ น้ำหนักมะม่วงเริ่มต้น (กิโลกรัม)

w_f คือ น้ำหนักมะม่วงหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

2.6 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) เป็นความสามารถในการระเหยน้ำออกจากวัสดุโดยดูจากอัตราการระเหยน้ำออกจากมะม่วงน้ำดอกไม้ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง [16] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$DR = \frac{m_{\text{water}}}{t} \quad (5)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

m_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (กิโลกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.7 การประเมินคุณภาพมะม่วงอบแห้ง

ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ได้จากการทดลองถูกนำมาหาค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) วัดค่าสี และวัดเนื้อสัมผัส โดยค่า a_w วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Aqualab รุ่น PR การวิเคราะห์ค่าสีใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าสี HunterLab รุ่น UltraScan ทำการวัดค่าสีตามระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ สามารถบนพื้นผิวของชิ้นมะม่วง โดยที่ L^* หมายถึงค่าความสว่าง (Lightness), a^* หมายถึงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว และ b^* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำการหาความแตกต่างของสีชิ้นมะม่วงอบแห้งจากการทดลองเทียบกับชิ้นมะม่วงผล

สด (Total color difference, ΔE) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_0 - L^*)^2 + (a^*_0 - a^*)^2 + (b^*_0 - b^*)^2} \quad (6)$$

โดยที่

L^*_0, a^*_0, b^*_0 คือ ค่าพารามิเตอร์สีของมะม่วงผลสด

L^*, a^*, b^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของมะม่วงอบแห้ง

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้งแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ได้แก่ Hardness, Cohesiveness, Springiness และ Chewiness ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XT Plus C, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA) ใช้หัวกดแบบแบนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยกดตัวอย่างลง 70% ของความสูงด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดระหว่างและหลังทดสอบ คือ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

2.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

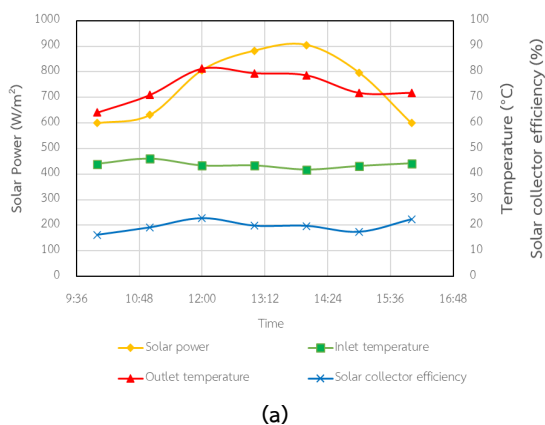
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติของการอบแห้งต่อค่าคุณภาพของมะม่วงอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ย (Multiple comparison test) ด้วยวิธี Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการศึกษา

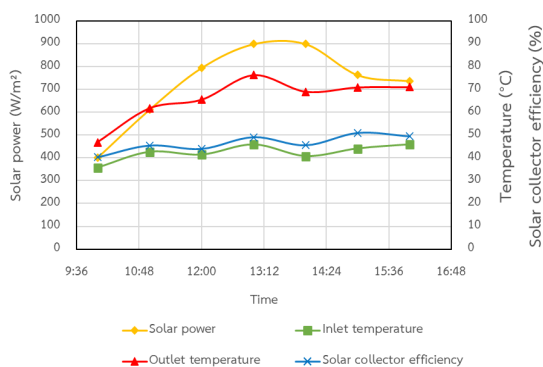
3.1 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ผลการประเมินประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์พบว่าค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลของอากาศโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 19.59 เมื่ออัตราการไหลอากาศเท่ากับ

0.03 กิโลกรัมต่อวินาที ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 745.90 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 46.36 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.09 กิโลกรัมต่อวินาที ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 728.57 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยค่าประสิทธิภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราการไหล 0.03 กิโลกรัมต่อวินาที มีค่าอุณหภูมิอากาศขาออกเฉลี่ยคือ 73.99 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าที่อัตราการไหล 0.09 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 65.89 องศาเซลเซียส



(a)



(b)

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar power) อุณหภูมิอากาศขาเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับ

ช่วงเวลาในการทดสอบ (a) อัตราการไหลอากาศ

0.03 กิโลกรัมต่อวินาที (b) อัตราการไหลอากาศ

0.09 กิโลกรัมต่อวินาที

3.2 ผลการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

3.2.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการอุ่นอากาศก่อนเข้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มให้อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้นตามที่ต้องการนั้นเป็นการช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบการอบแห้งลงได้ ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้งส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นต้องการพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์สูงขึ้น ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยของการอบแห้งมะม่วงที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส คือ 12.57 13.69 และ 14.83 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหยตามลำดับ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น [17] ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเทียบกับรายงานของ W. Sriariyakul [18] ซึ่งทำการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยสุด 68.84 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหยที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอินฟราเรด 70 องศาเซลเซียส เมื่อทำการทดสอบเปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าจนได้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน การผลิตลมร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสามารถลดการใช้พลังงานจากไฟฟ้าได้ 4.68 6.66 และ 5.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็น 27.15 32.73 และ 25.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์อุ่นอากาศขึ้นต้นช่วยลดภาระของฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงาน [19] ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้

3.2.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้แสดงในตารางที่ 1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

จาก 0.112 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส เป็น 0.153 กิโลกรัมต่อชั่วโมงที่ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ซึ่งการ

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องเกิดการถ่ายเทมวลได้มากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการ อบแห้งลดลง [20]

ตารางที่ 1 ค่าความชื้นสุดท้าย ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEEC) และอัตราการอบแห้ง (DR) ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

อุณหภูมิอบแห้ง	ความชื้นสุดท้าย (%)	a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)
60 °C	14.65±2.19 ^a	0.59±0.06 ^a	12.57±0.98 ^b	0.122±0.017 ^b
70 °C	13.67±2.27 ^a	0.58±0.07 ^a	13.69±0.35 ^{ab}	0.145±0.025 ^{ab}
80 °C	14.58±2.49 ^a	0.54±0.04 ^a	14.83±0.23 ^a	0.153±0.006 ^a

หมายเหตุ อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

3.2.3 ความชื้นสุดท้ายและ ค่าปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระของ มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทาง

สถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 1 มะม่วงอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่า 18% (มาตรฐานเปียก) และมีค่า Water Activity ไม่เกิน 0.65 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง [14]

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สี่ และค่าความเปลี่ยนแปลงสี่ของมะม่วงน้ำดอกไม้

มะม่วงน้ำดอกไม้	L^*	a^*	b^*	ΔE
มะม่วงสด	63.09±2.57 ^a	13.84±1.64 ^b	61.08±3.28 ^a	-
อบแห้งอุณหภูมิ 60 °C	59.91±4.63 ^a	17.08±1.38 ^a	56.35±4.60 ^{ab}	9.32±3.38 ^a
อบแห้งอุณหภูมิ 70 °C	54.45±4.15 ^b	17.17±2.09 ^a	50.66±5.04 ^{bc}	11.45±5.70 ^a
อบแห้งอุณหภูมิ 80 °C	54.08±7.11 ^b	16.01±5.21 ^{ab}	48.6±5.20 ^c	15.36±5.28 ^a

หมายเหตุ อักษรที่ต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

3.2.4 คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์

จากการนำมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อน พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส มาทำการตรวจสอบคุณภาพด้านสี พบว่าค่าสี L^* ของมะม่วงน้ำดอกไม้ผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงใน ตาราง 2 โดยค่าสี L^* ลดลงจากผลสด และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า L^* น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

ส่วนค่าสี a^* ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อน พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสี a^* ของมะม่วงผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยค่าสี a^* เพิ่มขึ้นจากผลสดแสดงถึงการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงหลังผ่านการอบแห้ง [21] การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า a^* น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และค่าสี b^* ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อน

พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่า b^* ของมะม่วง น้ำดอกไม้ผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่า b^* ลดลงจากผลสด และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า b^* น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อทำจากการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งเทียบกับผลสด พบว่าทุกระดับอุณหภูมิให้ค่าความแตกต่างสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2.5 เนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้ง

จากการวิเคราะห์ค่า Hardness ของมะม่วง น้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อความแข็งของมะม่วงอบแห้งที่ได้ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน [18] ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลงจึงทำให้เกิดการหดตัวของมะม่วงลดลง ในส่วนของค่ายึดเกาะ (Cohesiveness) ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนพลังงานไฟฟ้า

ร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมะม่วงอบแห้งที่มีค่ายึดเกาะน้อยที่สุดจะมีค่ายึดเกาะของเนื้ออาหารภายในหรือความเหนียวน้อยที่สุดเท่ากับ 0.11 คือ มะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความยืดหยุ่น (Springiness) บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นของเนื้อมะม่วงยังมีค่ามากยังมีความยืดหยุ่นมากจากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อค่าความยืดหยุ่นของมะม่วงอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมะม่วงอบแห้งที่มีค่าความยืดหยุ่นมากที่สุดเท่ากับ 0.11 คือ มะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิวของมะม่วงมีการแข็งตัวจากการจับตัวของน้ำตาลในเนื้อมะม่วงทำให้เกิดการหดตัวได้น้อยลง และค่าความเคี้ยวได้ (Chewiness) เป็นค่าพลังงานใช้ในการบดอาหารที่มีสถานะของแข็งใช้ในการพิจารณาถึงความรู้สึกในช่องปากของผู้บริโภค จากการวิเคราะห์พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยมะม่วงอบแห้งที่มีค่า Chewiness น้อยที่สุดเท่ากับ 1.24 นิวตัน คือมะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 เนื้อสัมผัสมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งที่ได้จากอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิอบแห้ง	Hardness (N)	Cohesiveness	Springiness	Chewiness (N)
60 °C	14.81±4.28 ^a	0.11±0.03 ^a	0.11±0.05 ^a	1.24±0.86 ^a
70 °C	12.93±4.28 ^{ab}	0.13±0.03 ^a	0.10±0.03 ^a	1.44±0.73 ^a
80 °C	9.48±3.83 ^b	0.12±0.05 ^a	0.07±0.05 ^b	1.73±1.15 ^a

หมายเหตุ อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากการวิเคราะห์ เนื้อสัมผัสของมะม่วง น้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า Springiness มากที่สุด และค่า Chewiness น้อยที่สุด รวมถึงค่า L^* และ ค่า b^* มาก

ที่สุด อีกทั้งให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด จึงเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนที่ทำการ

ทดสอบโดย W. Sriariyakul [18] พบว่าสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการระเหยนํ้าออกจากมะม่วงนํ้าดอกไม้ได้ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการอบแห้งมะม่วงชนิดอื่นและผลไม้อื่นได้เนื่องจากอุณหภูมิไม่สูงเกินไป โดยเฉพาะผลไม้ที่มีนํ้าตาลสูงเช่น ลำไย ลิ้นจี่ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาด้านพลังงานพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์มีศักยภาพในการนำมาเป็นแหล่งความร้อนเสริมให้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อลดการใช้พลังงานหลักจากไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงแก๊สได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสาครและคณะ [22] ที่พบว่าอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งเพอร์นิเจอร์ไม้เคลือบสี 2.41 บาทต่อกิโลกรัมนํ้าระเหย ขณะที่ใช้อากาศร้อนจากห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สอย่างเดียวมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งสูงถึง 7.90 บาทต่อกิโลกรัมนํ้าระเหย

5. สรุป

จากการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งมะม่วงนํ้าดอกไม้ด้วยลมร้อนจากพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นสถานะที่เหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะน้อยที่สุดคือ 12.56 เมกะจูลต่อกิโลกรัมค่าสี L^* และ b^* มากที่สุด ค่า Springiness มากที่สุดค่า Cohesiveness และค่า Chewiness น้อยที่สุดค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 46.36 ช่วยลดใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 27.15

4. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Fudholi, K. Sopian, M.H. Ruslan, M.A. Alghoul and M.Y. Sulaiman, "Review of solar dryers for agricultural and marine products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp. 1-30, 2010.
- [2] R.H.B. Exell, "The Fluctuation of Solar Radiation of Thailand," *Solar Energy*, Vol. 18, pp 549 – 554, 1976.
- [3] I. Dincer, "Moisture loss from wood products during drying-Part I: moisture diffusivities and moisture transfer coefficients," *Energy Sources*, vol.20, pp 67-75, 1998.
- [4] A.G.M.B. Mustayen, S. Mekhilef and R. Saidur, "Performance study of different solar dryers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.34, pp 463–470, 2014.
- [5] M.S. Sodha, N.K. Bansal, K. Kumar, P.K. Bansal and M.A.S. Malik, "Solar crop drying, vol.1," Florida, USA, C. R. C. Press, Palm Beach, 1987.
- [6] O.V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy Conversion & Management*, vol.40, pp 615–655, 1999.
- [7] A.A. El-Sebaei and S.M. Shalaby, "Solar drying of agricultural products: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16, pp 37–43, 2012.
- [8] A. B. Lingayat, V.P. Chandramohan, V.R.K Raju and V. Meda, "A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its

- performance, energy storage and important highlights,” *Applied Energy*, vol. 258, 2022.
- [9] C. Tiris, M. Tiris and I. Dincer, “Experiments on the a new solar air heater,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.16, pp 183–7, 1996.
- [10] T. Yaibok, S. Phethuayluk, J. WeawSak, M. Mani and P. Buaphet, “Development the Fish Drying Process with a Solar-Electrical Combined Energy Dryer under the Southern of Thailand Climate,” *Thaksin University Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 109–118, 2010.
- [11] S. Sombatpraiwan, T. Tipyavimol, and K. Treeamnuk, “Factors Related to Ripening-stages of Nam Dok-mai Mango after Harvesting,” *Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 52–58, 2012.
- [12] Horwitz, W., “Official Methods of AOAC International” 17th ed, Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International, Gaithersburg, 2000.
- [13] J. Seelanamtiang, T. Treeamnuk and K. Treeamnuk, “Effect of Blanching Pretreatment on Physical Properties and Texture of Dried Chok-Anun Mango,” In *Proceeding of the 22 th TSAE National Conference and the 14 th TSAE International Conference*, Faculty of Engineering Khon Kaen University, Thailand, 2021, pp. 161-165.
- [14] Office of Industrial Product Standards, Ministry of Industry, Bangkok, “Dried Fruit Industrial Standard,” TIS. 919- 2563.
- [15] N. Saelim, T. Treeamnuk and K. Treeamnuk, “Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 37-46, 2018.
- [16] K. Jaito, T. Treeamnuk, K. Treeamnuk and N. Prangpru, “Shredded-Coconut Drying by Spouted-Bed Technique for Cold Press Coconut Oil Production,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 22, no. 1, pp 64-72, 2016.
- [17] E.O.M. Akoy, “Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices,” *International Food Research Journal*, vol.21, pp 1911-1917, 2014.
- [18] W. Sriariyakul, “Drying of Nam Dok Mai Mango Using Far-Infrared Radiation in Combination with Hot-Air” *The Journal of Industrial Technology*, vol17, no. 3, pp 16-182, 2021.
- [19] P.N. Sarsavadia, “Development of solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion,” *Renewable Energy*, vol.32, pp 2529–47, 2007.
- [20] R. Kumwan, S. Thiangchanta and S. Kesai, “Determination of Drying Rate of Jackfruit by Infrared Dryer, Vacuum System,” *J. Industrial Technology Lampang Rajabhat University*, vol.11, no. 2, pp. 67-77, 2018.
- [21] G.M. Sapers and Jr.F.W. Douglas, “Measurement of enzymatic browning at

cut surfaces and in juice of raw apple and pear fruits,” *Journal Food Science*, vol.52, pp. 1258-1261, 1987,

- [22] S. Inthachai, N. Meeso, S. Siriamornpun, “Use of hot-air from solar energy

combined with gas fuel in coated wood furniture drying” *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 32, no. 5, pp. 659-663, 2013.