



การประเมินศักยภาพเชิงพลังงานและเอ็กเซอร์จีของเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม ENERGY AND EXERGY POTENTIAL ASSESSMENT OF SOLAR TUNNEL DRYER

วานิช นิลนนท์^{1*} และสุธิดา พิทักษ์วินัย²

¹อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมแบบการพาความร้อนด้วยการบังคับ โดยทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (EUR) ของเครื่องอบแห้งและประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และเครื่องอบแห้ง รวมถึงการหาความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตต่อพลังงานที่ใช้ของกระบวนการอบแห้ง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาศักยภาพของระบบอบแห้งที่มีการใช้พลังงานหมุนเวียนในด้านของการเพิ่มประสิทธิภาพให้มีค่าสูงสุดต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม, พลังงาน, เอ็กเซอร์จี

ABSTRACT

This article is an analysis of the energy and exergy of mango drying using a solar tunnel dryer with forced convection. The experiment was conducted to find the Energy Utilization Ratio (EUR) of the dryer and apply the second law of thermodynamics in the analysis of the exergy on the solar collector and the solar tunnel dryer including the ability to evaporate water from the product to the energy of the drying process. The results obtained from the energy and exergy analyzes could be used to develop the potential of the renewable energy drying system in terms of maximum efficiency.

KEYWORDS: solar tunnel dryer, energy, exergy

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีประชากรทำอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลักและมีผลผลิตทางการเกษตรปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องมีการแปรรูปหลังการเก็บเกี่ยว วิธีการที่นิยมใช้สำหรับแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่ส่วนใหญ่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ 30% - 80% นั้น คือ การทำแห้ง (dehydration) [1] ซึ่งเป็นการลดความชื้นภายในผลผลิตเป็นเหตุให้ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและ

Wanich Nilnont^{1*} and Sutida Phitakwinai²

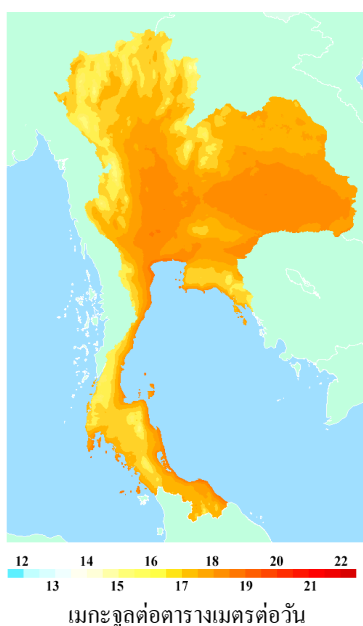
¹Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture

²Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Nonthaburi, 11000, Thailand

แบคทีเรีย ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษา มีความสะดวกในการจัดเก็บ รวมถึงการจัดการในการขนส่ง วิธีการลดความชื้นออกจากผลผลิตที่นิยมทำกันมาตั้งแต่อดีตคือการตากแดดตามธรรมชาติ วิธีการนี้ถึงแม้จะมีข้อดีคือทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย แต่อาจจะมีปัญหาด้านสุขอนามัยของผลผลิตที่ทำการลดความชื้นและในบางครั้งผลผลิตอาจเสียหายจากสภาพภูมิอากาศซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ โดยทั่วไปการอบแห้งเป็นกระบวนการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตซึ่งต้องใช้ปริมาณความร้อน 3 – 6 MJ ในการระเหยน้ำ 1 kg [2] ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งเชิงกลขึ้นมาในหลายรูปแบบ แต่เครื่องอบแห้งเหล่านั้นมีราคาที่สูงแพง เกษตรกรไม่สามารถหามาใช้ได้อย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่เครื่องอบแห้งที่พัฒนามาจะมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีราคาไม่แน่นอนและมีแนวโน้มสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลาในการเป็นแหล่งพลังงานเพื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับประเทศไทย เนื่องจากปริมาณรังสีอาทิตย์รวมรายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศไทยมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ซึ่งจัดได้ว่ามีศักยภาพด้านพลังงานค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 1 [3]



รูปที่ 1 แผนที่รังสีรวมรายวัน 3 เฉลี่ยต่อปี [3]

ปัจจุบันกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้กำหนดแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติ ในช่วง พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2579 ที่ให้ความสำคัญในการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน โดยระบบอบแห้งรังสีอาทิตย์เป็นเป้าหมายหนึ่งในการส่งเสริมให้มีพื้นที่ในการติดตั้งระบบ $75,000 \text{ m}^2$ หรือเทียบเท่าการผลิตพลังงานความร้อน 5 ktoe ครอบคลุมทั้งในระดับครัวเรือน ระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลางให้รักษาคุณภาพของผลผลิตได้ตามความต้องการของผู้บริโภค [4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาในประเทศไทยได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ [5] ซึ่ง Janjai et al. [6-7] ได้เป็นผู้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ประเภทเรือนกระจกที่มีรูปทรงพาราโบลา

โคมสำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น พริก กล้วย ลำไย กาแฟ และผลผลิตทางการเกษตรตามฤดูกาล โดยมีกำลังการผลิตอยู่ในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลาง ในปัจจุบันได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ประเภทเรือนกระจกแบบพาราโบลาโคมให้สามารถอบกล้วยได้ครั้งละ 1 ton ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในแหล่งที่ผลิตกล้วยอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งมีการยอมรับในด้านคุณภาพทั้งในประเทศและต่างประเทศ นอกจากนี้ Nabnean et al. [8] ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์โดยใช้น้ำร้อนจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนให้กับการอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่ม โดยสามารถอบแห้งได้ครั้งละ 100 kg และพบว่าผลผลิตหลังการอบแห้งมีคุณภาพที่ดี สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งเมื่อเทียบกับการตากแดดลงจากเดิม 3 วัน โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่า 21% - 69% และ Karan [9] ได้ประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลสำหรับอบแห้งมันสำปะหลังเส้น ระบบอบแห้งดังกล่าวประกอบด้วยตู้อบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์และเตาเผาแก๊สชีวมวล ผลการทดลองพบว่าสามารถลดความชื้นจาก 60.5% (w.b.) เหลือ 14% (w.b.) ในเวลา 11 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากมันสำปะหลังเส้นแบบตากแดดธรรมดา 3 ชั่วโมง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำสุดของการทดลองมีค่าเท่า 5.92% โดยมีสาเหตุหลักมาจากการสูญเสียความร้อน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากต่างประเทศ เช่น Fudholi et al. [10] ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้งพริกแดง ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเป็นแหล่งผลิตความร้อน เครื่องอบแห้งนี้สามารถลดความชื้นเริ่มต้นของพริกแดงสดจาก 80% (w.b.) เหลือ 10% (w.b.) ในเวลา 33 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดธรรมดา 49% พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่า 28% เป็นต้น



รูปที่ 2 พาราโบลาโคมของโรงงาน “กล้วยตากจิราพร” [5]

การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ในด้านของการวิเคราะห์เอกเซอร์จีได้นำมาใช้เพื่อช่วยในการออกแบบและประเมินศักยภาพของระบบทางความร้อน โดยเอกเซอร์จีเป็นการคาดคะเนถึงค่าสูงสุดของพลังงานที่เป็นประโยชน์ที่ระบบสามารถทำได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะด้วยกระบวนการย้อนกลับได้จากสภาวะที่กำหนดโดยอ้างอิงกับสภาวะแวดล้อม ในทางปฏิบัติพบว่าปริมาณเอกเซอร์จีบางส่วนมีการสูญเสียไปเนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้ ดังนั้นจึงพบความแตกต่างระหว่างพลังงานของระบบจริงและค่าพลังงานสูงสุดที่ระบบสามารถทำได้อยู่เสมอ ซึ่งค่าของผลต่างที่ได้นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบจริงให้มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่เป็นไปได้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดของการใช้พลังงาน ในช่วงเวลาที่ผ่านมางานวิจัยที่ทำการศึกษาโดยใช้หลักการวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้ง

ผลผลิตทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ [10-19] แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการทดลองในเครื่องต้นแบบที่มีขนาดเล็ก ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมเพื่อเพิ่มมูลค่าแก่ผลผลิตทางการเกษตรในพื้นที่ชุมชนเกษตรกรรมย่านชานเมืองของจังหวัดนนทบุรี โดยใช้หลักการวิเคราะห์ตามกฎข้อที่หนึ่ง และการวิเคราะห์เอกเซอร์จีที่อยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองตามหลักการอุณหพลศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาศักยภาพของระบบอบแห้งในการใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประโยชน์สูงสุด สามารถทดแทนการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล และยังเป็นการพัฒนางานวิจัยที่ช่วยส่งเสริมเทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่สามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีกของประเทศให้สามารถแข่งขันในตลาดระดับสากลได้ซึ่งเป็นไปตามแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติในช่วง พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2579 ที่ให้ความสำคัญในการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน

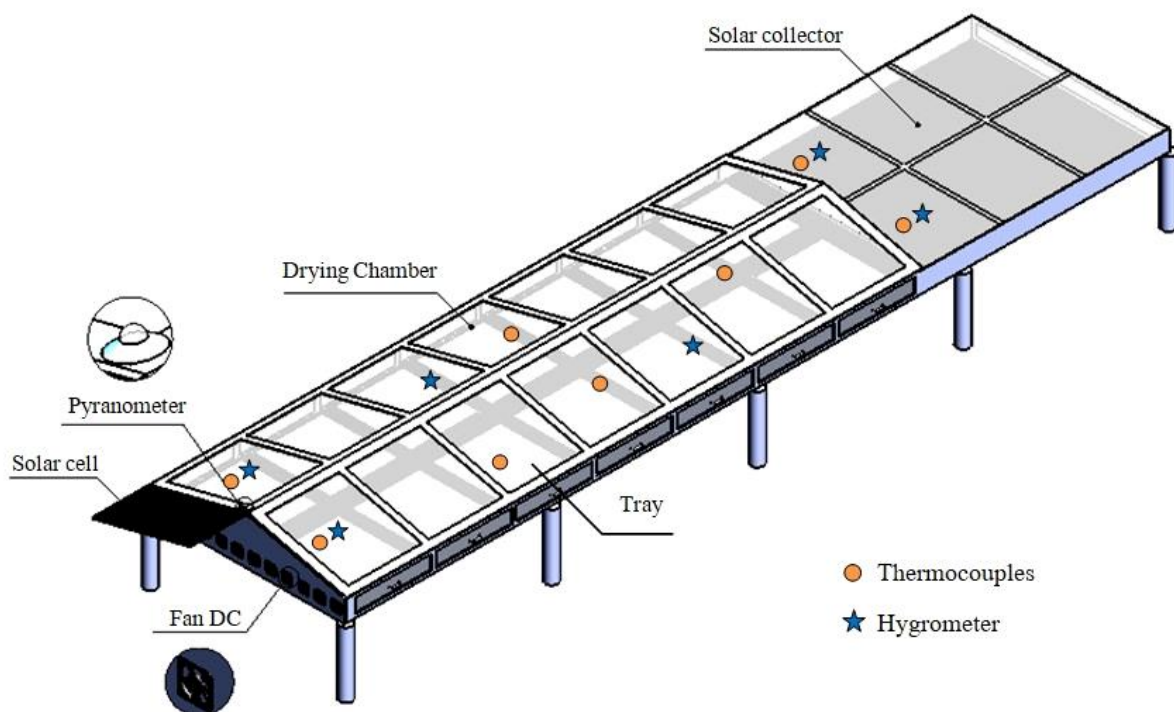
2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม (Solar tunnel dryer)

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง โดยเครื่องอบแห้งจะถูกติดตั้งให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ วัสดุหลักที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งเป็นแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตและในส่วน of พื้นที่รับรังสีถูกทาด้วยสีดำด้าน ภายในเครื่องอบแห้งมีการหมุนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมมีส่วนประกอบสำคัญหลัก 3 ส่วน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (solar collector) ห้องอบแห้ง (drying chamber) และเซลล์รังสีอาทิตย์ (solar cell) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีขนาดความกว้าง 2.4 m ความยาว 3 m ถูกปิดด้วยแผ่นปิดใสโปร่งแสงเป็นกระจกใส และมีอากาศเป็นของไหลทำงาน ส่วนห้องอบแห้งถูกติดตั้งต่อจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ห้องอบแห้งมีขนาดความกว้าง 2.4 m ความยาว 7 m ประกอบด้วยหลังคาที่มีโครงสร้างเป็นแบบหน้าจั่วโดยมุมที่ฐานเอียง 14 องศาและแผ่นปิดใสโปร่งแสงเป็นวัสดุชนิดเดียวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยที่ถาดอลูมิเนียมใส่ผลผลิตสำหรับทำการอบแห้งจะถูกจัดวางในตำแหน่งที่ลมร้อนสามารถผ่านได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของถาด ด้านหลังของเครื่องอบแห้งได้ทำการติดตั้งพัดลมจำนวน 14 ตัว ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 V จากเซลล์รังสีอาทิตย์ (solar cell) รุ่น SLP120S-12 ขนาด 120 W ซึ่งพัดลมจะทำหน้าที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านผลผลิต

2.2 เครื่องมือวัดสำหรับการทดลอง

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมได้ติดตั้งเครื่องมือวัดค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) ของ Kipp & Zonen รุ่น CMP6 เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) ชนิด hot wire ของ Emtech รุ่น 45158 เครื่องมือวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouples) ชนิด K เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer) ของอากาศสิ่งแวดล้อมและอากาศภายในเครื่องอบแห้งของ Graphtec รุ่น B-530-UM-152 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Graphtec รุ่น GL-820 สำหรับทำการบันทึกข้อมูลรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสิ่งแวดล้อมและอากาศภายในเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้ใช้เครื่องชั่งแบบ Electronic Balance สำหรับชั่งมวลของผลผลิต มีขนาดความสามารถ 3000 g ค่าความแม่นยำ 0.01 g



รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) และความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometer)

2.3 วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นได้ทำการติดตั้งและทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งก่อนขยายผลสู่ชุมชน ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี เครื่องอบแห้งนี้มีความสามารถในการอบแห้งมะม่วงสดสุกพันธุ์มหาชนกได้ครั้งละ 100 kg ในการอบแห้งครั้งนี้ทำการอบแห้งมะม่วงสดสุกพันธุ์มหาชนกที่ปอกเปลือกโดยหั่นตามแนวยาวของลูก ซึ่งมีความหนาต่อชิ้นประมาณ 0.5 mm จำนวน 100 kg ซึ่งเป็นการอบแห้งที่เต็มความจุของเครื่องอบแห้ง จากนั้นทำการเก็บมะม่วงที่หั่นแล้วในตู้แช่ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ก่อนทำการอบแห้งนำมะม่วงที่เตรียมไว้ออกจากตู้แช่เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของมะม่วงมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จากนั้นแบ่งมะม่วงจัดวางบนถาด 3 ถาด โดยนำไปวางไว้ในเครื่องอบแห้ง 2 ถาด และสำหรับตากแดดตามธรรมชาติอีก 1 ถาด ในแต่ละถาดมีมวลมะม่วงโดยประมาณ 400 g เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เริ่มทำการทดลองในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 18.00 น. โดยดำเนินการอบแห้งจนกระทั่งมวลของตัวอย่างภายในเครื่องอบแห้งคงที่ ขณะทำการทดลองมีการบันทึกค่าความชื้นรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสิ่งแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้ง ในราย 5 นาที และทำการชั่งมวลมะม่วงทุกชั่วโมง หลังจากมวลของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงนำตัวอย่างไปอบในเตาอบ (oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC [20] เพื่อนำค่ามวลแห้งที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาความชื้นของมะม่วงระหว่างอบแห้งต่อไป

3. การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลม

การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดการพาความร้อนแบบบังคับเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถใช้หลักการทางอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์กระบวนการได้ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อสมรรถนะของระบบโดยรวม ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศ รังสีอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ซึ่งผลลัพธ์ที่แสดงจะอยู่ในรูปของประสิทธิภาพของระบบ

3.1 การวิเคราะห์พลังงาน

การวิเคราะห์พลังงานของระบบอบแห้งสามารถทำได้ด้วยการประยุกต์กฎการอนุรักษ์มวลและหลักการอนุรักษ์พลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ โดยที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และเซลล์รังสีอาทิตย์จะมีพลังงานรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีพลังงานดังกล่าวที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของทั้ง 2 อุปกรณ์ หาได้จากสมการดังนี้ [18]

$$IA_{col} = A_{col} \int Sr(t) dt \quad (1)$$

$$IA_{pv} = A_{pv} \int Sr(t) dt \quad (2)$$

โดยที่ IA_{col} คือพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งที่ใช้ในการอบแห้ง และ IA_{pv} คือพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของเซลล์รังสีอาทิตย์ พลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับจ่ายไฟให้แก่พัดลม

เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสี พลังงานส่วนนี้จะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อนให้กับของไหลทำงานที่เคลื่อนที่เข้ามาในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยปริมาณความร้อนที่ของไหลทำงานได้รับหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์หาได้จากสมการดังนี้

$$Q_{col} = \dot{m}(t) C_p (T_{out} - T_{in}) dt \quad (3)$$

โดยที่ Q_{col} คือพลังงานความร้อนที่ของไหลทำงานได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (Energy Utilization Ratio, EUR) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่สามารถทำให้น้ำในผลผลิตระเหยต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยมีพลังงานส่วนแรกเข้าสู่ห้องอบแห้งมาจากของไหลทำงานที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Q_{col}) และในส่วนที่สองได้จากพลังงานรังสีที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของห้องอบแห้ง ซึ่งพลังงานในส่วนที่สองนี้หาได้จากสมการ

$$IA_{dc} = A_{dc} \int Sr(t) dt \quad (4)$$

โดยที่ IA_{dc} คือพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของห้องอบแห้ง

พลังงานความร้อนที่ทำให้ให้น้ำในผลผลิตระเหย ซึ่งเป็นผลมาจากการรับพลังงานรวมเข้าสู่ห้องอบแห้ง หาได้จากสมการดังนี้

$$Q_{drying} = WL \quad (5)$$

เมื่อ L คือความร้อนที่ต้องการใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg ในการทดลองนี้จะใช้ค่า L เท่ากับ 6 MJ/kg ซึ่งเป็นค่าที่รวมความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำกับความร้อนที่สูญเสียจากเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมที่ได้จากการทดสอบของ Muhlbaier ณ มหาวิทยาลัย Hohenheim และ W คือ มวลน้ำที่ระเหยจากผลผลิต (kg) สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [2]

$$W = \frac{m_p(M_i - M_f)}{100 - M_f} \quad (6)$$

โดยที่ m_p คือ มวลเริ่มต้นของผลผลิตที่ทำการอบแห้ง (kg) ในส่วนของ M_i และ M_f คือความชื้นฐานเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย (% (w.b.)) ตามลำดับ โดยความชื้นดังกล่าวหาได้จากสมการดังนี้

$$M = \frac{w(t) - d}{w(t)} \times 100\% \quad (7)$$

เมื่อ $w(t)$ เป็นมวลของผลผลิต ณ เวลาใด ๆ ที่ทำการอบแห้ง และ d คือมวลแห้งของผลผลิตหลังผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (kg)

ดังนั้นอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (Energy Utilization Ratio, EUR) หาได้จากสมการต่อไปนี้ [13]

$$EUR = \frac{Q_{drying}}{IA_{dc} + Q_{col} + IA_{pv}} \quad (8)$$

สำหรับค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะซึ่งแสดงถึงความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ (Specific moisture extraction rate, SMER, kg/kW·h) หาได้จากสมการ [10]

$$SMER = \frac{W}{E_{total}} \quad (9)$$

โดยที่ E_{total} คือพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของระบบอบแห้ง (kW·h) ในช่วงเวลาการอบแห้ง (t_d) หาได้จากสมการดังนี้

$$E_{\text{total}} = [(A_{\text{dryer}})I]td \quad (10)$$

3.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

กฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์กล่าวถึงคุณภาพของปริมาณพลังงานที่อยู่ในรูปแบบเอ็กเซอร์จี การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีจะทำให้สามารถประเมินพลังงานส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุด (maximum useful energy) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบทางความร้อน โดยใช้สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของของไหลทำงาน ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมซึ่งมีการกำหนดไว้ชัดเจน โดยของไหลทำงานที่สถานะหนึ่งซึ่งอยู่ในระบบที่มีการทำงานในกระบวนการย้อนกลับได้ภายใต้ภาวะแวดล้อมที่กำหนดจะมีศักยภาพของพลังงานส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุดอยู่ค่าหนึ่งที่เหลือจากการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในการทำงานด้านสิ่งแวดล้อม พลังงานส่วนนี้จะเป็นพลังงานสุทธิสูงสุดที่นำไปใช้ประโยชน์ซึ่งก็คือ “เอ็กเซอร์จี (Exergy)” พลังงานในส่วนที่ใช้ประโยชน์ได้นี้ถ้านำไปใช้ไม่ถูกวิธีก็จะมี การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นอีก การสูญเสียในส่วนหลังนี้คือ “การย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility)” ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณพลังงานของระบบที่ถูกทำลายระหว่างการเปลี่ยนแปลงภาวะของระบบในกระบวนการทำงานจริง (Real Process) สำหรับกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งมีสาเหตุที่ทำให้เกิดกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ที่สำคัญ 3 ประการ คือ (1) ความฝืดหรือความเสียดทาน (2) อุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งจะเกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น (3) ความดันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อาจเกิดขึ้นระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมหรือเกิดขึ้นจากความดันในระบบขณะภาวะใด ๆ ที่ไม่อยู่ในภาวะสมดุล

ในกระบวนการอบแห้งนั้นเมื่อเครื่องอบแห้งผลิตเอ็กเซอร์จีได้แล้ว เอ็กเซอร์จีส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ในการทำให้น้ำในผลผลิตระเหย ซึ่งพบว่าในความเป็นจริงไม่สามารถใช้เอ็กเซอร์จีทั้งหมดที่ระบบผลิตได้มาใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากระบบอบแห้งเป็นระบบผลิตความร้อนประเภทหนึ่ง ในการทำงานของระบบย่อมมีการย้อนกลับไม่ได้ที่เกิดขึ้นระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน รวมถึงการเคลื่อนที่ของของไหลทำงานที่เกิดจากพัดลมที่รับพลังงานมาจากเซลล์รังสีอาทิตย์ ซึ่งความเร็วลมที่เคลื่อนที่ในเครื่องอบแห้งย่อมมีส่วนหนึ่งที่มีการย้อนกลับไม่ได้จากความเสียดทานเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านระบบ ในส่วนของความดันที่แตกต่างกันระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมพบว่ามีผลน้อยมาก

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของระบบอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์นั้น เครื่องอบแห้งจะรับเอ็กเซอร์จีจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านเส้นขอบเขตของระบบซึ่งจัดได้ว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการความดันคงที่ จากนั้นระบบจะมีการแปลงเอ็กเซอร์จีที่ได้รับเป็นเอ็กเซอร์จีให้กับของไหลทำงานที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady flow) ผ่านเข้าและออกจากขอบเขตของระบบ ค่าเอ็กเซอร์จีสามารถคำนวณได้จากการสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ได้ในรูปของสมการดังนี้ [16]

$$\text{Exergy} = \dot{m}_{\text{da}} C_{\text{pa}} \left[(T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T}{T_{\infty}} \right] \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) สามารถนำไปใช้ในการหาค่าเอ็กเซอร์จีที่เพิ่มขึ้นของอากาศเมื่อผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ดังสมการต่อไปนี้ [20]

$$\text{Ex}_{\text{wf}} = \dot{m}_{\text{da}} C_{\text{pa}} \left[(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) - T_{\text{a}} \ln \frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}} \right] \quad (12)$$

โดยเอกเซอร์จีจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นั้น ได้มาจากการสมการจากการทดลองของ Petela ซึ่งสมการดังกล่าวได้ถูกพัฒนาให้เป็นสมการสำหรับหาค่าเอกเซอร์จีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถรับไว้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ดังต่อไปนี้ [21]

$$Ex_{col} = A_{col} I_s \tau \alpha \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \frac{T_a^4}{T_s^4} \right] \quad (13)$$

เมื่อ T_s เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่าอุณหภูมิดวงอาทิตย์มีค่าโดยประมาณ 5,770 K [21] และ T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่อ้างอิง ดังนั้นประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หาได้จากการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างเอกเซอร์จีของอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อของไหลทำงานผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อเอกเซอร์จีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับไว้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Collector Exergy Efficiency} = \frac{Ex_{wf}}{Ex_{col}} \quad (14)$$

สำหรับการออกแบบระบบต้องการเอกเซอร์จีในการทำให้น้ำระเหยออกจากผลผลิต ซึ่งเอกเซอร์จีในส่วนนี้หาได้จากสมการต่อไปนี้ [22]

$$Ex_{vap} = \left[1 - \frac{T_a}{T_m} \right] \dot{m}_w L \quad (15)$$

โดยที่ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการระเหยของมวลน้ำที่ออกจากผลผลิต สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da} (X_2 - X_1) \quad (16)$$

ซึ่ง X_1 และ X_2 คืออัตราส่วนความชื้นในอากาศ ((kg water)/(kg dry air)) ที่ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้ง หาได้จากแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ที่ได้จากการวัด

เนื่องจากเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมแบบพาความร้อนโดยบังคับมีการรับพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีได้ทั้งหมดสองส่วนคือบริเวณตัวเก็บรังสีอาทิตย์และบริเวณห้องอบแห้ง ซึ่งค่าเอกเซอร์จีจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่เครื่องอบแห้งรับไว้ทั้งสองส่วนสามารถหาได้จากสมการดังนี้ [19]

$$Ex_{dryer} = A_{col} I_s \tau \alpha \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \frac{T_a^4}{T_s^4} \right] + A_{dc} I_s \tau \alpha \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \frac{T_a^4}{T_s^4} \right] \quad (17)$$

ดังนั้นจากหลักการของประสิทธิภาพสามารถใช้กฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์หาประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของเครื่องอบแห้งได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Dryer Exergy} = \frac{E_{\text{vap}}}{Ex_{\text{dryer}}} \quad (18)$$

4. ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

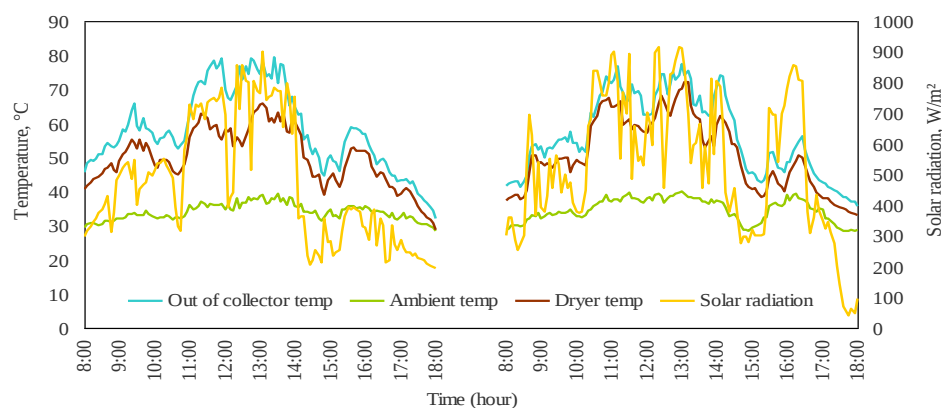
4.1 ผลการทดลอง

การทดลองดำเนินการระหว่างวันที่ 18 – 19 มิถุนายน พ.ศ.2561 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. – 18.00 น. โดยทำการวัดรังสีและอุณหภูมิราย 5 นาที ในช่วงเวลาดังกล่าวห้องฟาร์มมีเมฆบางส่วนทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากอยู่ในช่วงฤดูฝน และมีฝนตกเป็นระยะในช่วงเวลาประมาณ 14.00 น.– 15.00 น. ของวันที่ทำการทดลอง อุณหภูมิสถานะแวดล้อมอยู่ในช่วง 28.4°C - 39.2°C ความเข้มรังสีอาทิตย์ขณะทำการอบแห้งมีค่าสูงสุดประมาณ 908.3 W/m² จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์และภายในห้องอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งอุณหภูมิภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่ 79.4°C และ 72.2 °C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งพบว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงตรงข้ามกับอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งโดยมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 13.00 น. จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงที่ฝนตก ดังแสดงในรูปที่ 5

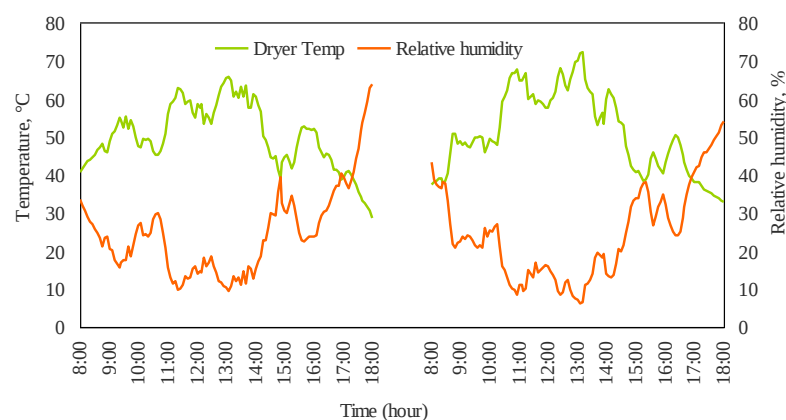
ในกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิของอากาศชั้นที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งจะถูกทำให้ร้อนขึ้นจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่งอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งของกระบวนการดังกล่าวจะมีค่าคงที่ แต่ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าลดต่ำลงเมื่ออากาศส่วนนี้สัมผัสกับผลผลิตจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากอากาศเข้าสู่ผลผลิต น้ำที่อยู่ในผลผลิตก็จะระเหยเข้าสู่อากาศและเคลื่อนที่ออกจากเครื่องอบแห้งเป็นผลให้ความชื้นในผลผลิตลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะทำการอบแห้ง ซึ่งในการอบแห้งมะม่วงพบว่าความชื้นของมะม่วงในห้องอบแห้งมีค่าลดลงในช่วงแรกใกล้เคียงกับการตกแฉดธรรมชาติ เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของมะม่วงมีค่าสูง ในช่วงแรกการสะสมพลังงานความร้อนของอากาศภายในเครื่องอบแห้งยังมีปริมาณไม่มากพอต่อการทำให้น้ำภายในผลผลิตระเหยออกมาได้เร็วกว่าผลผลิตที่ตกแฉด เมื่อเวลาผ่านไปพลังงานความร้อนสะสมในอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจนเพียงพอที่จะทำให้น้ำภายในผลผลิตระเหยออกมาได้มากกว่าผลผลิตที่ตกแฉดธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 6 การอบแห้งมะม่วงนี้ทำการลดความชื้นเริ่มต้นโดยประมาณจาก 81.5% (w.b.) จนกระทั่งความชื้นไม่เปลี่ยนแปลง พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 20 ชั่วโมง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวและปริมาณความชื้นในผลผลิตในเครื่องอบแห้งลดลงเหลือ 15.13% (w.b.) ขณะที่ความชื้นของมะม่วงที่ตกแฉดธรรมชาติมีค่า 20.03% (w.b.) ในส่วนของค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) จากการทดลองของการอบแห้งแบบใช้อุโมงค์ลมพบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ 0.95 kg/kW·h ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งมะม่วงสุกด้วยกรรมวิธีการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมจากขดลวดความร้อน โดยพิจารณาผลลัพธ์ด้านอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่ระบบอบแห้งสามารถทำได้เพียงอย่างเดียว พบว่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่เครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมทำได้มีค่าต่ำกว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนร่วมที่สร้างและทดลองโดย Wang et al. [23] อยู่ 0.72 kg/kW·h ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีความสามารถในการระเหยน้ำจำเพาะจากมะม่วงได้ 1.67 kg/kW·h สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากระบบอบแห้งชนิดนี้สามารถรักษาอุณหภูมิในขณะทำการอบแห้งได้อย่างสม่ำเสมอด้วยความร้อนเสริมจากขดลวดความร้อน

การทดสอบคุณภาพทางด้านสีของมะม่วงมหาชนกทั้งก่อนและหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมทำด้วยเครื่องวัดสีอาหารยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น ColorFlex^{EZ} โดยวัดค่าสีของมะม่วงอบแห้งในเทอมของตัวแปร L* a* และ b* ทำการวัดสีตัวอย่าง 5 ซ้ำ ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 1 โดยที่ค่าความสว่าง (L*) มีเกณฑ์การวัดอยู่ในช่วง

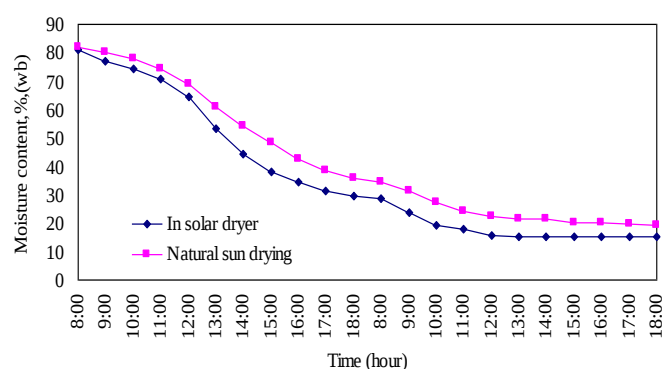
0 - 100 ถ้าค่า L^* มีแนวโน้มเข้าใกล้ 100 แสดงว่ามีสีสว่าง คือ สีเหลืองอ่อน ส่วนค่าเป็นสีแดง-เขียว (a^*) แสดงความเป็นสีแดงของมะม่วงมหาชนก ซึ่งหากมีค่าเป็น (+) แสดงว่ามะม่วงมีแนวโน้มเป็นสีแดงมากกว่าสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) มีความเป็น (+) แสดงว่ามีความเป็นสีเหลืองมากกว่าสีน้ำเงิน จากการทดสอบคุณภาพทางด้านสีของมะม่วงมหาชนกก่อนอบแห้งพบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของมะม่วงมหาชนกมีค่าเป็นสีแดง และสีเหลืองเนื่องจากมะม่วงมหาชนกเมื่อสุกเต็มที่แล้วจะมีสีเหลืองดังตารางที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบค่าสีของมะม่วงหลังอบแห้งพบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีความลดลง เนื่องจากความร้อนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ส่งผลต่อค่าสีของมะม่วงมหาชนกที่ผ่านการอบแห้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสีของมะม่วงมหาชนกที่ผ่านการอบแห้งมีค่าสีที่ลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทางออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง และความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 18 – 19 มิถุนายน พ.ศ.2561 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. – 18.00 น.



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความชื้นกับเวลาที่อบแห้งมะม่วงโดยเครื่องอบแห้งและการตากแดดธรรมชาติ

ตารางที่ 1 การทดสอบคุณภาพทางด้านสีของมะม่วงมหาชนก

ผลิตภัณฑ์	ค่าของสี		
	L*	a*	b*
มะม่วงมหาชนกก่อนอบแห้ง	46.29	15.04	48.30
มะม่วงมหาชนกหลังอบแห้ง	44.90	9.07	46.84

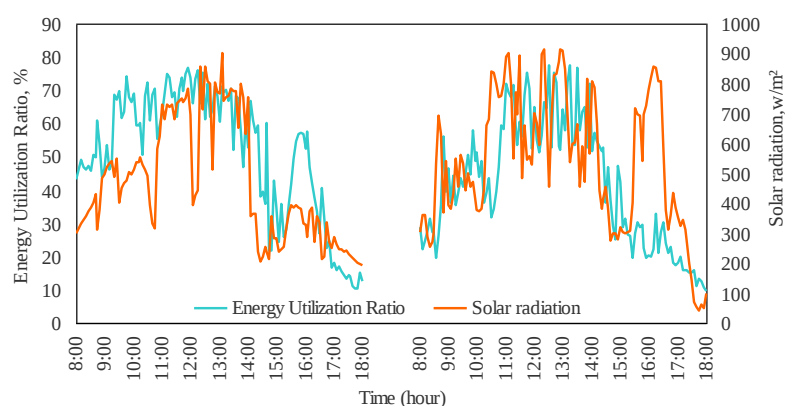


มะม่วงก่อนการอบแห้ง



มะม่วงผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดตูมโงก

รูปที่ 7 ตัวอย่างมะม่วงก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดตูมโงก



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์และความเข้มรังสีอาทิตย์

4.2 การวิเคราะห์พลังงาน

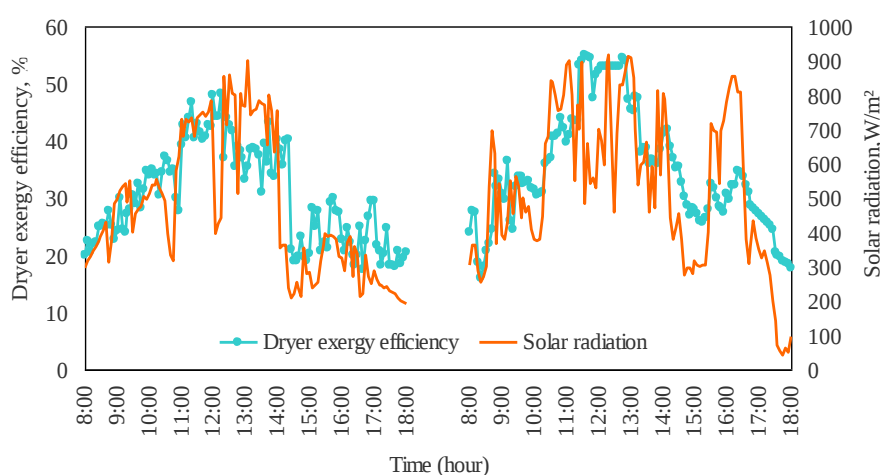
อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (EUR) ในการอบแห้งสามารถหาได้จากอัตราส่วนการแปลงพลังงานของเครื่องอบแห้ง เมื่อเครื่องอบแห้งได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยน้ำในผลผลิตที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพของพลังงานที่มีในเครื่องอบแห้งที่ใช้สำหรับการอบแห้งผลผลิต จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ของเครื่องอบแห้งมีค่าระหว่าง 10% - 77.4% และมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 13.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ของเครื่องอบแห้งไม่แปรตามค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบน เนื่องจากว่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำที่เครื่องอบแห้งผลิตได้ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณานั้นจะมีปริมาณเท่ากับความสามารถในการแปลงพลังงานที่เครื่องอบแห้งจะทำได้ในช่วงเวลานั้น แม้ว่าในช่วงเวลาดังกล่าวค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะมีค่าสูงก็ตาม และพบว่าค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ของเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นมีค่าสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันที่สร้างขึ้นโดย Chowdhury et al. [19] ที่มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์อยู่ระหว่าง 32.34% - 65.35% โดยที่เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีห้องอบแห้งยาว 10 m กว้าง 1.8 m และตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความยาว 10 m มีการใช้วัสดุชนิดพอลิเอทิลีน (polyethylene) เป็นแผ่นปิดโปรงแสงของเครื่องอบแห้ง ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ส่วนหนึ่งมาจากแผ่นปิดโปรงแสงของเครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพการส่งผ่านรังสี (τ , transmittance) ต่ำกว่ากระจก และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ของเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นนี้มีค่ามากกว่าของเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นโดย Karthikeyan และ Murugavelh [13] ซึ่งมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์อยู่ระหว่าง 9.75% - 33.98% เนื่องจากเครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นเครื่องดันแบบขนาดเล็ก บริเวณห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นโดมมีการใช้แผ่นพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) ในการสร้าง ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีค่าสภาพการส่งผ่านรังสี (τ , transmittance) ต่ำกว่ากระจกเช่นกัน

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอุโมงค์ลมจะมีข้อแตกต่างจากเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ชนิดอื่นตรงที่เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถรับพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ได้ 2 ส่วน ทั้งบริเวณที่เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้งทำให้สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในปริมาณที่มากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ในการแปลงพลังงานเพียงอย่างเดียว

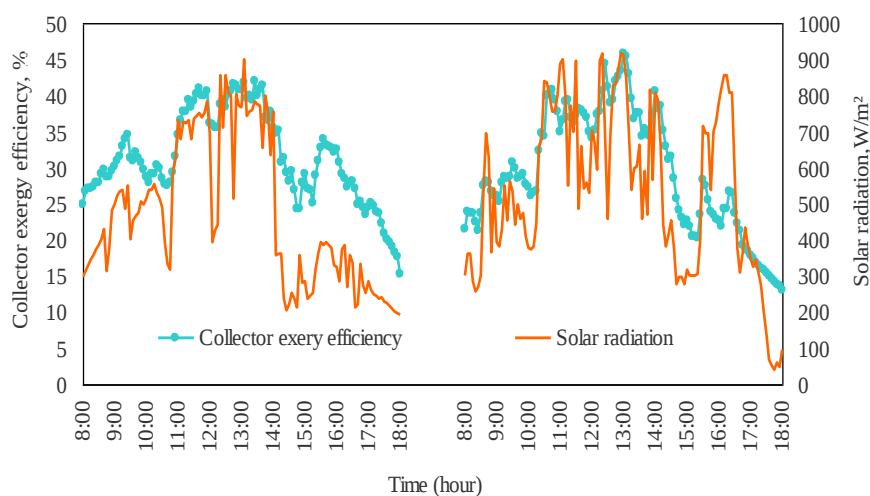
4.3 การวิเคราะห์เอกเซอร์จี

เอกเซอร์จีที่ทำให้น้ำในผลผลิตระเหยในกระบวนการอบแห้งนั้นได้มาจากเอกเซอร์จีที่เครื่องอบแห้งรับไว้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การหาความสามารถของเครื่องอบแห้งจะทำการวิเคราะห์โดยการใช้อยู่หลักการ ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการหาค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของเครื่องอบแห้งโดยที่ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 17.4% - 54.76% ดังแสดงในรูปที่ 9 และจากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของเครื่องอบแห้งไม่แปรตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของเครื่องอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเอกเซอร์จีที่ใช้ประโยชน์ในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตนั้นจะมีค่าที่เป็นไปตามศักยภาพของเครื่องอบแห้งที่สามารถทำได้ ถึงแม้ว่าในช่วงเวลาที่พิจารณาเอกเซอร์จีที่เครื่องอบแห้งรับไว้จากการแผ่รังสีจะมีค่าสูงก็ตาม จากการศึกษาพบว่าผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Karthikeyan และ Murugavelh [13] และ Chowdhury et al. [19] ที่ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเครื่องอบแห้ง และสำหรับประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์พบว่าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปตามความเข้มรังสี

อาทิตย์โดยที่กระบวนการที่ทำให้เอกเซอร์จีของของไหลทำงานเพิ่มขึ้นหลังจากออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีที่ตกกระทบบมีผลทำให้เอกเซอร์จีของของไหลทำงานเพิ่มขึ้นจากเดิมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เอกเซอร์จีที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้นกว่าทางเข้าซึ่งเป็นผลโดยตรงมาจากความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แล้วแปลงเป็นเอกเซอร์จีให้กับของไหลทำงาน ผลการทดลองที่ได้มีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Karthikeyan และ Murugavelh [13] และ Chowdhury et al. [19] ที่ใช้เครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรเช่นกัน สำหรับค่าเอกเซอร์จีที่จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลที่จะช่วยในการประเมินศักยภาพที่แท้จริงของระบบอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี โดยที่ถ้าหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของการอบแห้งให้มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มความคุ้มค่าในการใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

สำหรับการวิเคราะห์ระบบด้วยวิธีเอกเซอร์จี้จะมีข้อแตกต่างจากการวิเคราะห์พลังงาน โดยที่การวิเคราะห์พลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งตามหลักการของประสิทธิภาพจะได้ผลลัพธ์ในรูปของการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากพลังงานที่ให้แก่ระบบแล้วได้เป็นพลังงานที่ต้องการออกมาร้อยละเท่าไรเพียงอย่างเดียว ในส่วนของการวิเคราะห์เอกเซอร์จี้จะเป็นการวิเคราะห์ระบบที่อยู่บนพื้นฐานตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยหลักการวิเคราะห์นี้จะเป็นการคาดคะเนถึงพลังงานส่วนที่เป็นประโยชน์สูงสุดที่ระบบสามารถกระทำได้โดยมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมที่มีการกำหนดไว้อย่างชัดเจน เมื่อระบบมีการทำงานด้วยกระบวนการย้อนกลับได้ ผลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับสมรรถนะของระบบที่ทำงานจริง ซึ่งผลของความแตกต่างจากการเปรียบเทียบนี้มีสาเหตุเกิดจากการย้อนกลับไม่ได้เป็นหลัก โดยที่การวิเคราะห์ตามกฎข้อที่หนึ่งจะไม่ให้ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ ดังนั้นการวิเคราะห์เอกเซอร์จี้จะช่วยให้ความกระจ่างเกี่ยวกับสาเหตุที่เป็นข้อมูลนำไปใช้ประโยชน์เป็นแนวทางในการปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นต่อไป ถ้ากล่าวตามหลักการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจะเป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างพลังงานในส่วนที่เป็นประโยชน์ใช้ได้จริงต่อพลังงานที่เป็นประโยชน์สูงสุดซึ่งมีให้ใช้ประโยชน์ได้

5. สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองอบแห้งแบบการพาความร้อน โดยบังคับในเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้มะม่วงสายพันธุ์มหาชนเป็นตัวอย่างผลผลิตในการอบแห้ง ระหว่างการทดลองเป็นช่วงฤดูฝนพบว่าสภาพอากาศมีเมฆเป็นบางส่วนและในช่วงเวลาประมาณ 14.00 – 15.00 น. ของวันที่ทำการทดลองมีฝนตกสลับกับการมีแดดเป็นระยะ อุณหภูมิสูงสุดในเครื่องอบแห้งมีค่าประมาณ 72.2°C ใช้เวลาจำนวน 20 ชั่วโมงในการลดความชื้นออกจากมะม่วงที่มีความชื้นเริ่มต้น 81.5% (w.b.) ลดลงเหลือ 15.13% (w.b.) โดยความชื้นของมะม่วงที่ตากแดดธรรมชาติในช่วงเวลาเดียวกันมีค่าความชื้นลดลงเหลือ 20.03% (w.b.) ซึ่งมะม่วงที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์ลมนั้นใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นน้อยกว่าการตากแดดธรรมชาติ และผลผลิตที่ได้ก็ยังสะอาดถูกสุขอนามัย

สำหรับการวิเคราะห์พลังงานพบว่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (EUR) ที่วิเคราะห์ตามกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่ 77.4% ในขณะที่ประสิทธิภาพเอกเซอร์จี้ที่อยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่ 54.76% ประสิทธิภาพในส่วนนี้บ่งชี้ถึงพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้จากพลังงานที่มีให้ใช้ประโยชน์ทั้งหมดจากแหล่งพลังงาน ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการประเมินศักยภาพของระบบเบื้องต้น เพื่อช่วยสำหรับการออกแบบให้ระบบลดการสูญเสียที่เกิดจากการย้อนกลับไม่ได้ซึ่งจะเป็นการพัฒนาคุณภาพของระบบอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ให้สูงขึ้นได้ต่อไป โดยเป็นส่วนหนึ่งของการส่งเสริมในการใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพของประเทศไทยสำหรับผลิตความร้อนมาใช้ประโยชน์ในได้มากที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

Nomenclature

Symbols

Ex	เอกเซอร์จี้ (W)
EUR	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์
E_{total}	พลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีของระบบอบแห้ง ($\text{kW}\cdot\text{h}$)
IA	พลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสี (J)
I_s	รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่ (W/m^2)

L	ความร้อนที่ต้องการใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg (MJ/kg)
M	ความชื้นฐานเปียก (% (w.b.))
$\dot{m}_{da}$	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทำงาน (kg/s)
$\dot{m}_w$	อัตราการระเหยของมวลน้ำที่ออกจากผลผลิต (kg/s)
Q	พลังงานความร้อนที่ของไหลทำงานได้รับ (J)
SMER	ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลผลิตต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ (kg/kW·h)
T	อุณหภูมิ (K)
W	มวลน้ำที่ระเหยจากผลผลิต (kg)
α	สภาพการดูดกลืน
τ	สภาพการส่งผ่าน

Subscripts

∞	สภาวะสิ่งแวดล้อมที่อ้างอิง
col	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์
dc	ห้องอบแห้ง
f	สุดท้าย
in	เริ่มต้น
m	ผลผลิต
out	ทางออก
pv	เซลล์รังสีอาทิตย์
s	เทียบเท่าดวงอาทิตย์
vap	น้ำระเหยออกจากผลผลิต
wf	ของไหลทำงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pornchaloempong, P. and Rattanapanone, N. Dehydration, 2010. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0277/dehydration> [Accessed 1 August 2018]. (in Thai)
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, and Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, "Solar Crop Dryers", Research Report, Bangkok, Thailand, August 2004. (in Thai)
- [3] Janjai, S. Masiri, I. Pattarapanitchai, S. and Laksanaboonsong, J. Mapping Global solar radiation from long-term satellite data in the tropics using an improved model. International Journal of Photoenergy, 2013, pp. 1-11.
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. Alternative Energy Development Plan: AEDP2015. Available from: http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf [Accessed 30 March 2018]. (in Thai)
- [5] Janjai, S. Parabola dome. Solar Laboratory, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 2016. (in Thai)
- [6] Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C. and Khamvongsa, V. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. Renewable Energy, 2011, 36, pp. 1053-1062.

-
- [7] Janjai, S., Lamler, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Müller, J., Bala, B.K. and Nagle, M. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 2009, 83, pp. 1550–1565.
- [8] Nabnean, S., Janjai, S., Thepa, S., Sudaprasert, K., Songprakorp, R. and Bala, B.K. Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. *Renewable Energy*, 2016, 94, pp. 147-156.
- [9] Karan, H. Performance evaluation of a combined solar and biomass drying system. *Engineering Journal of Research and Development*, 2018, 29, pp. 61-74. (in Thai)
- [10] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Backstay, B., Ruslan, M.H., Gabbasa, M. and Kazem, H.A. Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 2014, 99, pp. 47–54.
- [11] Tiwari, S. and Tiwari, G.N. Energy and exergy analysis of a mixed-mode greenhouse-type solar dryer, integrated with partially covered N-PVT air collector. *Energy*, 2017, 128, pp. 183-195.
- [12] Rabha, D.K., Muthukumar, P. and Somayaji, C. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger. *Renewable Energy*, 2017, 105, pp. 764-773.
- [13] Karthikeyan, A.K. and Murugavelh, S. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 2018, 128, pp. 305-312.
- [14] Sansaniwal, S.K., Sharma, V. and Mathur, J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, pp. 1576–1601.
- [15] Akbulut, A., and Durmus, A. Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*, 2010, 35, pp. 1754-1763.
- [16] Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y. and Ruslan, M.H. Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. *Energy and Buildings*, 2014, 68, pp. 121–129.
- [17] Akpinar, E.K. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51, pp. 2407–2418.
- [18] Chowdhury, M.M.I., Bala, B.K. and Haque, M.A. Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather. *Biosystems Engineering*, 2011, 110, pp. 222-229.
- [19] Park, S.R., Pandey, A.K., Tyagi, V.V. and Tyagi, S.K. Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30, pp.105–123.
- [20] AOAC. Official methods of the association of official analytical chemists. Association of Official Analytical Chemists, Washington D.C., 2002.
- [21] Kalogirou, S.A., Karellas, S., Braimakis, K., Stanciu, C. and Badescu, V. Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 56, pp. 106–137.
- [22] Ekasilp, W. Energy and exergy analysis of microwave spouted bed drying of biomaterial. Master Thesis, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand, 2007.
- [23] Wang, W., Li, M., Hassanien, R.H.E., Wang, Y. and Yang, L. Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 134, pp. 310–321.