

อิทธิพลของแหล่งความร้อนสำหรับปั๊มความร้อนในระบบอบแห้งด้วยปั๊ม ความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก

The Influence of the Greenhouse as Heat Source for Heat Pump Drying System Combined with Solar Greenhouse

จารุวัฒน์ เจริญจิต* สติพร บุญญานุวัตร และ อุดร นามเสน

Jaruwat Jareanjit*, Sittiporn Boonyanuwat and Udon Namsaen

Received: 14 June 2019, Revised: 30 July 2019, Accepted: 15 October 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก การทดลองได้ใช้พริกสดเป็นตัวแทนผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก 2 กรณีศึกษา ได้แก่ (1) การใช้ฮีวปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนแบบเปิดสู่บรรยากาศ และ (2) การใช้ฮีวปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนแบบครอบด้วยเรือนกระจก การทดสอบดำเนินการในช่วงเวลา 9:00-21:00 น. (12 ชั่วโมงต่อวัน: 3 วัน) ปริมาณพริกสดที่ใช้ 20 kg ในส่วนของห้องอบแห้งด้านคอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิ 60 °C จากการทดสอบที่สภาวะเดียวกัน พบว่าการดำเนินการตามกรณีที่ (2) ทำให้พริกแห้งจากห้องอบแห้งด้านคอนเดนเซอร์มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 16.20 % (w.b.) ในขณะที่กรณีที่ (1) พริกแห้งมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 22.15 % (w.b.) ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 19.8 kWh และ 21.1 kWh ตามลำดับ การอบแห้งกรณีฮีวปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจก กรณีที่ (2) เป็นระบบที่มีสมรรถนะสูงกว่ากรณีที่ (1) โดยมีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) และค่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 4.64 kWh/kg และ 1.66 kWh/kg ตามลำดับ ซึ่งค่า SEC และ SEEC กรณีที่ (2) ลดลง 12 % และ 15 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ (1) อันเป็นผลจากการที่ฮีวปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจก เป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบในการลดการใช้พลังงานที่ป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงใช้กรณีดังกล่าว เปรียบเทียบระบบต่อไป

คำสำคัญ: รังสีอาทิตย์, ปั๊มความร้อน, ระบบอบแห้ง, เรือนกระจก

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้ติดต่อประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): j.jaruwat@gmail.com

ABSTRACT

This research studied and developed the prototype system of heat pump dryer combined with solar greenhouse. The fresh chili was used as agricultural product for doing the experiment. The test was performed to compare 2 cases of study, including heat pump obtained heat from ambient air and from solar greenhouse. The experiments were performed at the same conditions. For case 1, the evaporator of heat pump was opened to receive heat from ambient air, and case 2, the evaporator of heat pump was covered with greenhouse. Each test was conducted with 20 kg of fresh chili during 9:00 - 21:00 for each day (12 hrs. per day: 3 days). The fresh chili was dried in drying chamber at temperature of 60 °C. The experimental results showed that drying with case 2 provided the dried chili with average moisture content of 16.20 %(w.b.), while drying with case 1 the average moisture content of dried chili was 22.15 %(w.b.). The total electricity energy consumption was equal to 19.8 kWh and 21.1 kWh, respectively. Drying by using evaporator of heat pump covered with greenhouse (case 2) had greater performance than case 1 system. The Specific Energy Consumption (SEC) of both cases was 4.64 kWh/kg and 1.66 kWh/kg, respectively. The SEC and SEEC of case 2 were lower than case 1 of 12 % and 15 %, respectively. These results revealed that the evaporator of heat pump covered with greenhouse (case 2) was a factor that helped to enhance the system's performance. Thus, it reduced the energy consumption of compressor since the temperature of heat source was increased. The study of mentioned system can be used for further comparison.

Key words: solar, heat pump, dryer system, green house

บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนพลังงานมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานในด้านต่างๆ โดยเฉพาะพลังงานฟอสซิลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ รวมถึงรายงานของ Lawrence Livermore National Laboratory (Smith *et al.*, 2007) กล่าวถึงข้อตกลงว่าด้วยการลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของแต่ละประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs) ส่งผลให้ประเทศไทยต้องมีแผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP) และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ของกระทรวงพลังงาน เพื่อใช้ในการลดต้นทุนด้าน

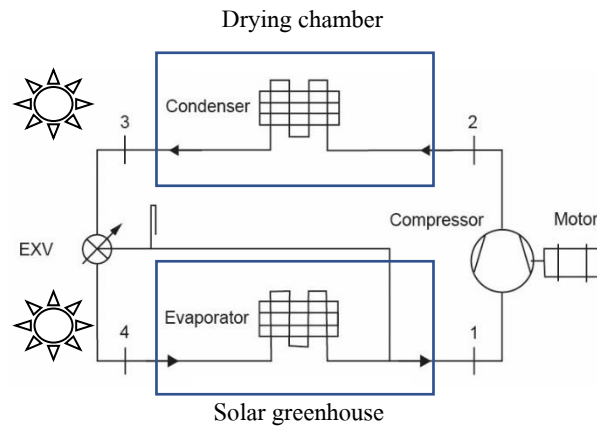
พลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน ในการลดความเข้มการใช้พลังงานลงร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2579 ที่ผ่านมามีอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหารเพื่อแปรรูป และเพิ่มมูลค่าสินค้าเป็นกลุ่มหนึ่งที่ถูกส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานในกระบวนการผลิต เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (solar thermal) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.2 MJ/m²-day (ประเทศไทย) ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ในทางตรงหรือทางอ้อมได้อย่างกว้างขวางตามบริบทของแหล่งทรัพยากรต่างๆ เป็นทุนเดิม

และสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มีการใช้รังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตลมร้อนในการอบแห้งแบบ passive, active และ hybrid (Fudholi *et al.*, 2010) ระบบสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนเฟส (Roonprasang *et al.*, 2006; Gil *et al.*, 2010; Barlev *et al.*, 2011) เพื่อสะสมความร้อน รวมถึงการใช้รังสีอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน (Solar Assisted Heat Pump, SAHP) (Daghighi *et al.*, 2010) โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน 2 รูปแบบ คือทำงานแยกกันโดยทำงานเสริมกันผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ (Direct-expansion, DX-SAHP) สารทำงานจะขยายตัวโดยตรงในตัวเก็บรังสีอาทิตย์และเป็นส่วนประกอบหนึ่งของระบบ (Kara *et al.*, 2008) เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Chaturvedi and Shen, 1984; Morrison, 1994; Kuang *et al.*, 2003) เนื่องจากปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ได้เปรียบเชิงพลังงานสามารถดึงความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงได้ เมื่อเทียบกับการใช้หลอดไฟฟ้าในการทำงานการใช้พลังงานจึงน้อยกว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้อบแห้งได้ ผ่านการควบคุมที่เหมาะสม (Daghighi *et al.*, 2010) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการอบลมร้อนธรรมดา (Prasertsan *et al.*, 1997; Soponronnarit *et al.*, 1998; Strommen *et al.*, 1999; Kohayakawa *et al.*, 2004) ประกอบกับกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ ส่งผลเชิงบวกต่อคุณภาพของวัสดุทางชีวภาพ แต่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน (Low Temperature and Long Time, LTLT) (Arason, 2003; Piga *et al.*, 2003; Lewicki, 2006) ดังนั้นการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน และรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

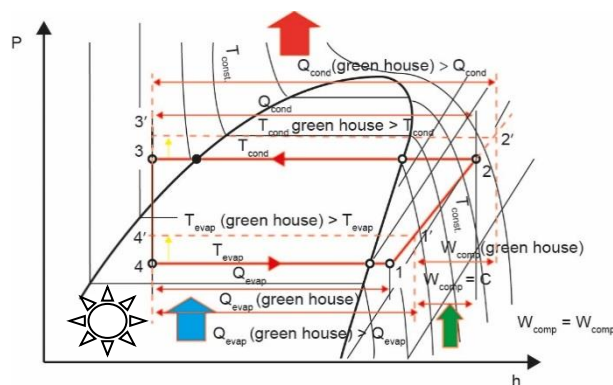
100 °C เป็นแนวทางหนึ่งในการอบเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Jareanjit, 2012) ซึ่งตู้อบแห้งรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดเล็กกรณีไม่มีภาระอุณหภูมิภายในสูงประมาณ 80-85 °C (Sharma *et al.*, 1990) สูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 20-30 °C (Minka, 1986) แปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ นอกจากนี้การศึกษาเชิงทดสอบการใช้พลังงานของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกที่ประกอบจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ในกรณีที่อัตราป้อนเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจกเสริมในระบบปิดใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าการเปิดสู่บรรยากาศ ที่พลังงานไฟฟ้า 0.09 kWh (5.8% ของไฟฟ้าทั้งหมด) ต่ำกว่าประมาณ 86.15% ตามลำดับ (Jareanjit *et al.*, 2014) นอกจากนี้การศึกษาเชิงทดสอบการใช้พลังงานของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส กรณีที่อัตราป้อนเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจกใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าการเปิดสู่บรรยากาศ มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าการอบในเรือนกระจกปกติ และการตากธรรมชาติ (Jareanjit *et al.*, 2014; Jareanjit and Naemsai, 2016) จากข้อมูลข้างต้น ทางคณะผู้วิจัยพิจารณาว่าการใช้รังสีอาทิตย์และปั๊มความร้อนทำงานร่วมกัน สามารถลดการใช้พลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในลักษณะการทำงานแบบผสมผสานกัน สามารถทำงานได้สม่ำเสมอและเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งอย่างต่อเนื่องจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ชุดทดลอง



ภาพที่ 1 แนวคิดสำหรับพัฒนาระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก



ภาพที่ 2 ไดอะแกรม P-h ของปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก กรณีที่กำลังที่คอมเพรสเซอร์คงที่

แนวคิดการทำงานของปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก สำหรับศึกษานี้ แหล่งความร้อนหลักของระบบได้มาจากรังสีอาทิตย์ทางอ้อมโดยใช้เรือนกระจก (greenhouse) ในการยกระดับอุณหภูมิด้านอิวาปอเรเตอร์ให้สูงขึ้นโดยใช้เรือนกระจก และอาศัยความได้เปรียบเชิงพลังงานของปั๊มความร้อนที่มีความสามารถในการยกระดับของอุณหภูมิคุณภาพต่ำให้สูงขึ้น ประกอบกับเพื่อให้ระบบมีความเสถียรเชิงอุณหภูมิ และความต่อเนื่องของกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์มากขึ้น จึงออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบปั๊มความร้อน เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนสำหรับระบบอบแห้งปั๊มความร้อนด้านอิวาปอเรเตอร์ โดยคาดการณ์ว่าบรรยากาศในเรือนกระจกที่อุณหภูมิสูงกว่าสภาพแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิ

ประมาณ 30°C เป็นปัจจัยต่อสมรรถนะของระบบในการลดการใช้พลังงานที่ป้อนที่คอมเพรสเซอร์เนื่องจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงแนวคิดสำหรับพัฒนาระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก และไดอะแกรม P-h ของปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก กรณีที่กำลังที่คอมเพรสเซอร์คงที่ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 1-2

ปั๊มความร้อนในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก ในส่วนของห้องอบแห้งทำจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใสโปร่งแสง ขนาดกว้าง 120 cm × ยาว 200 cm × สูง 180 cm ภายในห้องอบแห้งมีชั้นอบแห้งจำนวน 5 ชั้น เป็นภาชนะในการใส่พริกมีขนาดกว้าง 90 cm × ยาว 100 cm × สูง 8 cm โดยแต่ละชั้นมีระยะห่าง 30 cm และ

ห่างจากพื้นของตู้อบ 30 cm และมีหลังคาในลักษณะ
โค้งรีมี 60 cm ประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศขนาด

9,000 BTU ใช้สารทำงาน R 32 เป็นสารทำความเย็น
ใน ระบบ ดัง รายละเอียด ใน ภาพ ที่ 3

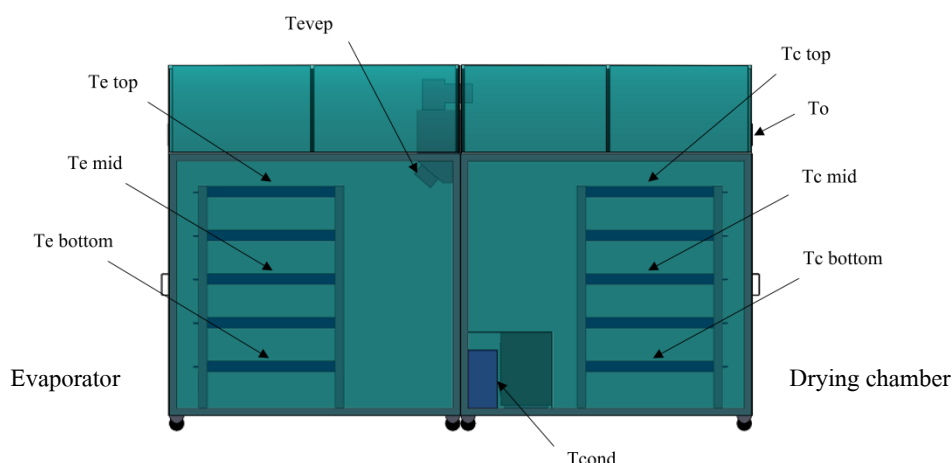


ภาพที่ 3 ระบบปรับอากาศร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลอง เพื่อดำเนินการทดลองสำหรับเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้ง กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับกรณีมีเรือนกระจก (case 2) ครอบอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน ที่หมุนวนอากาศทำงานในระบบเปิด โดยอากาศภายนอกทั้งหมดจะไหลผ่านคอนเดนเซอร์เข้าสู่ห้องอบแห้ง และถูกปล่อยทิ้งสู่ภายนอกทั้งหมด โดยใช้เครื่องต้นแบบ 2 ชุด ทดสอบที่สภาวะเดียวกัน ที่ความเร็วลมในระบบคงที่ 3 m/s ทดลองช่วงเวลา 9:00-21:00 น. (12 ชั่วโมงต่อวัน: 3 วัน) โดยทดลองอบพริกสด 20 kg ในห้องอบด้านคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อทดสอบสมรรถนะ โดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้ง และการใช้

พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน วัดค่ารังสีอาทิตย์ด้วย Pyranometer (Kipp & Zonen) Model CM11B ความละเอียด $\pm 2 \text{ W/m}^2$ วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีความละเอียด $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ บันทึกข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิการทดลองตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4 ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ data logger (Yokogawa) Model MV 2000 สำหรับการวัดความชื้นของผลผลิต (moisture content) โดยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ อ่านค่าจากเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Miras Sartorius ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg ที่มีค่าความละเอียด 5 g เก็บข้อมูลของน้ำหนัก ทุก 6 ชั่วโมง นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง

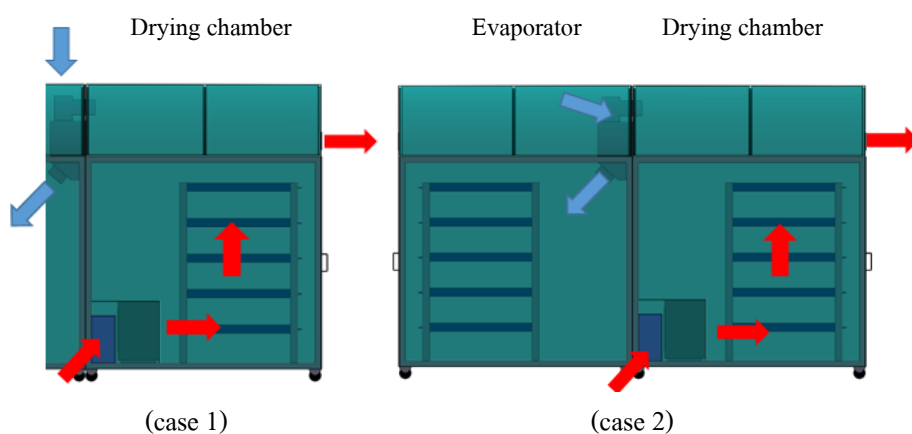


ภาพที่ 4 โครงสร้างตำแหน่งเครื่องอบฟริกติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิเครื่องอบแห้ง

- เมื่อ T_c = จุดวัดอุณหภูมิอากาศในห้องอบที่ชั้นต่างๆ ห้องอบแห้งด้านคอนเดนเซอร์
 T_e = จุดวัดอุณหภูมิอากาศที่ชั้นต่างๆ ด้านอีวาพอเรเตอร์
 T_{cond} = จุดวัดอุณหภูมิอากาศที่คอนเดนเซอร์
 T_{evap} = จุดวัดอุณหภูมิอากาศที่อีวาพอเรเตอร์
 T_o = จุดวัดอุณหภูมิอากาศที่ทางออกตู้อบ

การหาน้ำหนักแห้งทำโดยการนำฟริกสดจำนวน 1 kg มาอบในตู้อบไฟฟ้าขนาด 3,000 W ยี่ห้อ Binder ตั้งอุณหภูมิ 103°C โดยจะทำการอบแห้ง 48 ชั่วโมง (ฟริกสดจินดา 1 kg เป็นน้ำหนักแห้ง 0.24 kg) โดยเปรียบเทียบสมรรถนะระบบอบแห้งอิทธิพลของเรือนกระจกเป็นแหล่งความร้อนสำหรับระบบอบแห้ง ในตัวแปรของอุณหภูมิ การใช้พลังงาน

(energy consumption) และความชื้นของผลิตภัณฑ์ (moisture content) และอัตราการอบแห้ง (drying rate) กรณีศึกษาต่างๆ เพื่อหารูปแบบการทำงานที่เหมาะสมต่อไป แต่ละกรณีศึกษา ซึ่งติดตั้งหันหน้าไปทางทิศใต้ เพื่อให้ได้ตั้งฉากและรับรังสีอาทิตย์ได้ตลอดการทดลอง เก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าทุกๆ 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 5 การหมุนวนอากาศระบบเปิด กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับติดตั้งเรือนกระจก (case 2)

กรณีไม่มีเรือนกระจกครอบอิวาปอเรเตอร์ (case 1) อากาศจะเข้าสู่ห้องอบด้านคอนเดนเซอร์ผ่านทางช่องทางเข้าด้านข้างของเครื่องอบ เมื่อระบบทำงาน พัดลมจะเป่าลมร้อนเข้าสู่ห้องอบให้กับพริก และระบายออกที่ช่องทางด้านหลังของเครื่องอบ ส่วนด้านอิวาปอเรเตอร์จะดูดอากาศจากด้านนอกผ่านเพื่อดึงความร้อนจากบรรยากาศ และปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ อากาศที่ใช้ในระบบจะนำมาจากภายนอกทั้งหมด และอากาศหลังการอบแห้งจะถูกปล่อยทิ้งสู่ภายนอก 100% กรณีติดตั้งเรือนกระจกครอบอิวาปอเรเตอร์ (case 2) อากาศจะหมุนวนเหมือนกับการทดลองกรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) แต่ด้านของอิวาปอเรเตอร์จะถูกครอบปิดให้อากาศหมุนวนผ่านอิวาปอเรเตอร์อยู่ภายในตู้ของด้านที่ถูกครอบปิดเพื่อดึงความร้อนจากบรรยากาศในเรือนกระจก ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 5 ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะทำการตั้งค่าที่เครื่อง

ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นไว้ที่ 60 °C ตั้งค่าผลต่างอุณหภูมิ 5 °C และตั้งค่าอุณหภูมิที่อิวาปอเรเตอร์ ไว้ที่ 18 °C เพื่อไม่ให้ปัมความร้อนทำงานที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป

3. สมรรถนะของระบบ

3.1 การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ สำหรับ การวัดความชื้นของผลผลิต (moisture content) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง ส่วนใหญ่จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. การแสดงค่าความชื้นแบบเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (wet basis) เป็นการแสดงค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์โดย พิจารณาจากอัตราส่วนของปริมาณความชื้นต่อน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

$$MC (\% \text{ w.b.}) = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100 \quad (1)$$

2. การแสดงค่าความชื้นแบบเปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง (dry basis) เป็นการแสดงค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดย พิจารณาจากอัตราส่วนของปริมาณความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

$$MC (\% \text{ d.b.}) = \frac{W_w}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_w คือน้ำหนักของน้ำในเนื้อของผลิตภัณฑ์ (kg)

W_d คือน้ำหนักของเนื้อผลิตภัณฑ์แห้ง (kg)

การหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์จากสมการความชื้นฐานเปียก ทำให้ค่าความชื้นมีค่าไม่เกิน 100% ส่วนค่า ความชื้นฐานแห้งอาจจะมีค่าเกิน 100% ได้ โดยงานวิจัยนี้รายงานความชื้นเป็น

เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก โดยที่อัตราการ อบแห้ง พิจารณาจากความชันของกราฟ ซึ่งแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นกับเวลา

$$\text{drying rate, DR} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (3)$$

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ในการระเหยน้ำ คือ

พลังงานที่ใช้ต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$SEC = \frac{E_t}{\Delta W} \quad (4)$$

เมื่อ $E_t = I_t \times A \times \Delta t + E_e$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ดังนี้

$$SEC = \frac{I_t \times A \times \Delta t + E_e}{\Delta W} \quad (5)$$

เมื่อ A คือพื้นที่รับรังสีส่วนห้องอบแห้ง

E_e คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (kWh)

E_t คือพลังงานทั้งหมดที่ใช้ (kWh)

I_t คือค่ารังสีอาทิตย์ (kW/m^2)

ΔW คือมวลของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ (kg)

Δt คือเวลาในการอบแห้ง (h)

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption, SEEC)

คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg จากผลิตภัณฑ์ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$SEEC = \frac{E_e}{\Delta W} \quad (6)$$

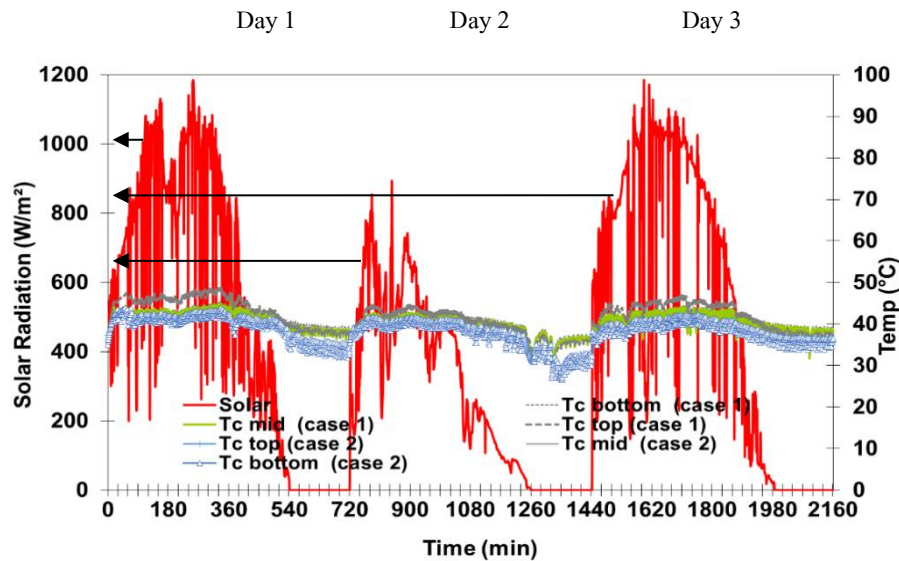
เมื่อ SEC คือความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

SEEC คือความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (kWh/kg)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการทดสอบอบแห้งพริกในระบบอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตรอุณหภูมิต่ำโดยการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยเปรียบเทียบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก 2 กรณีศึกษา คือ กรณีที่ 1 อีวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนเปิดสู่บรรยากาศ (case 1) และกรณีที่ 2 อีวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจกเสริม (case 2) ตามลำดับ ที่สภาวะเดียวกัน

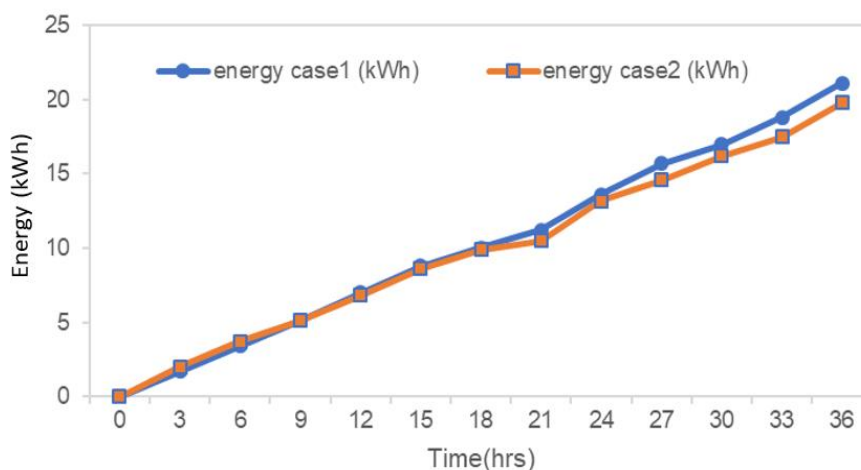
ร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก 2 กรณีศึกษา คือ กรณีที่ 1 อีวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนเปิดสู่บรรยากาศ (case 1) และกรณีที่ 2 อีวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจกเสริม (case 2) ตามลำดับ ที่สภาวะเดียวกัน



ภาพที่ 6 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และค่าอุณหภูมิของอากาศในระบบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์ กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับติดตั้งเรือนกระจก (case 2) กรอบอ้าวปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน

จากภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับค่าอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้งด้านคอนเดนเซอร์แต่ละภาคทั้ง 2 กรณีศึกษา ตลอดจนการทดลองเป็นเวลา 3 วัน พบว่ามีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่ระดับชั้นอบแห้งต่างกัน โดยอากาศบริเวณถาดบนจะมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศตำแหน่งถาดอื่นๆ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้ง พบว่ากรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) จะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) เฉลี่ยประมาณ 4-5 °C โดยกรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) ช่วงเวลา 09:00-12:00 น. อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 38 °C และในช่วงเวลา 12:00-15:00 น. อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้ง เฉลี่ยประมาณ 38 °C ในขณะที่ช่วงเวลา 18:00-21:00 น. อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 35°C ในขณะที่กรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) โดยช่วงเวลา 09:00-12:00 น. อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 42 °C และในช่วงเวลา 12:00-15:00 น. อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้ง เฉลี่ยประมาณ 38 °C ในขณะที่ช่วงเวลา 18:00-21:00 น.

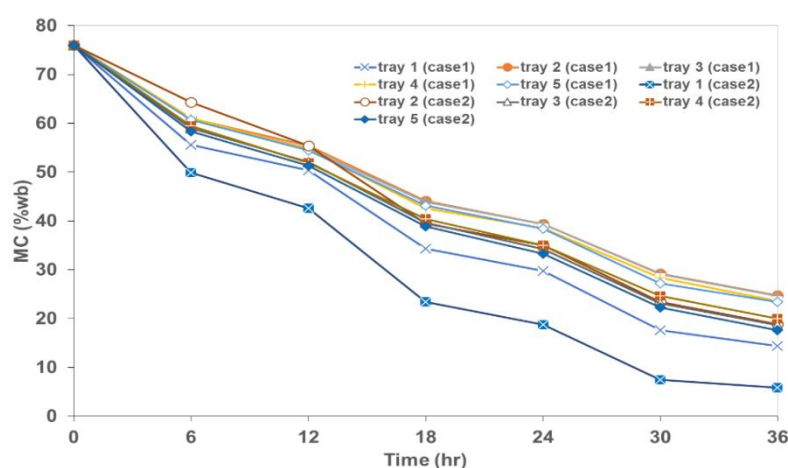
อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 32 °C ตามลำดับ ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเดียวกัน ช่วงเวลา 09:00-18:00 น. อุณหภูมิจะแปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ในขณะที่ช่วงเวลา 18:00-21:00 น. ซึ่งไม่มีความร้อนจากรังสีอาทิตย์ป้อนสู่เรือนกระจก ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งลดลง แปรผันตามแหล่งความร้อนเช่นกัน แต่กรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ช่วงเวลาดังกล่าวจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศ พิจารณาได้ว่ากรณีมีเรือนกระจก ความร้อนจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนในการเพิ่มคุณภาพพลังงานความร้อนส่งไปยังห้องอบแห้งของปั๊มความร้อน ส่งผลให้มีอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งของกรณีมีเรือนกระจกสูงกว่าการดึงความร้อนจากบรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญ พบด้วยว่าอุณหภูมิในภาพรวมในระบบต่ำกว่า 50 °C ส่งผลให้ระบบทำงานเป็นไปในลักษณะการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน และรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C (LTLT) เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Jareanjit, 2012) ได้ตามสมมุติฐาน



ภาพที่ 7 การใช้พลังงานไฟฟ้าระบบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์ กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับติดตั้งเรือนกระจก (case 2)

จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดตลอด 36 ชั่วโมง โดยแต่ละวันจะทดลองในช่วงเวลา 09:00-21:00 น. พบว่า กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 21.1 kWh และกรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด เท่ากับ 19.8 kWh โดยกรณีมีเรือนกระจกจะใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดต่ำกว่า 1.3 kWh หรือลดลง 6.16% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Jareanjit *et al.*, 2014) ที่มีลักษณะการทำงานรูปแบบเดียวกัน

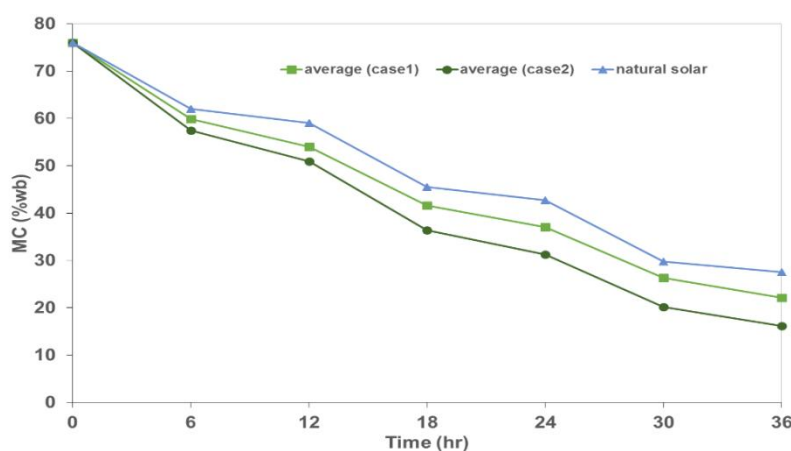
แตกต่างกันที่ปริมาณและการระบอบแห้งที่สูงขึ้นจึงส่งผลต่ออุณหภูมิและการใช้พลังงาน พิจารณาได้ว่าแหล่งความร้อนหลักของระบบได้มาจากรังสีอาทิตย์ผ่านปรากฏการณ์ของสภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ส่งผลให้อุณหภูมิในเรือนกระจกสูงขึ้น และประหยัดพลังงานมากขึ้น ในช่วงเวลา 09:00-15:00 น. และจะมีอัตราการประหยัดพลังงานน้อยลง ในช่วงเวลา 15:00-21:00 น. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 8 ความชื้นของผลิตภัณฑ์แต่ละถาดกับเวลา ระบบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับติดตั้งเรือนกระจก (case 2)

จากภาพที่ 8 กราฟเปรียบเทียบความชื้นของผลิตภัณฑ์แต่ละถาด ระหว่างกรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับติดตั้งเรือนกระจก (case 2) จากผลการทดลองพบว่ามีความแตกต่าง เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยในห้องอบแห้งจากอิทธิพลของแหล่งความร้อนของระบบปั๊มความร้อนที่แตกต่างกัน พบว่าความชื้นของแต่ละถาดไม่เท่ากัน จากปัจจัยของการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้ง โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอบแห้งในแต่ละกรณีศึกษาโดยความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้าย กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) ถาดที่ 1 เท่ากับ 14.38 % (w.b.) ถาดที่ 2 เท่ากับ 24.75 % (w.b.) ถาดที่ 3 เท่ากับ 24.65 % (w.b.) ถาดที่ 4 เท่ากับ 23.63 % (w.b.) และถาดที่ 5 เท่ากับ 23.38 % (w.b.) ในขณะที่กรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ถาดที่ 1 เท่ากับ 5.88 % (w.b.) ถาดที่ 2 เท่ากับ 18.88 % (w.b.)

ถาดที่ 3 เท่ากับ 18.63 % (w.b.) ถาดที่ 4 เท่ากับ 20.00 % (w.b.) และถาดที่ 5 เท่ากับ 17.63 % (w.b.) จากเริ่มต้นที่ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 76 % (w.b.) ตามลำดับ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิในห้องอบแห้ง กรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) จะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) เฉลี่ยประมาณ 4-5 °C จากการทดลองที่สภาวะเดียวกัน พบว่าแหล่งความร้อนสำหรับระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้ง ในรูปแบบของอุณหภูมิ และการใช้พลังงานของระบบปั๊มความร้อน พบว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ระบบกรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ต่ำกว่า ระบบกรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) และมีอัตราการอบแห้ง (DR) สูงกว่า โดยพิจารณาจากความชันของกราฟในภาพที่ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นกับเวลาที่ชันกว่า



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบความชื้นของผลิตภัณฑ์เฉลี่ยกับเวลา ระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์ กรณี ไม่มีเรือนกระจก (case 1) กับติดตั้งเรือนกระจก (case 2) เทียบกับตากแบบธรรมชาติ

จากภาพที่ 9 พบว่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะการอบแห้งในการทดลองที่สภาวะเดียวกัน ในการอบแห้งกรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) เทียบกับกรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ในระบบเปิดเทียบกับตากแบบธรรมชาติ เมื่อครบ 36 ชั่วโมง พบว่ากรณีติดตั้งเรือน

กระจก (case 2) มีสมรรถนะการอบแห้งสูงกว่ากรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) โดยความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากับ 16.20 % (w.b.) และ 22.15 % (w.b.) ตามลำดับ ในขณะที่การตากแบบธรรมชาติดีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 27.50 % (w.b.) อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งกรณีติดตั้งเรือน

กระจก (case 2) มีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) เฉลี่ยประมาณ 4-5 °C ที่สภาวะเดียวกัน จากพฤติกรรมการระเหยของความชื้นอาศัยปัจจัยของอุณหภูมิ และความชื้นของตัวกลาง ดังนั้นการอบแห้งด้วยบั้งความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก ซึ่งความร้อนได้จากการแผ่รังสีอาทิตย์โดยตรง และการพาความร้อนแบบบังคับจากระบบบั้งความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิสารตัวกลางหรืออากาศร้อนถ่ายเทความร้อนให้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น รวมถึงความชื้นในอากาศต่ำลงจากการเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นเนื่องจากถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ รวมถึงความชื้นของตัวกลางหรืออากาศลดลง จึงเป็นเหตุผลการอบแห้งกรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ที่มีอุณหภูมิสูง เพิ่มการถ่ายเทมวลของ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ไปสู่อากาศมากกว่า การอบแห้งกรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1)

ซึ่งผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอากาศมีความชื้นสูงกว่าเนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่า ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Jareanjit *et al.*, 2014; Jareanjit and Naemsai, 2016) ดังนั้นการอบแห้งโดยระบบบั้งความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์ด้วยสภาวะเรือนกระจกในกรณีศึกษา นี้ จึงมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า โดยจะเห็นได้ว่าการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 16.20 % (w.b.) ในกรณีไม่มีเรือนกระจก หรือการตากแบบธรรมชาติ ต้องใช้พลังงานและระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และเสี่ยงต่อการที่พริกจะเสียหายเนื่องจากความชื้น และใช้เวลานานเกินความเหมาะสม แปรผันตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นการอบแห้งโดยระบบบั้งความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์กรณีติดตั้งเรือนกระจกครอบอิวาปอเรเตอร์ (case 2) จึงมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า

ตารางที่ 1 สมรรถนะระบบอบแห้งด้วยบั้งความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก

ตัวแปร	Case 1 ระบบเปิด 20 kg ที่ 60 °C	Case 2 ระบบเปิด 20 kg ที่ 60 °C	หน่วย
พลังงานไฟฟ้า	21.1	19.8	kWh
มวลน้ำที่หายไป	10.77	11.96	kg
เวลาอบแห้ง	36	36	hrs
ค่ารังสีเฉลี่ย	619.03	619.03	W/m ²
SEC	5.27	4.64	kWh/kg
SEEC	1.96	1.66	kWh/kg

จากตารางที่ 1 แสดงสมรรถนะระบบอบแห้งด้วยบั้งความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก กรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) เทียบกับกรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) ที่สภาวะเดียวกัน พบว่ากรณีติดตั้งเรือนกระจก (case 2) มีสมรรถนะการอบแห้งสูงกว่ากรณีไม่มีเรือนกระจก (case 1) โดยมวลน้ำที่หายไประหว่างกระบวนการอบแห้ง มีค่า

เท่ากับ 11.96 และ 10.77 kg มากกว่า (+11.04%) จากปัจจัยของอุณหภูมิที่สูงกว่า ในขณะที่ปัจจัยทางด้านการใช้พลังงาน แสดงผลไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 4.64 kWh/kg และ 5.27 kWh/kg หรือลดลง 12% ในขณะที่ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 1.66 kWh/kg และ 1.96 kWh/kg หรือลดลง

15% ตามลำดับ พิจารณาว่าการที่อีวาพอเรเตอร์ (evaporator) ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจก เป็นปัจจัยต่อสมรรถนะของระบบในการลดการใช้พลังงานที่ปั๊มที่คอมเพรสเซอร์เนื่องจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้น

สรุป

การศึกษาอิทธิพลของแหล่งความร้อนสำหรับปั๊มความร้อนในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยเปรียบเทียบกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งเรือนกระจกสำหรับแหล่งความร้อนของปั๊มความร้อนต่อสมรรถนะการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์ พบว่าระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก ในกรณีที่อีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนรับความร้อนจากเรือนกระจกมีอัตราการอบแห้งสูงกว่ากรณีที่ระบบอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนเปิดสู่บรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาในด้านของอุณหภูมิและพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากแหล่งความร้อนของปั๊มความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น รวมทั้งระบบสามารถทำการอบแห้งได้ต่อเนื่อง โดยใช้ปั๊มความร้อนทำงานร่วมกับความร้อนจากรังสีอาทิตย์จากสถานะเรือนกระจกโดยตรงในการอบแห้ง และโดยทางอ้อมจากการใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนปั๊มความร้อนในช่วงเวลากลางวัน ตามลำดับ โดยสามารถอบแห้งพริกสด 20 kg จากเริ่มต้นที่ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 76 % (w.b.) เหลือความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 16.20 % (w.b.) ในระยะเวลา 3 วัน โดยใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 19.8 kWh ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 4.64 kWh/kg ซึ่งต่ำกว่ากรณีอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนที่เปิดสู่บรรยากาศ 12 % และค่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 1.66 kWh/kg

ซึ่งต่ำกว่ากรณีอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนเปิดสู่บรรยากาศ 15 % ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนซึ่งรับความร้อนจากเรือนกระจกเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้งในการลดการใช้พลังงานที่ป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงใช้กรณีดังกล่าวเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบต่อไปในอนาคต เพื่อสนับสนุนแนวความคิดการใช้บรรยากาศภายในเรือนกระจกเป็นแหล่งความร้อนของปั๊มความร้อนสำหรับช่วยลดการใช้พลังงานในส่วนของปั๊มความร้อนจากสถานะเรือนกระจกในเวลากลางวัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ภายใต้แผนงานวิจัยการบริหารจัดการ Food Valley ปีงบประมาณ 2559 สัญญาเลขที่ PRP5905021050

เอกสารอ้างอิง

- Arason, S. 2003. The Drying of Fish and Utilization of Geothermal Energy-The Icelandic Experience, pp. 21-31. In **International Geothermal Conference**. Reykjavik, Iceland.
- Barlev, D., Vidu, R. and Stroeve, P. 2011. Review Innovation in concentrated solar power. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 95(10): 2703-2725.
- Chaturvedi, S.K. and Shen, J.Y. 1984. Thermal performance of a direct expansion solar assisted heat pump. **Solar Energy** 33(2): 155-162.

- Daghigh, R., Ruslan, M.H., Sulaiman, M.Y. and Sopian, K. 2010. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14(9): 2564-2579.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, H.M., Alghoul, M.A. and Sulaiman M.Y. 2010. Review of solar dryers for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14(1): 1-30.
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., La.zaro, A., Dolado, P., Zalba, B. and Cabeza, L.F. 2010. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part1-concepts, materials and modellization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14(1): 31-55.
- Jareanjit, J. 2012. A Solar Dryer Technology and Its Development. **KKU Research Journal** 17(1): 110-124.
- Jareanjit, J., Boonyanuwat, S. and Naemsai, T. 2014. Experimental Study on Thermal Potential and Energy consumption of Solar Greenhouse Dryer Combined with Heat Pump, pp. 52-59. *In The 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 28)*. Khonkaen, Thailand.
- Jareanjit, J. and Naemsai, T. 2016. Experimental performance of pepper drying using solar assisted heat pump drying system, pp. 1067-1074. *In The 30th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 30)*. Songkhla, Thailand.
- Kara, O., Ulgen, K. and Hepbasli, A. 2008. Exergetic assessment of direct-expansion solar assisted heat pump systems: review and modeling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 12(5): 1383-1401.
- Kohayakawa, M.N., Silveria-Junior, V. and Telis-Romero, J. 2004. Drying of mango slices using heat pump dryer, pp. 884-891. *In Proceedings of the 14th international drying symposium; 2004*. Sao Paulo City, Brazil.
- Kuang, Y.H., Wang, R.Z. and Yu, L.Q. 2003. Experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply. **Energy Conversion and Management** 44(7): 1089-1098.
- Lewicki, P.P. 2006. Design of hot air drying for better foods. **Trends in Food Science and Technology** 17(4): 153-163.
- Minka, C.J. 1986. Potential improvement to traditional solar crop drying in Cameroon: research and development solar drying in Africa, pp. 11-22. *In Proceedings of a Workshop held in Dakar*. Senegal.
- Morrison, G.L. 1994. Simulation of packaged solar heat-pump water heaters. **Solar Energy** 53(3): 249-257.
- Piga, A., Del Caro, A. and Corda, G. 2003. Influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. **Journal of Agriculture and Food Chemistry** 51(12): 3675-3681.

- Prasertsan, S., Sean-saby, P. and Prateepchaikul, G. 1997. Heat pump dryer. Part 3: experiment verification of the simulation. **International Journal of Energy Research** 21: 1-20.
- Roonprasang, N., Namprakai, P. and Pratinthong, N. 2006. Mathematical model and optimum sizing for a solar banana dryer combined with parabolic trough and phase change energy storage system in Thailand. **KKU Engineering Journal** 33(5): 495-510.
- Sharma, S.J., Sharma, V.K., Ranjana, J.H.A. and Ray, R.A. 1990. Evaluation of the performance of a cabinet type solar dryer. **Energy Conversion & Management** 30(2): 75-80.
- Smith, C.A., Belles, R.D. and Simon, A.J. 2007. **Estimated International Energy Flows** 2007. Lawrence Livermore National Lab. Available Source: <http://flowcharts.llnl.gov/content/international/2007EnergyInternational.pdf>, March 27, 2016.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Rukprang, P. 1998. Fruit drying using heat pump. **International Energy Journal** 20(1): 39-53.
- Strommen, I., Eikevik, T.M. and Odilio, A.F. 1999. Optimum design and enhanced performance of heat pump dryers. In Abudullah, K., Tamaunan, A.H. and Maujumdar, A.S., eds. **Proceedings of the first Asian-Australian drying conference**. Bali, Indonesia.