

การศึกษาศมรรถนะการอบแห้งพริกด้วยระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก
Experimental performance of pepper drying using solar assisted
heat pump drying system

จาร์วัฒน์ เจริญจิต*และฐานวิทย์ แนนมใส

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอ เมือง จังหวัด สงขลา 90000
*ติดต่อ: Email:j.jaruwat@gmail.com, 086-6856747, 074-315185

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเชิงทดสอบสมรรถนะการอบแห้งพริก ด้วยระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก โดยใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตใสเป็นห้องอบแห้งสำหรับระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกและเป็นส่วนสร้างความร้อนให้กับฮีววาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน ตามลำดับ จากการทดสอบสมรรถนะการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg พบว่าระบบสามารถลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจากประมาณ 300%d.b. ลดลงเหลือประมาณ 65, 35 และ 10 %d.b. ในช่วงเวลา 4:00 PM-4:00 PM (24 ชั่วโมงต่อเนื่อง) ที่ประสิทธิภาพการอบแห้งประมาณ 14, 13 และ 9% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 45-50°C ในช่วงเวลากลางคืนและ 55-60°C ในช่วงเวลากลางวัน โดยใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 19 kWh ขึ้นกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้ง และค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งในตู้อบแบบเรือนกระจกและตากแห้งตามธรรมชาติ พบว่าระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าชัดเจน เนื่องจากสามารถทำการอบแห้งได้ต่อเนื่องจากการใช้ระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่ทำงานร่วมกับความร้อนจากรังสีอาทิตย์จากสภาวะเรือนกระจกโดยตรงในการอบแห้ง และโดยทางอ้อมจากการใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนปั๊มความร้อนในช่วงเวลากลางวัน ตามลำดับ

คำหลัก: ปั๊มความร้อน; ระบบอบแห้ง; เรือนกระจก

Abstract

This study is to evaluate the performance of pepper drying with solar assisted heat pump dryer. The drying room, which made with polycarbonate sheets, was used as an evaporator section of the heat pump. From the experimental results of pepper drying in 3 different cases (10, 7.5 and 5kg), it was found that the dryer could continuously remove the moisture content of products from 300%d.b. to 65, 35 and 10%d.b. respectively (24 hr). Moreover, the drying efficiency of 3 cases were around 14, 13 and 9% respectively at the average drying temperature ranges of 45-50°C (nighttime) and 55-60°C (daytime). The electrical energy was nearly used 19 kWh and it was proportional to dried product quantity and solar radiation consecutively. As comparing between the dryer and open sun system, it showed that the dryer had a higher drying rate than the open sun system obviously. As a result, it was able to continuously dry the products through the solar assisted heat pump system and it could indirectly dry the products through the solar energy in daytime.

Keywords: heat pump; drying system; greenhouse

1. บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนพลังงานมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศเนื่องจากมีปริมาณความต้องการใช้พลังงานในด้านต่างๆเพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะพลังงานฟอสซิลจำนวนมาก และเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพดังแสดงในรายงานของ Lawrence Livermore National Laboratory[1] รวมถึงข้อตกลงว่าด้วยการลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของแต่ละประเทศ(Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs)ส่งผลให้ประเทศไทยต้องมีการปรับแผนการใช้พลังงานของประเทศโดยรวมดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับแผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP 2015) และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก(AEDP 2015) ของกระทรวงพลังงาน ในการลดต้นทุนด้านพลังงานเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนในการลดความเข้มข้นการใช้พลังงานลงร้อยละ 30 ในปีพ.ศ. 2579 ทางคณะผู้วิจัยพิจารณาว่ากลุ่มอุตสาหกรรมการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรเพื่อแปรรูป และเพิ่มมูลค่าสินค้าเป็นกลุ่มหนึ่งที่ต้องส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานในกระบวนการผลิตเนื่องจากเป็นกระบวนการทางความร้อนสามารถประยุกต์ใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (solar thermal) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง โดยมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย $18.2\text{MJ}/\text{m}^2\text{-day}$ (ประเทศไทย) ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ ในทางตรงหรือทางอ้อมได้อย่างกว้างขวาง และกระจายตัวอยู่ทั่วประเทศตามบริบทของแหล่งทรัพยากรต่างๆ เป็นทุนเดิม และสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจได้

ที่ผ่านมาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้มีการใช้รังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตลมร้อนในการอบแห้งแบบ passive, activeและhybrid [2]ระบบสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนเฟส [3-5] เพื่อสะสมความร้อน รวมถึงการใช้รังสีอาทิตย์เสริมปั๊มความร้อน (Solar assisted heat pump, SAHP)[6] โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน 2 รูปแบบ คือทำงานแยกกันโดยทำงานเสริมกันผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ (Direct-expansion, DX-SAHP) สารทำงานจะขยายตัวโดยตรงในตัวเก็บรังสีอาทิตย์และเป็นส่วนประกอบหนึ่งของระบบ[7] เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะ[8-10] เนื่องจากปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ได้เปรียบเชิงพลังงาน สามารถดึงความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำไป

ยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงได้เมื่อเทียบกับการใช้ลวดไฟฟ้าในการทำงานการใช้พลังงานจึงน้อยกว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศที่ใช้อบแห้งได้ผ่านการควบคุมที่เหมาะสม[6] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการอบลมร้อนธรรมดา[11-14] ประกอบกับกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ ส่งผลเชิงบวกต่อคุณภาพของวัสดุทางชีวภาพแต่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน (low temperature and long time, LTLT) [15-17] ดังนั้นการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน และรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เป็นแนวทางหนึ่งในการอบเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์[18] ซึ่งตู้อบแห้งรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดเล็กกรณีไม่มีภาระอุณหภูมิภายในสูงประมาณ $80\text{-}85^{\circ}\text{C}$ [19] สูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$ [20] แปรผันตามค่ารังสีนอกจากนี้การศึกษาเชิงทดสอบการใช้พลังงานของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก ที่ประกอบจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ใน กรณีที่อัตราป้อนเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครบด้วยเรือนกระจกเสริมใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าการเปิดตู้บรรยากาศ ที่พลังงานไฟฟ้า 0.09kWh (5.8%ของไฟฟ้าทั้งหมด)ต่ำกว่าประมาณ 86.15% ตามลำดับ [21]

จากข้อมูลข้างต้น รังสีอาทิตย์และปั๊มความร้อนสามารถลดการใช้พลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ในลักษณะการทำงานแบบผสมผสานกัน สามารถทำงานได้สม่ำเสมอและเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งอย่างต่อเนื่องจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง



รูปที่ 1 ระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก

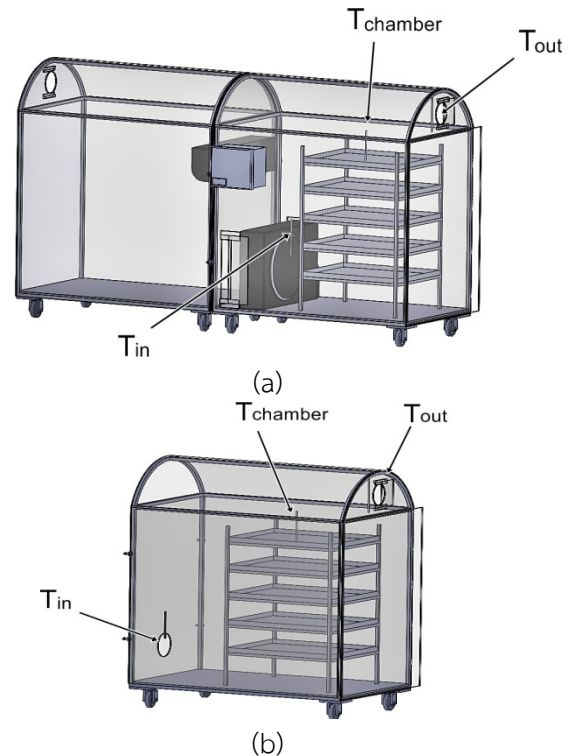
[21]

ระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก สำหรับการศึกษา นี้ เป็นการทดสอบกรณีมีภาระอบแห้ง ในระบบอบแห้งแบบเรือนกระจก โดยใช้ฟริกซีหนูเป็นตัวอย่างในการอบแห้งเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ (ความชื้นของผลผลิต, อัตราการอบแห้งและประสิทธิภาพการอบแห้ง) ของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก ที่ประกอบจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใสหนา 6 mm ในระบบปิด ขนาดกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 1,200 mm×2,000 mm×1,700 mm และหลังคาโค้งมีรัศมี 650 mm พื้นของเรือนกระจก ทำจากแผ่นโลหะพ่นสีดำ ด้านประกอบด้วยชุดอบแห้งเรือนกระจกทั่วไป 1 ชุดและระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก 1 ชุดตามลำดับ

การทำงานของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกสำหรับการศึกษา นี้ แหล่งความร้อนหลักของระบบได้มาจากรังสีอาทิตย์ ผ่านปรากฏการณ์ของสถานะเรือนกระจก (green house effect) ส่งผลให้อุณหภูมิในเรือนกระจกสูงขึ้น เพื่อใช้ในการอบแห้งโดยตรง โดยทำงานร่วมกับระบบปั๊มความร้อนเพื่อให้ระบบมีความเสถียรเชิงอุณหภูมิ และความต่อเนื่องของกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์มากขึ้น โดยอาศัยความได้เปรียบเชิงพลังงานของปั๊มความร้อนในการยกระดับของอุณหภูมิคุณภาพต่ำให้สูงขึ้นโดยการศึกษานี้จะบรรยากาศภายในเรือนกระจก (เรือนกระจกที่ครอบอิวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก) เป็นแหล่งความร้อนของปั๊มความร้อน ซึ่งติดตั้งหันหน้าไปทางทิศใต้ เพื่อหลังคาโค้งตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ และรับรังสีได้ตลอดการทดลอง โดยประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศขนาด 10000 BTU ใช้สารทำงาน R 22 เป็นสารทำความเย็นในระบบ ติดตั้งให้ทำงานในลักษณะของปั๊มความร้อน โดยติดตั้งอิวาปอเรเตอร์ภายในเรือนกระจก และติดตั้งคอนเดนเซอร์ในเรือนกระจก ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเพื่อดำเนินการทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกเทียบกับเรือนกระจกทั่วไป และตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ รวมถึงทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก กรณีมีภาระอบแห้งฟริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพการอบแห้งของระบบต่อไป



รูปที่ 2 แผนภาพรายละเอียดของระบบอบแห้ง (a)แบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก(b)แบบเรือนกระจกทั่วไป

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.ดำเนินการทดสอบการอบแห้งแบบเรือนกระจกทั่วไปและตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ ในช่วงเวลา 9:00 AM-4:00 PM เป็นเวลา 7 ชั่วโมงต่อวัน 2.ดำเนินการทดสอบการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกในช่วงเวลา 4:00 PM-4:00 PM เป็นเวลา 24 ชั่วโมงต่อเนื่องโดยควบคุมอุณหภูมิสูงสุดด้านคอนเดนเซอร์ สูงสุดที่ 65°C และจะต่อใหม่ในช่วงเวลา 5 นาทีถัดมา โดยตั้งค่าอุณหภูมิต่อ-ตัดการทำงาน ของปั๊มความร้อนที่ตำแหน่งอากาศเข้าคอนเดนเซอร์ที่ $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ คือ 55°C และ 60°C เพื่อทดสอบสมรรถนะ โดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อนทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์ด้วย Pyranometer (Kipp&Zonen) Model CM11B ความละเอียด $\pm 2\text{W}/\text{m}^2$ วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ประกอบด้วย อุณหภูมิอบแห้ง (Drying Temperature) ภายในเรือนกระจก (T_{chamber}), อุณหภูมิทางเข้าเรือนกระจก (T_{in}), อุณหภูมิทางออกเรือนกระจก (T_{out}) และอุณหภูมิภายนอก (T_a) วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีความละเอียด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ บันทึกข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิการทดลอง ทุกๆ 180 นาที โดยใช้ Data logger (Yokogawa) Model MV 2000 และวัดปริมาณการใช้

พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อนำค่าที่ได้ เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกแต่ละกรณี ดังแสดงในรูปที่ 2

สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดลองคือพริกขี้หนูที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300% d.b. โดยจัดเตรียมบรรจุบนตะแกรงใส่พริกขี้หนู จำนวน 5 ชั้นโดยแบ่งเป็นชั้นละ 1.0, 1.5 และ 2.0 kg ในการทดลองแต่ละครั้งใช้พริกขี้หนูเท่ากับ 5kg, 7.5kg และ 10 kg ตามลำดับโดยเริ่มจากการทดสอบอบแห้งพริกขี้หนูสดจำนวน 10kg ในช่วงเวลา 4:00 PM-4:00 PM เป็นเวลา 24 ชั่วโมงต่อเนื่องเทียบกับแบบเรือนกระจกทั่วไป และการตากแห้งตามธรรมชาติ ในช่วงเวลา 9:00 AM-4:00 PM หรือ 7 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก กรณีมีการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg ในชุดการทดสอบที่สอง ตามลำดับ

2.3 การวัดความชื้นของผลผลิต

สำหรับการวัดความชื้นของผลผลิต (Moisture Content) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อ่านค่าจากเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Miras Sartorius ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30kg ที่มีค่าความละเอียด 5 g เก็บข้อมูลของน้ำหนัก ทุก 180 นาที นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์เพื่อทำการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์และอัตราการอบแห้ง

การวัดความชื้นของผลผลิต (Moisture Content) นั้นส่วนใหญ่จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (Wet Basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลผลิต ที่ขึ้นเป็นหลักดังนี้

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

2. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (Dry Basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลผลิตแห้งเป็นหลักดังนี้

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

เมื่อ W_w คือน้ำหนักของน้ำในเนื้อของวัสดุ(kg)
 W_d คือน้ำหนักของเนื้อวัสดุแห้ง(kg)

จากสมการ ความชื้นมาตรฐานเปียก มีค่าไม่เกิน 100 % ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง อาจมีค่าเกิน 100 % โดยงานวิจัยนี้จะบอกความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งโดยที่อัตราการอบแห้ง พิจารณาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา

$$(\text{Drying Rate, DR}) = \frac{dW}{dt} \quad (3)$$

2.4 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

การคำนวณประสิทธิภาพในการอบแห้งพริกในระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก (Drying efficiency) วิเคราะห์จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานทางความร้อนที่จ่ายให้เครื่องอบแห้งใช้สมการดังนี้

$$(\text{Drying efficiency}) = \frac{h_{fs} \cdot dW}{(It \cdot A)dt + (dE)dt} \quad (4)$$

เมื่อ dW คือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์(kg)

h_{fs} คือค่าความร้อนแฝง(J/kg)

It คือค่ารังสีอาทิตย์(W/m^2)

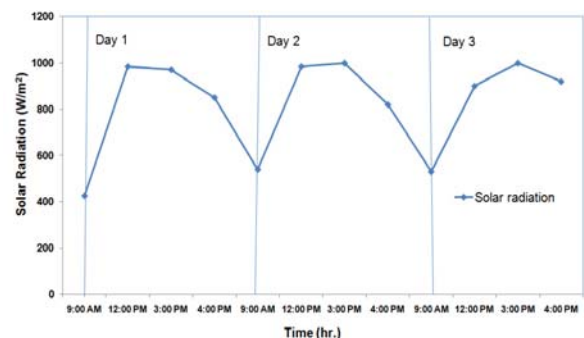
A คือพื้นที่รับรังสีส่วนห้องอบแห้ง ($1.2m^2$)

dt คือเวลาในการอบแห้ง (s)

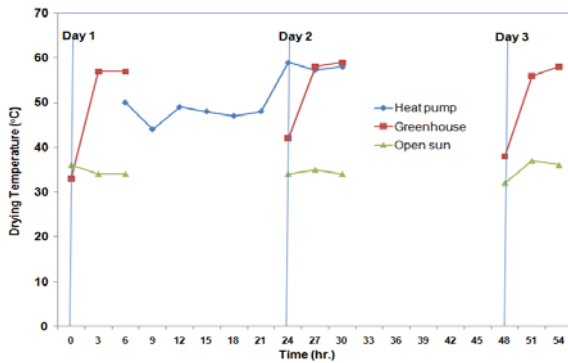
dE คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ(kWh)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดสอบระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกเทียบกับเรือนกระจกทั่วไป และตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ ในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อประเมินศักยภาพเชิงอุณหภูมิจากของระบบ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

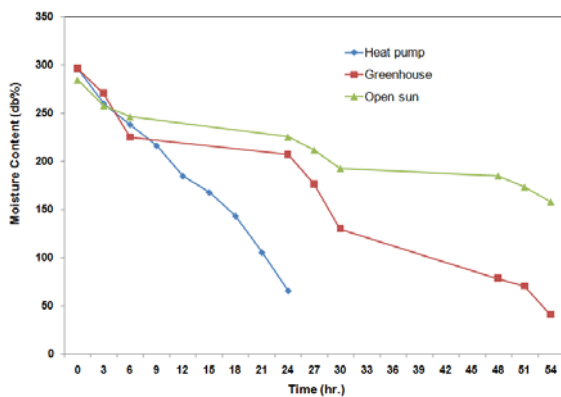


รูปที่ 3 ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยช่วงเวลา 9:00 AM-4:00 PM ที่ใช้ทดสอบระบบอบแห้ง กรณีศึกษาต่าง ๆ



รูปที่ 4 อุณหภูมิภายในเรือนกระจกของระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกเทียบกับเรือนกระจกทั่วไป และตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ ในช่วงเวลาต่างๆ

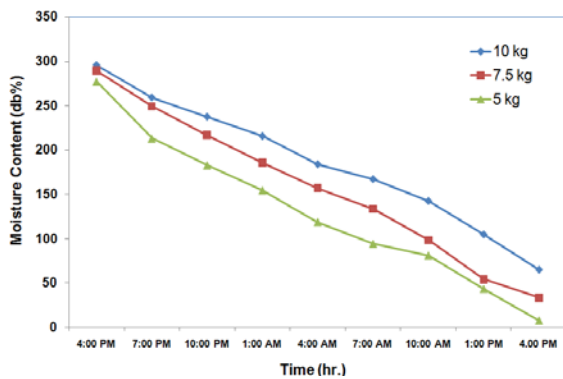
จากการทดสอบ พบว่าอุณหภูมิภายในเรือนกระจกกรณีปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ตามจังหวะการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของปั๊มความร้อน ที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศที่ไหลผ่านคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 45-50°C ในช่วงเวลากลางคืนและ 55-60°C ในช่วงเวลากลางวัน ส่งผลให้สามารถทำงานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมงได้ ในขณะที่อุณหภูมิภายในเรือนกระจกทั่วไป มีค่าประมาณ 32°C และ 59°C แปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งในเวลากลางวันมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันคือประมาณ 55-60°C แต่เป็นช่วงเวลาประมาณ 3 ชั่วโมงจึงขาดความต่อเนื่องของอุณหภูมิและระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่กรณีการตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ มีอุณหภูมิประมาณ 33-35 °C ที่ค่ารังสีอาทิตย์ประมาณ 400-1000 W/m² ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



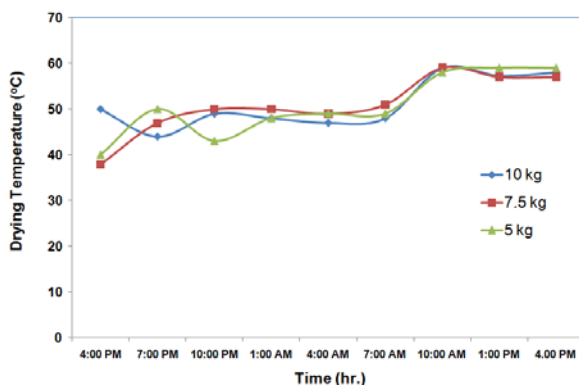
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกเทียบกับเรือนกระจกทั่วไป และตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ

จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (Dry Basis)(%d.b.) จากการทดลองพบว่า การอบแห้งพริกทั้ง 3 กรณีศึกษา พบว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วใกล้เคียงกันในช่วงเวลา 6 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง โดยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกจะใช้พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนเป็นหลัก ในส่วนของเรือนกระจกทั่วไปและการตากแห้งตามธรรมชาติ รับประทานพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นหลัก โดยพบว่า การอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก และเรือนกระจกทั่วไปจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่ากรณีตากแห้งตามธรรมชาติ เนื่องจากพฤติกรรมของการระเหยของความชื้นอาศัยปัจจัยของอุณหภูมิ และความชื้นของตัวกลาง ดังนั้นการอบในเรือนกระจกส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของเนื้อพริกสูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อพริกไปสู่อากาศมากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ อีกทั้งความชื้นของตัวกลางในตู้อบลดลงจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น และมีค่าต่ำกว่าเนื้อพริก ส่งผลให้อัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวพริกสูงกว่าการอบแห้งในตัวกลางที่มีความชื้นสูงเช่นการตากในบรรยากาศอย่างไรก็ตาม จากข้อจำกัดของระยะเวลาการทำงานของระบบอบแห้งจากความร้อนรังสีอาทิตย์ ส่งผลให้ทั้ง 3 กรณี อาศัยความร้อนรังสีอาทิตย์ในเวลาเท่ากัน คือในช่วงเวลากลางวัน 7 ชั่วโมงแตกต่างกันที่เวลาเริ่มต้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกเทียบกับเรือนกระจกทั่วไปและการตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ พบว่าที่เวลาเท่ากัน คือ 24 ชั่วโมงสามารถอบพริกชิ้นหนุสที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300% d.b. จนผลิตภัณฑ์เหลือความชื้นประมาณ 65, 207 และ 225 % d.b. ตามลำดับ โดยเรือนกระจกทั่วไปสามารถอบพริกชิ้นหนุสเหลือความชื้นประมาณ 65% d.b. ต้องใช้เวลาประมาณ 3 วัน ในขณะที่การตากรังสีอาทิตย์ตามธรรมชาติ ใช้เวลายาวนานกว่าชัดเจน ดังนั้นการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกจึงมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าจากปัจจัยการทำงานอย่างต่อเนื่องของปั๊มความร้อนเป็นหลักโดยมีรังสีอาทิตย์มาช่วยลดภาระในส่วนแหล่งความร้อนในเรือนกระจกในการอบพริกและแหล่งความร้อนของปั๊มความร้อนจากสถานะเรือนกระจกในเวลากลางวัน

จากการทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก กรณีมีการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg ในช่วง 24 ชั่วโมงต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพการอบแห้งของระบบ พบว่าระบบสามารถอบพริกชิ้นสูงสุดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300% d.b. ลดลงเหลือประมาณ 65, 35 และ 10 % d.b. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6 ในขณะที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 45-50°C ในช่วงเวลากลางคืน โดยอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะแปรผันตามจังหวะตัด-ต่อการทำงานของชุดคอมเพรสเซอร์ของระบบปั๊มความร้อนเป็นหลัก ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิแต่ละกรณีแตกต่างกันตามสภาวะอากาศในช่วงเวลากลางคืนที่ต่างกันเทียบกับในช่วงเวลากลางวันอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 55-60°C โดยแปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ และปริมาณการอบแห้งพริกสดเป็นหลักดังแสดงในรูปที่ 7

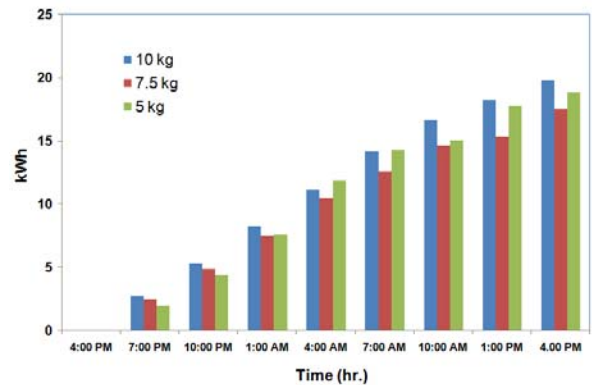


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกกรณีมีการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg ตามลำดับ



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกกรณีมีการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg ตามลำดับ

พริกที่ผ่านการอบแห้งจากระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกมีสภาพที่แดงใสจนสามารถมองเห็นเมล็ดด้านในได้อย่างชัดเจน ก้านมีสีน้ำตาลผสมกับสีเขียวอ่อน ในขณะที่พริกจากการอบแบบเรือนกระจกมีสีแดงเข้มอมดำ ก้านมีสีน้ำตาล และพริกที่ผ่านการตากแดดมีสีแดงสดไม่ค่อยใส ก้านมีสีเหลือง



รูปที่ 8 การใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกในช่วงเวลาต่างๆ

จากการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg ด้วยระบบอบแห้งพบว่ามวลของพริกที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีผลต่อกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วงเวลา 10:00 AM-4:00 PM ระบบจะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าช่วงเวลา 4:00 PM-10:00 AM เนื่องจากช่วงดังกล่าวระบบอาศัยพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ช่วยในการอบ และเป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบปั๊มความร้อน ตามลำดับโดยใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 19 kWh ขึ้นกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้ง และค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 1 ค่าประสิทธิภาพการอบแห้งการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก

parameter	10 kg	7.5 kg	5 kg	units
dW	5.83	4.93	3.58	kg
h_{fg}	2358.96	2358.96	2358.96	kJ/kg
It	888.00	836.25	837.50	W/m ²
dE	19.86	18.70	19.05	kWh
drying efficiency	13.97	12.54	8.98	%

จากตารางที่ 1 พบว่าการทดสอบสมรรถนะการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg พบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง คือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ (kg) ที่จะเพิ่มขึ้นแปรผันตามมวลพริกสดที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิ ตามลำดับโดยประสิทธิภาพการอบแห้งจะแปรผกผันกับเวลา และการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตามพลังงานส่วนหนึ่งที่ใช้ไปคือรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนซึ่งสามารถตอบโจทยการอนุรักษ์พลังงานในส่วนของการใช้เสริมระบบปั๊มความร้อนซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้เปรียบเชิงพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ประสิทธิภาพการอบแห้งประมาณ 14, 13 และ 9 % ตามลำดับ ขึ้นกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้งและค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ตามลำดับ

4. สรุป

จากการศึกษาเชิงทดสอบสมรรถนะการอบแห้งพริกด้วยระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกเทียบกับการอบแห้งในตู้อบแบบเรือนกระจกและตากแห้งตามธรรมชาติ พบว่าระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าชัดเจนเนื่องจากสามารถทำการอบแห้งได้ต่อเนื่อง โดยใช้ปั๊มความร้อนทำงานร่วมกับความร้อนจากรังสีอาทิตย์จากสถานะเรือนกระจกโดยตรงในการอบแห้ง และโดยทางอ้อมจากการใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนปั๊มความร้อนในช่วงเวลากลางวัน ตามลำดับ

จากการทดสอบสมรรถนะการอบแห้งพริกสดจำนวน 10, 7.5 และ 5 kg พบว่าระบบสามารถลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจากประมาณ 300% d.b. ลดลงเหลือประมาณ 65, 35 และ 10 % d.b. ในช่วงเวลา 4:00 PM-4:00 PM (24 ชั่วโมงต่อเนื่อง) ที่ประสิทธิภาพการอบแห้งประมาณ 14, 13 และ 9 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 45-50°C ในช่วงเวลากลางคืนและ 55-60°C ในช่วงเวลากลางวัน โดยใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 19 kWh ขึ้นกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้ง และค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Smith, C.A., Belles, R.D. and Simon, A.J. (2007), "Estimated International Energy Flows 2007", Lawrence Livermore National Lab, URL: <http://flowcharts.llnl.gov> (Livermore, 2011)
- [2] 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*, vol. 14(1), January 2010, pp.1-30.
- [3] 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*, vol. 33(5), September-October 2006, pp. 495-510. Thai.
- [4] 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. Part 1- concepts, materials and modellization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14(1), January 2010, pp.31-55.
- [5] Barlev, D., Vidu, R. and Stroeve, P. (2011). Review Innovation in concentrated solar power, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 95(10), October 2011, pp. 2703-2725.
- [6] 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*, vol. 14(9), December 2010, pp. 2564-2579.
- [7] 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*, vol. 12(5), June 2008, pp. 1383-1401.

- [8] Chaturvedi, S.K. and Shen, J.Y. (1984). Thermal performance of a direct expansion solar assisted heat pump, *Solar Energy*, vol. 33(2), 1984, pp. 155–162.
- [9] Morrison, G.L. (1994). Simulation of packaged solar heat-pump water heaters, *Solar Energy*, vol. 53(3), September 1994, pp. 249–257.
- [10] 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*, vol. 44(7), May 2003, pp.1089–1098.
- [11] Prasertsan, S., Sean-saby, P. and Prateepchaikul, G. (1997). Heat pump dryer. Part 3: experiment verification of the simulation, *International Journal of Energy Research*, vol. 21, June 1997; 1–20.
- [12] Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Rukprang, P. (1998). Fruit drying using heat pump, *International Energy Journal*, vol. 20(1), June 1998, pp.39–53.
- [13] Strommen, I., Eikevik, T.M. and Odilio, A.F. (1999). Optimum design and enhanced performance of heat pump dryers, paper presented in *Abudullah K, Tamaunan AH, Maujumdar AS, editors. Proceedings of the first Asian-Australian drying conference*, Bali, Indonesia.
- [14] Kohayakawa, M.N., Silveria-Junior, V. and Telis-Romero, J. (2004). Drying of mango slices using heat pump dryer, paper presented in *Proceedings of the 14th international drying symposium; 2004*, Sao Paulo City, Brazil.
- [15] Arason, S. (2003). The Drying of Fish and Utilization of Geothermal Energy – The Icelandic Experience, paper presented in *International Geothermal Conference; 2003*, Reykjavik, Iceland.
- [16] Piga, A., Del Caro, A. and Corda, G. (2003). Influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity, *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, vol. 51(12), June 2003, pp.3675–3681.
- [17] Lewicki, P.P. (2006). Design of hot air drying for better foods, *Trends in Food Science and Technology*, vol. 17(4), April 2006, pp.153–163.
- [18] Jareanjit, J. (2012). A Solar Dryer Technology and Its Development, *KKU Res. J*, vol. 17(1), January-February 2012, pp.110-124. Thai.
- [19] 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*, vol. 30(2), 1990, pp.75–80.
- [20] Minka, C.J. (1986). Potential improvement to traditional solar crop drying in Cameroon: research and development solar drying in Africa, paper presented in *Proceedings of a Workshop held in Dakar, Senegal*.
- [21] Jareanjit, J., Boonyanuwat S. Naemsai T. (2014). Experimental Study on Thermal Potential and Energy consumption of Solar Greenhouse Dryer Combined with Heat Pump, paper presented in *the 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 28)*; khonkaen, Thailand.