



# การนำอากาศร้อนมาใช้ใหม่ต่อสมรรถนะ ระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางทะเล

## Heat Recovery on Performance of Solar Heat Pump Systems with Greenhouse Assisted for Drying Marine Products

จาร์วัฒน์ เจริญจิต\* และ สิทธิพร บุญญานูวัตร์

Jaruwat Jareanjit\* and Sittiporn Boonyanuwat

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000 Thailand

\*E-mail: jaruwat.j@rmutsv.ac.th, Tel.:0-7431-7162, Fax:0-7431-7168

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษานำอากาศร้อนมาใช้ใหม่ต่อสมรรถนะระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจกในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางทะเล โดยใช้เรือนกระจกเป็นส่วนสร้างความร้อนให้กับปั๊มความร้อนโดยศึกษาการหมุนวนอากาศมาใช้ในระบบอบแห้ง 2 กรณี คือระบบเปิด (case 1) อากาศภายนอกเข้าสู่ห้องอบแห้งผ่านคอนเดนเซอร์และระบายสู่ภายนอกทั้งหมด เทียบกับระบบผสม (case 2) นำอากาศร้อนระบายออกจากห้องอบแห้งส่วนหนึ่งมาใช้ใหม่ร่วมกับอากาศภายนอก ที่สภาวะเดียวกัน โดยใช้ปลาทุบแช่เกลือแห้ง 10 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 308 (%d.b.) เป็นผลิตภัณฑ์ทดสอบ จากการทดลองพบว่า กรณีระบบผสมมีสมรรถนะการอบแห้งสูงกว่าระบบเปิด โดยสามารถอบแห้งเหลือความชื้นเฉลี่ยประมาณ 161.55 (%d.b.) ที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 3.763 kWh/kg ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 1.375 kWh/kg และอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เท่ากับ 4.792 ตามลำดับ โดยการนำอากาศร้อนระบายออกจากห้องอบแห้ง ส่งผลกระทบเชิงบวกต่อสมรรถนะการอบแห้ง ในแง่ของการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่โดยตรงผ่านการหมุนวนกลับเข้าสู่ระบบ และโดยทางอ้อมผ่านการดึงความร้อนจากระบบปั๊มความร้อน เป็นการลดความชื้นออกจากอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง โดยทั้ง 2 กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์มีลักษณะทางกายภาพเป็นไปตามลักษณะปลาแดดเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับตากแบบธรรมชาติ

**คำสำคัญ:** ปั๊มความร้อน; ระบบอบแห้ง; เรือนกระจก; การนำกลับ; ผลิตภัณฑ์ทางทะเล

## ABSTRACT

This research is to study effect of heat recovery on performance of solar heat pump systems with greenhouse assisted for drying marine products. A greenhouse effect was conducted as a heating source of the heat pump drying system. The drying system were divided into two scenarios under the same condition including no ventilation heat recovery from the condenser room to the evaporator room (case 1) and the ventilation heat recovery from the condenser room to the evaporator room (case 2). 10 kg fresh mackerels (ripped at the back) with initial moisture content of 308 (%d.b.) were set as samples. From the experimental results, it was found that the system with ventilation heat recovery had a higher drying performance than that without ventilation heat recovery. The heat recovery system offered the final moisture content of 161.55 (%d.b.) with specific energy consumption (SEC) of 3.763 kWh/kg, specific electrical energy consumption (SEEC) of 1.375 kWh/kg and energy efficiency ratio (EER) of 4.792, respectively. The ventilation heat recovery in the drying chamber was directly created a positive impact on the drying performance. Moreover, the ventilation heat recovery of heat pump drying could dehumidify the inlet air before flowing to the drying chamber (condenser room). The dried fish quality from both cases were similar to the typical sun-dried fish.

**Keywords:** heat pump; drying system; greenhouse; recovery; marine products

### 1. บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนพลังงานมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานในด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานฟอสซิลและเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพจากรายงานของ Lawrence Livermore National Laboratory [1] รวมถึงข้อตกลงว่าด้วยการลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของแต่ละประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs) ส่งผลให้ประเทศไทยต้องมีแผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP) และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ของกระทรวงพลังงาน ในการลดต้นทุนด้านพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน ในการลดความเข้มการใช้พลังงานลง 30% ในปี พ.ศ.2579 ทางคณะผู้วิจัยพิจารณาว่ากลุ่มอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร เพื่อแปรรูป และเพิ่มมูลค่าสินค้า เป็นกลุ่มหนึ่งที่ควรส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานในกระบวนการผลิต เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้

ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (solar thermal) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง โดยมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.2 MJ/m<sup>2</sup>-day (ประเทศไทย) ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในทางตรงหรือทางอ้อมได้อย่างกว้างขวางตามบริบทของแหล่งทรัพยากรต่าง ๆ เป็นทุนเดิม และสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ ที่ผ่านมารอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มีการใช้รังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตความร้อนในการอบแห้งแบบ passive, active และ hybrid [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 สามารถดึงความร้อนจากแหล่งที่มี

อุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงได้ เมื่อเทียบกับการใช้หลอดไฟในการทำงานการใช้พลังงานจึงน้อยกว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศที่ใช้อบแห้งได้ผ่านการควบคุมที่เหมาะสม [6] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการอบลมร้อนธรรมดา [11-14] นอกจากนี้กระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ ส่งผลเชิงบวกต่อคุณภาพของวัสดุทางชีวภาพ แต่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน (Low Temperature and Long Time, LTLT) [15-17] ดังนั้นการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน และรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นแนวทางหนึ่งในการอบเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [18] ซึ่งตู้อบแห้งรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดเล็กกรณีไม่มีภาระอุณหภูมิภายในสูงประมาณ  $80-85^{\circ}\text{C}$  [19] สูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $20-30^{\circ}\text{C}$  [20] แปรผันตามค่ารังสี นอกจากนี้การศึกษาเชิงทดสอบการใช้พลังงานของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก ที่ประกอบจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใสในกรณีใช้อิวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อนครอบด้วยเรือนกระจกเสริมในระบบปิด ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าการเปิดตู้บรรยากาศที่พลังงานไฟฟ้า  $0.09\text{ kWh}$  (5.8% ของไฟฟ้าทั้งหมด) ต่ำกว่าประมาณ 86.15% ตามลำดับ [21] ที่ผ่านมามีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์ด้วยสถานะเรือนกระจก โดยใช้เรือนกระจกเป็นส่วนสร้างความร้อนให้กับอีวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน กรณีติดตั้งเรือนกระจก กับกรณีไม่มีเรือนกระจกในระบบเปิด ที่สถานะเดียวกัน โดยใช้ปลาทุแขกสดผ่าหลัง  $10\text{ kg}$  เป็นผลิตภัณฑ์ทดสอบ พบว่า กรณีมีเรือนกระจกมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC)  $1.531\text{ kWh/kg}$  ในขณะที่กรณีไม่มีเรือนกระจกมีค่า  $1.678\text{ kWh/kg}$  ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สมรรถนะด้านการอบแห้งกรณีติดตั้งเรือนกระจกต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งเรือนกระจก [22] โดยผลิตภัณฑ์มีลักษณะทางกายภาพเป็นไปตามลักษณะปลาแดดเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับตากแห้งตามธรรมชาติ [22-23] จึงมีแนวคิดพัฒนารูปแบบการหมุนวนอากาศลักษณะอื่น [24] เพื่อนำความร้อนที่งกกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มสมรรถนะระบบอบแห้งและปั๊มความร้อน

จากข้อมูลข้างต้น รังสีอาทิตย์และปั๊มความร้อนสามารถลดการใช้พลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในลักษณะการทำงานแบบผสมผสานกัน [25-26] สามารถทำงานได้สม่ำเสมอและเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งอย่างต่อเนื่องจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

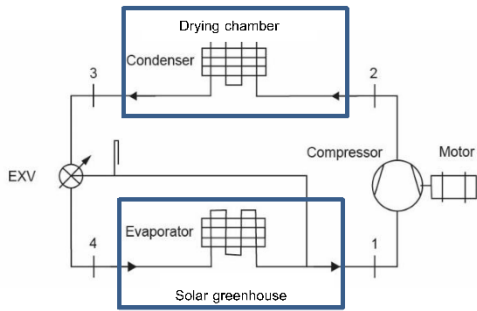
## 2. หลักการทำงาน

### 2.1 ชุดทดลอง

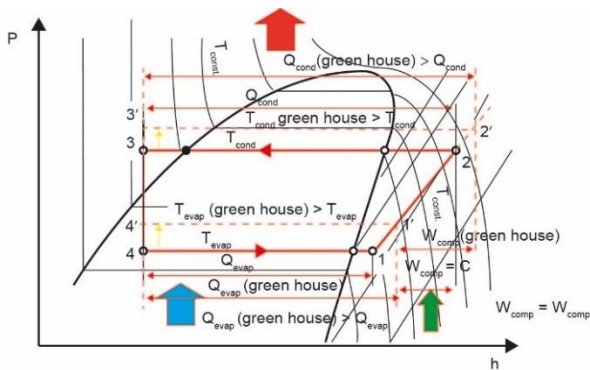
ระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจกสำหรับการศึกษานี้ เป็นการทดสอบกรณีมีภาระอบแห้งโดยใช้ปลาทุแขกสดผ่าหลัง  $2\text{ kg}$  ต่อถาด จำนวน  $5$  ถาด รวมทั้งสิ้น  $10\text{ kg}$  เป็นตัวอย่างในการอบแห้ง เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งผลิตภัณฑ์ (ความชื้นผลิตภัณฑ์, อัตราการอบแห้งและประสิทธิภาพการอบแห้ง) ของระบบอบแห้งขนาดกว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง ( $1,000\text{ mm} \times 1,500\text{ mm} \times 1,000\text{ mm}$ ) ภายในบรรจุถาดสแตนเลสที่เจาะรูเป็นช่องโปร่งขนาดกว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง ( $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ) สำหรับวางผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งจำนวน  $5$  ชั้นอบแห้งจากบนลงล่าง (shelf 1-5) และส่วนบนประกอบจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใสหนา  $6\text{ mm}$  ติดตั้งครอบอีวาปอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน ในกรณีติดตั้งเรือนกระจกพื้นของเรือนกระจก ทำจากแผ่นโลหะพ่นสีดำด้าน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก [22]



รูปที่ 2 แนวคิดพัฒนาระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก [22]

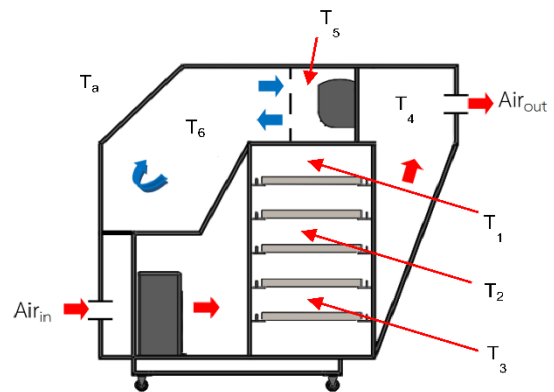


รูปที่ 3 ไดอะแกรม P-h ระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก กรณีที่กัลังที่ป้อนที่คอมเพรสเซอร์คงที่ [22]

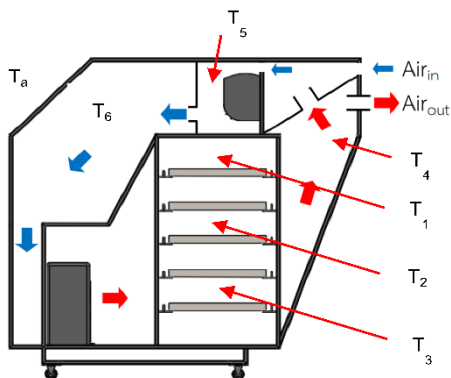
การทำงานของระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก สำหรับการศึกษาี้ แหล่งความร้อนหลักของระบบได้มาจากรังสีอาทิตย์ ผ่านปรากฏการณ์ของสถานะเรือนกระจก ส่งผลให้อุณหภูมิในเรือนกระจกสูงขึ้นโดยทำงานร่วมกับระบบปั๊มความร้อน เพื่อให้ระบบมีความเสถียรเชิงอุณหภูมิ และความต่อเนื่องของกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์มากขึ้น โดยอาศัยความได้เปรียบเชิงพลังงานของปั๊มความร้อนในการยกระดับของอุณหภูมิคุณภาพต่ำให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยการศึกษาี้จะศึกษารูปแบบการหมุนวนอากาศในระบบ 2 ลักษณะคือระบบเปิด และระบบผสม โดยติดตั้งหันหน้าไปทางทิศใต้เพื่อตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ และรับรังสีได้ตลอดการทดลอง โดยประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศขนาด 9,000 BTU/h ใช้สารทำงาน R 32 เป็นสารทำงานในระบบ

## 2.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลอง เพื่อดำเนินการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งกรณีติดตั้งเรือนกระจก ในการหมุนวนอากาศมาใช้ในระบบอบแห้ง 2 กรณีศึกษา กรณีระบบเปิดเทียบกับระบบผสม 1. กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) อากาศภายนอกจะไหลผ่านคอนเดนเซอร์เข้าสู่ห้องอบแห้ง และถูกปล่อยทิ้งสู่ภายนอกทั้งหมด ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ จึงขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศภายนอก 2. กรณีระบบผสม (case 2) เป็นการนำอากาศระบายออกส่วนหนึ่งมาใช้ใหม่ร่วมกับอากาศภายนอก ในอัตราส่วน 4:1 หรือ 80% ของอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยจะดึงอากาศจากบรรยากาศภายนอก 20% มาผสมกันและดึงความชื้นออกจากอากาศ (dehumidification) ก่อนเข้าห้องอบแห้งโดยอีวาพอเรเตอร์ ก่อนรับความร้อนจากคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนเพื่อเข้าสู่ห้องอบแห้ง เพราะฉะนั้นอากาศที่เข้าห้องอบแห้งจึงมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โดยทำการทดสอบระบบ 2 ชุดพร้อมกัน ที่สภาวะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4 จุดวัดอุณหภูมิ และการหมุนวนของอากาศในการอบแห้งระบบเปิด (case 1) [22]



รูปที่ 5 จุดวัดอุณหภูมิและการหมุนวนของอากาศ ในการอบแห้งระบบผสม (case 2)

โดยกำหนดให้

- T1 = จุดวัดอุณหภูมิชั้นที่ 1
- T2 = จุดวัดอุณหภูมิชั้นที่ 3
- T3 = จุดวัดอุณหภูมิชั้นที่ 5
- T4 = จุดวัดอุณหภูมิที่ทางออก
- T5 = จุดวัดอุณหภูมิที่เข้าเครื่องระเหย
- T6 = จุดวัดอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องระเหย
- TR = อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง  
 $((T1+T2+T3+T4)/4)$
- Ta = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

โดยใช้เครื่องต้นแบบ 2 ชุด ทดลองที่ความเร็วลม 3 m/s ในช่วงเวลา 9:00-15:00 เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน (6 hrs) โดยควบคุมอุณหภูมิสูงสุดด้านคอนเดนเซอร์สูงสุดที่ 60°C และจะต่อใหม่ในช่วงเวลา 5 นาทีถัดมา โดยตั้งค่าอุณหภูมิต่อ-ตัดการทำงานของปั๊มความร้อนที่ตำแหน่งอากาศเข้าคอนเดนเซอร์ที่ = 5°C คือ 55°C และ 60°C เพื่อทดสอบสมรรถนะ บันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน ทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์ด้วย Pyranometer (Kipp & Zonen) Model CM11B ความละเอียด ± 2W/m<sup>2</sup> วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีความละเอียด ± 0.5°C บันทึกข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิการทดลอง ทุก ๆ 1 นาที โดยใช้ data logger (Yokogawa) Model MV 2000 และวัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ

ปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจกแต่ละกรณีศึกษา

ผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดลอง คือปลาทุแห้งผาลังขนาดใหญ่ ขนาดกว้าง × ยาว ประมาณ 10 cm × 22 cm ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 308% d.b. โดยทำการอบแห้งปลาทุแห้งผาลังทั้งหมด 10 kg (ปลาทุแห้งสด) ต่อเครื่องต้นแบบ 1 ชุด แบ่งใส่ถาดละ 2 kg จำนวน 5 ถาด ในการจัดวาง 5 ชั้น โดยเรียงลำดับ 1-5 (บนลงล่าง) ในห้องอบแห้งที่แยกออกมาจากเรือนกระจก โดยรับความร้อนจากชุดคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่รับรังสีอาทิตย์โดยตรงเป็นระบบอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (Indirect Solar Drying; ISD) และเตรียมปลาอีก 2 kg ใส่ถาดนอกเพื่อตากแห้งตามธรรมชาติ ทำการเก็บบันทึกค่าน้ำหนักแต่ละถาดทุก ๆ 120 นาที โดยเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Miras Sartorius ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg ที่มีค่าความละเอียด 5 g นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ สำหรับการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ (moisture content) และอัตราการอบแห้ง โดยน้ำหนักแห้ง ทำโดยการนำปลาจำนวน 1 kg มาอบในตู้อบไฟฟ้าขนาด 3,000 W ยี่ห้อ Binder ตั้งอุณหภูมิ 103°C โดยจะทำการอบแห้ง 48 hrs (ปลาทุแห้งผาลังสด 1 kg เป็นน้ำหนักแห้ง 0.235 kg)

### 3. ทฤษฎี

#### 3.1 การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์

สำหรับการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง

การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ (moisture content) นั้น ส่วนใหญ่จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (wet basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นเป็นหลักดังนี้

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

2. เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (dry basis) เป็นการวัด โดยใช้น้ำหนักของผลผลิตแห้งเป็นหลักดังนี้

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

เมื่อ  $W_w$  คือ น้ำหนักของน้ำในเนื้อของวัสดุ (kg)

$W_d$  คือ น้ำหนักของเนื้อวัสดุแห้ง (kg)

จากสมการความชื้นมาตรฐานเปียกมีค่าไม่เกิน 100% ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง อาจมีค่าเกิน 100% โดยงานวิจัยนี้จะบอกความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยที่อัตราการอบแห้ง พิจารณาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา

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

### 3.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

การคำนวณประสิทธิภาพในการอบแห้งปลาทุแวก ผ่าหลัง ในระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก (drying efficiency) วิเคราะห์จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานความร้อนที่จ่ายให้เครื่องอบแห้งใช้สมการดังนี้

$$\text{drying efficiency} = \frac{h_{fg} \Delta W}{(It.A)\Delta t + (\Delta E)\Delta t} \quad (4)$$

เมื่อ  $\Delta W$  คือมวลของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ (kg)

$h_{fg}$  คือค่าความร้อนแฝง (kJ/kg)

$It$  คือค่ารังสีอาทิตย์ (kW/m<sup>2</sup>)

$A$  คือพื้นที่รับรังสีส่วนห้องอบแห้ง (2.2 m<sup>2</sup>)

$\Delta t$  คือเวลาในการอบแห้ง (hrs)

$\Delta E$  คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (kW)

### 3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ(SEC) คือพลังงานที่ใช้ต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{SEC} = \frac{E_t}{\Delta W} \quad (5)$$

เมื่อ  $E_t = ItA\Delta t + E_e$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ดังนี้

$$\text{SEC} = \frac{ItA\Delta t + E_e}{\Delta W} \quad (6)$$

### 3.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption, SEEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ(SEEC) คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg ของวัสดุ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{SEEC} = \frac{E_e}{\Delta W} \quad (7)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

SEEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (kWh/kg)

$E_t$  คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ (kWh)

$E_e$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

### 3.5 อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER)

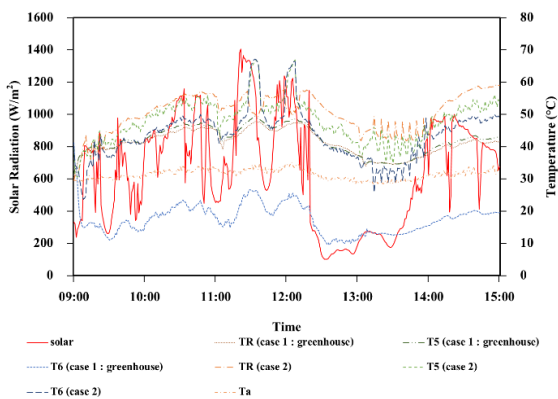
อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน เป็นการอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ในการระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{EER} = \frac{h_{fg} (\Delta W / \Delta t)}{E_e} \quad (8)$$



#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทำการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก กรณีหมุนวนอากาศในระบบเปิด (case 1:greenhouse) เทียบกับระบบผสม (case 2) โดยใช้เครื่องต้นแบบ 2 ชุด ทำงานที่สภาวะเดียวกัน โดยควบคุมอุณหภูมิสูงสุดด้านคอนเดนเซอร์สูงสุดที่  $60^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อประเมินศักยภาพเชิงอุณหภูมิต่าง ๆ ของระบบ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้



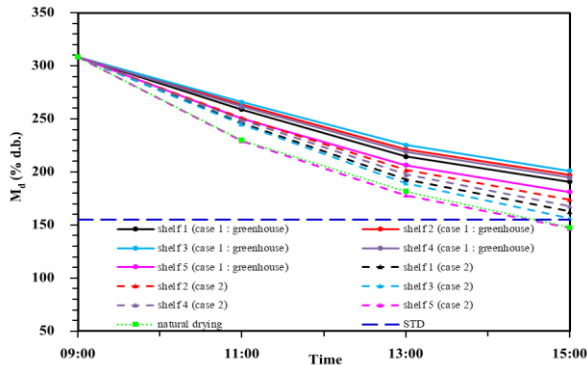
รูปที่ 6 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิจุดต่าง ๆ กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) เทียบกับระบบผสม (case 2)

จากรูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบอบแห้ง พบว่ากรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) และระบบผสม (case 2) มีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง (TR) ประมาณ  $35-48^{\circ}\text{C}$  และ  $40-60^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ แปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยระบบผสม (case 2) มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องระเหย (T6) กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) มีอุณหภูมิประมาณ  $10-25^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากได้รับอิทธิพลของอากาศเย็นที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์ ซึ่งพิจารณาได้ว่ากรณีมีเรือนกระจกความร้อนในถูกดึงไปใช้เป็นแหล่งความร้อนในการเพิ่มคุณภาพพลังงานความร้อนส่งไปยังห้องอบแห้งของปั๊มความร้อน ในขณะที่กรณีระบบผสม (case 2) มีอุณหภูมิสูงกว่ามีค่าประมาณ  $30-60^{\circ}\text{C}$  แปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ และการทำงานของปั๊มความร้อน ตามลำดับ

เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากอากาศร้อนที่หมุนวนกลับเข้ามาสู่ระบบผ่านอีวาพอเรเตอร์ ซึ่งพิจารณาได้ว่ากรณีมีเรือนกระจก ความร้อนในถูกดึงไปใช้เป็นแหล่งความร้อนในการเพิ่มคุณภาพพลังงานความร้อนส่งไปยังห้องอบแห้งของปั๊มความร้อน ส่งผลให้มีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งของกรณีระบบผสมสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กรณีการตากแห้งตามธรรมชาติ (natural drying) มีอุณหภูมิประมาณ  $32^{\circ}\text{C}$  ที่ค่ารังสีอาทิตย์ประมาณ  $400-1300\text{ W/m}^2$  ตามลำดับ

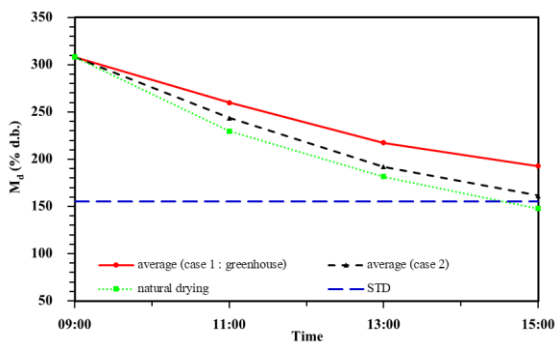
จากรูปที่ 7 ระบบสามารถอบแห้งปลาทุแคกสดผ่าหลังที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 308 (%d.b.) จนผลิตภัณฑ์เหลือความชื้นสุดท้ายในแต่ละชั้นอบแห้ง กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) ชั้นที่ 1 เท่ากับ 190.61 (% d.b.) ชั้นที่ 2 เท่ากับ 196.94 (% d.b.) ชั้นที่ 3 เท่ากับ 201.02 (% d.b.) ชั้นที่ 4 เท่ากับ 194.69 (% d.b.) และชั้นที่ 5 เท่ากับ 181.22 (% d.b.) ในขณะที่กรณีระบบผสม (case 2) สามารถอบแห้งปลาทุแคกสดผ่าหลังจนผลิตภัณฑ์เหลือความชื้นสุดท้ายในแต่ละชั้นอบแห้ง ชั้นที่ 1 เท่ากับ 162.65 (% d.b.) ชั้นที่ 2 เท่ากับ 173.88 (% d.b.) ชั้นที่ 3 เท่ากับ 156.33 (% d.b.) ชั้นที่ 4 เท่ากับ 167.76 (% d.b.) และชั้นที่ 5 เท่ากับ 147.14 (% d.b.) แปรผันตามอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย โดยความชื้นในแต่ละชั้นจะแตกต่างกัน จากการแยกชั้นของอุณหภูมิ โดยชั้นที่ 1-4 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างปริมาณความชื้นแต่ละชั้นจะมากขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิมลร้อนซึ่งส่งผลชัดเจน ในขณะที่ชั้นที่ 5 ซึ่งเป็นชั้นล่างสุดอยู่ในตำแหน่งที่ติดตั้งพัดลมของชุดปั๊มความร้อน ส่งผลให้ได้รับอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อน ผ่านการพาความร้อนมากกว่าชั้นอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การตากแห้งตามธรรมชาติ (natural drying) ผลิตภัณฑ์เหลือความชื้นสุดท้าย 147.76 (% d.b.) พบว่าระบบผสม (case 2) ความชื้นของผลิตภัณฑ์ชั้นที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกับความชื้นของปลาแดดเดียวอ้างอิง (STD) [23] ที่ความชื้นประมาณ 155 (% d.b.) ในขณะที่ชั้นอื่น ๆ การตากแห้งตามธรรมชาติ (natural drying) มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าจากปัจจัยของการรับการแผ่รังสีโดยตรง

และการระบายความชื้นที่สูงกว่าจากการระเหยสู่บรรยากาศ เปิดโดยตรง



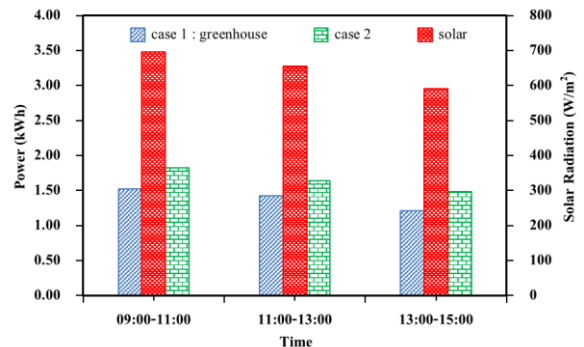
รูปที่ 7 ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาทุบกึ่งในแต่ละชั้น ออบแห้งที่เวลาต่าง ๆ ของระบบอบแห้งกรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) และระบบผสม (case 2) เทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ

จากรูปที่ 8 แสดงความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาทุบกึ่งเฉลี่ยทุกชั้นอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ พบว่าความชื้นเฉลี่ยผลิตภัณฑ์สุดท้าย กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) มีค่าเท่ากับ 192.90 (%d.b.) กรณีระบบผสม (case 2) มีค่าเท่ากับ 161.55 (%d.b.) และตากแห้งตามธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 147.76 (%d.b.) ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน พบว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ (natural drying) มีความชื้นเฉลี่ยต่ำที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับความชื้นของปลาแดดเดียวอ้างอิง (STD) [23] ที่ความชื้นประมาณ 155 (%d.b.)



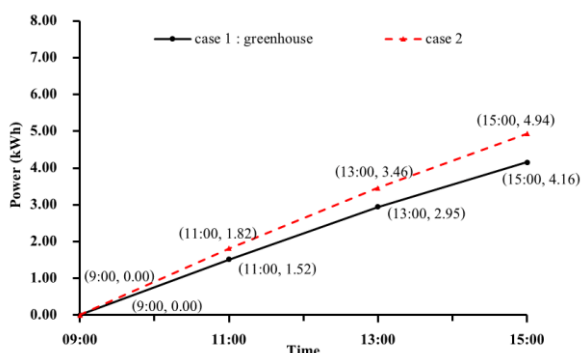
รูปที่ 8 ความชื้นมาตรฐานแห้งของปลาทุบกึ่งเฉลี่ยทุกชั้น ออบแห้งที่เวลาต่าง ๆ ของระบบอบแห้งกรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) และระบบผสม (case 2) เทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ

จากการทดสอบการอบแห้ง 2 กรณีศึกษา ที่สภาวะเดียวกัน พบว่าในอัตราการอบแห้งกรณีระบบผสม (case 2) สูงกว่ากรณีระบบเปิด(case 1) จากปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้ง และการระบายอากาศหรือความชื้นของระบบ โดยการนำอากาศร้อนระบายออกจากห้องอบแห้งกรณีระบบผสม (case 2) ส่งผลกระทบเชิงบวกต่อระบบปั๊มความร้อนในแง่ของการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่โดยตรงผ่านการหมุนวนกลับเข้าสู่ระบบ และโดยทางอ้อมผ่านการดึงความร้อนจากอากาศร้อนทิ้งโดยระบบปั๊มความร้อน และเป็นการลดความชื้นของอากาศ (dehumidification) ก่อนเข้าห้องอบแห้งพร้อมกัน ในขณะที่การตากแห้งตามธรรมชาติ รับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นหลักผ่านกลไกการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน โดยพบว่าการตากแห้งตามธรรมชาติในกรณีศึกษานี้จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่ากรณีการใช้ระบบฯ เนื่องจากพฤติกรรมการระเหยของความชื้นอาศัยปัจจัยของอุณหภูมิ และความชื้นของตัวกลาง ดังนั้นการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งความร้อนได้จากการแผ่รังสีอาทิตย์โดยตรง และการตากเพียง 1 ชั้น เปิดสู่บรรยากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์สูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลไปสู่อากาศมากกว่า การอบแห้งในตู้อบซึ่งเป็นพื้นที่ปิดที่แบ่งชั้นการอบแห้ง 5 ชั้น ดังนั้นการอบแห้งโดยระบบฯ ในกรณีศึกษานี้ มีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า



รูปที่ 9 พลังงานไฟฟ้าของระบบอบแห้ง กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) เทียบกับระบบผสม (case 2) และ ค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่สภาวะเดียวกัน





รูปที่ 10 พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) และระบบผสม (case 2)

จากรูปที่ 9-10 แสดงพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของกรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) เทียบกับระบบผสม (case 2) ช่วงเวลา 9:00-15:00 น. พบว่าระบบผสม (case 2) ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 4.97 kWh และกรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 4.16 kWh พบว่ากรณีระบบผสม (case 2) ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดสูงกว่า กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) เท่ากับ 0.81 kWh หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 19% ที่สภาวะเดียวกัน เนื่องจากภาระการทำงานของปั๊มความร้อนมากขึ้นตามอุณหภูมิของแหล่งความร้อนจากเรือนกระจกและความร้อนจากอากาศระบายออกมาใช้ใหม่ และอากาศภายนอก ส่งผลให้ปั๊มความร้อนทำงานอย่างต่อเนื่อง

พิจารณาค่าใช้จ่ายดำเนินการค่าไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการอบแห้งโดยระบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก กรณีระบบเปิด (case 1:greenhouse) เทียบกับระบบผสม (case 2) อ้างอิงระบบประมาณการค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรณีประเภทที่ 1.1 บ้านอยู่อาศัย (อัตราปกติ) ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 1.1.2 ใช้พลังงานไฟฟ้าเกิน 150 หน่วยต่อเดือน (อัตรา 11.49 บาทต่อหน่วย) ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายดำเนินการเป็นค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 48 บาทต่อวัน และ 58 บาทต่อวัน หรือ 14 และ 16 บาทต่อปลาแดดเดียวแห้ง 1 kg ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนรังสีอาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก กรณีระบบเปิด (case 1) และระบบผสม (case 2)

ตัวแปร	(case 1)	(case 2)	หน่วย
พลังงานไฟฟ้า	4.16	4.94	kWh
มวลน้ำที่หายไป	2.823	3.592	kg
เวลาอบแห้ง	6	6	hrs
ค่ารังสีเฉลี่ย	649.862	649.862	W/m <sup>2</sup>
SEC	4.512	3.763	kWh/kg
SEEC	1.474	1.375	kWh/kg
EER	4.473	4.792	

จากข้อมูลตารางที่ 1 พบว่าระบบเปิด (case 1) มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 4.512 kWh/kg ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 1.474 kWh/kg และอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เท่ากับ 4.473 ส่วนกรณีระบบผสม มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 3.763 kWh/kg และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 1.375 kWh/kg และอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) เท่ากับ 4.792 พบว่าระบบผสม (case 2) มีสมรรถนะทางด้านพลังงานสูงกว่าระบบเปิด ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะทางด้านพลังงาน คือมวลของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ (kg) ที่จะเพิ่มขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิของการอบแห้ง อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่า ตามลำดับ ซึ่งเทอมสมรรถนะทั้งสองดังกล่าวให้ผลลัพธ์ไม่เป็นทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 11 ลักษณะทางกายภาพของปลาที่อบแห้งในระบบผสม (case 2) เป็นไปตามลักษณะปลาแดดเดียว

ดังนั้นจึงพิจารณาประสิทธิภาพการอบแห้งประกอบซึ่งประสิทธิภาพการอบแห้งจะแปรผกผันกับเวลา และแปรผันตามการใช้พลังงาน แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองที่สภาวะเดียวกัน โดยใช้เวลาและรังสีอาทิตย์เท่ากัน ดังนั้นปัจจัยหลักในกรณีศึกษานี้คือและการใช้พลังงานไฟฟ้าและมวลของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิโดยพลังงานส่วนหนึ่งที่ใช้ไปคือรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนซึ่งสามารถตอบโจทย์การอนุรักษ์พลังงานในส่วนของการใช้เสริมระบบบีบความร้อนซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้เปรียบเชิงพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่ากรณีระบบเปิด (case 1) มีค่าประสิทธิภาพการอบแห้ง 14.81% และกรณีระบบผสม (case 2) มีค่าประสิทธิภาพการอบแห้ง 17.58% ตามลำดับ ขึ้นกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้งและค่ารังสีอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ตามลำดับ

## 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาเชิงทดสอบอิทธิพลของการนำอากาศระบายออกมาใช้ใหม่ต่อสมรรถนะระบบบีบความร้อนรังสี

อาทิตย์เสริมด้วยเรือนกระจก ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางทะเล โดยใช้เรือนกระจกเป็นส่วนสร้างความร้อนให้กับบีบความร้อน โดยศึกษาการหมุนวนอากาศมาใช้ในระบบอบแห้ง 2 กรณี คือระบบเปิด (case 1) เทียบกับระบบผสม (case 2) ที่สภาวะเดียวกัน พบว่าการนำอากาศร้อนระบายออกจากห้องอบแห้งกรณีระบบผสม (case 2) ส่งผลกระทบเชิงบวกต่อระบบบีบความร้อนในแง่ของการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยตรง ผ่านการหมุนวนกลับเข้าสู่ระบบ และโดยทางอ้อมผ่านการดึงความร้อนจากระบบบีบความร้อนเป็นการลดความชื้นออกจากอากาศ (dehumidification) ก่อนเข้าห้องอบแห้ง มีความสัมพันธ์ต่อการใช้พลังงานในระบบมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากภาระการทำงานของบีบความร้อนมากขึ้นตามอุณหภูมิของแหล่งความร้อนจากเรือนกระจก และความร้อนจากอากาศระบายออกมาใช้ใหม่และอากาศภายนอก ส่งผลให้บีบความร้อนทำงานอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าที่ค่าประสิทธิภาพการอบแห้ง 17.58% ของระบบผสม และ 14.81% ของระบบเปิดตามลำดับ โดยทั้ง 2 กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์มีลักษณะทางกายภาพเป็นไปตามลักษณะปลาแดดเดียว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติที่ความชื้นประมาณ 147.76 (%d.b.) ที่สภาวะเดียวกัน ระบบอบแห้งแบบบีบความร้อนรังสีอาทิตย์ด้วยสภาวะเรือนกระจกต้องพัฒนารูปแบบการอบแห้งในรูปแบบการหมุนวนอากาศลักษณะอื่น เพื่อเพิ่มสมรรถนะต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2561 ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

## 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., Lazaro, 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*, 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 14<sup>th</sup> 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. (In 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 28<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 28)*; khonkaen, Thailand. (In Thai).
- [22] Jareanjit J, Boonyanuwat S. (2019). Developed a prototype of Solar Heat Pump systems with greenhouse assisted for drying marine products, paper presented in *the Conference of the 18<sup>th</sup> CMU Annual Conference on Heat & Mass Transfer*; Krabi, Thailand. (In Thai).
- [23] Jareanjit, J., Jeentada, W. and Naemsai T. (2014). Effect of Moisture Ventilation and Multi-drying Shelf on Drying Performance of Round scads (*Decapterus maraudsi*, Temminck & Schlegel). *KKU Res. J.*, vol. 19(2), pp. 320-332. (In Thai).
- [24] Naemsai, T., Jareanjit, J. and Thongkaew, K. (2019). Experimental investigation of solar assisted heat pump dryer with heat recovery for the drying of chili peppers. *J. Food Process Eng.*, vol. 42 (6), pp. 1–10.
- [25] Koşan, M., Demirtaş, M., Aktaş, M. and Dişli, E. (2020). Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system. *Solar Energy*, vol. 199, pp. 657–672.
- [26] Singh, A., Sarkar, J. and Sahoo, R.R. (2020). Experimentation on solar-assisted heat pump dryer: Thermodynamic, economic and exergoeconomic assessments. *Solar Energy*, vol. 208, pp.150–159