

## อิทธิพลของการหมุนวนอากาศในระบบเปิด-ปิดต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งด้วย ปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก

### Influence of open-close air circulation systems on Performance of Combined Heat Pump and Solar Greenhouse Drying System

จาร์วัฒน์ เจริญจิต\* และสิทธิพร บุญญานุวัตร

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
เลขที่ 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอ เมือง จังหวัด สงขลา 90000  
\*ติดต่อ: Email:j.jaruwat@gmail.com, 086-6856747, 074-315185

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยทดสอบพิจารณาผลของการหมุนวนอากาศในระบบเปิด-ปิด ต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก 2 กรณีศึกษา ที่สภาวะเดียวกัน คือ 1. ระบบเปิด (opened loop system) และ 2. ระบบปิด (closed loop system) ทดสอบในช่วงเวลา 9:00 - 21:00 น. (12 ชั่วโมงต่อวัน) โดยทดลองอบพริก 20 kg ในห้องอบด้านคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 วัน จากการทดสอบพบว่า ระบบปิด ระบบเปิด และการตากแบบธรรมชาติ สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์เหลือความชื้นสุดท้าย เท่ากับ 3.90, 17.62 และ 27.50 (% w.b.) ตามลำดับ โดยระบบปิดใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 11.7 kWh ซึ่งต่ำกว่าระบบเปิดประมาณ 25.95% มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 3.85 kWh/kg ซึ่งต่ำกว่าระบบเปิดประมาณ 24.65% นอกจากนี้ ระบบปิดลดค่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) ลง 40.00% จากค่า SEEC 1.35 kWh/kg ดังนั้นการหมุนวนอากาศในระบบปิด เป็นการนำความร้อนทิ้งมาใช้ใหม่ (waste heat recovery) มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะของระบบ เนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจากการนำความร้อนทิ้งมาใช้ใหม่ ลดการสูญเสียความร้อนจากระบบ และการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนที่คอมเพรสเซอร์ ตามลำดับ จึงใช้กรณีดังกล่าวเปรียบเทียบระบบต่อไปในอนาคต

**คำหลัก:** รังสีอาทิตย์; ปั๊มความร้อน; ระบบอบแห้ง; เรือนกระจก

#### Abstract

This research aimed to develop a system of combined solar greenhouse and heat pump dryer. The effect of open and closed loop air system on drying performance of the dryer was experimentally investigated. The operating conditions composed of two cases: the open-loop system and the closed-loop system. In the experiment, the red chili of 20 kg was dried during 9.00 am to 9.00 pm (12 h/day). The controlled drying condition included the drying temperature inside the condenser room of 60°C and total drying time of 3 days. From the experimental results, the closed-loop system, open-loop system and natural sun system offered the final moisture content of 3.90, 17.62 and 27.50 (% w.b.),

respectively. The energy consumption of the closed-loop system giving 11.7 kWh, which was lower than that of open-loop system about 25.95%. The SEC of closed-loop system (3.85 kWh/kg) was also lower than that of open-loop system around 24.65%. Furthermore, the closed-loop system could decrease the electrical energy consumption significantly 40.00% from the SEEC of open-loop system (1.35 kWh/kg). Therefore, the closed-loop system defined as the heat recovery system had a significant effect on the enhancement of the drying performance. The main reason that the increase in the drying temperature from the heat recovery system could reduce heat loss from the system and the electrical energy consumption of the compressor, respectively. This system will be further examined in the future.

**Keywords:** Solar; heat pump; dryer system; green house

## 1. บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนพลังงานมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานฟอสซิลและเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรายงานของ Lawrence Livermore National Laboratory [1] นอกจากนี้การกำหนดข้อตกลงว่าด้วยการลดก๊าซเรือนกระจกแต่ละประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs) เป็นผลให้นานาชาติตระหนักในหน้าที่ในการลดการปลดปล่อยสำหรับประเทศไทยได้ดำเนินการในเรื่องนี้โดยการกำหนดแผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP) และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ของกระทรวงพลังงาน ในการลดต้นทุนด้านพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน ในการลดความเข้มการใช้พลังงานลงร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2579 ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ประกอบกับประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร เป็นจำนวนมาก ซึ่งทางคณะผู้วิจัยจึงพิจารณาว่ากลุ่มอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร เพื่อแปรรูป และเพิ่มมูลค่าสินค้า เป็นกลุ่มหนึ่งที่ควรส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานในกระบวนการผลิต เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (solar thermal)

ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง โดยมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.2MJ/m<sup>2</sup>-day (ประเทศไทย) ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ ในทางตรงหรือทางอ้อมได้อย่างกว้างขวาง ตามบริบทของแหล่งทรัพยากรต่างๆ เป็นทุนเดิม และสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ ที่ผ่านการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มีการใช้รังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตลมร้อนในการอบแห้งแบบ 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 สามารถดึงความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงได้ เมื่อเทียบกับการใช้หลอดไฟฟ้าในการทำงานการใช้พลังงานจึงน้อยกว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศที่โซบแห้งได้ ผ่านการควบคุมที่เหมาะสม [6] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการอบลมร้อนธรรมดา [11-14] ประกอบกับกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ ส่งผลเชิงบวกต่อคุณภาพของวัสดุทางชีวภาพ

แต่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน (Low Temperature and Long Time, LTLT) [15-17] ดังนั้นการอบแห้งด้วยบีมความร้อน และรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เป็นแนวทางหนึ่งในการอบเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [18] ซึ่งตู้อบแห้งรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจกกรณีไม่มีภาระอบแห้งอุณหภูมิภายในสูงประมาณ 80-85°C [19] หรือสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 20-30°C [20] แปรผันตามค่ารังสี นอกจากนี้การศึกษาเชิงทดสอบการใช้พลังงานของระบบอบแห้งแบบบีมความร้อนร่วมเรือนกระจก ที่ประกอบจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ในกรณีที่อีวาพอเรเตอร์ของบีมความร้อนครอบด้วยเรือนกระจกในระบบปิด ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าการเปิดสู่บรรยากาศ และมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบในเรือนกระจกปกติ และการตากธรรมชาติ [21-22]

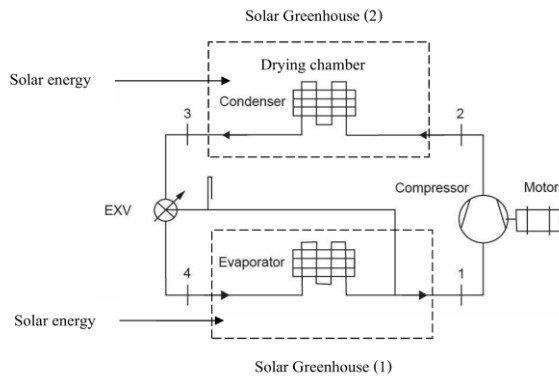
จากข้อมูลข้างต้น พบว่าระบบบีมความร้อนส่วนใหญ่จะอาศัยการดึงความร้อนจากบรรยากาศที่อุณหภูมิต่ำ หรือตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยตรงซึ่งต้องใช้สารทำงานปริมาณมากและมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าครีบอลิ่วพอเรเตอร์ของบีมความร้อน ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานในการนำรังสีอาทิตย์และบีมความร้อนทำงานแบบผสมผสาน โดยครีบอลิ่วพอเรเตอร์ของบีมความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อนของบีมความร้อน มาทดสอบบนตัวแปรของการหมุนวนอากาศในระบบเปิด-ปิด ในระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้ง ลดการใช้พลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำงานได้สม่ำเสมอและเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งอย่างต่อเนื่องจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

การทำงานของระบบอบแห้งแบบบีมความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก สำหรับศึกษานี้ แหล่งความร้อนหลักของระบบได้มาจากรังสีอาทิตย์ ผ่านปรากฏการณ์ของสภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ส่งผลให้อุณหภูมิในเรือนกระจกสูงขึ้นตามลำดับ

โดยอาศัยระบบบีมความร้อนเป็นแหล่งความร้อนเสริมสามารถเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์มากขึ้น โดยอาศัยความได้เปรียบเชิงพลังงานของบีมความร้อนในการยกระดับของอุณหภูมิคุณภาพต่ำให้สูงขึ้นจากกระบวนการดังกล่าว โดยการศึกษานี้จะใช้บรรยากาศภายในเรือนกระจก (greenhouse 1) (เรือนกระจกครอบอีวาพอเรเตอร์ของบีมความร้อน) ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนด้านอีวาพอเรเตอร์ของบีมความร้อน และติดตั้งคอนเดนเซอร์ในเรือนกระจกอีกห้องหนึ่ง (greenhouse 2) ซึ่งติดตั้งหันหน้าไปทางทิศใต้ เพื่อหลังคาโค้งตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ และรับรังสีได้ตลอดการทดลอง โดยประยุกต์ระบบปรับอากาศขนาด 9000 BTU ใช้สารทำงาน R 32 เป็นสารทำงานในระบบ ติดตั้งให้ทำงานในลักษณะของบีมความร้อน เพื่อให้ระบบดึงความร้อนจากอากาศในเรือนกระจก (greenhouse 1) และยกระดับพลังงานความร้อนไปยังคอนเดนเซอร์ในเรือนกระจก (greenhouse 2) สำหรับการอบแห้งต่อไป

จากแนวคิดดังกล่าวส่งผลให้ระบบอบแห้งแบบบีมความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก มีห้องอบแห้ง 2 ชุดในเครื่องเดียวกัน คือ (greenhouse 1-2) โดย (greenhouse 1) ซึ่งนอกเหนือจากเป็นแหล่งความร้อนให้บีมความร้อนสำหรับ (greenhouse 2) แล้ว อีวาพอเรเตอร์ของบีมความร้อนในห้องอบสามารถควบคุมความชื้นออกจาก (greenhouse 1) ได้ในเวลาเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้เป็นห้องอบแห้งที่มีอุณหภูมิระดับกลางแต่มีความชื้นต่ำได้ ในขณะที่ (greenhouse 2) เป็นห้องอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจากปัจจัยของคอนเดนเซอร์ในเรือนกระจก ส่งผลให้สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นได้ง่ายกว่าระบบอื่น สามารถผลิตอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าระบบบีมความร้อนระบบเดียวใน (greenhouse 2) และสามารถผลิตอากาศที่มีอุณหภูมิปานกลางความชื้นต่ำใน (greenhouse 1) สำหรับอบแห้งได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.



รูปที่ 1 แนวคิดพัฒนาระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก

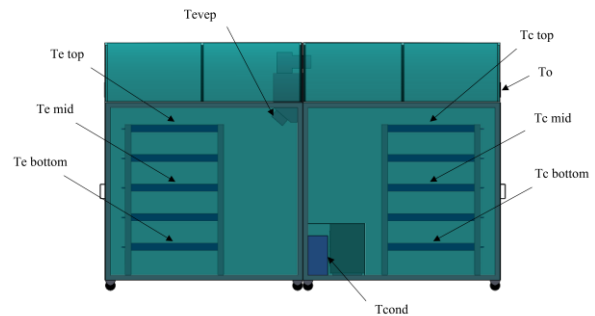
## 2.1 ชุดทดลอง

ระบบอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตรอุณหภูมิต่ำโดยการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ทำจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใสโปร่งแสง มีขนาด กว้าง×ยาว×สูง (120 cm × 200 × 180 cm) และมีหลังคาในลักษณะโค้งโดยมีรัศมี 60 cm และมีชั้นวางถาดจำนวน 5 ชั้น ภาชนะในการใส่พริกโดยมีขนาด กว้าง×ยาว×สูง (90 cm × 100 cm × 8 cm) โดยแต่ละชั้นมีระยะห่าง 30 cm และห่างจากพื้นของตู้อบ 30 cm มีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะและขนาดของโครงสร้างเครื่องอบพริก

โครงสร้างชุดการนำความร้อนมาใช้ใหม่ (heat recovery) และชุดอีวาโปเรเตอร์ทั้งความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์ตู้อากาศคอลล์เย็น (evaporator) โดยการทำช่องอากาศออกมาด้านหน้าขนาด กว้าง×ยาว (8 cm × 68 cm) ช่องอากาศเข้าด้านบน-ด้านหลังขนาด กว้าง×ยาว (9.5 cm × 28 cm) และที่ช่องลมได้ทำเป็นประตูสามารถเปิด-ปิดได้ เพื่อปรับเปลี่ยนไปตามกรณีศึกษาการไหลวนของอากาศ ในการทดลองติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างตำแหน่งเครื่องอบพริกและจุดวัดอุณหภูมิเครื่องอบแห้ง

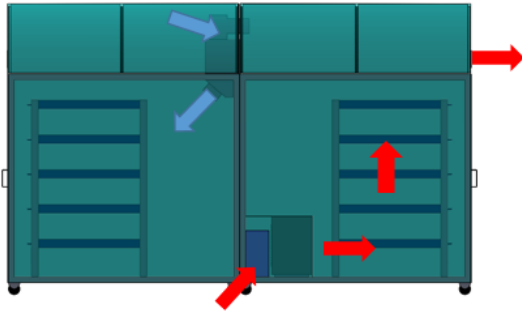
เมื่อ

- Tc = จุดวัดอุณหภูมิถาดอบแห้งด้านคอนเดนเซอร์
- Te = จุดวัดอุณหภูมิถาดอบแห้งด้านอีวาโปเรเตอร์
- To = จุดวัดอุณหภูมิที่ทางออก
- Tcond = จุดวัดอุณหภูมิที่คอนเดนเซนเซอร์
- Tevap = จุดวัดอุณหภูมิที่อีวาโปเรเตอร์

## 2.2. วิธีการทดลอง

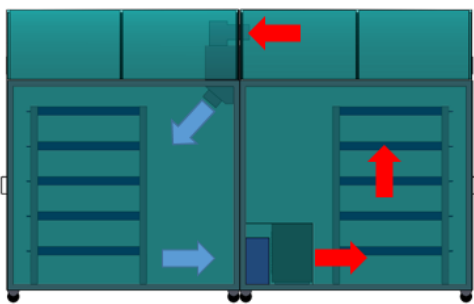
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลอง โดยการทดลองในช่วงนี้ใช้ตู้อบด้านคอนเดนเซอร์เพียงด้านเดียวเป็นห้องอบแห้ง เพื่อดำเนินการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบอบแห้งที่สภาวะเดียวกันใน 2 กรณีศึกษา คือ การหมุนวนอากาศในระบบเปิด(opened loop system) และระบบปิด (closed loop system)

## ETM - 001



รูปที่ 4 การหมุนวนอากาศระบบเปิด

ระบบเปิด (opened loop system : case 2) การหมุนวนอากาศในระบบเปิด อากาศจะเข้าสู่ห้องอบด้านคอนเดนเซอร์ผ่านทางช่องทางเข้าด้านข้างของเครื่องอบ ผ่านคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนทำงาน สร้างลมร้อนเข้าสู่ห้องอบพริก และระบายออกที่ช่องทางด้านหลังของเครื่องอบ ส่วนด้านอีวาพอเรเตอร์จะดูดอากาศในเรือนกระจกด้านดังกล่าวเป็นแหล่งความร้อนของปั๊มความร้อน อากาศที่ใช้ในระบบจะนำมาจากภายนอกทั้งหมดและอากาศหลังการอบแห้งจะถูกปล่อยทิ้งสู่ภายนอก 100% ทั้งหมด ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ จึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของอากาศภายนอก ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4



รูปที่ 5 การหมุนวนอากาศระบบปิด

ระบบปิด (closed loop system : case 3) ระบบนี้จะปิดช่องอากาศเข้าและช่องระบายอากาศทั้งหมดโดยจะให้อากาศจากห้องอีวาพอเรเตอร์เข้าไปยังห้องอบด้านคอนเดนเซอร์ ผ่านอีวาพอเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ กลับไปสู่ห้องอบด้านอีวาพอเรเตอร์ อากาศที่ใช้ในการ

อบแห้งจะหมุนเวียนอยู่ในระบบโดยไม่มีการปล่อยอากาศทิ้งหรือนำอากาศเข้ามาใหม่ ดังนั้นระบบนี้จึงมีการนำความร้อนมาใช้ใหม่ 100% (heat recovery) โดยดึงความชื้นออกจากอากาศที่ร้อนขึ้นหลังการอบแห้งที่อีวาพอเรเตอร์ทิ้งความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัส โดยให้อากาศหลังอบแห้งไหลผ่านอีวาพอเรเตอร์ ได้ทั้งหมดก่อนถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์อีกครั้ง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5

การทดสอบสมรรถนะการอบแห้งทั้ง 2 กรณี ทดสอบที่สภาวะเดียวกัน ในช่วงเวลา 9:00 - 21:00 น. (12 ชั่วโมงต่อวัน: 3 วัน) โดยตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องอบอยู่ที่ 60°C ระบบจะทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 55°C และตัดการทำงานที่อุณหภูมิ 60°C โดยทดลองอบพริก 20 kg ในห้องอบด้านคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิ 60°C โดยอบพริกสดที่น้ำหนัก 4 kg/ถาด จำนวน 5 ถาด รวม 20 kg โดยใช้เครื่องต้นแบบ 2 ชุด เพื่อทดสอบสมรรถนะการอบแห้ง ที่ความเร็วลมคงที่ 3 m/s โดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน ทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์ด้วย Pyranometer (Kipp & Zonen) Model CM11B ความละเอียด  $\pm 2 \text{ W/m}^2$  วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีความละเอียด  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  บันทึกข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิการทดลอง ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ data logger (Yokogawa) Model MV 2000 และวัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ โดยนำค่าที่ได้เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจกแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับการวัดความชื้นของผลผลิต (moisture content) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อ่านค่าจากเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Miras Sartorius ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg ที่มีค่าความละเอียด 5 g เก็บข้อมูลของน้ำหนัก ทุก 6 ชั่วโมง นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง

การให้น้ำหนักแห้ง ทำโดยการนำพริกสดจำนวน 1 kg มาอบในตู้อบไฟฟ้าขนาด 3,000 W ยี่ห้อ Binder ตั้งอุณหภูมิ 103°C โดยจะทำการอบแห้ง 48 ชั่วโมง (พริกสดจินดา 1 kg เป็นน้ำหนักแห้ง 0.24 kg)

โดยเปรียบเทียบสมรรถนะระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก ในตัวแปรของอุณหภูมิ การบริโภคพลังงาน (energy consumption) และความชื้นของผลผลิต (moisture content) และอัตราการอบแห้ง (drying rate) กรณีศึกษาต่าง ๆ เพื่อหารูปแบบการทำงานที่เหมาะสมต่อไป

### 2.3 สมรรถนะระบบอบแห้ง

สำหรับการวัดความชื้นของผลผลิต การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ มาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง

การวัดความชื้นของผลผลิต (moisture content) นั้น ส่วนใหญ่จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (wet basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลผลิต ที่ขึ้นเป็นหลักดังนี้

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

2. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (dry basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลผลิตแห้งเป็นหลักดังนี้

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

เมื่อ  $W_w$  คือน้ำหนักของน้ำในเนื้อของวัสดุ (kg)

$W_d$  คือน้ำหนักของเนื้อวัสดุแห้ง (kg)

จากสมการความชื้นมาตรฐานเปียก มีค่าไม่เกิน 100% ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง อาจมีค่าเกิน 100% โดยงานวิจัยนี้จะบอกความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในขณะที่อัตราการอบแห้ง (drying rate, DR) พิจารณาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา

$$DR = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (3)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kWh/kg) ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

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

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

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

เมื่อ  $\Delta W$  คือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ (kg)

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

$A$  คือพื้นที่รับรังสีส่วนห้องอบแห้ง

$\Delta t$  คือเวลาในการอบแห้ง (h)

$E_t$  คือพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบ (kWh)

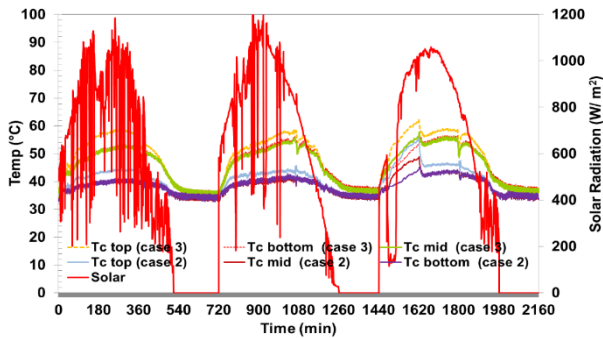
$E_e$  คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (kWh)

ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption, SEEC) คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg ของวัสดุ (kWh/kg) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

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

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

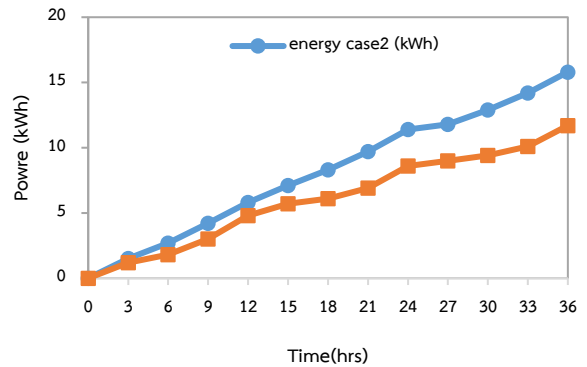
ผลการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะระบบอบแห้งที่สภาวะเดียวกันในการ 2 กรณีศึกษา คือการหมุนวนอากาศในระบบเปิด (case 2) และระบบปิด (case 3) ในการอบพริกจินดาสด 20 kg มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 76 (% w.b.) แบ่งใส่ถาดละ 4 kg จำนวน 5 ถาด และควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60°C ช่วงเวลาในการทดลอง 9:00-21:00 น. (12 ชั่วโมง/วัน) โดยจะเก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าทุก ๆ 3 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักพริกทุก ๆ 6 ชั่วโมง พบว่า



รูปที่ 6 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับค่าอุณหภูมิของอากาศ  
ในระบบเปิด (case 2) และระบบปิด (case 3)

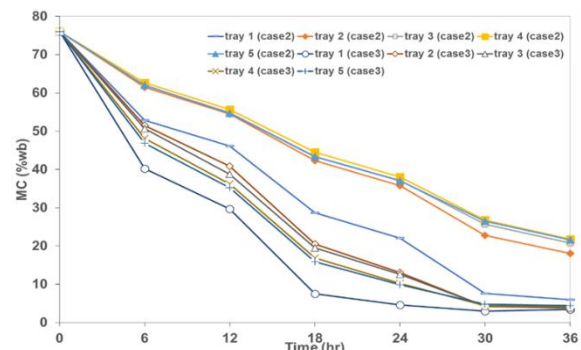
จากรูปที่ 6 แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับค่าอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้งด้านคอนเดนเซอร์แต่ละภาคทั้ง 2 กรณีศึกษาตลอดการทดลองเป็นเวลา 3 วัน พบว่ามีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ระดับชั้นอบแห้งต่างกัน พบว่าภาคบนจะมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของภาคอื่น ๆ ในห้องอบ พบว่าระบบปิด จะมีอุณหภูมิสูงกว่า ระบบเปิด โดยอุณหภูมิจะแตกต่างกันประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลากลางวัน โดยช่วงเวลา 09:00-15:00 น. อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยเท่ากับ  $30.3\text{-}31.3^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อุณหภูมิในห้องอบระบบเปิด และ ระบบปิด ช่วงเวลาดังกล่าวจะอยู่ประมาณ  $30\text{-}50^{\circ}\text{C}$  และ  $30\text{-}58^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ แปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ ในขณะที่ช่วงเวลา 18:00-21:00 น. ซึ่งค่ารังสีอาทิตย์ต่ำและไม่มีความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ป้อนสู่เรือนกระจก ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องอบลดลง อยู่ประมาณที่  $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$  และ  $30\text{-}45^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

ในขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดตลอด 36 ชั่วโมงพบว่า ระบบเปิดใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 15.8 kWh และระบบปิดใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด เท่ากับ 11.7 kWh โดยระบบเปิดจะใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าระบบปิด เท่ากับ 4.1 kWh หรือลดลง 25.95% โดยหมุนเวียนอยู่ภายในระบบ โดยไม่มีการปล่อยอากาศทิ้งหรือนำความร้อนมาใช้ใหม่ (heat recovery) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้า ระบบเปิด (case 2) และ  
ระบบปิด (case 3)

พิจารณาได้ว่าช่วงเวลา 09:00-15:00 น. มีการประหยัดพลังงานไฟฟ้า และช่วงเวลา 15:00-21:00 น. จะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ารังสีอาทิตย์ต่ำและไม่มีความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเพิ่มความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

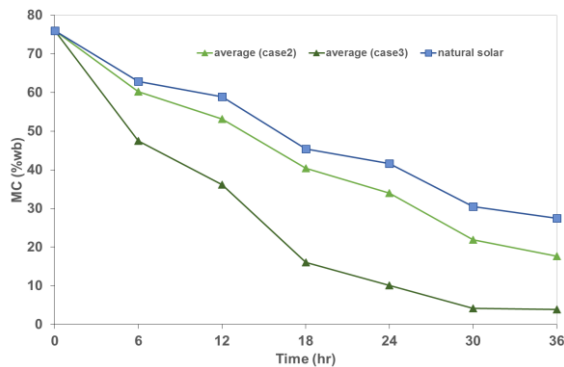


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของ  
ผลิตภัณฑ์แต่ละภาคกับเวลาของการทดลอง  
ในระบบเปิด (case 2) และระบบปิด (case 3)

จากรูปที่ 8 พบว่าความชื้นผลิตภัณฑ์แต่ละภาคไม่เท่ากัน แปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์เนื่องจากการแยกชั้นของอุณหภูมิ โดยความชื้นสุดท้ายเมื่ออบผลิตภัณฑ์ครบ 36 ชั่วโมง ในระบบเปิด พบว่าความชื้นสุดท้ายในภาคที่ 1 เท่ากับ 6.00 (% w.b.) ภาคที่ 2 เท่ากับ 18.00 (% w.b.) ภาคที่ 3 เท่ากับ 20.75 (% w.b.) ภาคที่ 4 เท่ากับ 21.75 (% w.b.) และภาคที่ 5 เท่ากับ 21.62 (% w.b.)

ในขณะที่ระบบปิดความชื้นสุดท้ายในถาดที่ 1 เท่ากับ 3.38 (% w.b.) ถาดที่ 2 เท่ากับ 3.75 (% w.b.) ถาดที่ 3 เท่ากับ 3.88 (% w.b.) ถาดที่ 4 เท่ากับ 4.12 (% w.b.) และถาดที่ 5 เท่ากับ 4.38 (% w.b.) จากเริ่มต้นที่ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 76 (% w.b.) ตามลำดับ

จากการทดลองที่สภาวะเดียวกัน พบว่ารูปแบบของการหมุนวนอากาศที่ต่างกัน ในระบบเปิด-ปิด มีอิทธิพลของต่อสมรรถนะของระบบอบแห้ง พบว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ระบบปิด จะต่ำกว่า ระบบเปิด เมื่อเทียบกับเวลาแต่ละช่วงของการทดลอง หรือกล่าวได้ว่า การหมุนวนอากาศระบบปิด (case 3) มีอัตราการอบแห้ง (drying rate, DR) สูงกว่าระบบเปิด (case 2)



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์กับเวลาของการทดลองในระบบเปิด (case 2) และระบบปิด (case 3) เทียบกับตากแบบธรรมชาติ

จากรูปที่ 9 พบว่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทดสอบสมรรถนะการอบแห้ง ในการทดลองที่สภาวะเดียวกัน ในการอบแห้งในระบบเปิดและระบบปิด เทียบกับตากแบบธรรมชาติ เมื่อครบ 36 ชั่วโมง พบว่าระบบปิดมีสมรรถนะการอบแห้งสูงที่สุด โดยความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากับ 3.90 (% w.b.) สำหรับระบบเปิดมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 17.62 (% w.b.) ในขณะที่การตากแบบธรรมชาติมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 27.50 (% w.b.) ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มี

ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.90 (% w.b.) ในระบบปิด และการตากแบบธรรมชาติ ต้องใช้พลังงาน และระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าและเสี่ยงต่อการที่พริกจะเสียหายเนื่องจากความชื้น และใช้เวลานานเกินความเหมาะสม แปรผันตามสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 1 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

| ตัวแปร         | Case 2 ระบบเปิด<br>20 kg ที่ 60°C | Case 3 ระบบปิด<br>20 kg ที่ 60°C | หน่วย            |
|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------|
| พลังงานไฟฟ้า   | 15.8                              | 11.7                             | kWh              |
| มวลน้ำที่หายไป | 11.67                             | 14.42                            | kg               |
| เวลาอบแห้ง     | 36                                | 36                               | hrs              |
| ค่ารังสีเฉลี่ย | 760.08                            | 760.08                           | W/m <sup>2</sup> |
| SEC            | 5.11                              | 3.85                             | kWh/kg           |
| SEEC           | 1.35                              | 0.81                             | kWh/kg           |

จากตารางที่ 1 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) ซึ่งจะเป็นต้นทุนดำเนินการหนึ่งในการอบแห้งสำหรับระบบ พบว่าการหมุนวนอากาศในระบบปิดเป็นระบบที่มีสมรรถนะสูงกว่าระบบเปิด โดยมวลน้ำที่หายไประหว่างกระบวนการอบแห้ง มีค่าเท่ากับ 14.42 และ 11.67 kg มากกว่า (+23.56%) จากปัจจัยของอุณหภูมิที่สูงกว่า ในขณะที่ปัจจัยทางด้านการใช้พลังงานแสดงผลไปในทิศทางเดียวกัน คือการหมุนวนอากาศในระบบปิดเป็นระบบที่มีสมรรถนะสูงกว่าระบบเปิด โดยมีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 3.85 kWh/kg และ 5.11 kWh/kg ต่ำกว่า (-24.65%) ในขณะที่ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) เท่ากับ 0.81 kWh/kg และ 1.35 kWh/kg ต่ำกว่า (-40.00%) ตามลำดับ

#### 4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของการหมุนวนอากาศในระบบเปิด-ปิดต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก พบว่าระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมเรือนกระจก ในการหมุนวน



อากาศในระบบปิด (closed loop system) มีสมรรถนะของระบบสูงกว่าระบบเปิด (opened loop system) อย่างชัดเจน ในแง่ อัตราการอบแห้ง เวลา การบริโภคพลังงาน และคุณภาพพริก เป็นการนำความร้อนทิ้งมาใช้ใหม่ (waste heat recovery) มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะของระบบ เป็นการลดการสูญเสียความร้อนจากระบบส่งผลต่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนที่คอมเพรสเซอร์ เนื่องจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามลำดับ สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้ง ลดการใช้พลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปสามารถทำงานได้สม่ำเสมอและเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง เมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ จนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อีกทั้งประหยัดพลังงานมากกว่าระบบบ่มความร้อนที่ทำงานระบบเดียวตามสมมติฐานข้างต้น จึงใช้กรณีดังกล่าวเปรียบเทียบกับระบบต่อไปในอนาคต

## 5. กิตติกรรมประกาศ

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

## 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.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] Daghighi, 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] Sophonronarit, 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 28<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 28)*; khonkaen, Thailand.
- [22] Jareanjit J and Naemsai T. (2016). Experimental performance of pepper drying using solar assisted heat pump drying system, paper presented in *the 30<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 30)*; songkhla, Thailand.