

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และขนาดที่เหมาะสม ของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้รางพาราโบลิครวมแสงร่วมกับระบบกักเก็บ พลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทย*

ณัฐพล รุ่งประแสง¹⁾ พิชัย นามประกาย²⁾ และ นริส ประทินทอง³⁾

¹⁾ นักศึกษา สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³⁾ อาจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Email: Mte805@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคนิคและความเป็นไปได้ในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลิครวมแสงร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส ในการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งจะใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 2 kg มาทำการอบแห้งและใช้น้ำเป็นตัวถึงความร้อนจากรางพาราโบลิคผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน(แบบน้ำ-อากาศ) ในห้องอบแห้ง ความร้อนส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ถังกักเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนเฟสที่บรรจุด้วยสารพาราฟินเป็นสารทำงาน

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพชั่วขณะของรางรับรังสีพาราโบลิคจะมีค่าสูงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (UAF) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (UA) ของ ถังกักเก็บพลังงานความร้อนในช่วงการประจุความร้อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.37 kW/°C และในช่วงการดึงความร้อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.35 kW/°C และ ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

ในการคำนวณเพื่อหาขนาดเครื่องอบแห้งระบบนี้ที่เหมาะสมกับประเทศไทย ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าอุณหภูมิในการอบแห้งกล้วยที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 55-60 °C, ในช่วงเวลากลางวันการทำงานของเครื่องอบแห้งต้องสามารถละลายพาราฟินในถังกักเก็บพลังงานความร้อนได้หมดพอดี และ ในช่วงเวลากลางคืนตู้อบแห้งต้องมีขนาดที่สามารถดึงความร้อนจากพาราฟินในถังกักเก็บพลังงานความร้อนมาใช้ได้หมดพอดีเพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้เต็มที่ในตอนกลางคืน พบว่าขนาดของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม

คือ ถึงกักเก็บพลังงานความร้อนบรรจุพาราฟินจำนวน 100 kg, รางรับแสงพาราโบลิคขนาด 2.31 m² จำนวน 2 ราง, พื้นที่ของท่อในการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังพาราฟินควรมีพื้นที่ขนาด 4 m², อัตราการไหลของอากาศในห้องอบแห้งที่เหมาะสม 0.13 kg/s

ซึ่งจากระบบดังกล่าวข้างต้นสามารถอบกล้วยได้จำนวน 105 kg ได้กล้วยแห้งจำนวน 45 kg สามารถอบแห้งกล้วย ให้มีความชื้น 50 % db. ได้ภายใน 2 วัน มีจุดคุ้มทุน 1.33 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายใน 44.45 %

คำสำคัญ : แสงอาทิตย์, เครื่องอบแห้ง, ระบบกักเก็บพลังงานความร้อน, พาราโบลิค

*
รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2549

Mathematical model and Optimum sizing for a Solar Banana dryer Combined with Parabolic Trough and Phase Change Energy Storage System in Thailand*

Natthaphon Roonprasang¹⁾ Pichai Namprakai²⁾ and Naris Pratinthong³⁾

¹⁾ Student, Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

²⁾ Assistant Professor, Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

³⁾ Lecturer, Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Email: Mte805@hotmail.com

ABSTRACT

This research was a technical and feasibility study of a banana dryer combined with a parabolic trough and a phase change energy storage system. In order to find the performance of the system we had to use 2 kg of bananas for drying and water as a working fluid to transfer thermal energy from the parabolic trough to a heat exchanger (water-air) of the dryer. The remaining energy then was stored in the phase change energy storage which used paraffin as a working medium.

It was discovered that the efficiency of the parabolic trough was higher when increasing mass flow rate of water through this parabolic trough. Slightly higher overall heat transfer coefficient (UAF) was found when increasing air mass flow rate in the drying box. Whereas the overall heat transfer coefficients (UA) of the phase change energy storage system were 0.37 kW/°C during a charging period and 0.35 kW/°C during a discharging period. The comparison between the mathematical simulation and the experiment had an error of less than 5 %.

The optimal size of such the dryer was investigated under the condition of Thailand: the temperature of a drying banana would be in the range of 55-60 °C. In daytime solar energy had to melt all paraffin in the thermal storage tank. At nighttime the drying box had to use up all the thermal energy in the thermal storage tank so that it could collect more energy during daytime. The optimal solution then should be: 100 kg of a paraffin for the thermal storage tank, $2 \times 2.31 \text{ m}^2$ receiving area of the two parabolic solar collectors, 4 m^2 area of the heat exchanger tubes in the paraffin tank, 0.13 kg/s mass flow rate of air in the drying box. The optimum drying system could bake banana from 105 kg wet product to 45 kg dried product with the final moisture content of 50 % db. within 2 day (48 hours). Economical analysis showed that the payback period of this system was 1.33 years. Internal rate of return was about 44.45 %.

Keywords : solar energy, the oven, thermal energy storage system, parabolic trough collector

*

Original manuscript submitted: March 28, 2006 and Final manuscript received: August 9, 2006

บทนำ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการลดความชื้นนอกจากอาหารต่างๆ โดยวิธีการตากแดดกลางแจ้งมีการทำมานานแล้ว ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการตากแห้งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาณความชื้นในวัสดุที่นำมาตากแห้ง ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งองค์ประกอบของอากาศภายนอกในขณะนั้น ปัญหาในการถนอมอาหารโดยวิธีการตากแห้งนั้นนอกจากจะจำกัดเรื่องเวลาการทำโดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีแสงแดดแล้ว ก็ยังมีปัญหาอันเนื่องมาจากฝนตก และความสกปรกอีกด้วย

ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้ในระบบการอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Koyuncu, 2005) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบการตากแดดโดยธรรมชาติกับการอบแห้งโดยอาศัยปรากฏการณ์เรือนกระจกด้วยวิธีการสร้างโรงเรือนเพื่อรับรังสีอาทิตย์และบรรจุวัตถุดิบที่ต้องการอบแห้งไว้ภายใน จากการศึกษาพบว่าการอบแห้งโดยโดยอาศัยปรากฏการณ์เรือนกระจกด้วยวิธีการสร้างโรงเรือน ให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติ โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งได้ 5-9 °C และสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ 2-5 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบการตากแดดโดยธรรมชาติ

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับการพัฒนาในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้แผงรับรังสีเป็นตัวผลิตความร้อนให้กับระบบอบแห้ง เพราะฉะนั้นถ้าหากว่าแผงรับรังสีที่ใช้มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้ระบบอบแห้งสามารถผลิตพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งได้สูง

สำหรับในประเทศไทยได้มีผู้ศึกษาการอบแห้งกล้วยโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Schirmer ,et.al,1996)ได้ทำการศึกษากการอบแห้งกล้วยโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบร่วมกับอุโมงค์ลม ในงานวิจัยนี้ใช้พัดลมในการขับเคลื่อนลมขนาด 53W พลังงานที่ให้แก่พัดลมได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลองอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 40-65 °C สามารถอบกล้วยได้จำนวน 300 kg ต่อการอบ 1 ครั้ง ใช้เวลาในการอบกล้วยประมาณ 3-5 วัน จากปกติถ้าตากแห้งจากธรรมชาติต้องใช้เวลา 5-7 วัน เครื่องอบแห้งนี้สามารถคืนทุนได้ภายใน 3 ปี

จากการศึกษาการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ ระบบการอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวมีข้อเสียคือ ระบบไม่สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง เพราะในช่วงเวลากลางคืนระบบอบแห้งไม่สามารถผลิตความร้อนได้ จึงได้มีนักวิทยาศาสตร์บางท่าน ได้ใช้พลังงานความร้อนรูปแบบอื่นมาช่วยในการอบแห้งในช่วงเวลากลางคืน (Prasad and Vijay,2005) ได้ทำการศึกษากการอบแห้งขิงและขมิ้นในประเทศอินเดียโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล ในการศึกษาได้ทำการอบแห้งขิงที่ความชื้นเริ่มต้น 319.74 (db)% จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้าย 11.8 (db)% และทำการอบแห้งขมิ้นที่ความชื้นเริ่มต้น 358.96 (db)% จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้าย 8.8 (db)% จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าพลังงานแสงอาทิตย์ 499
โดยใช้รางพาราโบลิครวมแสงร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทย

พลังงานชีวมวลใช้เวลาในการอบแห้งซึ่ง 36 ชั่วโมง และใช้เวลาในการอบแห้งมัน 48 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้ 54-60 % เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียวและ ลดเวลาในการอบแห้งลงได้ 83-84 % เมื่อเทียบกับการตากแห้งแบบธรรมชาติ

จะเห็นได้ว่าเมื่ออาศัยพลังงานจากภายนอกมาช่วยในการอบแห้งจะทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การอบแห้งแบบนี้จะสามารถลดระยะเวลาได้เนื่องจากไม่ต้องรอพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว แต่ระบบแบบนี้ก็มีข้อเสียคือ ถ้าหากบริเวณที่ทำการอบแห้งไม่สามารถหาแหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอกมาใช้ในช่วงเวลากลางคืนได้ ระบบนี้ก็ไม่สามารถทำงานได้

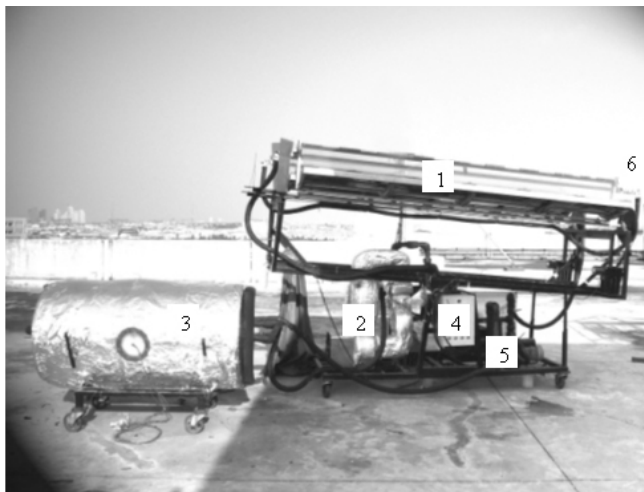
ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่ว่า จะทำอย่างไรที่จะทำให้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ระบบการกักเก็บความร้อนจึงได้รับการพิจารณาจากผู้วิจัย เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสามารถเก็บพลังงานความร้อนไปใช้ในเวลาที่ต้องการได้

จากการศึกษาพบว่าระบบการกักเก็บพลังงานความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ สามารถให้การกักเก็บพลังงานความร้อนได้สูง ผู้วิจัยจึงศึกษาเพื่อหาสารเปลี่ยนเฟสที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยคือ 55-60 °C ซึ่งสารเปลี่ยนเฟสที่ผู้วิจัยเลือกใช้คือพาราฟิน ซึ่งมีจุดหลอมตัวที่ 58-60 °C มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ 190 kJ/kg ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้รางพาราโบลิครวมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส ในการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการอบแห้ง เพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุดของเครื่องอบแห้ง (Bennamoun and Belhamri, 2003; Karim and Hawlader, 2006; Chemkhi, *et.al*, 2004)

อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลอง

ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ ชุดรับรังสีแบบพาราโบลิคชนิดปรับตามทางเดินของดวงอาทิตย์ ด้วยกลไกอัตโนมัติจำนวน 2 ราง มีขนาดพื้นที่รับแสงต่อราง 2.155 m² , ตู้อบแห้งปริมาตรขนาด 0.205×0.405×0.3 m³ , ถังเก็บพลังงานความร้อน บรรจุด้วยพาราฟินปริมาณ 479.54 kg มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.76 m ความยาวของถังเท่ากับ 1.35 m ใช้ท่อทองแดงขนาด 0.0127 m จำนวน 76 ท่อในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงาน(น้ำ)กับพาราฟิน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลิคร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส
1: รางพาราโบลิก 2: ตู้อบแห้ง 3: ถังเก็บพาราฟิน 4: ตู้คอนโทรล 5: โรตารีมิเตอร์ 6: ไพรานอมิเตอร์

อุปกรณ์วัดข้อมูล

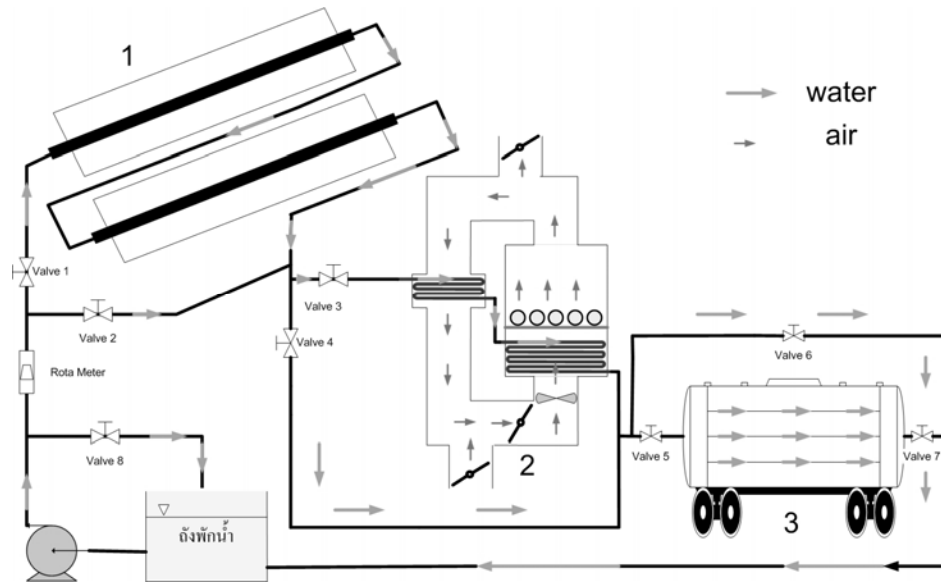
1. เครื่องซึ่งดิจิตอลซึ่งอ่านได้ทัศนียม 2 ตำแหน่ง
2. เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ(โรตารีมิเตอร์)
3. เครื่อง Data logger ให้ความละเอียดทัศนียม 2 ตำแหน่ง
4. สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด T
5. Pyranometer สำหรับวัดความเข้มรังสีรวมทั้งตกกระทบบนระนาบของรางรับรังสี

การทำงานของเครื่องอบแห้ง

การทำงานของเครื่องอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงเวลากลางวัน และ ช่วงเวลากลางคืน สำหรับช่วงเวลากลางวันเครื่องอบแห้งจะรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางรับแสงแบบพาราโบลิก(ในรูปที่ 2 คือหมายเลข 1) ระบบจะใช้น้ำเป็นสารทำงานเมื่อน้ำไหลผ่านวาล์ว 1 และรางรับรังสี รางรับรังสีจะถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นน้ำจะไหลผ่านทางวาล์ว 3 เข้าตู้อบแห้ง จะไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในตู้อบแห้งเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายในตู้อบแห้ง พลังงานความร้อนที่เหลือในน้ำ น้ำจะถูกส่งผ่านถึงกักเก็บพลังงานความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารเปลี่ยนเฟส ในระบบนี้ใช้พาราฟินเป็นสารเปลี่ยนเฟส มีจุดหลอมตัวอยู่ที่ประมาณ 58-60 °C มีค่าความจุความร้อนในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 190 kJ/kg เมื่อน้ำถ่ายเทความร้อนให้กับพาราฟินเรียบร้อยแล้วน้ำจะไหลไปรับพลังงานความร้อนจากรางรับรังสีต่อไป

สำหรับช่วงเวลากลางคืนน้ำจะไม่ไหลผ่านตัวรับรังสี จะไหลผ่านวาล์ว 2 เข้าวาล์ว 3 (วาล์ว 1 ปิด) ในช่วงนี้ระบบจะได้พลังงานความร้อนจากถังเก็บพลังงานความร้อนมาใช้ในการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าพลังงานแสงอาทิตย์ 501
โดยใช้รางพาราโบลาโครมแสงร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทย



รูปที่ 2 ส่วนประกอบและวงจรการทำงานของเครื่องอบแห้ง

วิธีการทดลอง

1. คัดเลือกกล้วยน้ำว้าสุกงอม ซึ่งสังเกตได้จากสีเหลืองจัดของเปลือกกล้วย ไม่มีจุดดำและมีกลิ่นหอม นำมาล้างหรือฉีดด้วยน้ำทำความสะอาดทั้งไว้ให้แห้งแล้วปอกเปลือกและดึงเส้นใยออกให้หมด
2. ชั่งน้ำหนักกล้วยน้ำว้าก่อนอบแห้ง ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ลำเลียงเข้าตู้เพื่อทำการอบแห้ง
3. ปรับแนวแกนของรางรับแสงพาราโบลาให้อยู่ในแนวทิศเหนือ-ใต้ โดยทำมุม 14 องศา กับทิศใต้ ให้รางรับแสงตั้งฉากกับดวงอาทิตย์แสงที่สะท้อนจากรางรับแสงพาราโบลาจะอยู่ในแนวของท่อรับแสง
4. ทำการเดินเครื่องอบแห้ง
5. ขณะทำการอบแห้ง ทำการบันทึกค่า อัตราการไหลของน้ำของระบบ, อัตราการไหลของอากาศในตู้อบแห้ง, อุณหภูมิจุดต่างๆของระบบทั้งหมด 29 จุดซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิของน้ำที่พาราโบลา 4 จุด คือ อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของพาราโบลาตัวที่ 1, อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของพาราโบลาตัวที่ 1, อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของพาราโบลาตัวที่ 2, อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของพาราโบลาตัวที่ 2, วัดอุณหภูมิของน้ำที่ตู้อบ 4 จุดคือ อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat, อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat, อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคอยล์, อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคอยล์, วัดอุณหภูมิของ

อากาศที่ดูดจำนวน 8 จุดคือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าดูด, อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนเข้าดูด, อุณหภูมิของอากาศก่อนไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat, อุณหภูมิของอากาศหลังไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat, อุณหภูมิของอากาศก่อนไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคอยล์, อุณหภูมิของอากาศหลังไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคอยล์, อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศออกจากดูด, อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศออกจากดูด, วัดอุณหภูมิของน้ำที่ถังกักเก็บพลังงานความร้อนจำนวน 2 จุด คือ อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของถังกักเก็บพลังงานความร้อน, อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของถังกักเก็บพลังงานความร้อน, วัดอุณหภูมิของพาราฟินภายในถังกักเก็บพลังงานความร้อนจำนวน 10 จุดโดยเว้นระยะห่างของจุดวัดให้ห่างกัน 10 cm, วัดอุณหภูมิของพาราฟินภายในถังกักเก็บน้ำร้อนจำนวน 1 จุด บันทึกอุณหภูมิโดยใช้เครื่อง Data logger บันทึกค่าทุกๆ 5 นาที โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์, สายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นชนิด T

6. นำกลัวยมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง
7. ทดลองไปจนกระทั่งได้ปริมาณความชื้นของกลัวยตามค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (50% dry basis)

เงื่อนไขการทดลองประกอบด้วยชุดการทดลอง ดังนี้

- ชุดที่1. การทดสอบรับแสงพาราโบลิคทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM, 20 LPM และ 25 LPM
- ชุดที่2. การทดสอบดูดแห้ง ทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.120 kg/s, 0.0977 kg/s, 0.0698 kg/s, 0.0419 kg/s, 0.02794 kg/s
- ชุดที่3. การทดสอบถึงกักเก็บพลังงานความร้อนช่วงการประจุความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำ 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM, 20 LPM และ 25 LPM
- ชุดที่4. การทดสอบถึงกักเก็บพลังงานความร้อนช่วงการดึงความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำ 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM, 20 LPM และ 25 LPM

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- การคำนวณหาปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งในกลัวยน้ำว่าหาได้จากสมการ

$$M_d = \frac{(w - d) \times 100}{d} \quad (1)$$

- สมการสมดุลพลังงานของตัวรับรังสีความร้อนแบบพาราโบลิค

$$Q_{\text{parabolic}} = Q_{\text{Water}} \quad (2)$$

$$\eta \times I_b \times A_a = m_w \times C_{pw} \times (T_{w,\text{out}} - T_{w,\text{in}}) \quad (3)$$

เมื่อ η คือความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบ ซึ่งได้จากการทดลอง

-สมการสมดุลพลังงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในตู้อบแห้ง

$$Q_{\text{water}} = Q_{\text{air}} = UAF\Delta T_m \quad (4)$$

$$Q_{\text{Water}} = \dot{m}_w \times C_{pw} \times (T_{w,\text{in}} - T_{w,\text{out}}) \quad (5)$$

$$Q_{\text{air}} = \dot{m}_a \times \left\{ \left[(C_{pa} \times T_{a,\text{out}}) + W(h_{fg} + C_{pv} \times T_{a,\text{out}}) \right] - \left[(C_{pa} \times T_{a,\text{in}}) + W(h_{fg} + C_{pv} \times T_{a,\text{in}}) \right] \right\} \quad (6)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{w,\text{out}} - T_{a,\text{in}}) - (T_{w,\text{in}} - T_{a,\text{out}})}{\ln \left[(T_{w,\text{out}} - T_{a,\text{in}}) / (T_{w,\text{in}} - T_{a,\text{out}}) \right]} \quad (7)$$

-สมการสมดุลพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแบบเปลี่ยนเฟส

$$Q_{\text{water}} = Q_{\text{Paraffin}} = UA\Delta T_m \quad (8)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_m - T_{w,\text{in}}) - (T_m - T_{w,\text{out}})}{\ln \left[(T_m - T_{w,\text{in}}) / (T_m - T_{w,\text{out}}) \right]} \quad (9)$$

ในช่วงความร้อนสัมผัส

$$Q_{\text{water}} = \dot{m}_w \times C_{pw} \times (T_{w,\text{in}} - T_{w,\text{out}}) = Q_{\text{Paraffin}} = m_{pa} \times C_{p,pa} \times \frac{dT_m}{dt} \quad (10)$$

ในช่วงความร้อนแฝง

$$Q_{\text{water}} = \dot{m}_w \times C_{pw} \times (T_{w,\text{in}} - T_{w,\text{out}}) = Q_{\text{Paraffin}} = \frac{dm_{pa,\text{melt}}}{dt} \times L \quad (11)$$

-คำนวณปริมาณมวลของพาราฟินที่เปลี่ยนสถานะที่เวลาใดๆ

$$m_{pa,\text{melt}}^{t+1} = m_{pa,\text{melt}}^t + \frac{Q_{\text{Paraffin}} \Delta t}{L} \quad (12)$$

เมื่อ $\Delta t = 1$ วินาที

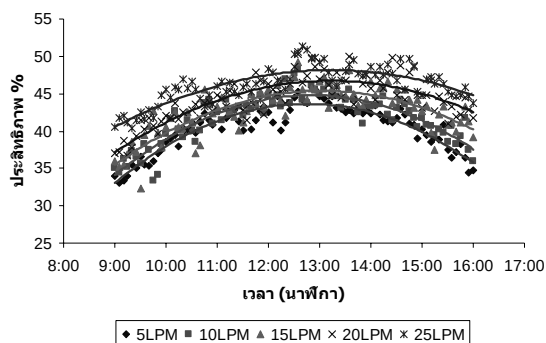
- การคำนวณปริมาณการสะสมพลังงานความร้อนภายในถังกักเก็บพลังงานความร้อน

$$\int_0^t Q_{\text{paraffin}} dt = \left[m_{pa} \times C_{p,pa} \times (T_m^t - T_m^0) \right] + \left[(m_{pa,\text{melt}}^t - m_{pa,\text{melt}}^0) \times L \right] \quad (13)$$

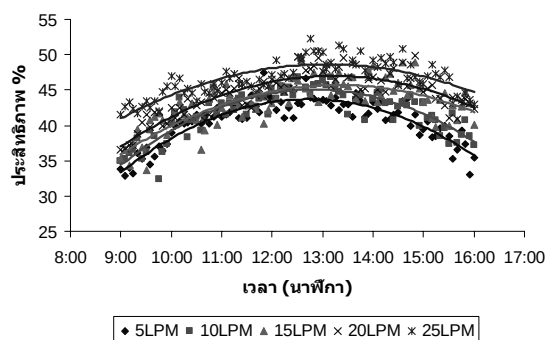
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของพาราโบลิค

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของพาราโบลิคจะมีค่าแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของน้ำในรางรับแสงพาราโบลิคเมื่อเพิ่มอัตราการไหลในระบบประสิทธิภาพของพาราโบลิคจะมีค่าสูงขึ้น โดยอัตราการไหลของน้ำที่ 25 LPM ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ระบบทำได้สูงสุด ให้ประสิทธิภาพของพาราโบลิคสูงที่สุด 48.6 % ช่วงเวลา 12.00-13.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพช่วงขณะของพาราโบลาตัวที่ 1 ที่อัตราการไหลต่างๆ

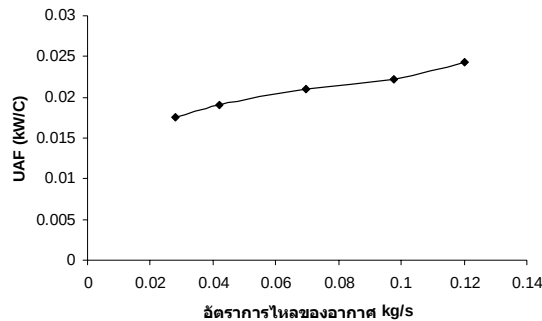


รูปที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพช่วงขณะของพาราโบลาตัวที่ 2 ที่อัตราการไหลต่างๆ

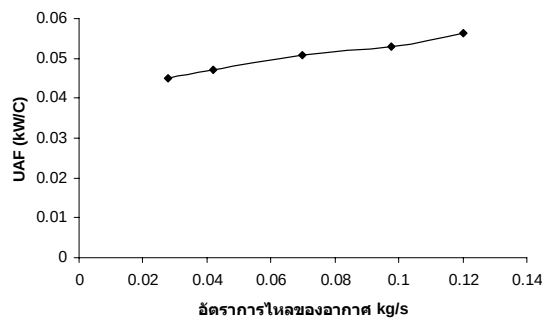
ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม UAF ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในตู้อบแห้ง

ในตู้อบแห้งได้ทำการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไว้ทั้งหมด 2 ตัว คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คอยล์ ซึ่ง จากผลการทดลองพบว่า ค่า UAF ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งมีค่าสูงขึ้น โดยอัตราการไหลของอากาศที่ 0.12 kg/s ให้ค่า UAF เฉลี่ยสูงที่สุด 0.024 kW/°C ดังแสดงในรูปที่ 5 และ ค่า UAF ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคอยล์ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งมีค่าสูงขึ้น โดยอัตราการไหลของอากาศที่ 0.12 kg/s ให้ค่า UAF เฉลี่ยสูงที่สุด 0.056 kW/°C ดังแสดงในรูปที่ 6

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าพลังงานแสงอาทิตย์ 505
โดยใช้รางพาราโบลาความร้อนแสงร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทย



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UAF ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Reheat กับอัตราการไหลต่างๆ



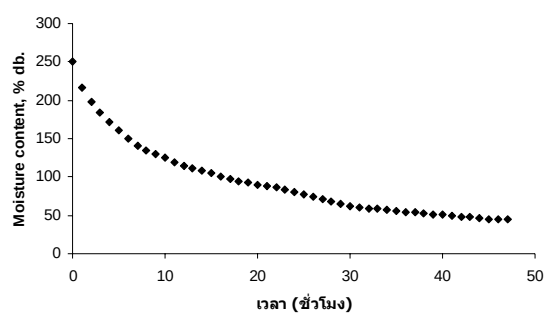
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UAF ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้ง กับอัตราการไหลต่างๆ

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม UA ของถังกักเก็บพลังงานความร้อน (Storage tank) ช่วงการประจุความร้อน และช่วงการดึงความร้อน

จากผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ของถังกักเก็บพลังงานความร้อนมีค่าค่อนข้างคงที่ ทั้งในช่วงการประจุความร้อนและในช่วงการดึงความร้อน เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลที่ต่างๆกัน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่า UA ในช่วงการประจุความร้อนมีค่า $\overline{UA} = 0.368$ kW/C และในช่วงการดึงความร้อนมีค่า $\overline{UA} = 0.347$ kW/C เนื่องจากในช่วงการประจุความร้อน พาราฟินที่บริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะละลายกลายเป็นของเหลวทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน แต่ในช่วงการดึงความร้อนพาราฟินบริเวณผิวท่อจะเกิดการแข็งตัวก่อน จึงมีการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน ซึ่งการนำความร้อนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าการพาความร้อน

ผลการอบกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลิคร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส

ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลิคร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7-8 ผลที่ได้จากการทดลองความชื้นของกล้วยที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานของกล้วยอบที่กำหนดไว้ (50 (db)%)



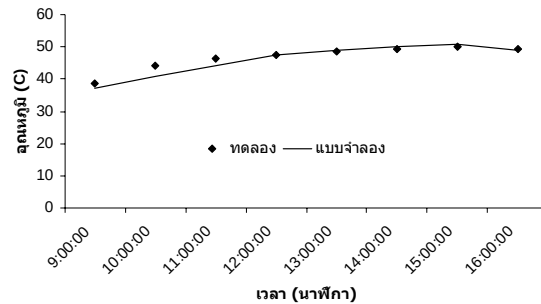
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งในกล้วยเทียบกับเวลา



รูปที่ 8 กล้วยหลังจากอบแห้ง (Moisture content, 44.56 % db.)

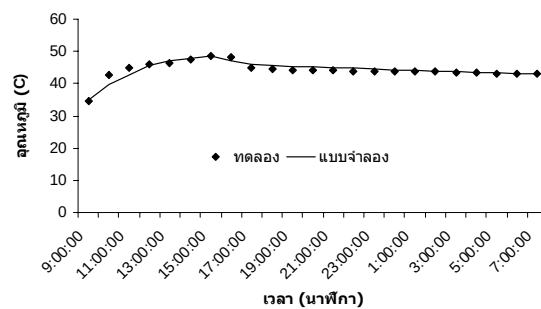
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าพลังงานแสงอาทิตย์ 507
โดยใช้รางพาราโบลาครอมแสงร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทย

ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง



รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของพาราโบลาตัวที่ 2 อัตราการไหลของน้ำ 5 LPM, อัตราการไหลของ

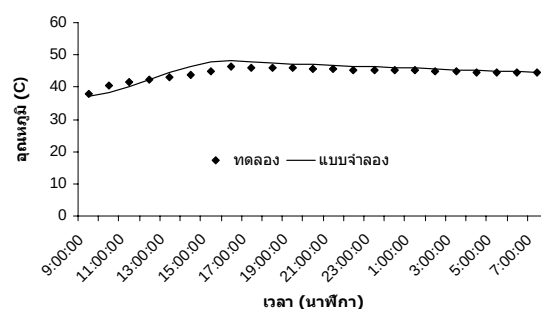
อากาศ 0.11 kg/s, อัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 90 % $RMSE = 1.598$, $\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100 = 3.42\%$



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้ง อัตราการ

ไหลของน้ำ 5 LPM, อัตราการไหลของอากาศ 0.11 kg/s, อัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 90 % $RMSE = 0.970$,

$$\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100 = 2.19\%$$



รูปที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิของพาราฟินที่บรรจุภายในถังกักเก็บพลังงานความร้อน อัตราการไหลของน้ำ 5

LPM, อัตราการไหลของอากาศ 0.11 kg/s, อัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 90 % $RMSE = 1.396$,

$$\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100 = 3.15\%$$

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความคลาดเคลื่อน $\left(\frac{RMSE}{X}\right) \times 100$ ไม่เกิน 5 % หลังจากนั้น นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปทำการคำนวณเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งต่อไป

ผลการหาขนาดของระบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับประเทศไทยโดยการคำนวณ

การคำนวณหาขนาดของระบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับประเทศไทย กำหนดเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งดังนี้คือ

1. อุณหภูมิในการอบแห้งกล้วยที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 55-60 °C
2. ในช่วงเวลากลางวันการทำงานของเครื่องอบแห้งต้องสามารถละลายพาราฟินในถังกักเก็บพลังงานความร้อนได้หมดพอดี
3. ในช่วงเวลากลางคืนตู้อบแห้งต้องมีขนาดที่สามารถดึงความร้อนจากพาราฟินในถังกักเก็บพลังงานความร้อนมาใช้ได้หมดพอดี

ได้ขนาดของระบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับประเทศไทย คือขนาดถังกักเก็บพลังงานความร้อนบรรจุพาราฟินจำนวน 100 kg ขนาดรางรับแสงพาราโบลิกขนาด 2.31 m² จำนวน 2 ราง ขนาดพื้นที่ของท่อในการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังพาราฟินมีพื้นที่ขนาด 4 m² อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสม 0.13 kg/s ซึ่งจากระบบดังกล่าวข้างต้นสามารถอบกล้วยได้จำนวน 105 kg ต่อครั้ง ได้กล้วยแห้งจำนวน 45 kg และจากการคำนวณหาจุดคุ้มทุนสำหรับระบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับประเทศไทยโดยกำหนดอัตราดอกเบี้ยคงที่ 15% ตลอดอายุการใช้งาน, อายุการใช้งาน 10 ปี, เงินลงทุนในการสร้างเครื่องอบแห้ง 80,000 บาท, ค่าบำรุงรักษารายปี 8,000 บาท พบว่าสามารถคืนทุนเครื่องอบแห้งได้ในระยะเวลา 1.33 ปี มีค่า IRR เท่ากับ 44.45 % เมื่อเทียบกับการตากแห้งแบบธรรมชาติ วิธีนี้จะได้ปริมาณผลผลิตมากกว่า เมื่อหักค่าใช้จ่ายแล้วคิดเป็นมูลค่าที่เพิ่มขึ้นเป็นเงิน 70,848 บาทต่อปี

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่า ขนาดของระบบเครื่องอบแห้งในการอบแห้งกล้วยที่เหมาะสมกับประเทศไทย คือ ขนาดถังกักเก็บพลังงานความร้อนบรรจุพาราฟินจำนวน 100 kg, พื้นที่รางรับแสงพาราโบลิกขนาด 2.31 m² จำนวน 2 ราง, พื้นที่ของท่อในการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังพาราฟินมีพื้นที่ขนาด 4 m², อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสม 0.13 kg/s สามารถอบกล้วยได้จำนวน 105 kg ต่อครั้ง ได้กล้วยแห้งจำนวน 45 kg และ จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ ของเครื่องอบแห้งที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสภาวะที่เหมาะสม สามารถคืนทุนเครื่องอบแห้งได้ในระยะเวลา 1.33 ปี ระบบการอบแห้งประเภทนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ที่มีอุณหภูมิการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าพลังงานแสงอาทิตย์ 509
โดยใช้รางพาราโบลิครวมแสงร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟสในประเทศไทย

ไม่เกิน 60 °C และข้อดีของระบบนี้คือสามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่ต้องอาศัยเชื้อเพลิงภายนอก ซึ่งเป็นการช่วยประเทศในการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงานและ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายการสัญลักษณ์

A_d	=	พื้นที่ของรางรับรังสีที่ตั้งฉากกับรังสีตกกระทบ, m^2
C_{pa}	=	ค่าความจุความร้อนของอากาศ, $kJ/kg.K$
$C_{p,pa}$	=	ค่าความจุความร้อนของพาราฟิน, $kJ/kg.K$
C_{pw}	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำ, $kJ/kg.K$
C_{pv}	=	ค่าความจุความร้อนของไอน้ำ, $kJ/kg.K$
d	=	น้ำหนักของวัสดุแห้ง, kg
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, $kJ/kg-H_2O$
I_b	=	รังสีอาทิตย์ตรงที่ตกกระทบผิวรับรังสี, W/m^2
L	=	ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของพาราฟิน, kJ/kg
M_d	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง
m_{pa}	=	มวลของพาราฟินที่บรรจุภายในถึงกักเก็บพลังงานความร้อน, kg
$m_{pa,melt}$	=	มวลของพาราฟินภายในถึงกักเก็บพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนสถานะ, kg
$\dot{m}_a$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
$\dot{m}_w$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ, kg/s
Q	=	ความร้อนที่แลกเปลี่ยนในระบบที่พิจารณา, W
Q_{air}	=	พลังงานความร้อนที่อากาศได้รับจากการแลกเปลี่ยนความร้อน, kW
$Q_{parabolic}$	=	พลังงานความร้อนที่พาราโบลิคสามารถผลิตได้, kW
$Q_{Paraffin}$	=	พลังงานความร้อนที่พาราฟินภายในถึงกักเก็บพลังงานความร้อนได้รับจากการแลกเปลี่ยนความร้อน, kW
Q_{water}	=	พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากการแลกเปลี่ยนความร้อน, kW
$T_{a,in}$	=	อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, K
$T_{a,out}$	=	อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, K
T_m	=	อุณหภูมิเฉลี่ยของพาราฟินที่บรรจุอยู่ภายในถึงกักเก็บพลังงานความร้อน, K

$T_{w,in}$	=	อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของระบบ, K
$T_{w,out}$	=	อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของระบบ, K
t	=	เวลา, sec
UA	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่พื้นผิวหนึ่งๆ, kW/ K
UAF	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่พื้นผิวหนึ่งๆของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Cross-Flow, kW/ K
W	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg-H ₂ O/kg-dry air
w	=	น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุชิ้น, kg
ΔT_m	=	ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม, K
η	=	ประสิทธิภาพของรางพาราโบลิค

เอกสารอ้างอิง

- Jaishree Prasad, V.K.Vijay. 2005. "Experimental studies on drying of Zingiber officinale, Curcuma longa, and Tinospora cordifolia in solar-biomass hybrid drier." **J.Renewable Energy**. Vol.30. pp. 2097-2109.
- Lyes Bennamoun and Azeddine Belhamri. 2003. "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products." **Journal of Food Engineering**. 59. pp. 259-266.
- M.A. Karim and M.N.A. Hawlader. 2004. "Development of solar air collectors for drying applications." **J.Energy Conversion and Management**. 45. pp. 329-344.
- P.Schirmer, S.Janjai, A.Esper, R.Smittabindu and W.Muhlbauer. 1996. "Experimental Investigation of the Performance of the solar tunnel dryer for drying bananas." **J.Renewable Energy**. Vol.7. No.2. pp. 119-129.
- Saber Chemkhi, Fethi Zagrouba and Ahmed Bellagi. 2004. "Drying of agricultural crops by solar energy." **J.Desalination**. 168. pp.101-109.
- Turhan Koyuncu. 2005. "An Investigation on the performance Improvement of greenhouse-type agricultural dryers." **J.Renewable Energy**. pp. 1-17.