

การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งยางแผ่น

วสันต์ จินธาตา* บัญญัติ นิยมवास และ อภิชาติ ศรีไชยรัตน์า

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7431 7100 ต่อ 3020 อีเมล: wasan.j@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.024

รับเมื่อ 28 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 26 มิถุนายน 2563 ตอรับเมื่อ 3 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองอบแห้งยางแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง 5 วัน โดยวันที่ 1 ควบคุมอัตราการไหลอากาศไว้ที่ 0.248 กิโลกรัม/วินาที วันที่ 2-5 ควบคุมอัตราการไหลอากาศไว้ที่ 0.020 กิโลกรัม/วินาที การอบแห้งวันที่ 1 มีอุณหภูมิห้องอบแห้ง 32-40°C ความชื้นสัมพัทธ์ห้องอบแห้ง 44-72% และรังสีดวงอาทิตย์ 428-1089 วัตต์/เมตร² วันที่ 2-5 อุณหภูมิห้องอบแห้ง 34-54°C ความชื้นสัมพัทธ์ห้องอบแห้ง 27-72% และรังสีดวงอาทิตย์ 136-1042 วัตต์/เมตร² จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการไหลอากาศสูงอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะต่ำลงในขณะที่ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำลงอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะสูงขึ้นในขณะที่ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ต่ำลง เครื่องอบแห้งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 31369.27 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 465.77 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม และประสิทธิภาพทางความร้อน 2.11% เอ็กเซอร์จีของการอบแห้งวันที่ 1 เอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก และเอ็กเซอร์จีสูญเสียมีค่า 40-246, 5-166 และ 18-81 วัตต์ ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าวันที่ 2-5 ที่มีค่า 4-91, 2-77 และ 1-43 วัตต์ ตามลำดับ แต่การอบแห้งวันที่ 1 มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี 12-79% ต่ำกว่าวันที่ 2-5 มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี 42-94% เนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงเอ็กเซอร์จีสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีต่ำลง

คำสำคัญ: พลังงานและเอ็กเซอร์จี การอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ยางแผ่น



Energy and Exergy Analysis of Solar Dryer for Rubber Sheet Drying

Wasan Jeentada*, Banyat Niyomvas and Apichit Srichairattana

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7431 7100 Ext. 3020, E-mail: wasan.j@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.024

Received 28 April 2020; Revised 26 June 2020; Accepted 3 July 2020; Published online: 25 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research is to study rubber sheet drying process using a solar dryer by analyzing the energy and exergy of the process. In the experiment, the required drying time was 5 days. The air mass flow rates were controlled to 0.248 kg/s for the first day and 0.020 kg/s for the other days. The experimental results on the first day presented that the drying temperature ranged between 32–40°C, the relative humidity ranged between 44–72%, and the solar radiation varied from 428 to 1,089 W/m². From the second day to the fifth day, the drying temperature ranged from 34°C to 54°C. The relative humidity range was between 27–72% and the solar radiation range was between 136–1042 W/m². It was found that at the higher air flow rate, the temperature in the drying chamber decreased leading to the higher thermal efficiency of the solar collector. On the other hand, when the lower air flow rate decreased, the temperature in the drying chamber increased bringing about the lower thermal efficiency of the solar collector. Moreover, the solar dryer could provide the specific energy consumption of 31369.27 Wh/kg, specific electrical energy consumption of 465.77 Wh/kg, and the thermal efficiency of 2.11%. In case of the exergy analysis on the first day, the exergy input, the exergy output, and the exergy loss altered in the range of 40–246, 5–166, and 18–81 W respectively. While, during the other days, the exergy input, the exergy output, and the exergy loss varied in the range of 4–91, 2–77 and 1–43 W respectively. It was found that all exergy values on the first day were higher than those of the other days. However, the exergy efficiency of 12–79% on the first day was lower than that of 42–94% on the other days because the higher exergy loss at the higher air flow rate directly affected the lower exergy efficiency.

Keywords: Energy and Exergy, Drying, Solar Dryer, Rubber Sheet

1. บทนำ

ยางพาราเป็นพืชอุตสาหกรรมมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย การอบแห้งยางแผ่นที่ได้มาจากผลผลิตของต้นยางพาราแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามกระบวนการของการอบแห้ง คือ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet; RSS) ไล่ความชื้นด้วยการอบรมควัน และยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air Dried Sheet; ADS) ไล่ความชื้นด้วยการผึ่งลมในที่ร่มหรืออบด้วยอากาศร้อนที่ปราศจากควันจากการเผาไหม้ [1] การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีการหนึ่งของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ดีที่สุดในอนาคตของทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมาการอบแห้งยางแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลาในการอบแห้ง 4–8 วัน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องอบแห้งและสภาพภูมิอากาศ [1], [3]–[5] เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้มีการออกแบบและถูกพัฒนากันอย่างกว้างขวางตามสภาพอากาศของท้องถิ่นและตามผลิตภัณฑ์ที่จะอบแห้ง ซึ่งจะสามารถประหยัดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 12.5–87% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดโดยตรง [6] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์จากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นระยะๆ ตามช่วงเวลาที่แสงแดดกับไม่มีแสงแดด การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานและให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ [7] หลักการทางอุณหพลศาสตร์มีบทบาทที่สำคัญต่อการวิเคราะห์ระบบทางความร้อน โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการอบแห้งและกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์เอนโทรปีของกระบวนการอบแห้ง เอนโทรปีจะเป็นการคาดคะเนถึงค่าสูงสุดของพลังงานที่เป็นประโยชน์ที่ระบบสามารถทำได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะด้วยกระบวนการย้อนกลับได้จากสภาวะที่กำหนดโดยอ้างอิงกับสภาวะแวดล้อม ในทางปฏิบัติพบว่าเอนโทรปีบางส่วนมีการสูญเสียไปเนื่องจากเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ จึงเห็นความแตกต่างระหว่างพลังงานของระบบจริงและค่า

พลังงานสูงสุดที่ระบบสามารถทำได้ [8] Dejchanchaiwong และคณะ [3] อบแห้งยางแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการพาความร้อนแบบอิสระ เครื่องอบแห้งมีขนาด $1.0 \times 2.0 \times 1.55$ เมตร (กว้าง×ยาว×สูง) บรรจุยางแผ่นได้ 30 แผ่น ใช้เวลาในการอบแห้ง 4 วัน พบว่าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด 21.5% มีประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งของแต่ละวัน 13.3%, 2.1%, 1.6% และ 1.3% ตามลำดับ Rabha และคณะ [9] ศึกษาการวิเคราะห์พลังงานและเอนโทรปีของการอบแห้งพริกขี้หนูและขิงแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการพาความร้อนแบบบังคับ มีอัตราการไหลอากาศ 0.019 กิโลกรัม/วินาที พบว่าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 22.10–38.44% ประสิทธิภาพเอนโทรปีของการอบแห้งพริกขี้หนูและขิงแห้ง 21–98% และ 4–96% ตามลำดับ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพริกขี้หนูและขิงแห้งเท่ากับ 18.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม และ 8.82 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ตามลำดับ อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งลดลงเมื่อค่ารังสีดวงอาทิตย์ลดลงส่งผลให้ค่าเอนโทรปีเข้าห้องอบแห้งลดลงด้วย อุณหภูมิอากาศที่ลดลงระหว่างทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งลดลงตามปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นผลให้เอนโทรปีไหลเข้าและไหลออกจากห้องอบแห้งเกือบจะเท่ากัน Vijayan และคณะ [10] วิเคราะห์พลังงานและเอนโทรปีของการอบแห้งมะระด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการพาความร้อนแบบบังคับ พบว่า เอนโทรปีไหลเข้าเอนโทรปีไหลออกและเอนโทรปีสูญเสียของห้องอบแห้งจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งและจะค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดการอบแห้งในแต่ละวัน เนื่องจากเอนโทรปีจะขึ้นอยู่กับค่ารังสีดวงอาทิตย์ ในช่วงเวลาที่มีค่ารังสีดวงอาทิตย์สูงเอนโทรปีสูญเสียก็จะมีค่าสูงด้วย Fudholi และคณะ [7] อบแห้งปาล์มน้ำมันด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการพาความร้อนแบบบังคับ มีอัตราการไหลอากาศ 0.13 กิโลกรัม/วินาที พบว่าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 9–48% ประสิทธิภาพ

เอ็กเซอร์จิสของเครื่องอบแห้ง 10–73% ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง 19% Naemsai และคณะ [11] วิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จิสของเครื่องอบแห้งชนิดสภาวะเรือนกระจกที่ปกคลุมด้วยแผ่นพอลิคาร์บอเนตในการอบแห้งยางแผ่นโดยการพาความร้อนอิสระ ทดลอง 2 กรณี คือ การปิดช่องลมภายในทุกช่องของเครื่องอบแห้งเพื่อไม่ให้เกิดการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์ และเปิดช่องลมภายในทุกช่องของเครื่องอบแห้งเพื่อให้เกิดการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์พบว่า กรณีการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์เอ็กเซอร์จิสสูญเสียจะมากกว่ากรณีไม่ให้เกิดการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิสของการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยกว่ากรณีไม่ให้เกิดการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์ จากที่กล่าวมาข้างต้นยังไม่พบการรายงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการพาความร้อนแบบบังคับในการอบแห้งยางแผ่นสำหรับครัวเรือนขนาดสวนยางพารา 10–12 ไร่ หรือมีการผลิตยางแผ่นประมาณ 30–40 แผ่น/วัน งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จิสของการอบแห้งยางแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการพาความร้อนแบบบังคับเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปปรับปรุงเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ยางแผ่นจากกระบวนการรีดแผ่นของสหกรณ์สวนยางพิจิตรจำกัด ตำบลพิจิตร อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา มีขนาดความกว้าง 45–50 เซนติเมตร ยาว 95–100 เซนติเมตรหนา 2–4 มิลลิเมตร มีความชื้น 20.66% มาตรฐานแห้ง

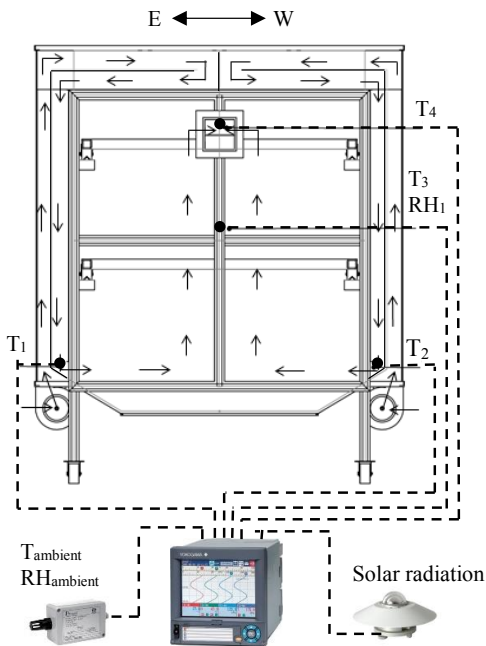
2.2 อุปกรณ์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาดห้องอบแห้ง 1.40×1.40×1.40 เมตร (กว้าง×ยาว×สูง) บรรจุยางแผ่นได้ 40 แผ่น ผนังห้องอบแห้งด้านซ้าย ด้านขวา และด้านบนทำด้วย



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งยางแผ่นพลังงานแสงอาทิตย์

สังกะสีลอนเล็กพันด้วยลวดดำ และปกคลุมด้วยกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร ใช้เป็นแผงรับรังสีดวงอาทิตย์และใช้สังกะสีลอนเล็กพันด้วยลวดดำคั่นกลางระหว่างผนังห้องอบแห้งกับกระจกอีกหนึ่งชั้นเพื่อทำให้เป็นแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 1 มีจุดประสงค์เพื่อให้อากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านข้างเครื่องอบแห้งโดยไหลขึ้นไปด้านบนห้องอบแห้งแล้วไหลลงมาเข้าห้องอบแห้งทางด้านล่างของห้องอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนผนังด้านหน้า ด้านหลัง และด้านล่างของห้องอบแห้งทำด้วยสังกะสีแผ่นเรียบพันด้วยลวดดำ ทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แต่ละด้านใช้พัดลมของคอยล์เย็นเครื่องปรับอากาศเป่าอากาศเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีขนาดใบพัด 6 × 8 นิ้ว 2 ใบพัด ปรับแรงลมได้ 2 ระดับ คือ ระดับสูง (มีอัตราการไหลอากาศ 0.124 กิโลกรัม/วินาที) และระดับต่ำ (มีอัตราการไหลอากาศ 0.010 กิโลกรัม/วินาที) มีช่องระบายอากาศขนาด 20 × 20 เซนติเมตร อยู่ที่ผนังด้านหน้าและผนังด้านหลังของห้องอบแห้งด้านละ 1 ช่อง การทดลองใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศยี่ห้อ Primus รุ่น HM-004-01 ค่าความผิดพลาด ±2% RH เครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP11 ค่าความผิดพลาด ±2% ต่อเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น MV 2000 ค่าความผิดพลาด ±0.15% สำหรับวัดค่าอุณหภูมิและ ±0.05% สำหรับวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA4102



รูปที่ 2 ตำแหน่งวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศของการทดลอง

ค่าความผิดพลาด ± 0.01 กรัม เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-40 ค่าความผิดพลาด $\pm 5\%$

2.3 วิธีการทดลอง

การทดลองมีการวัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{ambient}) อุณหภูมิทางออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันออก (T_1) อุณหภูมิทางออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันตก (T_2) อุณหภูมิกลางห้องอบแห้ง (T_3) และอุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของห้องอบแห้งที่ช่องระบายอากาศทั้ง 2 ด้าน (T_4) วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศสิ่งแวดล้อม (RH_{ambient}) และความชื้นสัมพัทธ์อากาศกลางห้องอบแห้ง (RH_1) ดังแสดงในรูปที่ 2 บันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และรังสีดวงอาทิตย์ทุกๆ 1 นาที วัดค่าความเร็วการไหลของอากาศที่ตำแหน่งช่องระบายอากาศของห้องอบแห้ง แขนงยางแผ่นแบบ 2 ชั้น (ชั้นบนและชั้นล่าง) ชั้นละ 20 แผ่น มีระยะห่างระหว่างแผ่น 12 เซนติเมตร นำยางแผ่น 4 แผ่น (ชั้นบน 2 แผ่น และชั้นล่าง 2 แผ่น) เป็นยางแผ่น

ตัวอย่างของตัวแทนยางแผ่นในตู้ทั้งหมด บันทึกค่ามวลยางแผ่นทุกๆ 1 ชั่วโมง ในวันที่ 1 ส่วนวันที่ 2 เป็นต้นไปบันทึกทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกว่ายางแผ่นจะแห้งเนือยางแผ่นใส่ทั่วตลอดทั้งแผ่น การอบแห้งวันที่ 1 มีอัตราการไหลอากาศในห้องอบแห้ง 0.248 กิโลกรัม/วินาที การอบแห้งวันที่ 2-5 อัตราการไหลอากาศในห้องอบแห้ง 0.020 กิโลกรัม/วินาที ทดลองในช่วงเวลา 09.00-16.00 นาฬิกา ของแต่ละวันในเดือนมีนาคม

2.3.1 การวิเคราะห์ความชื้นของยางแผ่น

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture Content on Dry Basis) เป็นอัตราส่วนของมวลน้ำในวัสดุต่อมวลแห้งของวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ (1) [1], [3], [12]

$$M_d = \left(\frac{m_w}{m_d} \right) \times 100\% = \left(\frac{m_t - m_d}{m_d} \right) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

m_w คือ มวลน้ำของวัสดุ (g)

m_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (g) โดยการอบที่อุณหภูมิ 103°C 72 ชั่วโมง [12], [13]

m_t คือ มวลที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (g)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) เป็นอัตราส่วนของปริมาณความชื้นที่ยังคงเหลืออยู่ในวัสดุต่อปริมาณความชื้นในวัสดุเริ่มต้น [14] คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$MR = \left(\frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \right) \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (Dimensionless)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (g water/g dry matter)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (g water/g dry matter)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่สภาวะการอบแห้ง (g water/g dry matter)

ความชื้นสมดุลของวัสดุเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณน้ำที่ยังเหลืออยู่ในวัสดุภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่อบแห้ง

ซึ่งเกิดสภาวะสมดุลของไอน้ำในอากาศกับไอน้ำในวัสดุ และเนื่องจากความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ [15], [16] จึงไม่พิจารณาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่สภาวะการอบแห้งในสมการที่ (2) ทำให้สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) คือ สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในวัสดุกับช่วงเวลาคำนวณได้จากสมการที่ (4) [10], [15], [17], [18]

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (4)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (g water/g dry matter-h) M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (g water/g dry matter)

$M_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นของวัสดุก่อนการอบแห้งในช่วงเวลา Δt (g water/g dry matter)

Δt คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.3.2 การวิเคราะห์พลังงาน

ประสิทธิภาพรังสีดวงอาทิตย์ (Collector Efficiency) เป็นอัตราส่วนพลังงานความร้อนที่ได้รับจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ต่อพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ภายใต้สมมติฐานไม่คิดการแผ่รังสีความร้อนออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ พิจารณาค่าประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ด้านทิศตะวันออกกับค่าประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้งแยกออกจากกัน คำนวณได้จากสมการที่ (5) [19], [20] และสมการที่ (6) [21]

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_c}{A_c I} \times 100\% = \frac{\dot{m}_{air} c_{p, air} (T_{c, o} - T_{c, i})}{A_c I} \times 100\% \quad (5)$$

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \dot{V}_{air} \quad (6)$$

เมื่อ η_c คือ ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (%) \dot{Q}_c คือ พลังงานความร้อนที่ได้รับจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (W)

A_c คือ พื้นที่ผิวของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m^2)

I คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2)

\dot{m}_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

$C_{p, air}$ คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg °C)

$T_{c, o}$ คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)

$T_{c, i}$ คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)

ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

\dot{V} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (m^3/s)

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Drying System) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นต่อพลังงานที่ให้กับระบบการอบแห้ง โดยไม่พิจารณาความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ของยางแผ่นและน้ำในเนื้อยาง คำนวณได้จากสมการที่ (7) [10], [20] และสมการที่ (8) [22]

$$\eta_{th} = \frac{E_{evap}}{E_{input}} \times 100\% = \frac{m_{evap} h_{fg}}{(A_c I + \dot{W}_f) t} \times 100\% \quad (7)$$

$$m_{evap} = m_i - m_f \quad (8)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง (%)

E_{evap} คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้น (Wh)

E_{input} คือ พลังงานที่ให้กับระบบการอบแห้ง (Wh)

m_{evap} คือ ความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุในกระบวนการอบแห้ง (kg)

h_{fg} คือ พลังงานความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (Wh/kg) เท่ากับ 661.861 Wh/kg (2382.70 kJ/kg) ที่อุณหภูมิทางออกของห้องอบแห้ง 50°C ซึ่ง 1 kWh = 3.6 MJ

\dot{W}_f คือ กำลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ (W)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

m_i คือ มวลของวัสดุก่อนการอบแห้ง (kg)

m_f คือ มวลของวัสดุหลังการอบแห้ง (kg)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้งต่อความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (9) [9], [20]

$$SEC = \frac{E_t}{m_{\text{evap}}} = \frac{(A_c I + \dot{W}_f) t}{m_{\text{evap}}} \quad (9)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Wh/kg)

E_t คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (Wh)

ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption; SEEC) เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยความชื้น 1 กิโลกรัม ของวัสดุที่อบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (10) [23], [24]

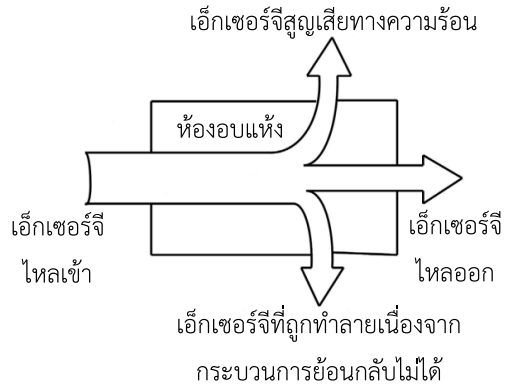
$$SEEC = \frac{E_c}{m_{\text{evap}}} = \frac{\dot{W}_f t}{m_{\text{evap}}} \quad (10)$$

เมื่อ SEEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Wh/kg)

E_c คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (Wh)

2.3.3 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

เอ็กเซอร์จิคำนวณได้จากสมบัติของสารทำงานตัวกลางภายใต้สมมติฐานอากาศเป็นแก๊สอุดมคติ มีสภาวะการไหลคงตัว (Steady Flow) ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง เนื่องจากการระเหยความชื้นของยางแผ่น ความแตกต่างของเอ็กเซอร์จีไหลเข้าและไหลออกของห้องอบแห้งมีค่าเท่ากับผลรวมของการสูญเสียเอ็กเซอร์จีทางความร้อน (Thermal Exergy Loss) และเอ็กเซอร์จีที่ถูกทำลายเนื่องจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (Exergy Destroyed Due to Irreversibility) ดังในรูปที่ 3 เอ็กเซอร์จิคำนวณได้จากสมการที่ (11) [6], [7], [9], [25]–[27]



รูปที่ 3 โต๊ะแกรมการไหลเอ็กเซอร์จีของห้องอบแห้ง

$$Ex = \dot{m}_{da} C_{p, da} \left[(T - T_a) - T_a \ln \frac{T}{T_a} \right] \quad (11)$$

เอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$Ex_{dci} = \dot{m}_{da} C_{p, da} \left[(T_{dci} - T_a) - T_a \ln \frac{T_{dci}}{T_a} \right] \quad (12)$$

เมื่อ Ex_{dci} คือ เอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้ง (W)

\dot{m}_{da} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (kg/s)

$C_{p, da}$ คือ ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศแห้งที่ใช้ในการอบแห้ง (J/kg °C)

T_{dci} คือ อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง (°C)

T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

เอ็กเซอร์จีไหลออกจากห้องอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (13)

$$Ex_{dco} = \dot{m}_{da} C_{p, da} \left[(T_{dco} - T_a) - T_a \ln \frac{T_{dco}}{T_a} \right] \quad (13)$$

เมื่อ Ex_{dco} คือ เอ็กเซอร์จีไหลออกจากห้องอบแห้ง (W)

T_{dco} คือ อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกห้องอบแห้ง (°C)

ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$Ex_{\text{loss}} = Ex_{dci} - Ex_{dco} \quad (14)$$

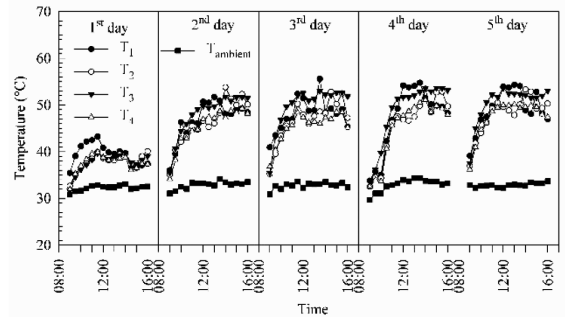
ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีคำนวณได้จากอัตราส่วนของเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในการอบแห้งของวัสดุต่อเอ็กเซอร์จีของอากาศในการอบแห้งที่จ่ายเข้าไปในห้องอบแห้ง สามารถอธิบายได้โดยอัตราส่วนของเอ็กเซอร์จีไหลออกต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้ง ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของห้องอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex_{dco}}{Ex_{dci}} \times 100\% = \frac{Ex_{dci} - Ex_{loss}}{Ex_{dci}} \times 100\% \quad (15)$$

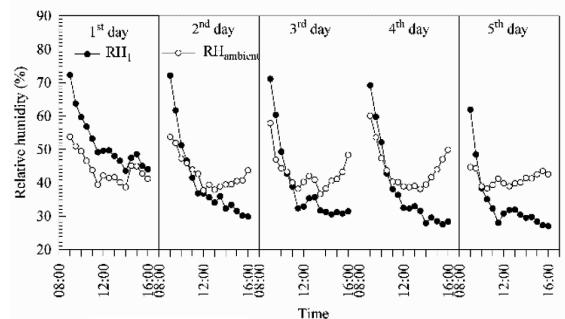
เมื่อ η_{Ex} คือ ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (%)

3. ผลการทดลอง

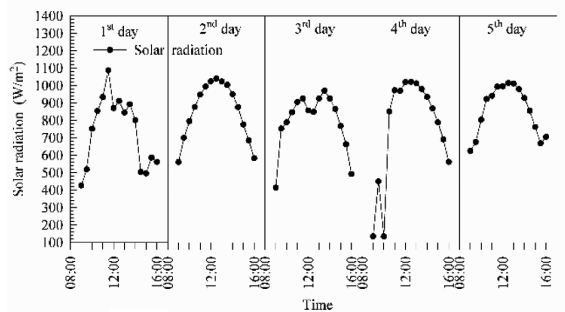
การทดลองอบแห้งยางแผ่นวันที่ 1 มีอัตราการไหลอากาศในห้องอบแห้ง 0.248 กิโลกรัม/วินาที อุณหภูมิทางออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันออกมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 35–43°C อุณหภูมิทางออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันตกอยู่ในช่วง 33–40°C อุณหภูมิกลางห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 32–40°C อุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของห้องอบแห้งทั้ง 2 ด้าน อยู่ในช่วง 32–40°C ความชื้นสัมพัทธ์กลางห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 44–72% อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 31–33°C ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 39–54% รังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 428–1089 วัตต์/เมตร² วันที่ 2–5 มีอัตราการไหลอากาศในห้องอบแห้ง 0.020 กิโลกรัม/วินาที อุณหภูมิทางออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันออกอยู่ในช่วง 34–56°C อุณหภูมิทางออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ทางด้านทิศตะวันตกอยู่ในช่วง 33–54°C อุณหภูมิกลางห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 34–54°C อุณหภูมิเฉลี่ยทางออกของห้องอบแห้งทั้ง 2 ด้าน อยู่ในช่วง 33–51°C ความชื้นสัมพัทธ์กลางห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 27–72% อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 30–34°C ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 37–60% รังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 136–1042 วัตต์/เมตร² ดังแสดงในรูปที่ 3–5 และตารางที่ 1 พบว่า ที่อัตราการไหลอากาศสูงอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะต่ำลงเนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงจะพาความร้อนออกจากห้องอบแห้งสูงตามไปด้วย



รูปที่ 3 อุณหภูมิของการอบแห้ง



รูปที่ 4 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศของการอบแห้ง



รูปที่ 5 ค่ารังสีดวงอาทิตย์ของการอบแห้ง

จากรูปที่ 9 ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์วันที่ 1 มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 16–54% จะสูงกว่าวันที่ 2–5 มีค่าอยู่ในช่วง 2–10% เนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงจะทำให้ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงขึ้นแต่ก็ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงขึ้นตาม และพบว่า การอบแห้ง

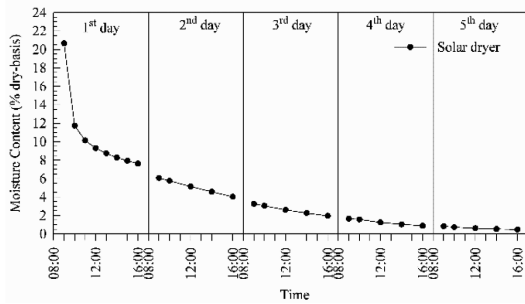
ตารางที่ 1 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งยางแผ่น

ตัวแปร	วันที่ 1	วันที่ 2-5
Mass flow rate of solar collector, East (kg/s)	0.124	0.010
Mass flow rate of solar collector, West (kg/s)	0.124	0.010
Mass flow rate of drying chamber (kg/s)	0.248	0.020
T_1 (°C)	35-43	34-56
T_2 (°C)	33-40	33-54
T_3 (°C)	32-40	34-54
T_4 (°C)	32-40	33-51
T_{ambient} (°C)	31-33	30-34
RH ₁ (%)	44-72	27-72
RH _{ambient} (%)	39-54	37-60
Solar Radiation (W/m ²)	428-1089	136-1042
DR (g water/g dry matter h)	0.0032-0.0893	0.0002-0.0031
Collector efficiency, East (%)	30-54	3-10
Collector efficiency, West (%)	16-50	2-10
Exergy _{inlet} (W)	40-246	4-91
Exergy _{outlet} (W)	5-166	2-77
Exergy _{loss} (W)	18-81	1-43
Exergy efficiency (%)	12-79	42-94
η_{th} (%)	2.11	
SEC (Wh/kg)	31369.27	
SEEC (Wh/kg)	465.77	
Mass Before Drying (kg)	42.864	
Mass After Drying (kg)	36.615	
M_d Before Drying (%)	20.66	
M_d After Drying (%)	0.49	

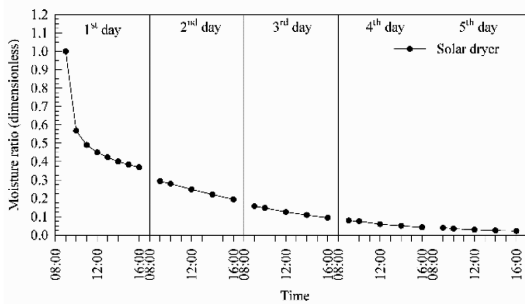
วันที่ 1 อัตราการไหลอากาศสูงจะเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ด้านทิศตะวันออกกับด้านทิศตะวันตกโดยที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ด้านทิศตะวันออกจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าด้านทิศตะวันตกตั้งแต่เวลา 09:30-13:30 นาฬิกา แต่การอบแห้งวันที่ 2-5 อัตราการไหลอากาศ

ต่ำลงประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ด้านทิศตะวันออกกับด้านทิศตะวันตกก็จะต่ำลงไปด้วยและมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การอบแห้งวันที่ 1 อัตราการไหลของอากาศ 0.124 กิโลกรัม/วินาที มีค่าประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 54% สูงกว่างานวิจัยของ Fudholi และคณะ [7] ที่อัตราการไหลอากาศ 0.13 กิโลกรัม/วินาที มีค่าประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 48%

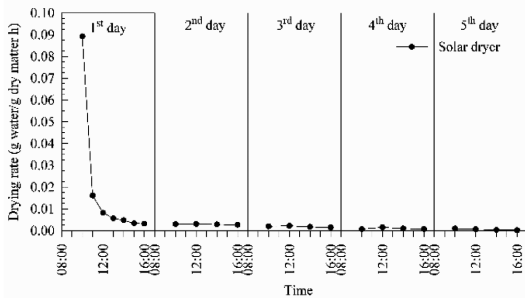
จากรูปที่ 6-8 ความชื้นยางแผ่น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งเนื่องจากการระเหยความชื้นที่ผิวของยางแผ่นหลังจากนั้นความชื้นจะระเหยออกช้าๆ เนื่องจากการระเหยความชื้นในเนื้อยางแผ่นมาซึ่งผิวยางแผ่น การอบแห้งวันที่ 1 อัตราการอบแห้งมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0032-0.0893 กรัมของน้ำ/กรัมของวัสดุแห้ง-ชั่วโมง การอบแห้งวันที่ 2-5 มีค่าอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.0002-0.0031 กรัมของน้ำ/กรัมของวัสดุแห้ง-ชั่วโมง เมื่ออบแห้งได้ 5 วัน ความชื้นยางแผ่นเหลือ 0.49% เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 31369.27 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 465.77 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง 2.11% เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งยางแผ่นแต่ละครั้ง 2.910 กิโลวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 12 บาท (คิดที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 4 บาท/หน่วย) นอกจากนี้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งของการทดลองอบแห้งแต่ละวันมีค่า 8.36%, 1.17%, 0.81%, 0.50% และ 0.20% ตามลำดับ การอบแห้งในแต่ละวันมีประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งต่ำกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของ Dejchanchaiwong และคณะ [3] ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งของการทดลองแต่ละวัน 13.3%, 2.1%, 1.6% และ 1.3% ตามลำดับ เนื่องจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองนี้มีปริมาตรห้องอบแห้งที่น้อยกว่าและมีปริมาณยางแผ่นมากกว่าส่งผลให้ยางแผ่นระเหยความชื้นออกได้น้อยกว่าแต่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์น้อยกว่า 62.67%



รูปที่ 6 ความชื้นของยางแผ่น

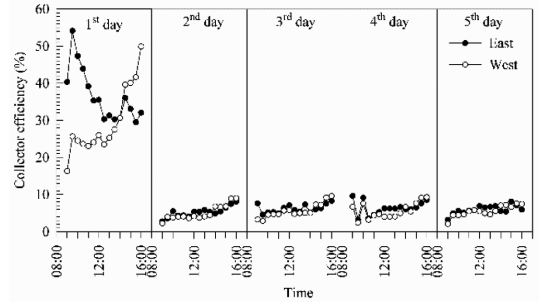


รูปที่ 7 อัตราส่วนความชื้นของยางแผ่น

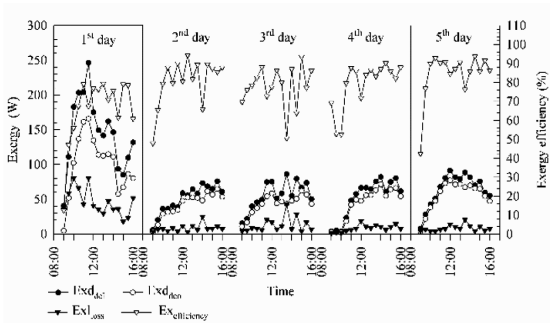


รูปที่ 8 อัตราการอบแห้งของยางแผ่น

จากรูปที่ 10 การอบแห้งวันที่ 1 แอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้งมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 40–246 วัตต์ แอ็กเซอร์จีไหลออกอยู่ในช่วง 5–166 วัตต์ แอ็กเซอร์จีสูญเสียอยู่ในช่วง 18–81 วัตต์ ประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีอยู่ในช่วง 12–79 วัตต์ ส่วนการอบแห้งวันที่ 2–5 แอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 4–91 วัตต์ แอ็กเซอร์จีไหลออกอยู่ในช่วง 2–77 วัตต์ แอ็กเซอร์จีสูญเสียอยู่ในช่วง 1–43 วัตต์ ประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีอยู่ในช่วง 42–94 วัตต์ จะเห็นว่าการอบแห้งวันที่ 1 แอ็กเซอร์จี



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์



รูปที่ 10 แอ็กเซอร์จีและประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง

ไหลเข้า แอ็กเซอร์จีไหลออก และแอ็กเซอร์จีสูญเสียมีค่าสูงกว่าวันที่ 2–5 เนื่องจากมีอัตราการไหลของอากาศไหลเข้ามากกว่า ในขณะที่มีอุณหภูมิอากาศไหลเข้าห้องอบแห้งต่ำกว่า แต่ประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีจะต่ำกว่าการอบแห้งในวันที่ 2–5 เนื่องจากแอ็กเซอร์จีสูญเสียสูงทำให้ประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีต่ำลง อัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าห้องอบแห้งมีผลต่อแอ็กเซอร์จีสูญเสียคือที่อัตราการไหลสูงแอ็กเซอร์จีสูญเสียก็จะสูงด้วยส่งผลให้ประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีต่ำลงและเมื่ออัตราการไหลของอากาศไหลเข้าห้องอบแห้งน้อยลงแอ็กเซอร์จีสูญเสียก็จะน้อยลงตามไปด้วยส่งผลให้ประสิทธิภาพแอ็กเซอร์จีสูงขึ้น แอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่อประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้นและแอ็กเซอร์จีไหลเข้าห้องอบแห้งจะน้อยลงเมื่อประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์น้อยลงเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่น้อยลง

4. สรุป

การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งยางแผ่น การอบแห้งวันที่ 1 มีอัตราการไหลอากาศสูงทำให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำกว่าวันที่ 2-5 ที่มีอัตราการไหลต่ำเนื่องจากอัตราการไหลอากาศสูงจะพาความร้อนออกจากห้องอบแห้งสูงตามไปด้วย ในขณะที่ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์วันที่ 1 มีอัตราการไหลอากาศสูงทำให้ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าวันที่ 2-5 ที่มีอัตราการไหลต่ำเนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงจะทำให้ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงขึ้น แต่ก็ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงขึ้นตาม ความชื้นยางแผ่น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากเป็นการระเหยความชื้นที่ผิวของยางแผ่นหลังจากนั้นความชื้นจะระเหยออกช้าๆ เนื่องจากเป็นการระเหยความชื้นในเนื้อยางแผ่นมายังผิวยางแผ่น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 31369.27 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 465.77 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง 2.11% เอ็กเซอร์จีของการอบแห้งวันที่ 1 เอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก และเอ็กเซอร์จีสูญเสียมีค่าอยู่ในช่วง 40-246, 5-166 และ 18-81 วัตต์ ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าวันที่ 2-5 มีค่าอยู่ในช่วง 4-91, 2-77 และ 1-43 วัตต์ ตามลำดับ เนื่องจากมีอัตราการไหลของอากาศไหลเข้าสูงกว่าในขณะที่มีอุณหภูมิอากาศไหลเข้าห้องอบแห้งต่ำกว่า แต่การอบแห้งวันที่ 1 มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีอยู่ในช่วง 12-79% ต่ำกว่าวันที่ 2-5 มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีอยู่ในช่วง 42-94% เนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงเอ็กเซอร์จีสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีต่ำลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และความอนุเคราะห์จากสหกรณ์สวนยางพิจิตร จำกัด ตำบลพิจิตร อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Jitjack, S. Thepa, K. Sudaprasert, and P. Namprakai, "Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels," *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 178-193, 2016.
- [2] A. Djebli, S. Hanini, O. Badaoui, B. Haddad, and A. Benhamou, "Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1494-1506, 2020.
- [3] R. Dejchanchaiwong, A. Arkasuwan, A. Kumar, and P. Tekasakul, "Mathematical modeling and performance investigation of mixed-mode and indirect solar dryers for natural rubber sheet drying," *Energy for Sustainable Development*, vol. 34, pp. 44-53, 2016.
- [4] W. Jeentada and P. Phetsongkram, "Geometrical effects of solar greenhouse dryer on rubber sheet drying," *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 1, pp. 89-99, 2017 (in Thai).
- [5] W. Jeentada, J. Jareanjit, and P. Tippracha, "Drying experiment of rubber sheet using solar dryer with solar collector installed on top wall of the dryer," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 23-33, 2019 (in Thai).
- [6] M. C. Ndukwu, L. Bennamoun, F. I. Abam, A. B. Eke, and D. Ukoha, "Energy and exergy analysis of a solar dryer integrated with sodium sulfate decahydrate and sodium chloride as thermal storage medium," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 1182-1192, 2017.
- [7] A. Fudholi, K. Sopian, M. A. Alghoul, M. H. Ruslan, and M. Y. Othman, "Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds," *Renewable Energy*, vol. 78,

- pp. 561–565, 2015.
- [8] W. Nilnont and S. Phitakwinai, “Energy and exergy potential assessment of solar tunnel dryer,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 30, no. 3, pp. 91–107, 2019 (in Thai).
- [9] D. K. Rabha, P. Muthukumar, and C. Somayaji, “Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger,” *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 764–773, 2017.
- [10] S. Vijayan, T. V. Arjunan, and A. Kumar, “Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer for drying bitter gourd slices,” *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2210–2223, 2020.
- [11] T. Naemsai, J. Jareanjit, and W. Jeentada, “Effect of free convection on rubber sheets drying process using energy and exergy analyses,” *RMUTSB Academic Journal*, vol. 3, no.1, pp. 66–78, 2015 (in Thai).
- [12] K. Chapchaimoh, N. Poomsa-ad, L. Wiset, and J. Morris, “Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 95, pp. 491–498, 2016.
- [13] B. Tanwanichkul, S. Thepa, and W. Rordprapat, “Thermal modeling of the forced convection sandwich greenhouse drying system for rubber sheets,” *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 511–523, 2013.
- [14] X. Wu, M. Zhang, and Z. Li, “Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of cordyceps militaris,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 111, pp. 790–798, 2019.
- [15] B. M. A. Amer, K. Gottschalk, and M. A. Hossain, “Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile,” *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 539–547, 2018.
- [16] A. E. khadraoui, I. Hamdi, S. Kooli, and A. Guizani, “Drying of red pepper slices in a solar greenhouse dryer and under open sun: Experimental and mathematical investigations,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 52, pp. 262–270, 2019.
- [17] Y. Qiu, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, X. Luo, and Q. Yu, “Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system,” *Solar Energy*, vol. 137, pp. 225–235, 2016.
- [18] P. Wang, D. Mohammed, P. Zhou, Z. Lou, P. Qian, and Q. Zhou, “Roof solar drying processes for sewage sludge within sandwich h-like chamber bed,” *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 1071–1081, 2019.
- [19] L. V. E. Cesar, C. M. A. Lilia, G. V. Octavio, P. F. Isaac, and B. O. Rogelio, “Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*),” *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 845–855, 2020.
- [20] A. B. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, and V. Meda, “A review on indirect type solar dryers for agricultural crops-Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights,” *Applied Energy*, vol. 258, pp. 114005, 2020.
- [21] M. M. Morad, M. A. El-Shazly, K. I. Wasfy, and H. A. M. El-Maghawry, “Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying peppermint



- plants,” *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 992–1004, 2017.
- [22] W. Wang, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, and L. Yang, “Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 134, pp. 310–321, 2018.
- [23] A. Ziaforoughi, and J. A. Esfahani, “A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer,” *Solar Energy*, vol. 136, pp. 428–436, 2016.
- [24] J. P. Ekka, K. Bala, P. Muthukumar, and D. K. Kanaujiya, “Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (*Kaempferia parviflora*) using two successive air mass flow rates,” *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 55–66, 2020.
- [25] M. S. H. Sarker, M. N. Ibrahim, N. A. Aziz, and M. S. Punan, “Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy,” *Energy*, vol. 84, pp. 131–138, 2015.
- [26] O. Prakash, A. Kumar, and V. Laguri, “Performance of modified greenhouse dryer with thermal energy storage,” *Energy Reports*, vol. 2, pp. 155–162, 2016.
- [27] F. Afzali, H. Darvishi, and N. B. Khazaei, “Optimizing exergetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 154, pp. 358–367, 2019.