



การทดลองศึกษาภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศ

วสันต์ จินธาตา* บัญญัติ นิยมवास และ อนเนก ไทยกุล

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-7431-7100 ต่อ 3020 อีเมล: wasan.j@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.06.002

รับเมื่อ 11 สิงหาคม 2560 ตอบรับเมื่อ 8 ธันวาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 5 มิถุนายน 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองศึกษาภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศ ทำการทดลอง 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ความเร็วลม 2.5 m/s มีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm² อบแห้งจนปลามีความชื้นต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง กรณีที่ 2 วันแรกความเร็วลม 5.5 m/s มีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm² วันที่ 2 ความเร็วลม 2.5 m/s มีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm² กรณีที่ 3 วันแรกความเร็วลม 5.5 m/s มีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 4800 cm² วันที่ 2 ความเร็วลม 2.5 m/s มีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm² จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งกรณีที่ 3 เป็นสถานะที่ทำให้อัตราการอบแห้งของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสูงกว่าอัตราการอบแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงในช่วง 3 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งเพราะขนาดพื้นที่ช่องช่องระบายอากาศมีผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญคือที่ความเร็วลมในห้องอบแห้งเท่ากันแต่พื้นที่ช่องระบายอากาศ 4,800 cm² จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่ามีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm² มีอัตราการอบแห้งในวันแรกอยู่ในช่วง 0.18–0.56 g water/g dry matter h ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง 32.18% และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 2087.72 Wh/kg การอบแห้งในวันแรกด้วยเครื่องอบแห้งพื้นที่ช่องระบายอากาศมากทำให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำแต่ที่อุณหภูมิต่ำนี้ทำให้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงแต่มีพื้นที่ช่องระบายอากาศน้อย

คำสำคัญ: อบแห้ง, ปลา, พลังงานแสงอาทิตย์, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การอ้างอิงบทความ: วสันต์ จินธาตา บัญญัติ นิยมवास และ อนเนก ไทยกุล, “การทดลองศึกษาภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 3, หน้า 525–536, ก.ค.-ก.ย. 2561.

Experimental Study on Drying Conditions of Solar Fish Dryer with Temperature Controlled by Open-closed Ventilating System

Wasan Jeentada*, Banyat Niyomvas and Anek Thaikul

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.2018.06.002

Received 11 August 2017; Accepted 8 December 2017; Published online: 5 June 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to conduct an experimental study on the solar fish dryer with temperature controlled by open-closed ventilating system. In the experiment, three cases of the study were examined by the different drying conditions. The first case including the air velocity of 2.5 m/s and the ventilating area of 480 cm² were applied to dry the fish until the moisture content below 70% dry basis. The second case was conducted for 2 days. The air velocity of 5.5 m/s and the ventilating area of 480 cm² were applied to test in first day of the drying time while on the second day, the air velocity of 2.5 m/s and the ventilating area of 480 cm² were set as the drying condition. For the third case, the drying condition was similar to that of the second case except the ventilating area of 4,800 cm² was applied in the first day of the drying time. From the experimental results, it can be seen that the third case can provide the faster drying rate than the fish drying the direct sun dry system in the first three hours drying time because the ventilating area plays a significant effect on the drying rate. In other words, at the same velocity, the area of 4,800 cm² can make the higher drying rate than the ventilating area of 480 cm² when the dryer with the larger area has a drying rate range of 0.18-0.56 g water/ g dry matter h, thermal efficiency of drying system of 32.18% and specific energy consumption of 2,087.72 Wh/kg. Therefore, in the first day of drying time, the dryer with larger ventilating area providing the lower drying temperature can operate with a higher drying rate than the dryer with smaller ventilating area.

Keywords: Drying, Fish, Solar Energy, Solar Dryer

Please cite this article as: W. Jeentada, B. Niyomvas, and A. Thaikul, "Experimental study on drying conditions of solar fish dryer with temperature controlled by open-closed ventilating system," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 525-536, Jul.-Sep. 2018 (in Thai).



1. บทนำ

การทำปลาแห้งเป็นการถนอมอาหารโดยการยับยั้งเอนไซม์และถ่ายเทความชื้นที่จำเป็นสำหรับแบคทีเรียและการเจริญเติบโตของเชื้อรา [1] ด้วยการใช้พลังงานจากแหล่งต่างๆ มาระเหยความชื้นออกจากตัวปลา พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหนึ่งที่เกษตรกรนำมาใช้ในการผลิตปลาแห้งเพราะเป็นพลังงานที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย โดยส่วนใหญ่เกษตรกรจะทำปลาแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงในตอนกลางวันและเก็บเข้าที่ร่มในตอนกลางคืนวันรุ่งขึ้นก็จะนำปลามาตากแดดทำซ้ำแบบนี้จนปลาแห้งตามความต้องการของตลาดจะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 2-3 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ในขณะที่กระบวนการผลิตปลาแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงจะมีแมลงและฝุ่นมาปนเปื้อนกับปลาที่ทำการตากแห้ง จึงผลิตเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ลดปัญหาเรื่องแมลงและฝุ่นมาปนเปื้อนกับปลาที่ตากแห้งแต่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ก็ยังมีปัญหาเรื่องอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเนื่องจากอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงตามค่ารังสีดวงอาทิตย์ในช่วงที่มีค่ารังสีดวงอาทิตย์มากจะทำให้เครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงเนื้อปลาที่อบแห้งจะสุกมีสีขาวขุ่น [2] ทำให้โปรตีนในเนื้อปลาลดลง [3] ซึ่งการอบแห้งปลาที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นประโยชน์ต่อการคงไว้ของคุณภาพของเนื้อปลา [4] Jeentada *et al.* [2] ทดลองอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ด้านบนห้องอบแห้งปกคลุมด้วยกระจกใส ระบายอากาศด้วยลูกหมุนระบายอากาศ Kituu *et al.* [5] อบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ใช้แผงรับรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งระบายอากาศด้วยพัดลมระบายอากาศ Yaibok *et al.* [6] อบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับขดลวดความร้อนแบบไฟฟ้าใช้แผงรับรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง ระบายอากาศด้วยพัดลมระบายอากาศ เครื่องอบแห้งปลาพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านมาจะมีอุณหภูมิสูงเมื่อค่ารังสีดวงอาทิตย์สูงในบางช่วงเวลาทำให้การอบปลาที่อุณหภูมิสูงได้เนื้อปลาที่มีคุณภาพลดลงและอาจทำให้นเนื้อปลาสุก เครื่องอบแห้งปลาพลังงานแสงอาทิตย์จึงต้อง

สามารถควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินจนทำให้นเนื้อปลาสุก ซึ่งได้ใช้วิธีการควบคุมอุณหภูมิโดยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศด้วยประตูระบายอากาศเพราะช่องระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศร้อนในเครื่องอบแห้งไหลออกได้ดีส่งผลให้ภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิลดลง [7] การเปิด-ปิดช่องระบายอากาศยังทำให้ขนาดพื้นที่ของช่องระบายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ตำแหน่งของช่องระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งจะส่งผลต่อการระบายอากาศของห้องอบแห้งเพราะตำแหน่งช่องระบายอากาศที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศในห้องอบแห้งที่แตกต่างกัน [8] การอบแห้งวัสดุในช่วงแรกนั้นจะเกิดการระเหยความชื้นที่ผิวของวัสดุเมื่อความชื้นที่ผิววัสดุลดต่ำลงความชื้นในวัสดุจะค่อยๆ แพร่จากด้านในออกมายังผิวนอกวัสดุซึ่งการแพร่ของความชื้นจากภายในวัสดุออกมายังผิวนอกวัสดุจะเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการระเหยความชื้นที่ผิวของวัสดุทำให้การลดลงของความชื้นช้ากว่าการอบแห้งในช่วงแรก [9], [10] งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองศึกษาสภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ปลาที่นำมาทดลองเป็นปลาไหลที่ผ่านกระบวนการทอดเกลือ ตัวหัว ผ่าท้อง ควักไส้ และแช่น้ำเกลือ 10-15 นาที พร้อมทั้งจะดำเนินการตากแห้งทำปลาแห้งจำหน่ายของชุมชนวังเขิว-วังขาว ต.บ่อทราย อ.เมือง จ.สงขลา

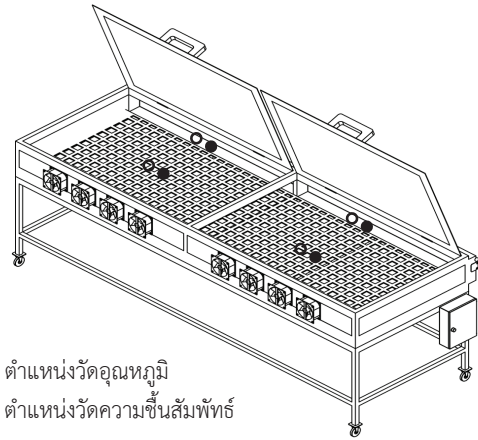
2.2 อุปกรณ์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาดห้องอบแห้ง 80×240×20 cm (กว้าง×ยาว×สูง) บรรจุปลาได้เฉลี่ย 12 kg (เฉลี่ย 140 ตัว) ด้านบนห้องอบแห้งปกคลุมด้วยกระจกใสหนา 5 mm ด้านข้างห้องอบแห้งฝั่งทางเข้าของอากาศติดตั้งพัดลมเป่าอากาศขนาด 12×12 cm ด้านข้างของห้องอบแห้ง



รูปที่ 1 รูปจริงเครื่องอบแห้งปลาพลังงานแสงอาทิตย์

ฝั่งทางออกของอากาศทำด้วยแผ่นอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นประตูระบายอากาศที่สามารถเปิด-ปิดได้ โดยจะเปิดประตูระบายอากาศเมื่อมีอุณหภูมิสูงถึงค่าที่ตั้งไว้และจะปิดประตูระบายอากาศเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ในขณะที่ประตูระบายอากาศปิดก็จะมีช่องระบายอากาศเหลืออยู่ 2 cm ตลอดความยาวของห้องอบแห้งคิดเป็นพื้นที่ 480 cm^2 ($2 \times 240 \text{ cm}$) ส่วนในขณะที่ประตูระบายอากาศเปิดจะมีช่องระบายอากาศขนาด 20 cm ตลอดความยาวของห้องอบแห้งคิดเป็นพื้นที่ $4,800 \text{ cm}^2$ ($20 \times 240 \text{ cm}$) ใช้มอเตอร์เกียร์หมุนสองทิศทางควบคุมการเปิด-ปิดของประตูระบายอากาศโดยรับคำสั่งการเปิด-ปิดประตูระบายอากาศมาจากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและใช้ฟร็อกซิมีตีสวิทช์ (Proximity Switch) มาควบคุมตำแหน่งการเปิด-ปิดประตูระบายอากาศดังแสดงในรูปที่ 1 ในการทดลองใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศยี่ห้อ Primus รุ่น HM-004-01 ค่าความผิดพลาด $\pm 2\%$ RH เครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP11 ค่าความผิดพลาด $\pm 2\%$ ต่อเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น MV 2000 ค่าความผิดพลาด $\pm 0.15\%$ สำหรับวัดค่าอุณหภูมิและ $\pm 0.05\%$ สำหรับวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA4102 ค่าความผิดพลาด $\pm 0.01 \text{ g}$ มีตำแหน่งวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

2.3 วิธีการทดลอง

การทดลองอบแห้งปลาจะมีการวัดบันทึกค่าอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์อากาศตรงตำแหน่งกลางห้องอบแห้งและตรงตำแหน่งทางออกของห้องอบแห้งแล้วนำค่ามาเฉลี่ยเพื่อเป็นค่าของตำแหน่งกลางห้องอบแห้ง (Middle) และค่าของตำแหน่งทางออกของห้องอบแห้ง (Outlet) ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม ค่ารังสีดวงอาทิตย์บันทึกทุกๆ 1 นาที ส่วนน้ำหนักปลาบันทึกค่าทุก 1 ชั่วโมง จนปลามีความชื้นต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง ทำการทดลอง 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 เปิดพัดลมให้ความเร็วลมไหลผ่านในห้องอบแห้งเฉลี่ย 2.5 m/s ควบคุมการเปิดประตูระบายอากาศไว้ที่ 45°C (ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 45°C ประตูระบายอากาศจะปิดซึ่งเหลือพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm^2 แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 45°C ประตูระบายอากาศจะเปิดซึ่งมีพื้นที่ช่องระบายอากาศ $4,800 \text{ cm}^2$) อบแห้งจนกว่าปลามีความชื้นต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง กรณีที่ 2 ในวันแรกเปิดพัดลมให้ความเร็วลมไหลผ่านในห้องอบแห้งเฉลี่ย 5.5 m/s ควบคุมการเปิดประตูระบายอากาศไว้ที่ 45°C ส่วนวันที่ 2 เปิดพัดลมให้ความเร็วลมไหลผ่านในห้องอบแห้งเฉลี่ย 2.5 m/s ควบคุมการเปิดประตูระบายอากาศไว้ที่ 45°C อบแห้งจนกว่าปลามีความชื้นต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง กรณีที่ 3 ในวันแรกเปิดพัดลมให้ความเร็วลมไหลผ่านในห้องอบแห้งเฉลี่ย 5.5 m/s ควบคุมการเปิดประตูระบายอากาศไว้ที่ 20°C (ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า

20°C ประสิทธิภาพอากาศจะปิดซึ่งเหลือพื้นที่ช่องระบายอากาศ 480 cm² แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 20°C ประสิทธิภาพอากาศจะเปิด ซึ่งมีพื้นที่ช่องระบายอากาศ 4,800 cm² จึงทำให้ประตูระบายเปิดตั้งรูปที่ 2 ส่วนวันที่ 2 เปิดพัดลมให้ความเร็วลมไหลผ่านในห้องอบแห้งเฉลี่ย 2.5 m/s ควบคุมการเปิดประตูระบายอากาศไว้ที่ 45°C อบแห้งจนกว่าปลามีความชื้นต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง การทดลองทั้ง 3 กรณีนี้จะมีสภาวะการทดลองแตกต่างกันเฉพาะในวันแรกของการอบแห้ง ในขณะที่เดียวกันก็ทำการอบแห้งปลาด้วยการตากแดดโดยตรงไปพร้อมกับการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ทดลองในช่วงเวลา 09.00-16.00 น. ของเดือนมีนาคม

2.4 การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture Content on Dry Basis) เป็นอัตราส่วนของมวลน้ำในวัสดุต่อมวลแห้งของวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ (1) [11]

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

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

m_w คือ มวลน้ำของวัสดุ (g)

M_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (g)

m_t คือ มวลที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (g)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) ขึ้นอยู่ปริมาณความชื้นในวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ (2) [12]

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

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น (No Unit)

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)

อัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณในรูปแบบสมการที่ง่ายจากสมการที่ (3)

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

เนื่องจากค่าของความชื้นสมดุลของวัสดุที่สภาวะการอบแห้ง (M_{eq}) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (M_i) และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (M_t) [13], [14]

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) คำนวณได้จากสมการที่ (4) [15]

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

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)

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Drying System) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นต่อพลังงานที่ให้กับระบบการอบแห้ง ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการพาความร้อน (Force Convection Solar Dryer) จะต้องรวมพลังงานของพัดลมที่ให้กับระบบการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (5) [16]

$$\eta_{th} = \frac{E_{evap}}{E_{input}} \times 100\% = \frac{m_{evap} h_{fg}}{(A_c I + \dot{W}_f) t} \times 100\% \quad (5)$$

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 671.83 Wh/kg (2418.60 kJ/kg)

ที่อุณหภูมิทางออกของห้องอบแห้ง 35°C ซึ่ง 1 kWh = 3.6 MJ)

A_c คือ พื้นที่ของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m^2)

I คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2)

\dot{W}_f คือ กำลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ (W)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้งต่อความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (6) [17], [18]

$$SEC = \frac{E_t}{m_{evap}} \quad (6)$$

เมื่อ SEC คือ การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Wh/kg)

E_t คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (Wh)

พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (7) [18]

$$E_t = (A_c I + \dot{W}_f) t \quad (7)$$

ความชื้นในวัสดุที่ระเหยในระหว่างกระบวนการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (8)

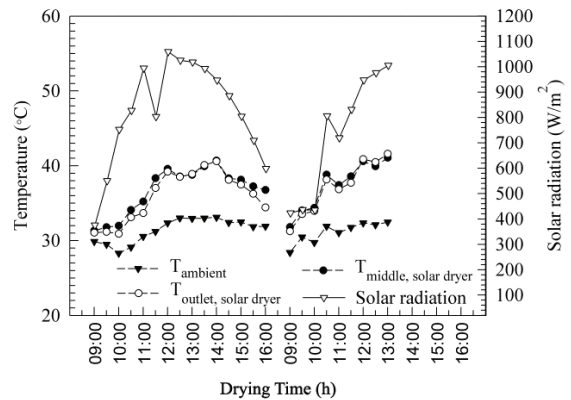
$$m_{evap} = m_i - m_f \quad (8)$$

เมื่อ m_i คือ มวลของวัสดุก่อนกระบวนการอบแห้ง (kg)

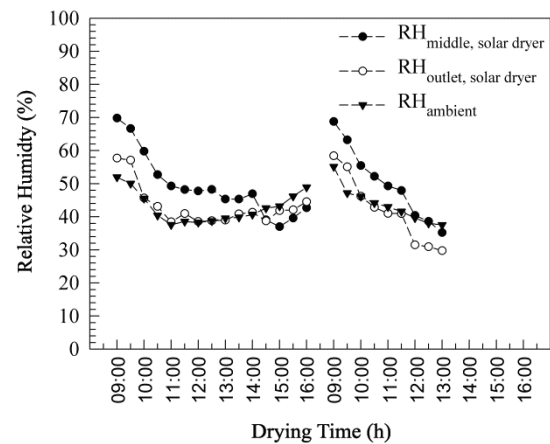
m_f คือ มวลของวัสดุหลังกระบวนการอบแห้ง (kg)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

กรณีที่ 1 ในเครื่องอบแห้งมีมวลปลาเริ่มต้น 12.03 kg มวลหลังการอบแห้ง 3.02 kg ความชื้นปลาเริ่มต้น 425.99% มาตรฐานแห้ง ความชื้นปลาหลังการอบแห้ง 69.44% มาตรฐานแห้ง (ตอนเวลา 11.00 น. ของวันที่ 2) การตากแดดโดยตรงมีความชื้นปลาเริ่มต้น 402.92% มาตรฐานแห้ง ความชื้นปลาหลังการอบแห้ง 64.52% มาตรฐานแห้ง (ตอนเวลา 11.00 น. ของวันที่ 2) ค่ารังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 375–1059 W/m^2 เฉลี่ย 780 W/m^2 ดังรูปที่ 3 ความเร็วลม

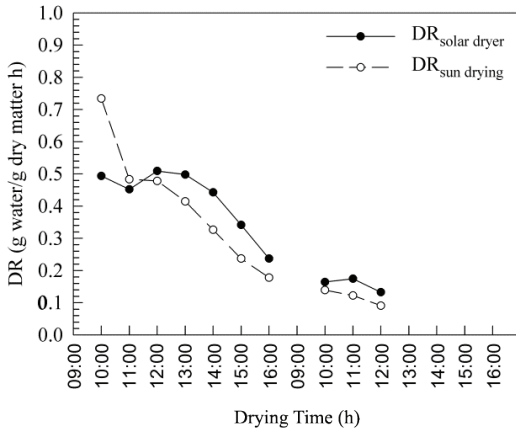


รูปที่ 3 อุณหภูมิและค่ารังสีดวงอาทิตย์ กรณีที่ 1

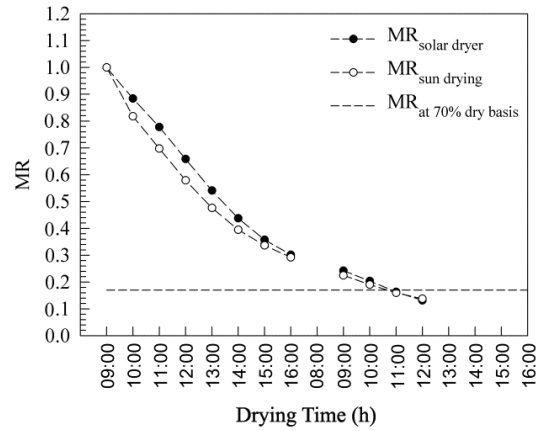


รูปที่ 4 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ กรณีที่ 1

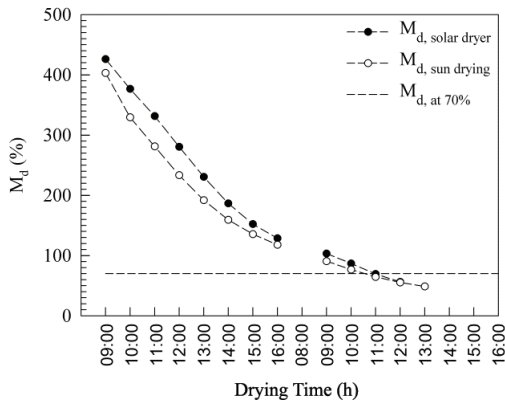
สิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 1.0 m/s วันแรกค่าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 31–40°C เฉลี่ย 36°C อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 28–33°C เฉลี่ย 31°C ดังรูปที่ 3 ความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 37–69% เฉลี่ย 49% ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 37–51% เฉลี่ย 42% ดังรูปที่ 4 อัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.24–0.51 g water/g dry matter h สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง และ 0.18–0.73 g water/g dry matter h สำหรับการตากแดดโดยตรง ดังรูปที่ 5 อัตราการอบแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงในช่วงแรกของการอบแห้ง (ในช่วงเวลา 09.00–11.00 น.) สูงกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเนื่องจากประจุระบายอากาศปิดมีพื้นที่ช่องระบายอากาศขนาด 480 cm^2 จึงพา



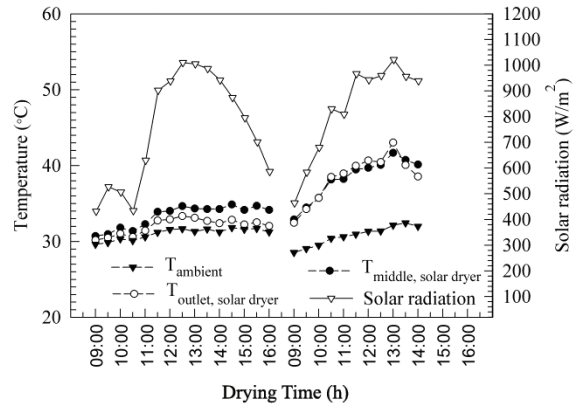
รูปที่ 5 อัตราการอบแห้ง กรณีที่ 1



รูปที่ 7 อัตราส่วนความชื้น กรณีที่ 1



รูปที่ 6 ความชื้นปลา กรณีที่ 1

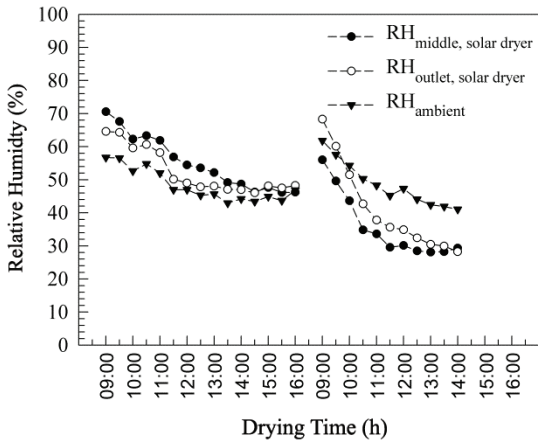


รูปที่ 8 อุณหภูมิและค่ารังสีดวงอาทิตย์ กรณีที่ 2

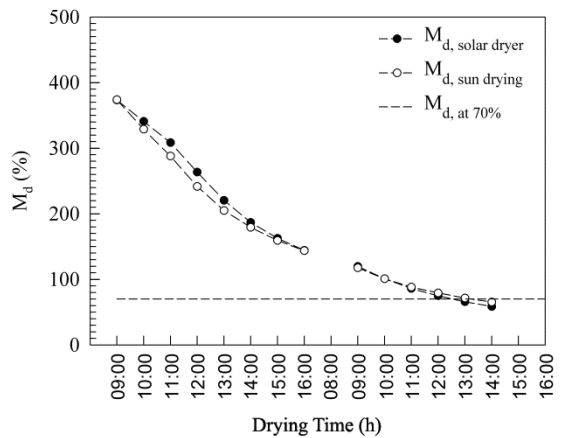
ความชื้นออกจากห้องอบแห้งได้ไม่ต้งส่งผลให้ความชื้นปลาในเครื่องอบแห้งในช่วงเวลา 09.00–11.00 น. ลดลงช้ากว่าการตากแดดโดยตรงทำให้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระเหยความชื้นปลาให้ต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง ได้ช้ากว่าการตากแดดโดยตรงทั้งที่มีอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 6 และแสดงเป็นอัตราส่วนความชื้นดังรูปที่ 7 วันที่สองค่าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 31–41°C เฉลี่ย 37°C อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 28–32°C เฉลี่ย 31°C ความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 29–68% เฉลี่ย 50% ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 37–55% เฉลี่ย 43% มีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.13–0.17 g water/g dry matter h สำหรับการอบแห้งด้วย

เครื่องอบแห้ง และ 0.07–0.14 g water/g dry matter h สำหรับการตากแดดโดยตรง จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง 36.26% การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 1853.02 Wh/kg

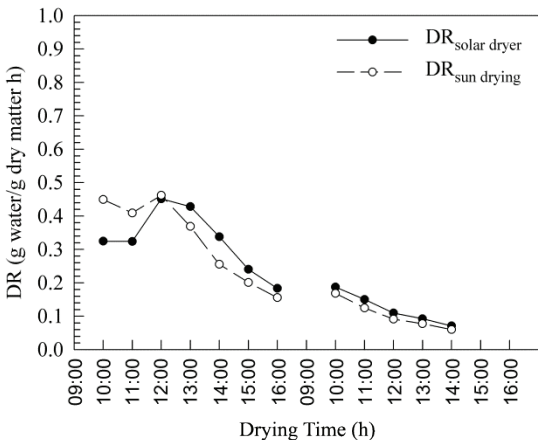
กรณีที่ 2 ในเครื่องอบแห้งมีมวลปลาเริ่มต้น 12.22 kg มวลหลังการอบแห้ง 3.32 kg ความชื้นปลาเริ่มต้น 373.33% มาตรฐานแห้ง ความชื้นปลาหลังการอบแห้ง 65.79% มาตรฐานแห้ง (ตอนเวลา 13.00 น. ของวันที่ 2) การตากแดดโดยตรงมีความชื้นปลาเริ่มต้น 373.75% มาตรฐานแห้ง ความชื้นปลาหลังการอบแห้ง 65.45% มาตรฐานแห้ง (ตอนเวลา 14.00 น. ของวันที่ 2) ค่ารังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 431–1021 W/m² เฉลี่ย 785 W/m² ดังรูปที่ 8



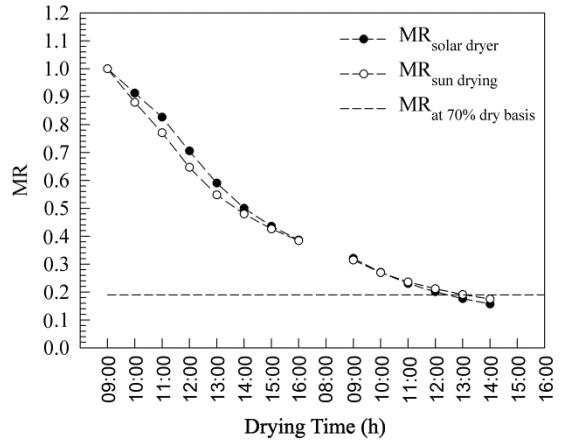
รูปที่ 9 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ กรณีที่ 2



รูปที่ 11 ความชื้นปลา กรณีที่ 2



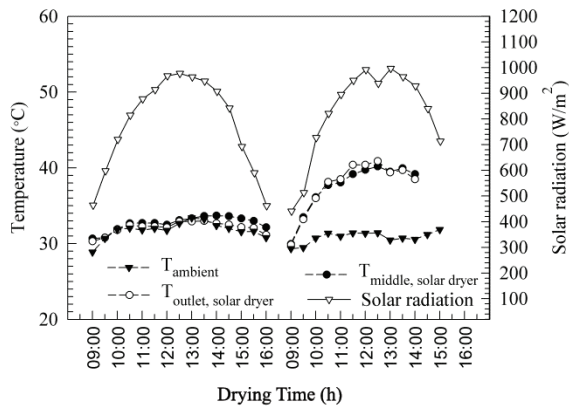
รูปที่ 10 อัตราการอบแห้ง กรณีที่ 2



รูปที่ 12 อัตราส่วนความชื้น กรณีที่ 2

ความเร็วลมสิ่งแวดลอมเฉลี่ย 1.0 m/s วันแรกค่าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 30–34°C เฉลี่ย 33°C อุณหภูมิสิ่งแวดลอมอยู่ในช่วง 29–31°C เฉลี่ย 31°C ดังรูปที่ 8 ความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 46–70% เฉลี่ย 55% ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดลอมอยู่ในช่วง 42–56% เฉลี่ย 48% ดังรูปที่ 9 อัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.18–0.45 g water/g dry matter h สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง และ 0.16–0.46 g water/g dry matter h สำหรับการตากแดดโดยตรง ดังรูปที่ 10 อัตราการอบแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงในช่วงแรกของการอบแห้ง (ในช่วงเวลา 09.00–12.00 น.) สูงกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเนื่องจากประตู

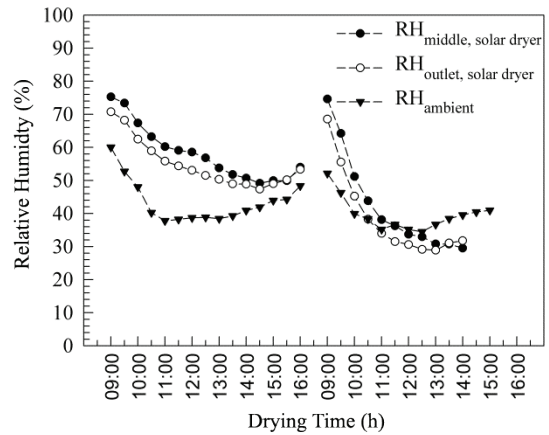
ระบายอากาศปิดมีพื้นที่ช่องระบายอากาศขนาด 480 cm² จึงพาความชื้นออกจากห้องอบแห้งได้ไม่ดีส่งผลให้ความชื้นปลาในเครื่องอบแห้งในช่วงเวลา 09.00–12.00 น. ลดลงช้ากว่าการตากแดดโดยตรงทำให้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระเหยความชื้นปลาให้ต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้งได้ช้ากว่าการตากแดดโดยตรงทั้งที่มีอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดลอมและมีความเร็วลมของพัดลมระบายอากาศเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 11 และแสดงเป็นอัตราส่วนความชื้น ดังรูปที่ 12 วันที่สองค่าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 32–43°C เฉลี่ย 38°C อุณหภูมิสิ่งแวดลอมอยู่ในช่วง 28–32°C เฉลี่ย 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งอยู่



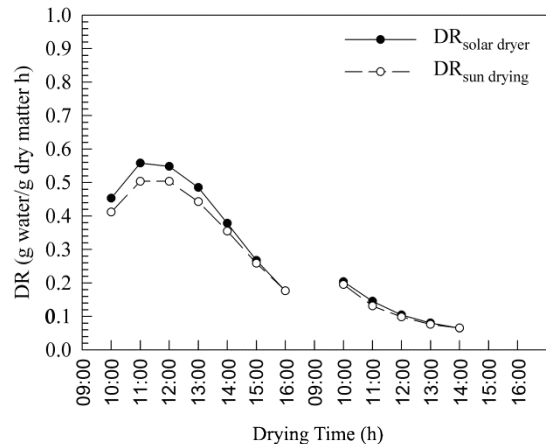
รูปที่ 13 อุณหภูมิและค่ารังสีดวงอาทิตย์ กรณีที่ 3

ในช่วง 28–62% เฉลี่ย 35% ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 41–61% เฉลี่ย 48% มีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.07–0.19 g water/g dry matter h สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง และ 0.06–0.17 g water/g dry matter h สำหรับการตากแดดโดยตรง จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง 32.56% การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 2063.22 Wh/kg

กรณีที่ 3 ในเครื่องอบแห้งมีมวลปลาเริ่มต้น 12.23 kg มวลหลังการอบแห้ง 3.16 kg ความชื้นปลาเริ่มต้น 420.42% มาตรฐานแห้ง ความชื้นปลาหลังการอบแห้ง 68.14% มาตรฐานแห้ง (ตอนเวลา 11.00 น. ของวันที่ 2) การตากแดดโดยตรงมีความชื้นปลาเริ่มต้น 407.91% มาตรฐานแห้ง ความชื้นปลาหลังการอบแห้ง 69.19% มาตรฐานแห้ง (ตอนเวลา 12.00 น. ของวันที่ 2) ค่ารังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 440–996 W/m² เฉลี่ย 802 W/m² ดังรูปที่ 13 ความเร็วลมสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 1.0 m/s วันแรกค่าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 30–33°C เฉลี่ย 32°C อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 28–33°C เฉลี่ย 31°C ดังรูปที่ 13 ความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 47–72% เฉลี่ย 58% ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 37–59% เฉลี่ย 43% ดังรูปที่ 14 อัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.18–0.56 g water/g dry matter h สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง และ 0.18–0.50 g water/g dry matter h สำหรับการตากแดด



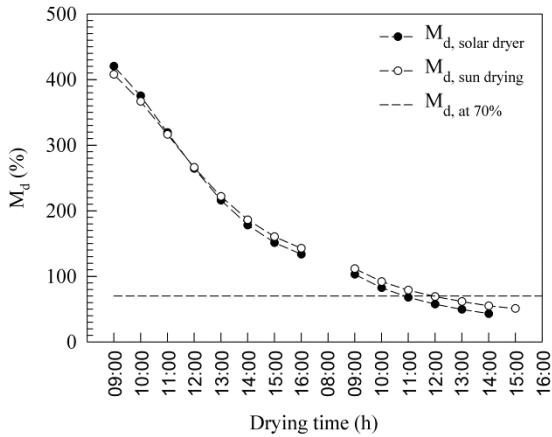
รูปที่ 14 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ กรณีที่ 3



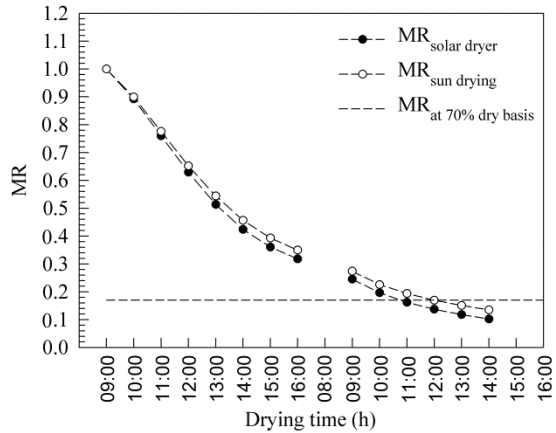
รูปที่ 15 อัตราการอบแห้ง กรณีที่ 3

โดยตรง ดังรูปที่ 15 อัตราการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสูงกว่า การการตากแดดโดยตรงตั้งแต่เริ่มการอบแห้งเนื่องจากประตูระบายอากาศเปิดมีพื้นที่ช่องระบายอากาศขนาด 4,800 cm² จึงพาความชื้นออกจากห้องอบแห้งได้ดีส่งผลให้ความชื้นปลาในเครื่องอบแห้งลดลงเร็วกว่าการตากแดดโดยตรงทำให้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระเหยความชื้นปลาให้ต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง ได้เร็วกว่าการตากแดดโดยตรงทั้งที่เครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิในการอบแห้งใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 16 และแสดงเป็นอัตราส่วนความชื้นดังรูปที่ 17 วันที่สองค่าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 29–40°C เฉลี่ย 37°C อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 29–3°C เฉลี่ย 30°C

วสันต์ จีนธาดา และคณะ, “การทดลองศึกษาสภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศ.”



รูปที่ 16 ความชื้นปลา กรณีที่ 3



รูปที่ 17 อัตราส่วนความชื้น กรณีที่ 3

ตารางที่ 1 ผลการทดลองอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ตัวแปร	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2		กรณีที่ 3	
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2
Air velocity (m/s)	2.5	2.5	5.5	2.5	5.5	2.5
Ventilation Area (cm ²)	480	480	480	480	4,800	480
T _{middle, solar dryer} (°C)	31–40	31–41	30–34	32–43	30–33	29–40
T _{ambient} (°C)	28–33	28–32	29–31	28–32	28–33	29–31
RH _{middle, solar dryer} (%)	37–69	29–68	46–70	28–62	47–72	28–74
RH _{ambient} (%)	37–51	37–55	42–56	41–61	37–59	34–52
DR _{solar dryer} (g water/g dry matter h)	0.24–0.51	0.13–0.17	0.18–0.45	0.07–0.19	0.18–0.56	0.07–0.20
DR _{sun drying} (g water/g dry matter h)	0.18–0.73	0.07–0.14	0.16–0.46	0.06–0.17	0.18–0.50	0.04–0.20
Solar Radiation (W/m ²)	375–1059		431–1021		440–996	
η_{th} (%)	36.26		32.5 6		32.18	
SEC (Wh/kg)	1853.02		2063.22		2087.72	
Mass Before Drying (kg)	12.03		12.22		12.23	
Mass After Drying (kg)	3.02		3.32		3.16	
Md Before Drying (%)	425.99		373.33		420.42	
Md After Drying (%)	69.44		65.79		68.14	

ความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 28–74% เฉลี่ย 42% ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 34–52% เฉลี่ย 39% มีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.07–0.20 g water/g dry matter h สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง และ 0.04–0.20 g water/g dry matter h สำหรับการตากแดดโดยตรง จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง 32.18% การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

2087.72 Wh/kg

ผลการทดลองศึกษาสภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศของทั้ง 3 กรณีได้แสดงค่าดังในตารางที่ 1

4. สรุป

การอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์



แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศพบว่าการอบแห้งกรณีที่ 3 เป็นสภาวะที่ทำให้อัตราการอบแห้งของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสูงกว่าอัตราการอบแห้งด้วยการตากแดดโดยตรงในช่วงครึ่งวันแรก (เวลา 09.00-12.00 น.) ทำให้การอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งมีความชื้นปลาลดลงต่ำกว่า 70% มาตรฐานแห้ง ได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยการตากแดดโดยตรง โดยพบว่าขนาดพื้นที่ของช่องระบายอากาศมีผลต่ออัตราการอบแห้งที่ความเร็วลมไหลผ่านในห้องอบแห้งเท่ากันคือที่ความเร็วลมเฉลี่ย 2.5 m/s เท่ากันแต่มีพื้นที่ของช่องระบายอากาศ 4,800 cm² คิดเป็นปริมาตรห้องอบแห้งต่อพื้นที่ที่ระบายอากาศเท่ากับ 80 : 1 จะมีอัตราการอบแห้งปลาได้ดีกว่าพื้นที่ของช่องระบายอากาศ 480 cm² คิดเป็นปริมาตรห้องอบแห้งต่อพื้นที่ที่ระบายอากาศเท่ากับ 800 : 1 ห้องอบแห้งที่มีพื้นที่ระบายอากาศมากก็จะทำให้มีการพาความร้อนออกจากห้องอบแห้งได้ดีในขณะที่เดียวกันก็จะพาความร้อนออกจากห้องอบแห้งมากด้วยส่งผลให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำ แต่ที่อุณหภูมิการอบแห้งต่ำนี้ก็สามารถทำให้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงแต่มีพื้นที่ของช่องระบายอากาศน้อยดังนั้น การอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศในช่วงเวลา 3 ชั่วโมงแรกของการเริ่มอบแห้งอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะส่งผลน้อยกว่าอิทธิพลของพื้นที่ของช่องระบายอากาศที่ทำให้เกิดการระบายอากาศได้ดีเนื่องจากการอบแห้งเริ่มต้นความชื้นจะอยู่ที่บริเวณผิวปลาจะถ่ายเทได้ดีถ้ามีการระบายอากาศที่ดีแต่เมื่ออบแห้งเกิน 3 ชั่วโมงไปแล้วอิทธิพลของพื้นที่ของช่องระบายอากาศจะไม่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเพราะเป็นการระเหยความชื้นที่อยู่ในเนื้อปลา การทดลองในกรณีที่ 3 มีอัตราการอบแห้งในวันแรกอยู่ในช่วง 0.18-0.56 g water/g dry matter h ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง 32.18% และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 2087.72 Wh/kg

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และความอนุเคราะห์จากชุมชนวังเขียว-วังขาว ต.บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Darvishi, M. Azadbakht, A. Rezaeiasl, and A. Farhang, "Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 12, pp. 121-127, 2013.
- [2] W. Jeentada, T. Naemsai, and C. Sirirak, "Experimental study of fish drying with solar tunnel dryer," in *Proceeding 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2015, pp. 23-28.
- [3] J. H. Cordova Murueta, M. A. N. Toro, and F. Garcia Carreno, "Concentrates of fish protein from bycatch species produced by various drying processes," *Food Chemistry*, vol. 100, pp. 705-711, 2007.
- [4] Z. Duan, L. Jiang, J. Wang, X. Yu, and T. Wang, "Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 89, pp. 472-476, 2011.
- [5] G. M. Kituu, D. Shitanda, C. L. Kanali, J. T. Mailutha, C. K. Njoroge, J. K. Wainaina, and V. K. Silayo, "Thin layer drying model for simulating the drying of Tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 98, pp. 325-331, 2010.
- [6] T. Yaibok, S. Phethuayluk, J. Weawsak, M. Mani, and P. Buaphet, "Development the fish drying process with a solar-electrical combined energy dryer under the southern of Thailand

- climate,” *Thaksin University Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 109–118, 2010 (in Thai).
- [7] 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).
- [8] P. Somsila and U. Teeboonma, “Air affecting inside para rubber solar greenhouse dryer of incline roof type,” *Science and Technology Mahasarakham University Journal*, pp. 340–346, 2013 (in Thai).
- [9] J. S. Goddard and J. S. M. Perret, “Co-drying fish silage for use in aquafeeds,” *Animal Feed Science and Technology*, vol. 118, pp. 337–342, 2005.
- [10] P. Prakotmak, “Modeling heat and mass transfer in drying of single-kernel brown rice,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 24, no. 3, pp. 634–643, 2014 (in Thai).
- [11] 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.
- [12] I. Ceylan and A. E. Gurel, “Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp. 899–905, 2016.
- [13] D. Jain and P. B. Pathare, “Study the drying kinetics of open sun drying of fish,” *Journal of Food Engineering*, vol. 78, no. 4, pp. 1315–1319, 2007.
- [14] Q. L. Shi, C. H. Xue, Y. Zhao, Z. J. Li, and X. Y. Wang, “Drying characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier,” *Journal of Food Engineering*, vol. 84, no.1, pp. 12–20, 2008.
- [15] 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.
- [16] A. Fudholi, K. Sopian, M. Y. Othman, and M. H. Ruslan, “Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed,” *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 121–129, 2014.
- [17] M. Aktas, S. Sevik, A. Amini, and A. Khanlari, “Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer,” *Solar Energy*, vol. 137, pp. 500–515, 2016.
- [18] 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.