

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาช่อนทะเลด้วยโรงเรือนอบแห้ง
พลังงานแสงอาทิตย์

A STUDY OF DRYING KINETICS OF SALTED COBIA FISH DRYING
IN A SOLAR GREENHOUSE

กมลวรรณ จิตจักร¹ และ แสนเชิง พรหมชิต²

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
kamonwan_ji@rmutto.ac.th

²เจ้าหน้าที่เหล่าทหารสารบรรณ ฝูงบิน 603, กองบิน 6 กองทัพอากาศไทย, ถนนพหลโยธิน
เขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร 10220, iamthunder@icloud.com

Kamonwan Jitjack¹ and Sanchoeng Promchit²

¹Lecturer, Program in Energy Technology, School of Engineering and Innovation,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Village No. 6 Bang Phra Sub-district,
Siracha District, Chonburi 20110, Thailand, kamonwan_ji@rmutto.ac.th

²Administrative Squadron 603, Wing 6, Royal Thai Air Force, Phaholyothin Road,
Don Mueang, Bangkok 10220, Thailand, iamthunder@icloud.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยศึกษาค่าความชื้นในกรณีที่มีอัตราการไหลอากาศภายในโรงเรือนที่แตกต่างกัน 2 ระบบคือ ปิดพัดลมระบายอากาศ และระบบเปิดพัดลมระบายอากาศ เปรียบเทียบกับการตากแดดธรรมชาติ และศึกษาคุณภาพหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ด้านสี ปริมาณน้ำอิสระ และความแข็งของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง พร้อมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็ม จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองระบบมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าแบบตากแดด โดยการอบแห้งแบบเปิดพัดลมระบายอากาศมีอัตราการอบแห้งเร็วที่สุดคือ 21 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาเทียบกับจากค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับปลาที่วางจำหน่ายในท้องตลาดคือ 45 %d.b. และค่าสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป แต่มีค่าความแข็งมากที่สุดซึ่งมีความต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) กับทุกระบบ ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งทุกระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.55-0.58 ซึ่งต่ำกว่า 0.6 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์

มาตรฐานอาหารแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลแบบ Logarithmic สามารถทำนายอัตราส่วนการอบแห้งปลาช่อนทะเลได้ดีที่สุดทั้งสองระบบ

คำสำคัญ: โรงเรือนอบแห้ง, พลังงานแสงอาทิตย์, ปลาช่อนทะเลเค็ม

ABSTRACT

This research was aimed to investigate the drying kinetic of salted Cobia fish drying in a solar greenhouse. The moisture content in different airflow rates of the greenhouse were examined in two systems: ventilation fan off or natural convection and ventilation fan on or force convection. The performance of both systems was compared to open sun drying performance. The quality of the samples was evaluated regarding color, water activity, and hardness. Mathematical model was also applied in this study. The results revealed that the drying in the solar greenhouse was obviously faster than the open sun drying and drying rate where the ventilation fan on took the shortest time in only 21 hours, considering at the same final moisture content of the products on the market 45% d.b. The color of the samples was also not different, but the hardness was statistically significant with $p>0.05$. The water activity of the samples was less than 0.6 and was agreeable to the Thai agricultural standard. Logarithmic mathematical model was the most accurate for both systems.

KEYWORDS: Greenhouse drying, Solar Energy, Salted Cobia

1. บทนำ

ปลาช่อนทะเลเค็มตากแห้งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทะเลอีกประเภทหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั้งของคนในพื้นที่และนิยมซื้อเป็นของฝากจากแหล่งท่องเที่ยวชายทะเล โดยกรรมวิธีการผลิตของชาวประมงพื้นถิ่นส่วนใหญ่ใช้วิธีการตากแดด ซึ่งจะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในขณะการผลิต ในระหว่างกระบวนการตากแดดโดยตรงอาจมีสิ่งสกปรกปนเปื้อน เช่น ฝุ่นละออง มด แมลงวัน เป็นต้น ในวันที่ทำค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีไม่เพียงพอ ทำการตากแดดยาวนานมากขึ้น อาจมีผลทำให้เกิดเชื้อราขึ้นที่ตัวปลา ทำให้คุณภาพของปลาดำ การทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด เป็นการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง โดยใช้หลักการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ร่วมกับแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานความร้อนมาก การอบแห้งเป็นการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุทำให้น้ำหรือความชื้นกลายเป็นไอระเหยอออกไปจากผิววัสดุ ซึ่งพลังงานความร้อนที่การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งความร้อนที่วัสดุได้รับ

เป็นค่าความร้อนแฝงของการระเหย [1] และในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต่าง ๆ เช่น สี ความหนืด กลิ่น รสชาติ และโครงสร้างอาจมีการสูญเสียได้ [2] จึงต้องมีการควบคุมค่าอุณหภูมิในการอบแห้งให้เหมาะสม หากอุณหภูมิในการอบแห้งน้อยเกินไปก็ทำให้ปลาเกิดความเสียหาย เช่น เน่าหรือมีกลิ่น แต่หากมีอุณหภูมิมากเกินไป จะทำให้ปลาสุกขณะทำการอบแห้งได้

เพื่อเป็นการลดปัญหาการทำแห้งปลาช่อนทะเลเค็มของเกษตรกร การนำเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาในการอบแห้งปลาได้ โดยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ รังสีแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโชบแห้ง [3] คล้ายกับปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจก เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบกับหลังคาโรงเรือนซึ่งทำจากวัสดุโปร่งใส บางส่วนจะสะท้อนออกสู่บรรยากาศ และมีรังสีอาทิตย์คลื่นสั้นเคลื่อนที่มายังภายในโรงเรือน เกิดการตกกระทบและดูดกลืนกับวัสดุต่าง ๆ ภายในโรงเรือนทำให้รังสีคลื่นสั้นมีค่าพลังงานลดลง กลายเป็นรังสีอาทิตย์คลื่นยาวซึ่งเป็นรังสีความร้อนหรืออินฟราเรด ซึ่งไม่สามารถผ่านออกจากแผ่นปกคลุมได้ ทำให้ความร้อนภายในโรงเรือนมีค่าสูงขึ้นและถ่ายเทไปยังผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้งในโรงเรือน [4] ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกสู่อากาศภายในโรงเรือน และความชื้นดังกล่าวจะเคลื่อนออกจากโรงเรือนผ่านช่องระบาย ซึ่งการนำอากาศชื้นไหลออกสู่ภายนอกมี 2 รูปแบบคือการพาโดยธรรมชาติและการพาโดยใช้แรงบังคับจากภายนอกโดยใช้พัดลมระบายอากาศ แต่ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมค่าอุณหภูมิในการอบแห้งให้เหมาะสมเพื่อรักษาคุณภาพของปลาหลังการอบแห้ง หากอุณหภูมิในการอบแห้งน้อยเกินไป ก็ทำให้ปลาเกิดความเสียหาย เช่น เน่าหรือมีกลิ่น แต่หากมีอุณหภูมิมากเกินไป จะทำให้ปลาสุกขณะทำการอบแห้งก่อให้เกิดความเสียหายกับปลาแห้งได้เช่นกัน ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีอัตราการไหลอากาศภายในโรงเรือนที่แตกต่างกัน 2 ระบบ คือการพาอากาศออกจากโรงเรือนแบบธรรมชาติ โดยการปิดพัดลมระบายอากาศและแบบบังคับโดยการเปิดพัดลมระบายอากาศ เปรียบเทียบกับการตากแดดดั้งเดิมของเกษตรกร แล้วศึกษาคุณภาพหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ด้านสี ปริมาณน้ำอิสระ และเนื้อสัมผัสของปลาหลังการอบแห้ง พร้อมทั้งหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็ม

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โรงเรือนอบแห้งรูปทรงพาราโบลาเพิ่มพื้นที่ด้านข้าง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน [5-7] โดยโรงเรือนมีขนาด 3.0x3.5x1.55 เมตร (กว้างxยาวxสูง) ปกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต

ชนิดใสแบบป้องกันแสงยูวี ด้านหน้ามีประตูเข้าเพื่อนำผลิตภัณฑ์เข้าอบแห้งและบริเวณด้านซ้ายและขวาทางเข้าโรงเรือน มีช่องอากาศเข้าจำนวน 2 ช่อง ด้านหลังติดตั้งพัดลมระบายอากาศซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของอากาศได้ โดยใส่ตาข่ายตรงช่องทางเข้าอากาศด้านหน้าและช่องพัดลมด้านหลัง เพื่อป้องกันการรบกวนของแมลงที่จะเข้าไปในโรงเรือน ตัวโครงสร้างโรงเรือนวางบนพื้นคอนกรีต ที่ทำสี่ผืนผ้าเป็นสีดำเพื่อเพิ่มการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ให้กับโรงเรือน ด้านล่างของโรงเรือนก่อนการเทพื้นคอนกรีตได้ทำการปูแผ่นพลาสติกอย่างหนา ก่อนหลังการปรับพื้นที่เสร็จ เพื่อเป็นการป้องกันความชื้นจากดินด้านล่างผ่านคอนกรีตเข้าสู่โรงเรือนอบแห้ง [8]



รูปที่ 1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มพื้นที่รับแสงด้านข้าง

2.2 วิธีการทดลอง

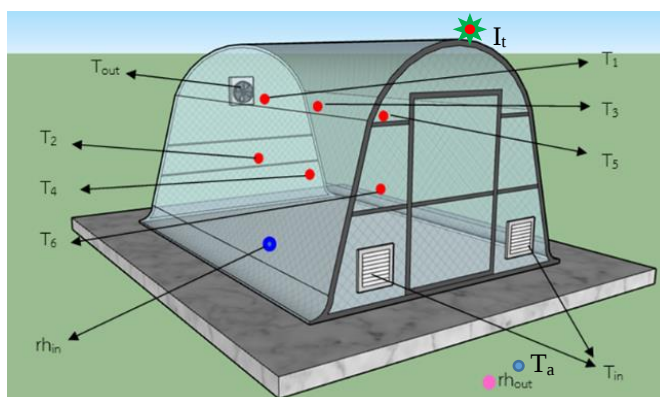
ทำการทดลองอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ เทียบกับการตากแดด คือ ระบบปิดพัดลมระบายอากาศ และระบบเปิดพัดลมระบายอากาศ ที่อัตราการไหลอากาศ $204 \text{ m}^3/\text{h}$ ซึ่งทั้งสองระบบทำการเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดภายนอกโรงเรือน โดยกระบวนการเริ่มจากการเตรียมปลาช่อนทะเลเค็ม นำปลาช่อนทะเลสดขนาด 9-10 ตัวต่อกิโลกรัม ถอดเกล็ด เอาหัวและเครื่องในออก ล้างสะอาดทำความสะอาด แล้วนำมาแช่น้ำเกลือเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมงด้วยอัตราส่วนน้ำเปล่าต่อเกลือ $3,000 \text{ ml} : 0.5 \text{ kg}$ [6] แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อครบเวลานำออกจากน้ำเกลือล้างน้ำสะอาดอีกรอบเพื่อเตรียมอบแห้ง

การอบแห้งทำการอบแห้งทั้งสองระบบเทียบกับวิธีการตากแดดภายนอกโรงเรือน ในแต่ละครั้งใช้ปลาช่อนจำนวน 5 kg วางอบแห้งในโรงเรือนอบแห้ง และนำตัวอย่างทั้งภายในและภายนอกโรงเรือนจำนวน 1 kg ใส่ตะแกรงแยกไว้เพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 30 นาที โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ AND รุ่น GF-3000 ความแม่นยำ $\pm 0.02 \text{ g}$ ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 8.00-18.00 น. ของแต่ละวันจนกว่าน้ำหนักปลาไม่ลดลง บันทึกข้อมูลในระหว่างการเก็บผลการทดลอง คือค่าอุณหภูมิแต่ละจุดภายในโรงเรือน (T_{1-6}) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{am}) อุณหภูมิตำแหน่งทางเข้าโรงเรือน (T_{in}) และทางออกโรงเรือนหลังพัดลม (T_{out}) อุณหภูมิกระเปาะเปียกภายใน

โรงเรือน (rh_{in}) อุณหภูมิกระเปาะเปียกภายนอกโรงเรือน (rh_{out}) โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type) ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL 820 บันทึกค่าทุก ๆ 5 นาที และวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (I_t) ด้วยเครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (pyranometer) ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CMP11 ดังแสดงตำแหน่งการติดตั้งรูปที่ 3



รูปที่ 2 วิธีการเตรียมปลาช่อนทะเลก่อนนำมาทดลองอบแห้ง



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดค่าต่าง ๆ ของการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็ม

วิธีการหาค่าความชื้นก่อนและหลังการอบแห้ง นำปลาตัวอย่างจากการอบแห้งภายในและภายนอกโรงเรือนมาสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ บรรจุในกระป๋องมอยเจอร์แคน เข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC [9] แล้วนำน้ำหนักแห้งไปคำนวณหาปริมาณ

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content dry basis) การหาปริมาณความชื้นของปลาช่อนทะเลเค็มที่ลดลงตามเวลาการอบแห้ง สามารถหาได้จากดังสมการที่ (1) [10]

$$M_{db} = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_{db} คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

W คือ น้ำหนักของปลาช่อนทะเลเค็มที่เวลาใด ๆ (g)

W_d คือ น้ำหนักแห้งของปลาช่อนทะเลเค็ม (g)

การกำหนดค่าความชื้นสมดุลในงานวิจัยนี้ กำหนดให้มีค่าน้อยมากเทียบกับความชื้นที่เวลาใด ๆ และที่ความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} < M_t$, $M_{eq} < M_0$) ดังนั้นอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2) [11]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%d.b.)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)

2.3 การวัดคุณภาพปลาช่อนทะเล

2.3.1 การทดสอบสี

ทดสอบคุณภาพสีของปลาช่อนทะเลเค็มแห้งด้วยเครื่อง Portable Colorimeter 3NH รุ่น NH310 มาตรฐานชนิดแหล่งกำเนิดแสง D65 ระบบสีที่วัดได้คือ CIE แบบ $L^* a^* b^*$ ให้ความสว่างที่ 6500 K ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อ L^* แสดงถึงค่าความสว่างมีค่า 0-100 โดยค่า 0 คือ สีดำ และค่า 100 คือ สีขาว a แสดงถึงสีเขียว แสดงสีแดง (+a) ถึงสีเขียว (-a) และค่า b แสดงสีเหลือง (+b) ถึงสีน้ำเงิน (-b) ทำการวัดสีหลังการอบแห้ง ที่บริเวณเนื้อปลาถัดจากพุงปลาด้านซ้ายหรือขวาที่ไม่มีกระดูกก้างปลา ในตำแหน่งเดิมทุกครั้งที่ทำกรวัดสี ระบบละ 15 ตัวอย่าง แล้วนำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ



รูปที่ 4 เครื่องวัดสี Portable colorimeter

2.3.2 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ

การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity) ของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง เป็นการบอกให้ทราบถึงค่าปริมาณน้ำภายในเนื้อผลิตภัณฑ์มีค่าระดับใด อยู่ในระดับที่จุลชีพต่าง ๆ เจริญได้หรือไม่ หรืออยู่ในมาตรฐานของอาหารแห้งหรือไม่ ดังนั้นจึงทำการวัดค่าปริมาณน้ำอิสระของปลาช่อนทะเลเค็มหลังจากการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองระบบเทียบกับการตากแดดธรรมชาติ และผลิตภัณฑ์ปลาช่อนทะเลเค็มในท้องตลาด เพื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นที่ได้กับค่ามาตรฐานอาหารแห้ง โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดปริมาณความชื้นอิสระ รุ่น aqua lab series 3 ความแม่นยำ ± 0.003 ความละเอียด ± 0.001 ดังรูปที่ 5 โดยทำการวัดระบบละ 15 ตัวอย่างและนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ



รูปที่ 5 เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ

2.3.3 การวัดสมบัติทางด้านเนื้อผิว

การวัดค่าเนื้อสัมผัส เป็นคุณลักษณะด้านการต้านทานของอาหารต่อสิ่งที่มากระทำ ซึ่งการอธิบายคุณลักษณะด้านความแข็งขึ้นอยู่กับวิธีการวัดค่าซึ่งค่าแรงที่แสดงออกมาจะเป็นค่าแรงสูงสุดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการวัดค่า โดยเฉพาะขนาดของหัววัดและระยะทางที่ทำการวัด ซึ่งในการทดลองวัดครั้งนี้ได้เลือกใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส texture analyzer โดยเลือกใช้หัวตัดใบมีดขนาดความยาว 10 cm เคลื่อนที่ไปกดตัดชิ้นวัสดุ โดยพิจารณาถึงแรงต้านทานสูงสุด (hardness) ก่อนที่

ชั้นวัสดุจะเกิดการแตกหัก ซึ่งค่าที่อ่านได้จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟที่บ่งบอกถึงแรงที่ใช้ในการกด เจือนวัสดุให้ฉีกขาด ความเร็วในการตัด 1.5 mm/s ใช้ในการทดลองเครื่องวัดสมบัติทางด้านพื้นผิว ta.xt.plus โดยใช้หัว texture profile analysis ซึ่งจะส่งผลการทดสอบออกมาเป็นกราฟระหว่างแรง กับเวลาหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ได้จากการทดสอบมาเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายเนื้อสัมผัส เป็นค่าความแข็งหรือความกระด้าง (hardness) ซึ่งพิจารณาจากแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกด หรือเทียบกับการกดครั้งแรก มีวิธีคือนำปลาช่อนทะเลเค็มที่อบแห้งแต่ละระบบแล้วมาตัดเป็นชิ้น ขนาดกว้าง 0.5 cm ยาว 1 cm แล้วเข้าเครื่องระบบละ 15 ตัวอย่างแล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผล ต่อไป



รูปที่ 6 เครื่องวัดสมบัติเนื้อสัมผัสและหัวกด Texture Profile Analysis

2.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของการอบแห้งปลาช่อนทะเล

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งปลาช่อนทะเล เค็ม โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลแบบชั้นบาง จำนวน 5 แบบจำลอง ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) เพื่อเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ที่เหมาะสมที่มีค่าสูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งต้องมีค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่ (3) และ (4) [12]

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง [13-16]

ลำดับที่	สมการแบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง
1	$MR = \exp(-kt)$	Lewis
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page
3	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
4	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic
5	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified Page

หมายเหตุ: a, c, k และ n คือค่าคงที่ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง และ t คือเวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{exp,ave}})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right]} \quad (4)$$

เมื่อ $MR_{\text{exp},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)

$MR_{\text{exp,ave}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลองเฉลี่ย (decimal)

$MR_{\text{pre},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการคำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)

N คือ จำนวนข้อมูลจากการทดลอง

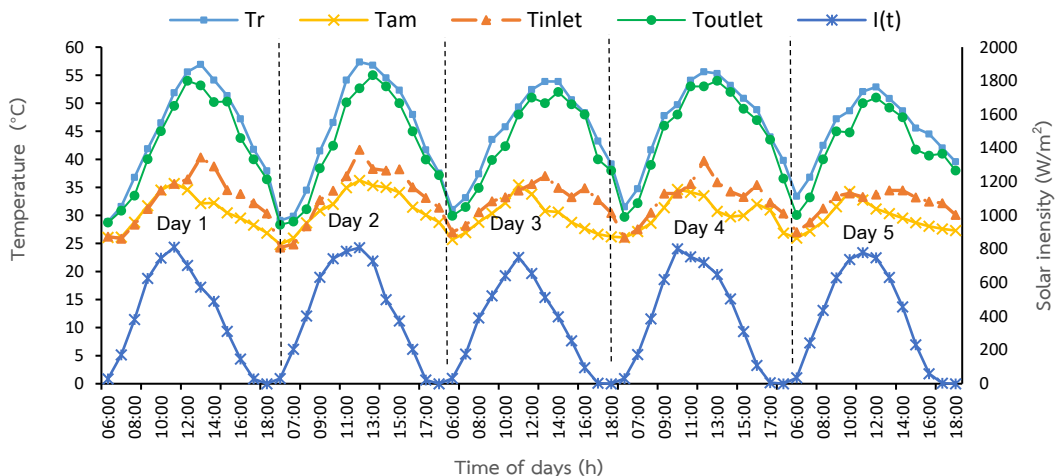
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดลองอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็ม

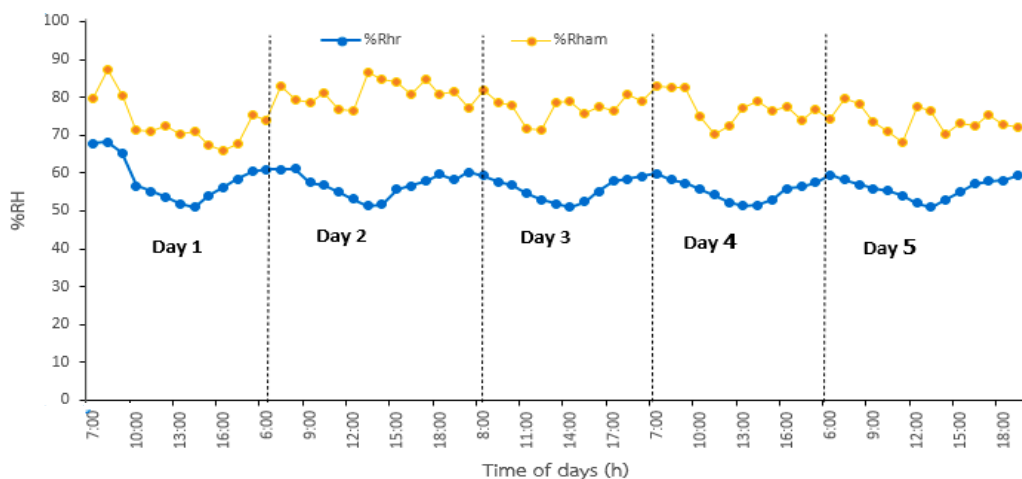
3.1.1 ระบบปิดพัฒน

ระบบนี้ทำการอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ปิดพักระบายอากาศเปรียบเทียบการตากแดดปกติ ซึ่งถือเป็นระบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยอาศัยความแตกต่างกันของความหนาแน่นอากาศที่เกิดจากการความต่างของอุณหภูมิให้เกิดการไหลของอากาศภายในสู่ภายนอกโรงเรือน ผ่านช่องระบายอากาศซึ่งเปิดอยู่ด้านท้ายของโรงเรือนอบแห้ง

การทดลองได้ดำเนินการในวันที่ 7-11 พฤศจิกายน ซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูฝนและเริ่มต้นฤดูหนาว ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 6-8



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายใน อุณหภูมิขาเข้า อุณหภูมิขาออกโรงเรือน อบแห้ง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทดลอง

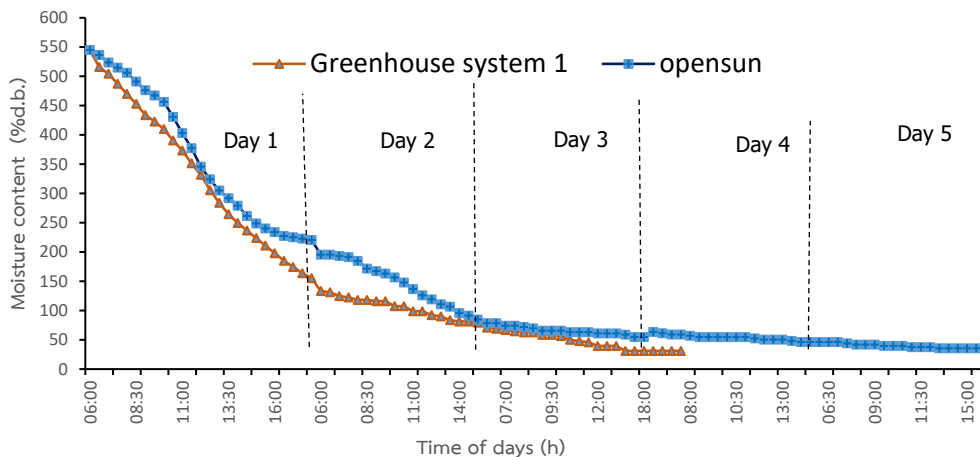


รูปที่ 7 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งระบบปิดพัฒลกับความสัมพันธ์แวดล้อมในช่วงเวลาที่ทดลอง

จากรูปที่ 6-7 พบว่าค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้ง มีค่าเฉลี่ย 45.2°C สูงกว่าภายนอก โดยภายนอกโรงเรือนมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 30.1°C ซึ่งมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิถึง 15°C ค่า

ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดในช่วงการทดลอง 743.80 W/m^2 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเฉลี่ย 56.3% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าภายนอกเนื่องจากค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าภายนอก ทำให้ค่าความชื้นมีค่าน้อย โดยค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ เมื่อค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงในช่วงเที่ยง อุณหภูมิภายในโรงเรือนจะขยับสูงตามไปด้วย และมีการสะสมความร้อนภายในโรงเรือนในช่วงบ่าย จึงทำให้ค่าอุณหภูมิภายในเพิ่มสูงต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาความชื้นที่ลดลงตามเวลาดังรูปที่ 8 เมื่อเริ่มทำการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มมีค่าความชื้น 550 % d.b. การอบแห้งในช่วงแรกที่ค่าอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นแต่ไม่มากพอจะเป็นช่วงที่เริ่มให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ เมื่อเวลาผ่านไปค่าอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เริ่มมีการถ่ายเทความร้อนให้กับปลา ในช่วงนี้ความชื้นในเนื้อปลามีมากเมื่อเริ่มได้รับความร้อน ความร้อนจะมีการถ่ายเทไปยังผิวหนังของปลา เกิดระเหยนํ้าออกจากตัวปลา เรียกการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) เป็นช่วงที่น้ำในเนื้อปลาระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่องคล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป โดยวันแรกของการทดลองค่าความชื้นที่ลดลงตามเวลาของการอบแห้งในโรงเรือนมีค่าสูงกว่าทุกวันของการทดลอง และเมื่อความชื้นในเนื้อปลาลดลงจะทำให้การอบแห้งจะช้าลง เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate regime) ความชื้นของน้ำที่ผิวของวัสดุระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นของน้ำจากภายในวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันวัสดุจะอยู่ในสภาพแห้งและอุณหภูมิผิวสูงขึ้น และทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งต่อจากช่วงแรกจะเกิดขึ้นตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลอง ตามกราฟในรูปที่ 8 ทั้งนี้เมื่อความชื้นระเหยออกมาในกรณีที่ไม่มีการเปิดพัดลมระบายอากาศ ความชื้นที่ระเหยออกจะทำให้ค่าความชื้นในโรงเรือนมีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นว่ามีค่าสูงในช่วงแรกของการอบแห้งในวันแรก และพอค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนจะลดลง รูปที่ 6 อุณหภูมิทางออกของช่องระบายอากาศด้านหลังพัดลมซึ่งไม่ได้เปิดพัดลมระบายอากาศค่าอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากโรงเรือนมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิภายใน โดยมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย อุณหภูมิขาเข้าโรงเรือนวัดบริเวณช่องทางเข้าด้านหน้าโรงเรือนมีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการไหลอากาศแบบพาความร้อนธรรมชาติ เมื่อมีการไหลเวียนอากาศภายในโรงเรือนและมีการดึงอากาศจากภายนอกที่เย็นกว่าเข้ามาแทนที่ จึงเกิดการไหลเวียนอากาศ

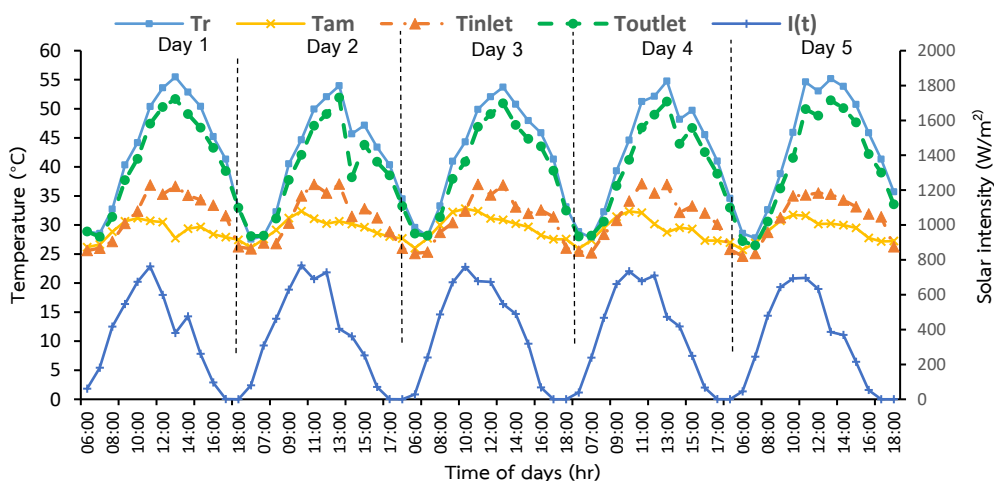
เมื่อพิจารณาที่ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากันของทั้งสองระบบที่ 35 %d.b. สภาวะที่น้ำหนักผลิตปลาอบแห้งไม่สามารถลดลงได้แล้ว พบว่าการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าโดยใช้เวลาในการอบแห้ง 40 ชั่วโมง และการอบแห้งแบบตากแดดใช้เวลา 60 ชั่วโมง ซึ่งการอบแห้งภายในโรงเรือนใช้เวลาในการอบแห้งเร็วกว่า 20 ชั่วโมง



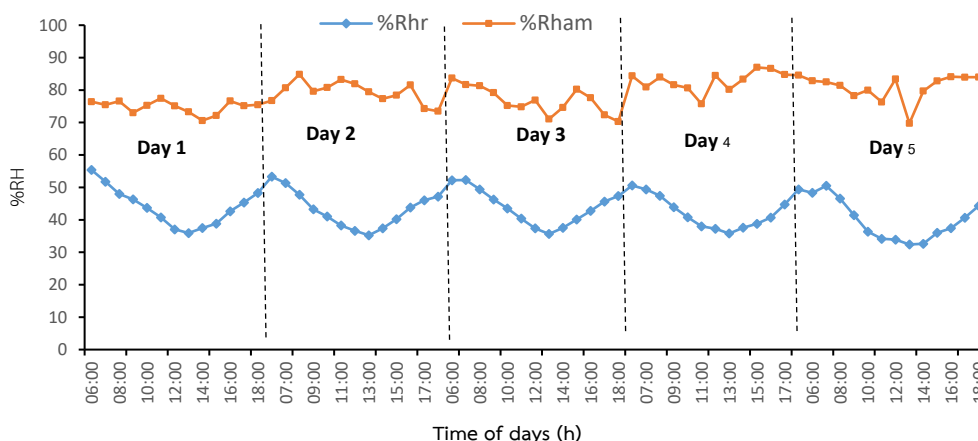
รูปที่ 8 เปรียบเทียบความชื้นของปลาบซ่อนทะเลบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ระบบปิดพัสดลกับการตากแดด

3.1.2 ระบบเปิดพัสดล

การอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เปิดพัสดลระบายอากาศ เปรียบเทียบการตากแดด ซึ่งเป็นระบบการพาความร้อนแบบบังคับใช้พัสดลระบายอากาศช่วยในการไหลเวียนอากาศเพื่อนำความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ออกสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้อัตราการไหลของอากาศ $204 \text{ m}^3/\text{h}$ การทดลองได้ดำเนินการในวันที่ 29 พฤศจิกายนถึงวันที่ 2 ธันวาคม ผลการทดลองดังในรูปที่ 9-11



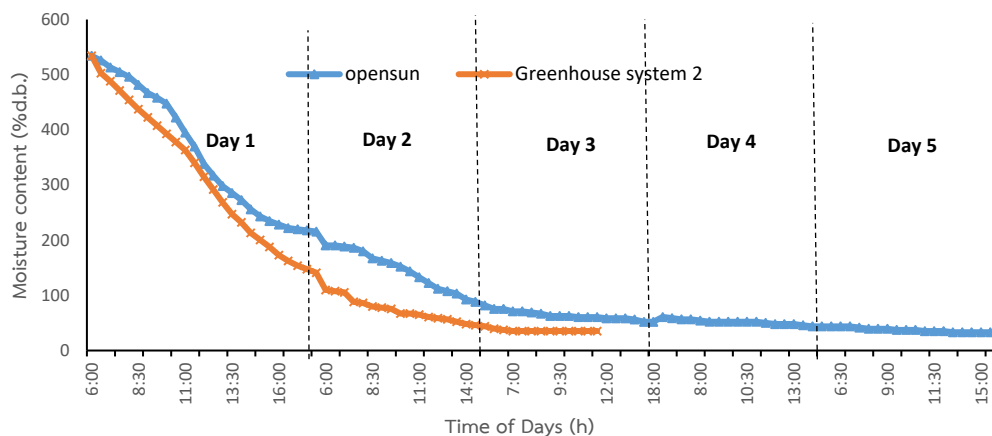
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายใน อุณหภูมิขาเข้า อุณหภูมิขาออก โรงเรือนอบแห้ง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทดลอง



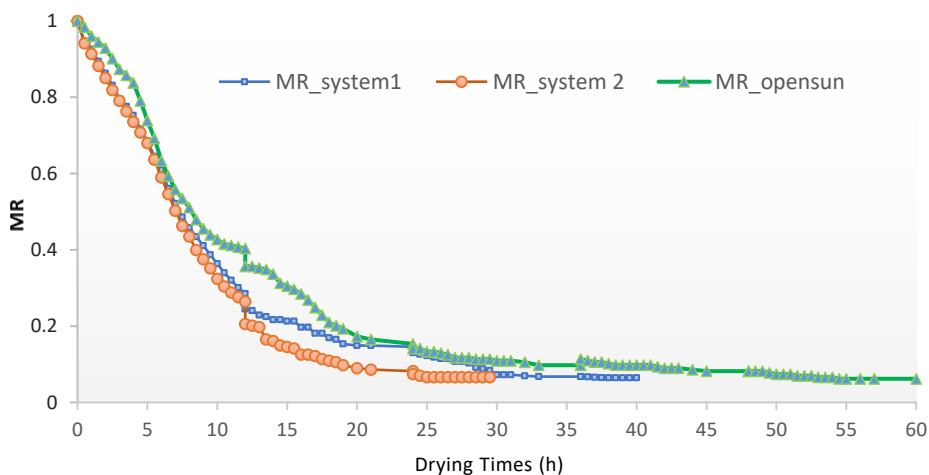
รูปที่ 10 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งระบบเปิดพัฒลมกับความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมในช่วงเวลาที่ทดลอง

จากรูปที่ 9-10 พบว่าผลการทดลองในระบบเปิดพัฒลมระบายอากาศ ค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้ง มีค่าเฉลี่ย 42.5°C สูงกว่าภายนอกซึ่งมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 29.2°C โดยมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ย 13.2°C ค่าอุณหภูมิขาเข้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม แต่มีค่าสูงกว่าในช่วงเที่ยงของแต่ละวัน เนื่องจากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในโรงเรือนแล้วส่งผ่านออกมาบริเวณทางเข้าของอากาศได้บางส่วน ค่าอุณหภูมิขาออกจากโรงเรือนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนเล็กน้อย เนื่องจากการนำความร้อนส่วนหนึ่งไปให้ในกระบวนการอบแห้ง ความชื้นออกจากผลผลิตแล้วถูกนำออกภายนอกโดยการไหลของอากาศด้วยแรงของพัฒลม มีค่าความเข้มข้นสูงสุดในการทดลอง 750.33 W/m^2 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเฉลี่ย 42.6% โดยมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแต่เพียงเล็กน้อย เนื่องจากการนำอากาศออกจากโรงเรือนตลอดเวลา ซึ่งจะมีการนำดังกล่าวจะมีทั้งค่าความร้อนและความชื้นออกมามาก ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในไม่ต่างกันมากในแต่ละวันที่ทำการทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์มีภายนอกมีค่าเฉลี่ย 76.1%

การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ลดลงตามเวลาการอบแห้งผลดังรูปที่ 11 พบว่าที่ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากันประมาณ $35 \% \text{d.b.}$ การอบแห้งด้วยโรงเรือนแสงอาทิตย์ใช้เวลาการอบแห้ง 29.5 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดปกติใช้เวลา 54 ชั่วโมง ซึ่งการอบแห้งด้วยโรงเรือนใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า 24.5 ชั่วโมง



รูปที่ 11 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของปลาช่อนทะเลอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเปิดพัฒน์กับการตากแดดธรรมชาติ



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของปลาช่อนทะเลอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบกับการตากแดด

จากผลการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองระบบพบว่าระบบเปิดพัฒน์ระบายอากาศใช้เวลาในการอบแห้งน้อยสุด เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นที่เท่ากัน เพราะว่าการอบแห้งในระบบเปิดพัฒน์ใช้หลักการพาความร้อนแบบบังคับที่อากาศชั้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากโรงเรือนได้เร็วกว่า มีการไหลเวียนอากาศภายในได้ดีกว่า [17] ทำให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว อุณหภูมิภายในของทั้งสองระบบสูงกว่าภายนอกส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในต่ำกว่าภายนอกเช่นกัน ทั้งนี้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน

ยังขึ้นอยู่กับค่าความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ด้วย ดังนั้นในช่วงวันแรกของการอบแห้งจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยเฉพาะในระบบปิดพัตลม เพราะความชื้นระบายออกโรงเรือนสู่ภายนอกได้ช้ากว่าระบบที่เปิดพัตลม ส่วนระบบเปิดพัตลมค่าความชื้นไม่มีการสะสมอยู่ในโรงเรือน เพราะพัตลมระบายอากาศจะระบายทั้งอากาศชื้นและความร้อนออกจากโรงเรือน ได้เร็วกว่าระบบปิดพัตลม

การอบแห้งทั้งสองระบบนี้ใช้หลักการของภาวะเรือนกระจกในการอบแห้ง อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ได้ระยะหนึ่ง ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ทำให้ค่าการสะสมความร้อนในโรงเรือนเพิ่มขึ้น ทำให้คงค่าอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง และสามารถให้ความร้อนต่อได้หลังจากช่วงเย็นที่ความเข้มแสงอาทิตย์ไม่มีได้อีก 1-2 ชั่วโมง โดยการสะสมความร้อนที่พื้นทำจากคอนกรีตที่สามารถสะสมความร้อนได้ดี [18] และแผ่ความร้อนออกมาเมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนมีค่าลดลง

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ

ตัวแปร	ระบบปิดพัตลม		ระบบเปิดพัตลม	
	GH	OS	GH	OS
ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ย (W/m^2)	743.80		750.33	
อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}C$)	45.48	30.22	42.48	29.22
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%Rh)	56.36	76.89	42.65	78.94
ความชื้น (%d.b.) พิจารณาที่ใกล้เคียงท้องตลาด (45.4 %d.b.)	45.78	46.18	45.96	45.89
ระยะเวลาการอบแห้ง (ชั่วโมง)	29.5	45	21	44
อัตราการไหลอากาศ (m^3/h)	0	-	204	-

หมายเหตุ: GH คือ ภายในโรงเรือนอบแห้ง OS คือ ตากแดดธรรมชาติ

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็ม โดยการพิจารณาเวลาการอบแห้งที่ค่าความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกับปลาช่อนทะเลจากท้องตลาดเขตพื้นที่ชลบุรีที่นำมาหาค่าความชื้นซึ่งมีค่า 45 %d.b. พบว่าการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนอบแห้งแบบเปิดพัตลมใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในต่ำกว่าระบบปิดพัตลมระบายอากาศ เนื่องจากความชื้นจากการระเหยน้ำจากการอบแห้งได้รับการระบายออกอย่างรวดเร็วด้วยหลักการพาความร้อนแบบบังคับ

3.2 คุณภาพสีและปริมาณน้ำอิสระ

ผลการวัดค่าสีและปริมาณน้ำอิสระของปลาช่อนทะเลเค็มหลังจากการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบและการตากแดด แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าสีและปริมาณน้ำอิสระของปลาช่อนทะเลเค็มแห้งในท้องตลาดที่วางจำหน่ายในแหล่งขายของฝาก ตลาดหนองมน และตลาดบางพระ จ.ชลบุรี โดยนำตัวอย่างจำนวน 20 ตัวอย่างมาทำการการค่าความชื้นและวัดค่าสีของปลาในตำแหน่งเดียวกับการทำการทดลอง แสดงผลดังตารางที่ 3

ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ทุกระบบการอบแห้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.55-0.58 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานการของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง ซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 0.6 ทั้งนี้ปริมาณน้ำอิสระเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ [19]

ตารางที่ 3 ผลการวัดค่าสีและปริมาณน้ำอิสระของปลาช่อนทะเลเค็ม

ระบบ	ค่าสี			a_w ปริมาณน้ำอิสระ
	L^*	a^*	b^*	
ปลาในท้องตลาด	62.05±4.7 ^a	1.68±0.4 ^a	11.47±3.8 ^a	0.55±0.03 ^a
ตากแดด	61.83±3.63 ^a	1.75±0.66 ^a	11.53±2.35 ^a	0.58±0.03 ^a
ระบบปิดพัดลม	70.50±3.14 ^b	3.76±0.54 ^c	13.75±5.93 ^b	0.57±0.01 ^a
ระบบเปิดพัดลม	61.57±3.50 ^a	2.26±0.77 ^b	11.12±5.21 ^a	0.55±0.01 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

ผลการวัดค่าสี พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของปลา ในระบบของการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดปกติ และระบบเปิดพัดลมมีค่าใกล้เคียงกับค่าของปลาในท้องตลาด และไม่มี ความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ในกรณีระบบปิดพัดลมจะมีความสว่างของสีปลามากที่สุด ส่วนค่าสีแดง (a^*) ของระบบปิดพัดลมจะมีค่าสูงกว่าแบบท้องตลาดและระบบเปิดพัดลม โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และค่าสีเหลือง (b^*) ของระบบปิดพัดลมจะมีความเหลืองมากกว่า เนื่องการอบแห้งภายในโรงเรือนมีค่าสูงกว่าการตากแดดและระบบเปิดพัดลม ส่งผลให้มีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) หรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ได้ [10] รูปที่ 13 แสดงตัวอย่างสภาพของปลาก่อนอบแห้งและในสภาพที่แห้งแล้วในการทดลองอบแห้งภายในและตากแดดธรรมชาติ



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 13 (a) ปลาช่อนทะเลเค็มอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้ง (b) ปลาช่อนทะเลเค็มตากแดดธรรมชาติ (c) ปลาช่อนทะเลเค็มแห้งที่อบแห้งภายในโรงเรือน (d) ปลาช่อนทะเลเค็มแห้งที่ตากแดดธรรมชาติ

3.3 สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อปลา

จากการศึกษาวิเคราะห์ความแข็งของเนื้อปลาอบแห้งแล้วภายในโรงเรือนทั้ง 2 ระบบกับการตากแดดปกติ เทียบกับปลาในท้องตลาด พบว่าระบบเปิดพัดลมระบายอากาศมีค่าความแข็งสูงสุดโดยมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับปลาอบแห้งด้วยการปิดพัดลม การตากแดดปกติและปลาในท้องตลาด สำหรับปลาช่อนทะเลที่อบแห้งภายในโรงเรือนปิดพัดลมระบายอากาศกับการตากแดด เทียบกับปลาในท้องตลาด มีค่าใกล้เคียงกันโดยไม่มี ความต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) การอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งแบบเปิดพัดลมระบายอากาศพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความชื้นพบว่าการอัตราการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็ว มีการระเหยน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้เนื้อสัมผัสของปลามีความแข็งหรือความกรอบมากกว่า

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งของเนื้อปลาช่อนทะเลเค็ม

ระบบ	Hardness (kg)
ปลาตามท้องตลาด	17.19±0.588 ^{ab}
ตากแดดปกติ	17.20±0.588 ^{ab}
ระบบปิดพัสดลม	17.69±0.55 ^{ab}
ระบบเปิดพัสดลม	19.30±0.008 ^b

หมายเหตุ: ค่า a b และ c ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปลาช่อนทะเลเค็มแห้ง

จากผลการทดลองการอบแห้งภายในโรงเรือน 2 ระบบคือ แบบปิดและเปิดพัสดลมระบายอากาศ นำค่าอัตราส่วนความชื้นของทั้งสองระบบที่หาค่าได้ มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบางที่นิยมใช้กันทั่วไปในด้านการอบแห้ง โดยเลือกใช้จำนวน 5 แบบจำลอง ตามรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล ซึ่งมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 5 มาทำนายผลอัตราการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มภายในโรงเรือนทั้งสองระบบ การพิจารณาว่าแบบจำลองใดเหมาะสมที่สุดพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มีมากที่สุด และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่มีค่าน้อยที่สุด

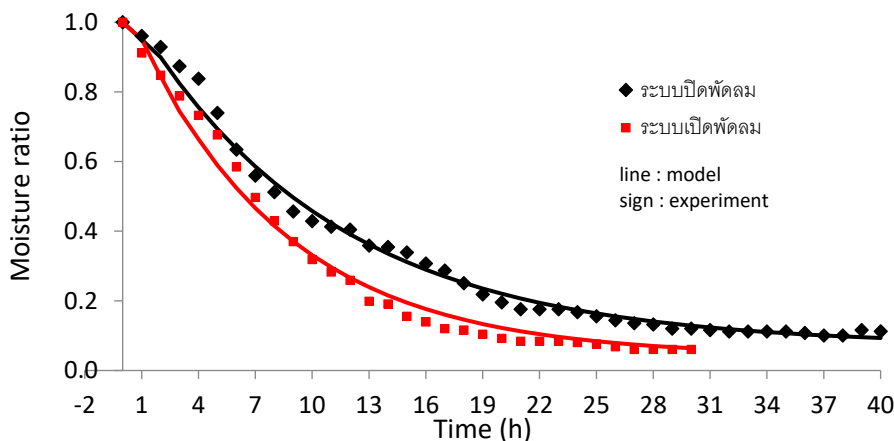
จากตารางที่ 5 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายผลการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ แบบจำลองของ Logarithmic สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้แม่นยำที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 99.225 และ 98.867 ตามลำดับ ซึ่งมีมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น และมีความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ของทั้ง 2 ระบบ เท่ากับ 0.022078 และ 0.025816 ตามลำดับ โดยมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ทำการเลือกมาพิจารณาในการหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการอบแห้งปลา

ตารางที่ 5 ค่าสมการที่ใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นของปลาช่อนทะเลอบแห้งในโรงเรือน 2 ระบบ

แบบจำลอง	พารามิเตอร์	โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	
		ระบบปิดพัสดลม	ระบบเปิดพัสดลม
Lewis	k	0.071373	0.104994
	R ²	97.045	97.315
	RMSE	0.043127	0.039748
Page	n	0.899864	1.090613
	k	0.094219	0.084919
	R ²	97.406	97.434
	RMSE	0.040401	0.038858
Henderson and Pabis	a	1.009317	1.047331
	k	0.072110	0.110119
	R ²	97.053	97.487
	RMSE	0.043067	0.038453
Logarithmic	c	0.071021	0.041263
	a	1.002179	1.036770
	k	0.095146	0.127375
	R ²	99.225	98.867
	RMSE	0.019848	0.023852
Modified Page	n	0.899864	1.090640
	k	0.072440	0.104229
	R ²	97.406	97.434
	RMSE	0.040401	0.038858

จากผลดังกล่าวหมายความว่า แบบจำลองของ Logarithmic เหมาะสมสำหรับการใช้ทำนายผลการของอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งระบบปิดพัสดลมและเปิดพัสดลมระบายอากาศ ได้ดีที่สุด ดังรูปที่ 14 แสดงผลอัตราส่วน

ความชื้นของการทดลองอบแห้งของปลาช่อนทะเลเค็มอบแห้งภายในโรงเรือนทั้งสองรูปแบบและผลการทำนายจากแบบจำลองของ Logarithmic



รูปที่ 14 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองอบแห้งของปลาช่อนทะเลของระบบปิดพัสดมและเปิดพัสดม กับแบบจำลอง Logarithmic

4. สรุป

ผลการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใน 2 ระบบ คือ ระบบปิดและเปิดพัสดมระบายอากาศเทียบกับการตากแดดธรรมชาติ โดยพิจารณาอัตราการไหลของอากาศ แบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติในระบบปิดพัสดม และระบบพาความร้อนด้วยแรงบังคับในระบบเปิดพัสดม ซึ่งทั้งสองระบบมีอัตราการไหลของอากาศแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าระบบเปิดพัสดมระบายอากาศสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่า เนื่องจากการถ่ายเทความชื้นจากผิวสดุดออกสู่อากาศภายในโรงเรือนได้เร็วและนำความชื้นออกจากโรงเรือนได้อย่างต่อเนื่องมากกว่า ทำให้ใช้เวลาการอบแห้งน้อยกว่าเมื่อพิจารณาที่ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากัน คุณภาพด้านสีของปลาที่อบแห้งแล้วด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบปิดพัสดมจะมีค่าความสว่างและสีออกเหลืองมากกว่าทุกระบบการอบแห้ง ค่าปริมาณน้ำอิสระของปลาช่อนทะเลเค็มในทุกระบบการอบแห้งการมีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของอาหารแห้ง ที่ไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของอาหารได้ง่าย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายการอบแห้งปลาช่อนทะเลเค็มได้ดีที่สุดของการอบแห้งภายในโรงเรือนอบแห้งทั้ง 2 ระบบ คือแบบจำลองของ Logarithmic โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

References

- [1] Yaldiz O, Ertekin C, Uzun IH. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. Energy 2001;26:457-65.
- [2] Perera CO, Rahman MS. Heat pump dehumidifier drying of food. Trends in Food Science and Technology 1997;8:75-9.
- [3] Janjai S. Solar drying technology. Nakhon Pathom: Petchkaset Printing; 2017. (In Thai)
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Solar heating [Internet]. 2021 [cited 2021 Jan 2]. Available from: <https://ienergyguru.com/2021/01>. (In Thai)
- [5] Jitjack K, Thepa S, Sudaprasert K, Namprakai P. Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panel. Energy and Buildings 2016;124:178-93.
- [6] Sawangdee Y, Meekun K, Sota C, Banchonhattakit P, Rodjarkpai Y, Phutdhawong W. et.al., editors. Drying salted Cobia in solar greenhouse. Proceedings of the 8th National Academic Conference Muban Chombueng Rajabhat Research; 2020 Mach 1; Muban Chombueng Rajabhat University. Ratchaburi, Thailand. (In Thai)
- [7] Thawatchai O, Jitjack K. A study of solar greenhouse drying in association with infrared heater for dehydration cherry tomatoes. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3): 62-83. (In Thai)
- [8] Janjai S. Parabola dome, innovation of drying banana in Thailand. Solar Energy Research, Department of Physics Faculty of Science. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2016. (In Thai)
- [9] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. of the Association of Official's Analytical Chemists. 17th ed. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [10] Jaekhom S, Witinantakit K. Drying kinetics of chicken using superheated steam technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):201-17. (In Thai)

- [11] Saniso E, Prado M, Yayee F. Optimal condition of mushroom drying using solar energy combined with infrared radiation. *Journal of Yala Rajabhat University* 2013;8(2):107-17. (In Thai)
- [12] Nilnont W. Drying kinetics of mango using solar tunnel dryer. *The Journal of KMUTNB* 2020; 30(1):16-47. (In Thai)
- [13] Younis M, Abdelkarim D, El-Abdein AZ. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2018;25:332-8.
- [14] Teeboonma U, Jongjam S. Ginger drying using infrared-vacuum technique. *Burapha Science Journal* 2010;15:76-86. (In Thai)
- [15] Babalis SJ, Papanicolaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering* 2006;75:205-14.
- [16] Demir V, Gunhan T, Yagcioglu AK. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering* 2007;98:47-53.
- [17] Taikhao A, Teekhasap S. Natural Convection and Forced Convection Solar Dryers. *EAU Heritage Journal Science and Techonology* 2013;7(1):23-31. (In Thai)
- [18] Janjai S, Chaichoet C, Intawee P. Performace of PV-ventilated greenhouse dryer for drying bananas. *Asian Journal of Energy and Environment* 2005; 6(2):133-9.
- [19] Pornchalermpong P, Rattanapanon N, Intawee P. Water activity [Internet]. 2021 [cited 2021 Jun 20] Available from <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0551/water-activit>. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.กมลวรรณ จิตจักร อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 092-332-5566 Email: kamonwan_ji@rmutto.ac.th



จ.ต. แสนเชิง พรหมชิตร์ วศ.ม.(เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก ตำแหน่งงานปัจจุบัน เจ้าหน้าที่สโมสรฝูงบิน 603 กองบิน 6
กองทัพอากาศไทย ถนนพหลโยธิน แขวงสนามบิน เขตดอนเมือง
กรุงเทพมหานคร 10220 E-mail: iamthunder@icloud.com

Article History:

Received: December 17, 2021

Revised: April 29, 2022

Accepted: April 30, 2022