

การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาโดยใช้วิธีตากูชิ

สุรัชชัย นามพรมมา¹, ราชนัน อุดมคำ¹, ศุภกิจ เคิกศิริ² และ อามินท์ หล้าวงศ์^{2,*}

¹ สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: amin.la@ksu.ac.th โทรศัพท์: 081-7995035

(รับบทความ: 6 เมษายน 2566; แก้ไขบทความ: 20 เมษายน 2566; ตอรับบทความ: 29 เมษายน 2566)

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่มีความนิยมในการนำมาใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ปัญหาคือการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพเพียงพอและเหมาะสมกับช่วงเวลาที่ใช้ในการอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ทำการศึกษาปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกรณีศึกษาการอบแห้งปลาแดดเดียว โดยมีขั้นตอนการทดลองคือ การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการอบแห้ง การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีของตากูชิ การทดลอง และการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเราได้ทำการทดลองโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรดเป็นหลักที่อุณหภูมิของเครื่องอบ 3 ระดับ ได้แก่ 38, 44 และ 50 °C และความเร็วอากาศในเครื่องอบ 3 ระดับ ได้แก่ 20, 25 และ 30 cfm ผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งปลาที่มีประสิทธิภาพในการอบแห้งที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิของเครื่องอบอยู่ที่ 44 °C และความเร็วของอากาศในเครื่องอบอยู่ที่ 20 cfm ซึ่งทำให้ได้ค่าร้อยละของความชื้นที่หายไปและค่าคะแนนด้านคุณภาพโดยรวม อยู่ที่ 61.96% และ 85.0% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวนของของร้อยละความชื้นที่หายไปและค่าคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมแล้วพบว่าผลการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองระดับความเชื่อมั่นที่ 99.15% และ 99.39% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้งปลา วิธีตากูชิ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า

การอ้างอิงบทความ: สุรัชชัย นามพรมมา และคณะ, "การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาโดยใช้วิธีตากูชิ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, หน้า 31-43, 2566.

Experiment to determine the optimal conditions for drying fish using the Taguchi method

Surachai Nampromma¹, Rachan Udomkham¹, Supakit Sergsiri² and Amin Lawong^{2,*}

¹ Department of Industrial Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan
KhonKaen Campus

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: amin.la@ksu.ac.th, Tel: 081-7995035

(Received: April 6, 2023; Revised April 20, 2023; Accepted: April 29, 2023)

Abstract

A solar-electric drying machine is a common tool for drying food. The problem is determining the optimal conditions for producing a high-quality dried product suitable for drying. As a result, the goal of this research is to investigate the factors and determine the best drying conditions. A case study of drying fish, with the experimental procedure determining the drying factors. Taguchi's method was used for experimental design. We conducted experiments with infrared lamp heat sources primarily at three dryer temperatures: 38, 44, and 50 °C, as well as three dryer air speed levels: 20 cfm, 25 cfm, and 30 cfm. Experimenting and determining the best drying conditions the results showed that the fish dryer's best drying efficiency was 44 °C and the air speed in the dryer was 20 cfm, resulting in a percentage of moisture loss and an overall quality score of 61.96% and 85.0%, respectively. Moreover, when the analysis of variance of the moisture loss percentage and the overall quality score value were taken into account, the results of the experimental factor analysis revealed a confidence level of 99.15 percent and 99.39 percent, respectively.

Keywords: Drying fish, Taguchi method, Solar-electric dryer

Please cite this article as: S. Nampromma, et al., "Experiment to Determine the Optimal Conditions for Drying Fish Using the Taguchi Method," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, KSU*, vol. 1, no. 2, pp. 31-43, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ปัจจุบันมีความนิยมของการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น กุ้งตาก ปลาแห้ง พริกแห้ง เป็นต้น ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์คือไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงในระหว่างการใช้งานไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ในการอบแห้งภายในพื้นที่ปิดจะช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง การรบกวนจากแมลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น และยังช่วยลดระยะเวลาในการตากแห้งได้อีกด้วย

เครื่องอบแห้งนี้ ประกอบด้วยส่วนรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์และส่วนเครื่องอบแห้ง ภายในเครื่องอบแห้งมีการระบายอากาศโดยใช้พัดลมระบายอากาศเพื่อให้มีการถ่ายเทอากาศในเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งควรออกแบบให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอาจต้องเคลื่อนย้ายตัวเครื่องให้อยู่ในบริเวณที่เหมาะสม

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์จะแผ่ไปยังผลิตภัณฑ์ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์สั่นและเกิดความร้อนขึ้นทำให้มีอุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ เป็นวิธีหนึ่งช่วยลดระยะเวลา และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และการให้ความร้อนโดยแสงอาทิตย์นั้น อุณหภูมิจะกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอจึงไม่มีปัญหาความชื้นผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งอยู่หลายงาน ทนศักดิ์ วัฒนา [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับตู้อบกระเทียมพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับก๊าซชีวมวลจากการวิจัยพบว่างานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้พลังงานความร้อนร่วมระหว่าง พลังงานแสงอาทิตย์ และ พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวมวล (Producer gas) พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาและเผยแพร่

เทคโนโลยีเครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากชีวมวลเพื่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเทคโนโลยี และสุฤดี นาถกรณกุล [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแก๊สชีวภาพ ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งได้ดี และมีข้อได้เปรียบคือประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าพลังงาน

พรพิชญและคณะ [4] ทำการศึกษาผลของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลและลมร้อนต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของขมิ้นชัน พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลและลมร้อนส่งผลต่อสีของขมิ้นอย่างมีนัยสำคัญในค่าสี L^* , a^* , b^* และ ΔE ($p < 0.05$) ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่ลดลง การอบแห้งขมิ้นชันด้วยรังสีอินฟราเรดไกล (80 °C) สามารถรักษาค่าสีให้คงเดิมมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งอาจเกิดจากการทำให้เกิดความร้อนที่รวดเร็วและสม่ำเสมอ

พัชรภรณ์และคณะ [5] ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งใบบัวบกโดยใช้รังสีอินฟราเรด พบว่าการอบแห้งใบบัวบกด้วยเครื่องต้นแบบดังกล่าวทำให้ได้ใบบัวบกที่มีคุณภาพเป็นไปตามต้องการ สำหรับค่า a_w ของใบบัวบกอบแห้งมีค่าต่ำกว่า 0.65 ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้จึงแทบจะไม่เกิดการเน่าเสียของอาหาร สามารถเก็บอาหารนี้ได้นานมากกว่า 2 ปี

สรวิทย์และคณะ [6] ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดและลมร้อนพบว่า เมื่อทดลองอบแห้งอาหารผลการทดลองในด้านของสี กลิ่น รสชาติ ไม่มีความแตกต่างจากวิธีดั้งเดิม และค่าปริมาณน้ำอิสระและค่าความชื้นมีความแตกต่างจากวิธีดั้งเดิมเพียงเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามค่ามาตรฐาน

บทความวิจัย (Research Article)

กมลวรรณ และคณะ [7] ทำการศึกษา จลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาช่อนทะเลด้วยโรงเรือน อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า การอบแห้งภายใน โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองระบบมี อัตราการอบแห้งเร็วกว่าแบบตากแดด โดยการ อบแห้งแบบเปิดพัดลมระบายอากาศมีอัตราการ อบแห้งเร็วสุดคือ 21 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาเทียบกับ จากค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับปลาที่วางจำหน่ายใน ท้องตลาดคือ 45 % d.b. และค่าสีใกล้เคียงกับ ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป

จุฑารัตน์และคณะ [8] ทำการศึกษาจลนศาสตร์ การอบแห้งปลาข้าวสาร ด้วยลมร้อนและรังสี อินฟราเรดพบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่อ อุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น

ฮาติมมีและคณะ [9] ทำการศึกษาประสิทธิภาพ การอบแห้งของปลาช่อนด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมไฟฟ้าพบว่า ตู้อบแห้งปลาช่อนโดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าปลาช่อนที่ได้จากการทดลองมี น้ำหนักเท่ากับ 567.6 กรัม ใช้เวลาทำการทดลอง 7 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับตู้อบแห้งปลาช่อนโดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์ และการตากแบบธรรมชาติ เท่ากับ 672.6 กรัม และ 808.8 กรัม ตามลำดับ และ อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.34 เปอร์เซ็นต์ 0.49 เปอร์เซ็นต์ และ 0.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่ง ประสิทธิภาพการอบแห้งของปลาช่อนโดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าสามารถลดระยะเวลาในการทำ ให้แห้งของปลาช่อน

สยามพลและคณะ [10] ทำการอบแห้งปลาด้วย เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่ใช้ของไหลนาโนในท่อ ความร้อน ซึ่งให้ผลที่ดีในด้านการประหยัดพลังงาน เพราะสามารถลดพลังงานจากคอมเพรสเซอร์ลงได้ แต่การใช้ปั๊มความร้อนเพื่อการอบแห้งนั้นมีค่าใช้จ่าย ในการลงทุนขั้นต้นสูงกว่าการใช้หลอดไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซ เชื้อเพลิง หรือถ่านหิน แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ของปั๊มความร้อนจะต่ำกว่า ดังนั้นการอบแห้งโดยใช้ ปั๊มความร้อนจะให้ผลคุ้มค่าในระยะยาว

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเครื่องอบ แห้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้า กรณีศึกษาการ อบแห้งปลา ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้มีความได้เปรียบ กว่าการอบแห้งด้วยวิธีอื่นคือสามารถอบแห้งด้วย ระยะเวลาที่รวดเร็วกว่าวิธีอื่นและปลาที่อบแห้งได้มี คุณภาพดีไม่แตกต่างกับการอบแห้งด้วยวิธีดั้งเดิม อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการผลิตไม่สูงและมีระยะเวลาคืนทุน เร็ว โดยในงานวิจัยนี้ ทางคณะผู้วิจัยทำการหาปัจจัย ของเครื่องอบแห้งปลาและหาสภาวะที่เหมาะสมที่ สามารถใช้ในการอบแห้งปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และปริมาณการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อการจำหน่าย ในกลุ่มอุตสาหกรรมย่อย โดยเครื่องอบที่ใช้ทดลอง อบแห้งปลาเป็นเครื่องที่มีขนาดกลางไปถึงขนาดใหญ่ ปลาที่ใช้อบแห้งปลา ได้แก่ ปลาสร้อยขาว และปลา กระมัง เป็นต้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ คือ กระบวนการที่ทำให้ระบบมีอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นโดย ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ อากาศร้อนทำให้อุณหภูมิ อบแห้งระเหยน้ำออกมา ความชื้นในเครื่องอบแห้งถูก ระบายออกไปภายนอกด้วยพัดลมซึ่งใช้พลังงานงาน จากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิอบแห้งมีความชื้น ลดลง เมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบบบอบแห้ง จะส่งผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังผลิตภัณฑ์บางส่วน จะตกกระทบบพื้นของระบบอบแห้ง ทำภายในห้องมี อุณหภูมิสูงขึ้น และแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีคลื่นยาว ซึ่งส่วนมาก ไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตออกไปภายนอกได้ จึงเก็บกักอยู่ภายในระบบอบแห้ง อุณหภูมิของห้อง อบแห้งจึงสูงขึ้น และทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหย ออกมาและถูกพัดลมดูดอากาศด้านหลังของระบบ

บทความวิจัย (Research Article)

อบแห้งดูตออกไปภายนอก อากาศแวดล้อมจะไหลผ่านช่องระบายอากาศทางด้านหน้าเข้ามา ความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงค่อยๆ ลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานทั้งจากรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบโดยตรง และจากอากาศภายในห้องอบแห้ง ดังนั้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วกว่าการตากแดดโดยวิธีธรรมชาติ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ยังไม่ถูกรบกวนจากพวก นก หนู แมลงต่าง ๆ และการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกต่าง ๆ

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในผลิตภัณฑ์

ในการทดลองอบแห้งต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยได้ศึกษาและสร้างโมเดลของสมการสมดุลความชื้นของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าทั้งกล้วย พริก และกาแฟต่างมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เหมือนกันคืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแต่จะมีเฉพาะในพริกที่จะมีความเร็วของอากาศในเครื่องอบเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากความเร็วของอากาศมีความสัมพันธ์กับความชื้นในเครื่องอบ เพราะเมื่ออากาศถูกระบายออกจากเครื่องอบได้เร็วความชื้นในเครื่องอบก็จะลดลงเร็วตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองโดยกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์อยู่ 2 ปัจจัยคืออุณหภูมิภายในเครื่องอบ และความเร็วอากาศในเครื่องอบ

ตารางที่ 1 ตัวอย่างโมเดลปริมาณความชื้นในกล้วย, พริก และกาแฟ

ผลิตภัณฑ์	โมเดลปริมาณความชื้นในกล้วย, พริก และกาแฟ	แหล่งที่มา
กล้วย	$Me = 74.6603 - 1.144253T + 37.07224rh + 0.001166T^2 + 51.55374rh^2$	Smitabhi ndu et al. [11,12]

พริก	$Me = -65.2206 - 0.06922T + 0.022734T^2 - 29.4079rh + 68.31193rh^2 - 63.4257V_a + 56.42796V_a^2$	Hossain [13]
กาแฟ	$Me = 1.1281[-\ln(1-rh)/(T+40.535)]^{0.5405}$	Berbert et al. [14]

2.3 การคำนวณหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้น โดยส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย โดยปกติจะใช้อัตราของความร้อนที่หายไปของผลิตภัณฑ์เป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการขจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ โดยมีสมการดังนี้

$$MW = [(W - D) / W] \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

MW คืออัตราของความร้อนที่หายไปของผลิตภัณฑ์

W คือ น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

D คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังจากอบแห้งแล้ว

โดยทั่วไปการอบแห้งวัสดุสามารถแบ่งออกเป็นช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าความชื้นวิกฤติที่ผิวของวัสดุมีน้ำอยู่มาก เมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุ ช่วงนี้อุณหภูมิผิวของวัสดุอบแห้งและอัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ เมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุ น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงจะระเหยไปกับอากาศ

บทความวิจัย (Research Article)

2.4 การออกแบบการทดลองโดยวิธีการทากุชิ

วิธีการทากุชิเป็นเทคนิคสำหรับการออกแบบและทำการทดลองตลอดจนเป็นกระบวนการเพื่อค้นหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่ได้จากปัจจัยในการนำมาทำการศึกษาดู (ตัวแปรนำเข้า) วิธีการทากุชิ คือ สิ่งที่ต้องการการออกแบบซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยได้ทำการเลือกสมรรถนะที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ได้กำหนด เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิธีการทากุชิก็คือ Orthogonal array (OA)

OA เป็นระบบเมตริกส์ของจำนวนข้อกำหนดในระดับแถว และคอลัมน์ วิธีการทากุชิคือการใช้อัตราส่วนแบบ Signal - to - noise (S/N) จะหาจำนวนของตัวแปรที่มีอยู่ S/N คือค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการวัดของผลกระทบของปัจจัย Noise ตามลักษณะของสมรรถนะของตัวแปร และจะทำการวัดค่าทั้งสองคือ S/N ของจำนวนตัวแปรในข้อมูลของผลตอบและเพื่อให้เข้าใจค่าเฉลี่ยผลตอบของเป้าหมายที่ต้องการที่สุด ทากุชิได้เสนอ 8 ขั้นตอนมาตรฐานดังนี้

1. จำแนกการดำเนินงานหลัก ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบข้างเคียงและโหมดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น
2. จำแนกปัจจัย Noise ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบ และลักษณะเฉพาะของคุณภาพ
3. จำแนกเป้าหมายของการดำเนินงานจนได้ค่าที่ดีที่สุด
4. จำแนกปัจจัยควบคุมและระดับต่างๆ
5. เลือกการทดลองเมตริกส์แบบ Orthogonal Array
6. ดำเนินการทดลองแบบเมตริกส์
7. วิเคราะห์ข้อมูลทำนายผลในระดับที่คาดหวังและสมรรถนะขบวนการที่ดีที่สุด
8. ดำเนินการทดลองเพื่อพิสูจน์หาความจริงและวางแผนการดำเนินงานในอนาคต [15-16]

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ

เมื่อผู้ออกแบบการทดลองทราบจำนวนของปัจจัยควบคุม (control factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (control factor level) ที่ได้ออกแบบไว้ก็จะนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิด Orthogonal Array การใช้ Orthogonal Array จะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีหลายปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำหนดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน Orthogonal Array อย่างเหมาะสม ตามรูปที่ 1 ดังขั้นตอนต่อไปนี้

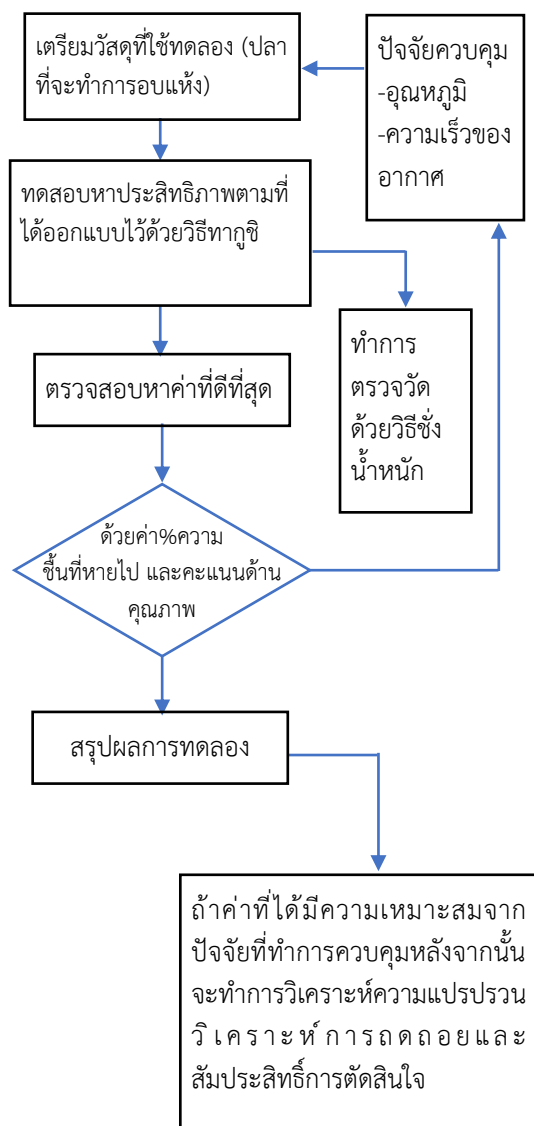
พิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบประกอบด้วย 2 ตัวแปร 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2 ส่วนตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาจะต้องกำหนดวิธีการควบคุมตัวแปรเพื่อให้ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยภายนอก เกิดขึ้นน้อยที่สุด เช่น เวลาที่ใช้ในการทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก เป็นต้น

ตารางที่ 2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง : ที่มาของปัจจัย [11-14]

ปัจจัยควบคุม	ระดับการทดลอง		
	1	2	3
อุณหภูมิเครื่องอบ (T)	38	44	50
ความเร็วของอากาศในเครื่องอบ (V)	20	25	30

หมายเหตุ: ระดับการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 3 ระดับ ทั้ง 2 ปัจจัยประกอบด้วยอุณหภูมิของเครื่องอบระดับที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 38, 44 และ 50 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่ใช้งานภายในเครื่องอบอยู่ในช่วง 38-50 องศาเซลเซียส) ความเร็วของอากาศในเครื่องอบระดับที่ 1, 2 และ 3 คือ 20, 25 และ 30 cfm (พัดลมสามารถปรับความเร็วรอบของใบพัดอยู่ในช่วง 0-30 cfm)

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากในการทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องอบผ่านการรับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ไม่คงที่ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาและสภาพอากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้การทดลองโดยให้

ตารางที่ 3 L9 (3²) Orthogonal array

ลำดับทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ปัจจัย	38	38	38	44	44	44	50	50	50
	20	25	30	20	25	30	20	25	30

ความร้อนผ่านหลอดอินฟราเรดและถูกควบคุมผ่านชุดควบคุมอุณหภูมิ PID

3.2 ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการอบแห้งโดยวิธีการทากูชิ

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งและวัสดุเป็นปลาที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีทั้งหมด 2 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ใช้ Orthogonal array (OAs) แบบ L-9 (3²) ทำการทดลองครั้งแรกและทำการทดลองซ้ำครั้งที่สองและยืนยันผลการทดลองในการหาประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเท่ากับ 18 รัน (run) และยืนยันผลการทดลองอีก 5 รัน (run) ประกอบด้วยจำนวนการทดลองที่ขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 การจัดวางลำดับแบบ Orthogonal L-9 (3²) Array ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

Taguchi orthogonal array

การจัดวางลำดับ Orthogonal ของทากูชิเป็นการออกแบบโดยกำหนดค่าปัจจัยนั้น เท่ากับ 2 ตัวแปรและ 3 ระดับเพื่อทำการทดลองที่ใช้กับพารามิเตอร์ในการกลึงจะทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Minitab release 18.00 มาช่วยในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 4 Taguchi Orthogonal array

ลำดับทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ปัจจัย	1	1	1	2	2	2	3	3	3
	1	2	3	1	2	3	1	2	3

3.3 ศึกษากระบวนการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบ

เมื่อทำการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบ และนำไปทดสอบหาร้อยละของความชื้นที่หายไปตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีการทากุชิทั้ง 9 การทดลอง และนำผลผลิตที่ได้มาทำการวัดเพื่อหาค่าน้ำหนักที่หายไปและคำนวณออกมาเป็นร้อยละของความชื้นที่หายไป

ในด้านการวัดคุณภาพด้านผลิตภัณฑ์ทางคณะผู้วิจัย ได้ทำแบบประเมินทางด้านคุณภาพให้กับผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่านในการประเมินโดยทำการประเมินด้วยระดับด้านคุณภาพ 5 ระดับในประเด็นด้านต่างๆ ได้แก่ด้านรสชาติ ด้านสีสัมผัสและกลิ่นโดยนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยรวมโดยแบบประเมินด้านคุณภาพสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แบบฟอร์มการประเมินคุณภาพโดยรวมของปลาอบแห้งรายบุคคล (ตัวอย่างการประเมิน)

ความพึงพอใจผู้ใช้งาน	ระดับ										คะแนนที่ได้
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ด้านคุณภาพของปลา											
กลิ่นของปลาที่อบแห้ง								✓			8
รสชาติของเนื้อปลาที่อบแห้ง									✓		9
สีของเนื้อปลาที่อบแห้งแล้ว							✓				7
ความพอใจโดยรวมของปลาที่อบแห้งแล้ว								✓			8
รวม											32
คิดเป็นร้อยละ											80

ในการทดลองแต่ละครั้งผู้วิจัยกำหนดระยะเวลาในการอบแห้งอยู่ที่ 6 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 10.00 น. จนถึงเวลา 16.00 น. นอกจากนี้ในการทดสอบการอบแห้งเราได้ใช้เครื่องอบแห้งขนาดกว้าง X ยาว x สูงเท่ากับ 2 ม. X 1 ม. X 0.3 ม. ดังรูปที่ 2 โดยเครื่องอบมีชุดควบคุมอุณหภูมิพร้อมทั้งติดตั้งหลอดอินฟราเรดขนาด 1000 W สำหรับให้ความร้อน

ในกรณีที่ไม่มีพลังงานจากแสงอาทิตย์หรือมีไม่เพียงพอ ดังรูปที่ 3 และ 4 และในการตรวจวัดค่าร้อยละของความชื้นที่หายไป เราทำการตรวจวัดโดยวิธีชั่งน้ำหนักก่อนและหลังจากการอบแห้งดังรูปที่ 5

สรุป นามพรมมาและคณะ, การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาโดยใช้วิธีทากุชิ

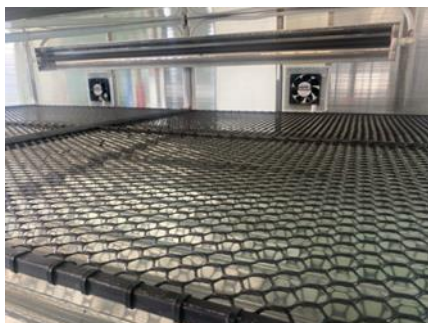
บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3 ชุดควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องอบ



รูปที่ 4 หลอดอินฟราเรดสำหรับให้ความร้อน



รูปที่ 5 เครื่องชั่งน้ำหนักปลาแห้ง

4. ผลการทดลอง

ในการทดลองการอบแห้งปลา ได้ทำการทดลองตามการทดลองเป็นแบบ orthogonal array L9 และทำการทดลอง 2 ชั่วโมง และมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดลองอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้ง

ลำดับทดลอง	ปัจจัย		ร้อยละของความชื้นที่หายไป (M)	คะแนนด้านคุณภาพโดยรวม (Q)
1	38	20	53.01	70.0
2	38	25	57.78	67.5
3	38	30	51.38	65.0
4	44	20	61.96	85.0*
5	44	25	64.01	82.5
6	44	30	60.63	80.0
7	50	20	65.31	82.5
8	50	25	67.90	80.0
9	50	30	62.74	77.5

4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยวิธีทาгуชิ

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งนี้ ผู้วิจัยได้นำเอาค่าร้อยละของความชื้นที่หายไปและคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมมาทำการวิเคราะห์ปัจจัยรบกวน (S/N ratio) โดยพิจารณาที่ “ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is better)” คือค่าที่ดีที่สุด ดังสมการที่ (2)

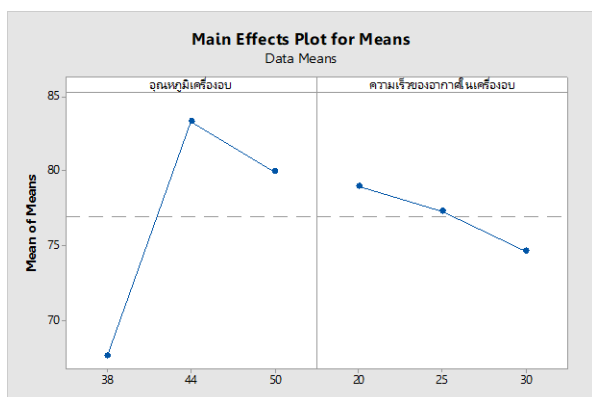
$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^{-2}}{n} \right] \quad (2)$$

บทความวิจัย (Research Article)

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาคูชิ สามารถสร้างกราฟเพื่อพิจารณาปัจจัยรอบวนที่ส่งผลต่อร้อยละของความชื้นที่หายไปและคะแนนด้านคุณภาพได้ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยหลักของร้อยละของความชื้นที่หายไป



รูปที่ 7 ผลกระทบของปัจจัยหลักของคะแนนด้านคุณภาพโดยรวม

จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อพิจารณาปัจจัยตอบสนองที่ส่งผลต่อร้อยละของความชื้นที่หายไปมากที่สุด เห็นได้ว่าระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดร้อยละของความชื้นที่หายไปมากที่สุดคือ ปัจจัยอุณหภูมิ (T) ที่ 50°C และความเร็วของอากาศในเครื่องอบ (V) ที่ 25 cfm ซึ่งจะให้ร้อยละของความชื้นที่หายไปสูงสุดที่ 67.90% และ

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อพิจารณาปัจจัยตอบสนองที่ส่งผลต่อคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมมากที่สุด เห็นได้ว่าปัจจัยนั้นได้แก่ ปัจจัยอุณหภูมิ (T) ที่ 44°C และความเร็วของอากาศในเครื่องอบ (V) ที่ 20 cfm มีค่าคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมอยู่ที่ 85.0%

เนื่องจากคณะผู้วิจัยได้พิจารณาปัจจัยตอบสนองทั้งสองปัจจัยแล้วทางผู้วิจัยให้ความสำคัญในด้านของคุณภาพโดยรวมมากกว่าร้อยละของความชื้นที่หายไป

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยที่มีผลต่อคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมสูงสุด 85.0% คือปัจจัยอุณหภูมิ (T) ที่ 44 °C และ ความเร็วของอากาศในเครื่องอบ (V) ที่ 20 cfm และทางผู้วิจัยได้ตรวจสอบร้อยละของความชื้นที่หายไปอยู่ที่ 61.96% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงเลือกให้ปัจจัยที่สภาวะดังกล่าวมีความเหมาะสมที่สุด

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย (Analysis of Variance: ANOVA)

เมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยในการทดลองด้วยเทคนิคทาคูชิสามารถทำการเปรียบเทียบผลของการอบแห้งปลาได้และสามารถนำเอาผลจากการวิเคราะห์มาใช้ในการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการอบแห้งและเพื่อเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยการทดลองที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้ง ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรในขั้นตอนถัดไป ผลการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองระดับความเชื่อมั่นที่ 99.15% และ 99.39% ดังตารางที่ 7 – 10 ตามลำดับ จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นที่หายไปและคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมได้จากสมการที่ 3 และสมการที่ 4 ด้วยสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 7 ANOVA: ร้อยละของความชื้นที่หายไป

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อุณหภูมิเครื่องอบ	2	194.000	97.000	194.00	0.000
ความเร็วของอากาศในเครื่องอบ	2	38.000	19.000	38.00	0.002
Error	4	2.000	0.5000		
Total	8	234.000			

หมายเหตุ: ทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติ

$$\alpha = 0.05 \text{ (P-value} < 0.05)$$

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ค่าก่าจัดความชื้นมาตรฐานเฉลี่ย

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0.707107	99.15%	98.29%	95.67%

สมการถดถอย (Regression Equation)

ค่าก่าจัดความชื้นมาตรฐานเฉลี่ย

$$= 23.8 + 0.938 \text{ อุณหภูมิเครื่องอบ} - 0.184 \text{ ความเร็วของอากาศในเครื่องอบ} \quad (3)$$

ตารางที่ 9 ANOVA: คะแนนด้านคุณภาพโดยรวม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อุณหภูมิเครื่องอบ	2	408.667	204.333	306.50	0.000
ความเร็วของอากาศในเครื่องอบ	2	28.667	14.333	21.50	0.007
Error	4	2.667	0.667		
Total	8	440.000			

หมายเหตุ: ทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติ

$$\alpha = 0.05 \text{ (P-value} < 0.05)$$

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) คะแนนด้านคุณภาพโดยรวม

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0.816497	99.39%	98.79%	96.93%

สมการถดถอย (Regression Equation)

คะแนนด้านคุณภาพโดยรวม

$$= 43.3 + 1.02 \text{ อุณหภูมิเครื่องอบ} - 0.500 \text{ ความเร็วของอากาศในเครื่องอบ} \quad (4)$$

ผลจากการใช้เลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมจากการใช้เทคนิคทากูชิ พบว่าค่าอุณหภูมิเครื่องอบ (T) และความเร็วของอากาศในเครื่องอบ (V) มีผลกระทบต่อร้อยละของความชื้นที่หายไปและคะแนนด้านคุณภาพโดยรวม

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการเลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้ง โดยใช้วิธีการของทากูชิ ผลจากการออกแบบการทดลองแบบ L9 ให้สามารถนำค่าการทดลองมาทำการพยากรณ์ผลการทดลองและหาตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งปลาได้ โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อคะแนนด้านคุณภาพโดยรวมสูงสุด 85.0% คือปัจจัยอุณหภูมิ (T) ที่ 44°C และความเร็วของอากาศในเครื่องอบ (V) ที่ 20 cfm โดยมีร้อยละของความชื้นที่หายไปอยู่ที่ 61.96% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงเลือกให้ปัจจัยที่สภาวะดังกล่าวมีความเหมาะสมที่สุด ดังนั้นในการนำไปใช้งานอบแห้งที่สภาวะจริงซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนซึ่งมีความไม่แน่นอนตามสภาพอากาศในวันที่ใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หลอดอินฟราเรดเข้ามาช่วยในการให้ความร้อนร่วมกันในวันที่มีแสงแดดไม่เพียงพอ และมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่คอยควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่สามารถอบแห้งได้ดีและสามารถอบเสร็จภายในหนึ่งวัน

บทความวิจัย (Research Article)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ทนงค์ดี วัฒนา, "การอบแห้งกระเทียมโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานจากก๊าซชีวมวล," วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2558.
- [2] พิสิษฐ์ มณีโชติ, "การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์," [ออนไลน์]. Available: <http://www.royalagro.doae.go.th/?p=1346>. [เข้าถึงเมื่อ: 29 มีนาคม 2565].
- [3] สุขฤดี นาถกรณกุล, "มาตรการอนุรักษ์พลังงาน," [ออนไลน์]. Available: <https://www.trueplookpanya.com/knowledge/content>. [เข้าถึงเมื่อ: 5 มกราคม 2565].
- [4] พรพิชญ ธรรมปัทม์, วีระยุทธ แสนมหาชัย, สุพรรณษา บ่อใหญ่ และ กมล พลคำ, "ผลของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลและลมร้อนต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของขมิ้นชัน," *วารสารเกษตรพระวรุณ*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 8-15, 2021.
- [5] พัทธภรณ์ อินริราย, สุรินทร์พร ชั่งไชย, สุพรรณิ คำอินทร์ และ ทิพา สุขโชติ, "การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดต้นแบบ," *วารสารเกษตรพระวรุณ*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, หน้า 47-257, 2019.
- [6] สราวุฒิ ดาแก้ว, ชูทวีป ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา, พรพิชญ ธรรมปัทม์, ศันธร พิชัย, ปาริชาติ ราชมณี และ ญาณิศา โพธิ์รัตน์โส, "การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดและลมร้อน," รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 2560.
- [7] กมลวรรณ จิตจักร และ แสนเชิง พรหมชิต, "การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาช่อนทะเลด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์," *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 75-97, 2565.
- [8] จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชกุล, "จลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาช่อนด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด," in *Proceedings of the 14th TSAE National Conference and the 6th TSAE International Conference*, pp. 531-537, 2556.
- [9] ฮาติมมี บากา, รอกียะอา อาแว, ชุลกิพลี กาซอ และ สุนิตย์ โรจนสุวรรณ, "การศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งของปลาช่อนด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มจร.*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 13-24, 2559.
- [10] สยมพล ศรีหนา, สุรัช บวรเศรษฐนันท์ และ วิศวัส ลีวนานนท์ชัย, "การอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่ใช้ของไหลนาโนในท่อความร้อน," ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชมงคลสุรินทร์วิชาการ ครั้งที่ 8"*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, pp. B402-B409, 2016.
- [11] R. Smitabhindu, S. Janjai and V. Chankong, "Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1523-1531, 2008.
- [12] R. Smitabhindu, "Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas," Ph.D. thesis, Kasetsart University, Thailand, 2008.

บทความวิจัย (Research Article)

- [13] M. A. Hossain, "Forced convection solar drying of chilli," Ph.D. thesis, Agricultural University, Bangladesh, 2003.
- [14] P. A. Berbert, D. M. Queiroz, J. S. Silva and J. B. F. Pinheiro, "Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic air flow reversal," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 60, no. 3, pp. 167-173, 1995.
- [15] สุรพงศ์ บางพาน, พีรพันธ์ บางพาน และ ธิติ กานต์ บุญแข็ง, "การประยุกต์วิธีการตากูชิสำหรับค่าที่ดีที่สุดโดยศึกษาของกระบวนการกะเทาะข้าวกล้องด้วยลูกยางกะเทาะเปลือก," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ม.ช.*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, หน้า 59-67, 2557.
- [16] สุรพงศ์ บางพาน, "การประยุกต์วิธีการตากูชิสำหรับกระบวนการกลึงที่ดีที่สุดโดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต," *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 104-112, 2557.
- [17] กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี, "คู่มือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์," [ออนไลน์]. Available:
<https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files.pdf>. [เข้าถึงเมื่อ: 26 มีนาคม 2564].
- [18] เสนา สอนประสม, "หลักการทำงานและส่วนประกอบของตู้อบปลาแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้ความร้อน," [ออนไลน์]. Available:
<http://sites.google.com/site/solarcelldryer>. [เข้าถึงเมื่อ: 9 มีนาคม 2565].
- [19] เสริม จันทร์ฉาย, "งานวิจัยด้านการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์," [ออนไลน์]. Available:
<http://www.solarlabsu.com/index.php/research/2>. [เข้าถึงเมื่อ: 3 กรกฎาคม 2565].
- [20] อัดสา ดอนทวี, "การอบแห้งและการประยุกต์ใช้งานเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์," [ออนไลน์]. Available:
<http://www.fao.org/docrep>. [เข้าถึงเมื่อ: 16 กันยายน 2565].